

การออกแบบคานเหล็กประกอบตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 โดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) เพื่อนำหนักที่เบาที่สุด

Weight Optimization of Steel Plate Girders: A Particle Swarm Optimization Framework with ANSI/AISC 360-16 Compliance.

กิตติคุณ จิตไพโรจน์^{1,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

*Corresponding author; E-mail address: kittikun.j@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอกรอบการออกแบบคานเหล็กประกอบตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 โดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) ที่มีการลงโทษแบบปรับตัว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดน้ำหนักโดยรวมของคานเหล็กประกอบ โดยพิจารณาข้อกำหนดด้านกำลังรับแรงดัด, แรงเฉือน, และสภาวะการใช้งาน ในการหาค่าเหมาะสมจะพิจารณาตัวแปรการออกแบบที่สำคัญ ได้แก่ ความลึกคาน, ความกว้างปีก, ความหนาเอน, ความหนาปีก และการจัดแผ่นเหล็กเสริมกำลังทางขวาง นอกจากนี้ยังพิจารณาความสามารถในการผลิตโดยการปรับขนาดให้เหมาะสมและใช้ความหนาแผ่นเหล็กมาตรฐาน ผลการทดสอบเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าวิธี PSO ที่พัฒนาขึ้นสามารถลดน้ำหนักคานเหล็กประกอบได้ 2.7% และ 9.0% เมื่อเทียบกับวิธีการออกแบบดั้งเดิมและอัลกอริทึมการหาค่าที่ดีที่สุดอื่นตามลำดับภายใต้ข้อจำกัดเดียวกัน

คำสำคัญ: คานเหล็กประกอบ, วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค, ANSI/AISC 360-16

Abstract

This paper presents a framework for designing steel plate girders according to ANSI/AISC 360-16 specifications using Particle Swarm Optimization (PSO) with adaptive penalty. The objective is to minimize the total weight of the girder system while satisfying flexural strength, shear strength, and serviceability requirements. The optimization considers key design variables including beam depth, flange width, web thickness, flange thickness, and transverse stiffener arrangements. Additionally, manufacturing feasibility is considered by optimizing dimensions and using standard steel plate thicknesses. Comparative testing results demonstrate that the developed PSO method can reduce the weight of steel plate girders by 2.7% and 9.0% compared to conventional design methods and other optimization algorithms, respectively, under the same constraints.

Keywords: steel plate girder, particle swarm optimization, ANSI/AISC 360-16

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

คานเหล็กประกอบ (Built-up Steel Beams) เป็นองค์ประกอบโครงสร้างที่สำคัญอย่างยิ่งในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกในอาคาร สะพาน และโครงสร้างอื่นๆ คานเหล่านี้ถูกสร้างขึ้นจากการเชื่อมหรือยึดแผ่นเหล็กหลายชิ้นเข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้รูปทรงและขนาดที่เหมาะสมกับการรับแรงตามความต้องการของโครงการ การออกแบบคานเหล็กประกอบอย่างมีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความมั่นคงแข็งแรงและความประหยัดของโครงสร้างโดยรวม

มาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 "Specification for Structural Steel Buildings" [1] เป็นมาตรฐานหลักที่วิศวกรโครงสร้างในหลายประเทศทั่วโลกใช้เป็นแนวทางในการออกแบบโครงสร้างเหล็ก รวมทั้งประเทศไทย มาตรฐานนี้ได้กำหนดข้อกำหนดและเกณฑ์ต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการออกแบบองค์ประกอบเหล็ก รวมถึงคานเหล็กประกอบ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าโครงสร้างที่ออกแบบมีความปลอดภัยและสามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์

อย่างไรก็ตาม การออกแบบคานเหล็กประกอบให้น้ำหนักน้อยที่สุดในขณะที่ยังคงเป็นไปตามข้อกำหนดที่ซับซ้อนของมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 นั้นเป็นกระบวนการที่ท้าทาย การออกแบบแบบดั้งเดิมมักอาศัยประสบการณ์ของวิศวกรและการลองผิดลองถูก ซึ่งอาจไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่เป็นค่าเหมาะสมที่สุดได้เสมอไป ดังนั้น การนำเทคนิคการหาค่าเหมาะสม (Optimization Techniques) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์การออกแบบที่สามารถลดน้ำหนักของโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) เป็นหนึ่งในเทคนิคการหาค่าเหมาะสมเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Computation) ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมในหลากหลายสาขา รวมถึงวิศวกรรมโครงสร้าง [2], [3] อัลกอริทึม PSO มีแนวคิดที่ได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมของฝูงนกหรือฝูงปลา โดยอาศัยการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอนุภาคในกลุ่ม เพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด [4] จุดเด่นของ PSO คือความเรียบง่ายในการใช้งาน ความสามารถในการค้นหาในพื้นที่คำตอบที่กว้างขวาง และความรวดเร็วในการลู่เข้าสู่คำตอบ [5] ซึ่งทำให้เป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพสูงสำหรับการแก้ปัญหาการออกแบบโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น การออกแบบคานเหล็กประกอบที่ต้องพิจารณาข้อกำหนดหลายด้านจากมาตรฐานการออกแบบ [6] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการใช้ PSO ในการออกแบบคานเหล็กประกอบ ยังขาดการพิจารณาข้อกำหนดตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 อย่างครบถ้วน และการปรับใช้ความหนาแผ่นเหล็กมาตรฐานอย่างมีประสิทธิภาพ (รายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อ 2.3)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์หลักของการวิจัยนี้คือ

1. เพื่อพัฒนาวิธีการออกแบบคานเหล็กประกอบที่มีน้ำหนักเบาที่สุดตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 โดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (PSO)
2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึม PSO ในการแก้ปัญหการออกแบบคานเหล็กประกอบภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบคานเหล็กประกอบหน้าตัดรูปตัวไอสมมาตรสองแกน (Double Symmetric I-Shaped Section) ที่รับน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง, มีจุดรองรับอย่างง่าย และไม่มีค้ำยันด้านข้าง ในการออกแบบพิจารณาข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องทั้งหมดจากมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 ได้แก่ บท F: การออกแบบของคานรับโมเมนต์ดัด และ บท G: การออกแบบของคานรับแรงเฉือน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากการวิจัยนี้คาดว่าจะก่อให้เกิดประโยชน์ดังต่อไปนี้:

1. เป็นแนวทางในการออกแบบคานเหล็กประกอบที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยสามารถลดน้ำหนักของโครงสร้างได้ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16
2. เป็นพื้นฐานในการพัฒนาและประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมอื่นๆ ในการออกแบบโครงสร้างเหล็กประเภทต่างๆ ต่อไป
3. นำไปสู่การพัฒนาเครื่องมือช่วยออกแบบโครงสร้างเหล็กที่มีประสิทธิภาพและนำไปใช้งานร่วมกันซอฟต์แวร์ออกแบบโครงสร้างอื่นๆ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การออกแบบคานเหล็กประกอบตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16

การออกแบบคานเหล็กประกอบตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 มีหลักการพื้นฐานที่สำคัญหลายประการ โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้มั่นใจว่าคานที่ออกแบบมีความแข็งแรง มั่นคง และสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยภายใต้ภาระบรรทุกที่คาดการณ์ไว้ ข้อกำหนดที่สำคัญในการออกแบบคานเหล็กประกอบตามมาตรฐานนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

2.1.1 การจำแนกประเภทหน้าตัด (Classification of Sections)

มาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 กำหนดให้หน้าตัดขององค์อาคารเหล็กถูกจำแนกออกเป็น 3 ประเภทตามอัตราส่วนความกว้างต่อความหนา (λ) ของชิ้นส่วนรับแรงอัด ในกรณีที่ $\lambda \leq \lambda_p$, $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$, และ $\lambda > \lambda_r$ หน้าตัดจะถูกจัดอยู่ในประเภทหน้าตัดแบบอัดแน่น (Compact), แบบไม่อัดแน่น (Noncompact), และแบบชะลูด (Slender) ตามลำดับ สำหรับแผ่นปีก (flange) ค่า λ_f , λ_{pf} และ λ_{rf} คำนวณได้จาก

$$\lambda_f = \frac{0.5b_f}{t_f}, \lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}, \lambda_{rf} = 0.95 \sqrt{\frac{k_c E}{F_L}} \quad (1)$$

สำหรับแผ่นเอว (web) λ_w , λ_{pw} และ λ_{rw} คำนวณได้จาก

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w}, \lambda_{pw} = 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}, \lambda_{rw} = 5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2)$$

โดยที่ d , b_f , t_w , t_f คือความลึกคาน, ความกว้างปีก, ความหนาเอว,

และความหนาปีก ตามลำดับ,

E คือ โมดูลัสของ탄ของเหล็ก

F_y คือ หน่วยแรงครากครากะบุต่ำสุดของเหล็ก

$$h = d - 2t_f \quad (3)$$

$$k_c = 4 / \sqrt{h/t_w}; 0.36 \leq k_c \leq 0.76 \quad (4)$$

$$F_L = 0.7F_y \quad (5)$$

2.1.2 กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)

มาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 ในบท F ได้กำหนดสมการและเกณฑ์สำหรับการคำนวณกำลังรับแรงดัดระยะ, M_n , สำหรับแต่ละสภาวะขีดจำกัด โดยกำลังรับแรงดัดที่ใช้ได้, M_c , จะได้จากการคูณกำลังรับแรงดัดด้วยค่าตัวคูณความต้านทาน, ϕ , ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.90 สำหรับการออกแบบด้วยวิธี LRFD หรือ หาค่าความปลอดภัย, Ω , ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.67 สำหรับการออกแบบด้วยวิธี ASD โดยกำลังรับแรงดัดระยะสามารถคำนวณได้จาก

$$M_n = \min(M_{nLTB}, M_{nCFLB}) \quad (6)$$

โดยที่ M_{nLTB} คือ กำลังรับแรงดัดระยะสำหรับสภาวะขีดจำกัดของการโก่งเดาะทางข้างและการบิด (Lateral-Torsional Buckling) และ M_{nCFLB} คือกำลังรับแรงดัดระยะสำหรับสภาวะขีดจำกัดของการโก่งเดาะเฉพาะที่ของปีกรับแรงอัด (Compression Flange Local Buckling) สำหรับสภาวะขีดจำกัดของการครากของปีกรับแรงอัด (Compression Flange Yielding) ถูกพิจารณาพร้อมกับสภาวะขีดจำกัดของการโก่งเดาะทางข้างและการบิดแล้ว ส่วนสภาวะขีดจำกัดของการครากของปีกรับแรงดึง (Tension Flange Yielding) นั้นไม่ต้องพิจารณาสำหรับหน้าตัดรูปตัวไอสมมาตรสองแกน

สำหรับหน้าตัดที่มีแผ่นเอวแบบอัดแน่น (Compact web) M_{nLTB} และ M_{nCFLB} สามารถคำนวณได้จาก

$$M_{nLTB} = \begin{cases} M_p = F_y Z_x & , L_b \leq L_p \\ C_b \left[M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p & , L_p < L_b \leq L_r \\ \frac{C_b \pi^2 E S_x}{(L_b/r_{ts})^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{J_c}{S_x h_0} \left(\frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2} \leq M_p & , L_b > L_r \end{cases} \quad (7)$$

$$M_{nCFLB} = \begin{cases} M_p & , \lambda_f \leq \lambda_{pf} \\ M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) & , \lambda_{pf} < \lambda_f \leq \lambda_{rf} \\ \frac{0.9E k_c}{\lambda_f^2} S_x & , \lambda_f > \lambda_{rf} \end{cases} \quad (8)$$

โดยที่ L_b คือ ความยาวปราศจากการค้ำยัน

$$L_p = 1.76 r_y \sqrt{E/F_y} \quad (9)$$

$$L_r = 1.95 r_{ts} \frac{E}{0.7F_y} \sqrt{\frac{J_c}{S_x h_0} + \sqrt{\left(\frac{J_c}{S_x h_0} \right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7F_y}{E} \right)^2}} \quad (10)$$

$$r_{ts} = \sqrt{I_y C_w / S_x} \quad (11)$$

$$h_0 = d - t_f \quad (12)$$

$$J = (2b_f t_f^3 + h_0 t_w^3) / 3 \quad (13)$$

$$c = 1$$

C_b คือ ตัวคูณปรับค่าการโก่งเดาะทางข้างและการบิด

S_x คือ โมเมนต์หน้าตัดอีลาสติกรอบแกนหลัก

Z_x คือ โมเมนต์หน้าตัดพลาสติกกรอบแกนหลัก

r_y คือ รัศมี ไจเรชันรอบแกนหลัก

สำหรับหน้าตัดที่มีแผ่นเอวแบบไม่อัดแน่น (Non-Compact web)

M_{nLTB} และ M_{nCFLB} สามารถคำนวณได้จาก

$$M_{nLTB} = \begin{cases} M_{ny} = R_{pc} F_y S_x & , L_b \leq L_p \\ C_b \left[M_{ny} - (M_{ny} - F_L S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_{ny} & , L_p < L_b \leq L_r \\ \frac{C_b \pi^2 E S_x}{(L_b/r_t)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{J}{S_x h_0} \left(\frac{L_b}{r_t} \right)^2} \leq M_{ny} & , L_b > L_r \end{cases} \quad (14)$$

$$M_{nCFLB} = \begin{cases} M_{ny} & , \lambda_f \leq \lambda_{pf} \\ M_{ny} - (M_{ny} - F_L S_x) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) & , \lambda_{pf} < \lambda_f \leq \lambda_{rf} \\ \frac{0.9 E k_c}{\lambda_f^2} S_x & , \lambda_f > \lambda_{rf} \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{โดยที่ } L_p = 1.1 r_t \sqrt{E/F_y} \quad (16)$$

$$L_r = 1.95 r_t \frac{E}{F_y} \sqrt{\frac{J}{S_x h_0} + \sqrt{\left(\frac{J}{S_x h_0} \right)^2 + 6.76 \left(\frac{F_L}{E} \right)^2}} \quad (17)$$

$$r_t = b_f / \sqrt{12(1 + a_w/6)} \quad (18)$$

$$a_w = h t_w / b_f t_f \quad (19)$$

$$R_{pc} = \begin{cases} 1.0 & , \frac{I_{yc}}{I_y} \leq 0.23 \\ \frac{M_p}{M_y} & , \frac{I_{yc}}{I_y} > 0.23 \text{ \& } \lambda_w \leq \lambda_{pw} \\ \left[\frac{M_p}{M_y} - \left(\frac{M_p}{M_y} - 1 \right) \left(\frac{\lambda_w - \lambda_{pw}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw}} \right) \right] \leq \frac{M_p}{M_y} & , \frac{I_{yc}}{I_y} > 0.23 \text{ \& } \lambda_w > \lambda_{pw} \end{cases} \quad (20)$$

$$M_p = F_y Z_x \leq 1.6 F_y S_x \quad (21)$$

$$I_{yc} = t_f b_f^3 / 12 \quad (22)$$

สำหรับหน้าตัดที่มีแผ่นเอวแบบชะลูด (Slender web) M_{nLTB} และ

M_{nCFLB} สามารถคำนวณได้จาก

$$M_{nLTB} = \begin{cases} M_{ny} = R_{pg} F_y S_x & , L_b \leq L_p \\ C_b M_{ny} \left[1 - 0.3 \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_{ny} & , L_p < L_b \leq L_r \\ \frac{C_b \pi^2 E}{(L_b/r_t)^2} R_{pg} S_x \leq M_{ny} & , L_b > L_r \end{cases} \quad (23)$$

$$M_{nCFLB} = \begin{cases} M_{ny} & , \lambda_f \leq \lambda_{pf} \\ M_{ny} - (M_{ny} - F_L S_x) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) & , \lambda_{pf} < \lambda_f \leq \lambda_{rf} \\ \frac{0.9 E k_c}{\lambda_f^2} R_{pg} S_x & , \lambda_f > \lambda_{rf} \end{cases} \quad (24)$$

$$\text{โดยที่ } L_p = 1.1 r_t \sqrt{E/F_y} \quad (25)$$

$$L_r = \pi r_t \sqrt{E/(0.7 F_y)} \quad (26)$$

$$R_{pg} = 1 - \frac{a_w}{1200 + 300 a_w} \left(\lambda_w - 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right) \quad (27)$$

$$a_w = h t_w / b_f t_f \leq 10 \quad (28)$$

2.1.3 กำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength)

มาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 ในบท G ได้กำหนดสมการและเกณฑ์สำหรับการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนระบุ, V_n , สำหรับแต่ละสภาวะขีดจำกัด โดยกำลังรับแรงเฉือนที่ใช้ได้, V_c , จะได้จากการคูณกำลังรับแรงระบุด้วยค่าตัวคูณความต้านทาน, ϕ , ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.90 สำหรับการออกแบบด้วยวิธี LRFD หรือ หารด้วยค่าความปลอดภัย, Ω , ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.67 สำหรับการออกแบบด้วยวิธี ASD

สำหรับคานประกอบที่ไม่เสริมแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวาง (Unstiffened) หรือ End web panel ของคานที่มีการเสริมแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวาง (Stiffened) ที่ไม่พิจารณาแรงกระทำเชิงแรงดึง (Tension Field Action) กำลังรับแรงเฉือนระบุสามารถคำนวณได้จาก

$$V_n = 0.6 F_y A_w C_{v1} \quad (29)$$

$$\text{โดยที่ } C_{v1} = \begin{cases} 1.0 & , \frac{h}{t_w} \leq 1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \\ \frac{1.10 \sqrt{k_v E/F_y}}{h/t_w} & , \frac{h}{t_w} > 1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \end{cases} \quad (30)$$

$$k_v = \begin{cases} 5.34 & \text{Unstiffened} \\ 5 + \frac{5}{(a/h)^2} & \text{Stiffened \& } a/h \leq 3.0 \\ 5.34 & \text{Stiffened \& } a/h > 3.0 \end{cases} \quad (31)$$

$$A_w = d t_w \quad (32)$$

a คือ ระยะระหว่างผิวด้านในของแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวาง แต่ในการศึกษานี้ เพื่อความสะดวกในการคำนวณ จะใช้ระยะ center-to-center ของแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวางแทน

สำหรับ Interior web panel ของคานประกอบที่มีการเสริมแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวาง ซึ่งมีอัตราส่วน $a/h \leq 3.0$ และพิจารณาแรงกระทำเชิงแรงดึง กำลังรับแรงเฉือนระบุสามารถคำนวณได้จาก

$$V_n = \begin{cases} 0.6 F_y A_w & , \frac{h}{t_w} \leq 1.1 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \\ 0.6 F_y A_w \left[C_{v2} + \frac{1 - C_{v2}}{1.15 \sqrt{1 + (a/h)^2}} \right] & , \frac{h}{t_w} > 1.1 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \text{ \& } \frac{A_w}{A_f} \leq 2.5 \text{ \& } \frac{h}{b_f} \leq 6 \\ 0.6 F_y A_w \left[C_{v2} + \frac{1 - C_{v2}}{1.15 \sqrt{\frac{a}{h} + \left(\frac{a}{h} \right)^2}} \right] & , \frac{h}{t_w} > 1.1 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \text{ \& } \frac{A_w}{A_f} > 2.5 \parallel \frac{h}{b_f} > 6 \end{cases} \quad (33)$$

$$\text{โดยที่ } C_{v2} = \begin{cases} 1.0 & , \frac{h}{t_w} \leq 1.1 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \\ \frac{1.10 \sqrt{k_v E/F_y}}{h/t_w} & , 1.1 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 1.37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \\ \frac{1.51 k_v E}{(h/t_w)^2 F_y} & , \frac{h}{t_w} > 1.37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} \end{cases} \quad (34)$$

2.1.4 การออกแบบแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวาง

ในการออกแบบแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวางจำเป็นต้องหาค่าระยะ a ที่ทำให้คานมีกำลังรับแรงเฉือนเพียงพอต่อการรับแรง ($V_c \geq V_r$) แต่ค่าระยะ a ตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 นั้นไม่สามารถหาได้อย่างตรงไปตรงมา ในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้เทคนิค binary search ในการหาค่าระยะ a ในช่วง $a_{\min}$ ถึง $3.0h$ ที่ทำให้ $V_c = 1.01V_r$

เมื่อใช้ค่า a ดังกล่าว ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวางที่ต้องการ ($I_{st_require}$) เพื่อพัฒนากำลังต้านทานหลังการโก่งเดาะของแผ่นเอวคานสามารถคำนวณได้จาก

$$I_{st_require} = \frac{h^4}{40} \left(\frac{F_y}{E} \right)^{1.5} \quad (35)$$

สำหรับ double sided stiffener ค่า moment of inertia สามารถคำนวณได้จาก

$$I_{st} = \frac{t_{st} (2b_{st} + t_w)^3}{12} - \frac{t_{st} (t_w)^3}{12} \quad (36)$$

โดยที่ b_{st} และ t_{st} คือ ความกว้างและความหนาของแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวาง นอกจากนี้ กำหนดให้แผ่นเหล็กรับกำลังทางขวางมีความสูง h และมีอัตราส่วน $\frac{b_{st}}{t_{st}} \leq 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ โดยที่ b_{st} มีค่าได้ไม่มากกว่า $\frac{b_f - t_w}{2}$

2.1.5 สภาวะการใช้งาน

สภาวะการใช้งานที่พิจารณาในการศึกษาคือค่าการโก่งตัวสูงสุด แม้ว่ามาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 จะไม่ได้กำหนดค่าการโก่งตัวสูงสุดที่เป็นตัวเลขตายตัว แต่ได้ระบุว่าการโก่งตัวของโครงสร้างต้องไม่ก่อให้เกิดปัญหาในการใช้งานหรือความเสียหายต่อส่วนประกอบอื่นๆ ของอาคาร โดยทั่วไปแล้ว ค่าการโก่งตัวที่ยอมรับได้ (δ_{limit}) มักกำหนดเป็นสัดส่วนของความยาวช่วงคาน (L) เช่น $L/360$ หรือเป็นอย่างอื่นตามสภาวะการใช้งานที่ต้องการ

สำหรับคานที่มีจุดรองรับอย่างง่ายรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระจายคงที่ใช้งาน (w_s) และน้ำหนักบรรทุกทุกเป็นจุดใช้งาน (P_s) ค่าการโก่งตัวที่มากที่สุด (δ_{max}) สามารถคำนวณได้จาก

$$\delta_{max} = \frac{5}{384} \frac{w_s L^4}{EI} + \begin{cases} \frac{1}{48} \frac{P_s L^3}{EI}, & P_s \text{ at } \frac{L}{2} \\ \frac{23}{648} \frac{P_s L^3}{EI}, & P_s \text{ at } \frac{L}{3} \text{ \& } \frac{2L}{3} \end{cases} \quad (37)$$

เมื่อนำ δ_{limit} มาเทียบกับ δ_{max} จะสามารถคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยขั้นต่ำ (I_{min}) เพื่อไม่ให้ค่าการโก่งตัวสูงสุดมากกว่า δ_{max} ได้จาก

$$I_{min} = \frac{5}{384} \frac{w_s L^4}{E \delta_{max}} + \begin{cases} \frac{1}{48} \frac{P_s L^3}{E \delta_{max}}, & P_s \text{ at } \frac{L}{2} \\ \frac{23}{648} \frac{P_s L^3}{E \delta_{max}}, & P_s \text{ at } \frac{L}{3} \text{ \& } \frac{2L}{3} \end{cases} \quad (38)$$

2.1.6 สัดส่วนของหน้าตัด

มาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 ได้กำหนดสัดส่วนหน้าตัดขององค์อาคารหน้าตัดรูปตัวโอไว้ในหัวข้อ F13.2 ดังนี้

สำหรับคานที่ไม่มีการเสริมแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวาง

$$\frac{h}{t_w} \leq 260 \text{ \& } \frac{dt_w}{b_f t_f} \leq 10 \quad (39)$$

สำหรับคานที่มีการเสริมแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวาง

$$\frac{h}{t_w} = \begin{cases} 12.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}, & \frac{a}{h} \leq 1.5 \\ \frac{0.4E}{F_y}, & \frac{a}{h} > 1.5 \end{cases} \quad (40)$$

2.2 การหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization - PSO)

การหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization - PSO) เป็นวิธีการหาค่าเหมาะสมเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Computation) แนวคิดพื้นฐานของ PSO ได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมทางสังคมของสิ่งมีชีวิตที่มีชีวิตอยู่ร่วมกันเป็นฝูง เช่น ฝูงนกหรือฝูงปลา ในการค้นหาอาหารหรือหลีกเลี่ยงอันตราย โดยแต่ละตัวจะปรับเปลี่ยนตำแหน่งของตัวเองโดยอิงจากประสบการณ์ของตัวเองและความสำเร็จของสมาชิกคนอื่นๆ ในฝูง

ในบริบทของการหาค่าเหมาะสม PSO ใช้กลุ่มของอนุภาค (Particles) จำนวนหนึ่ง ซึ่งแต่ละอนุภาคเป็นตัวแทนของคำตอบที่เป็นไปได้ในพื้นที่ค้นหา (Search Space) กลุ่มของอนุภาคเหล่านี้เรียกว่า "ฝูง" (Swarm) แต่ละอนุภาคจะมีตำแหน่ง (Position) และความเร็ว (Velocity) เป็นของตัวเอง ตำแหน่งของอนุภาคจะบ่งบอกถึงค่าของตัวแปรที่กำลังถูกปรับปรุงเพื่อหาค่าเหมาะสม ในขณะที่ความเร็วจะกำหนดทิศทางและขนาดของการเคลื่อนที่ของอนุภาคในพื้นที่ค้นหา

การทำงานของอัลกอริทึม PSO จะเริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคแต่ละตัวในฝูงแบบสุ่ม จากนั้นในแต่ละรอบการทำซ้ำ (Iteration) หรือที่เรียกว่ายุค (Epoch) อนุภาคแต่ละตัวจะทำการปรับปรุงตำแหน่งและความเร็วของตัวเองโดยอิงจากสองปัจจัยหลัก

- ประสบการณ์ส่วนตัว (Personal Best - pbest): ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคแต่ละตัวเคยค้นพบมาตั้งแต่เริ่มต้นการทำงานของอัลกอริทึม ค่าความเหมาะสมของตำแหน่งนี้จะถูกประเมินโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)
- ประสบการณ์ส่วนรวม (Global Best - gbest): ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคใดๆ ในฝูงทั้งหมดเคยค้นพบมาจนถึงปัจจุบัน ค่าความเหมาะสมของตำแหน่งนี้ก็จะถูกประเมินโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เช่นกัน

การปรับปรุงความเร็วของอนุภาคในแต่ละรอบการทำซ้ำสามารถแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 r_1 (pbest_i - x_i(t)) + c_2 r_2 (gbest - x_i(t)) \quad (41)$$

โดยที่ $v_i(t+1)$ คือ ความเร็วของอนุภาค i ในรอบการทำซ้ำถัดไป

$v_i(t)$ คือ ความเร็วของอนุภาค i ในรอบการทำซ้ำปัจจุบัน

$x_i(t)$ คือ ตำแหน่งของอนุภาค i ในรอบการทำซ้ำปัจจุบัน

w คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อย (Inertia Weight) ซึ่งควบคุมผลกระทบของความเร็วในรอบก่อนหน้าต่อความเร็วในรอบปัจจุบัน

c_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ส่วนตัว (Cognitive Coefficient) ซึ่งควบคุมอิทธิพลของประสบการณ์ส่วนตัวของอนุภาค

c_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ส่วนรวม (Social Coefficient) ซึ่งควบคุมอิทธิพลของประสบการณ์ที่ดีที่สุดของฝูง

r_1 และ r_2 คือ ค่าสุ่มที่สร้างขึ้นในช่วง $[0, 1]$ ซึ่งเพิ่มความเป็นแบบสุ่มให้กับกระบวนการค้นหา

$pbest_i$ คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาค i เคยค้นพบ

$gbest$ คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคใดๆ ในฝูงเคยค้นพบ

เมื่ออนุภาคได้ปรับปรุงความเร็วแล้ว ตำแหน่งของอนุภาคจะถูกปรับปรุงตามสมการดังนี้

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (42)$$

กระบวนการปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งของอนุภาคจะถูกทำซ้ำตามจำนวนรอบการทำซ้ำที่กำหนดไว้ล่วงหน้า หรือจนกระทั่งพบเกณฑ์การหยุดใดๆที่กำหนดไว้ เช่น การลู่เข้าของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ หรือเมื่อไม่มีการปรับปรุงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีขึ้นเป็นระยะเวลาเกินกว่าที่กำหนด

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในงานวิศวกรรมโครงสร้างมานานหลายทศวรรษ โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อลดต้นทุน ลดน้ำหนักวัสดุ หรือเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างภายใต้ข้อจำกัดด้านความปลอดภัยและการใช้งาน ในช่วงแรก การศึกษา มักใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบ Gradient-based methods เช่น Linear Programming [7] หรือ Nonlinear Programming [8] อย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านี้มักประสบปัญหาในการจัดการกับข้อจำกัดที่ซับซ้อน ไม่เป็นเชิงเส้น และไม่ต่อเนื่อง เช่น การใช้ความหนาแผ่นเหล็กตามมาตรฐาน และการใช้หน้าตัดเหล็กมาตรฐาน [9] ซึ่งพบได้ทั่วไปในมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างสมัยใหม่ เช่น ข้อกำหนดในมาตรฐาน ANSI/AISC (American Institute of Steel Construction) หรือ Eurocode

อัลกอริทึมเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic algorithms) เป็นเทคนิคการค้นหาลักษณะสุ่ม (Stochastic search) ที่ได้แรงบันดาลใจจากธรรมชาติและกระบวนการอื่นๆ อัลกอริทึมเหล่านี้ เช่น Genetic Algorithms (GA), Simulated Annealing (SA), Ant Colony Optimization (ACO), Harmony Search (HS), และ Particle Swarm Optimization (PSO) ซึ่งมีข้อดีหลายประการที่ทำให้เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดทางวิศวกรรมโครงสร้าง เช่น ความสามารถในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดในภาพรวม (Global Optima, เหมาะสำหรับปัญหาที่มีตัวแปรไม่ต่อเนื่อง, สามารถจัดการกับข้อจำกัดที่ซับซ้อนตามข้อกำหนดการออกแบบต่างๆ รวมถึงมีความง่ายในการนำไปใช้งาน [10], [11])

การประยุกต์ใช้เมตาฮิวริสติกในการออกแบบโครงสร้างเหล็กได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้างเหล็กส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนวัสดุ งานวิจัยจำนวนมากมุ่งเน้นไปที่การหาค่าเหมาะสมที่สุดขององค์ประกอบเหล็กประเภทต่างๆ เช่น คาน (Beams), เสา (Columns), และโครงข้อแข็ง โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการลดน้ำหนักหรือต้นทุน และมีข้อจำกัดตามมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้อง เช่น ANSI/AISC หรือ Eurocode

สำหรับคานเหล็กประกอบ (Steel Plate Girders) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ซับซ้อน การหาขนาดหน้าตัดที่เหมาะสมที่สุด (ความลึก, ความกว้างปีก, ความหนาเอน, ความหนาปีก) และการจัดวางแผ่นเหล็กเสริมกำลัง (Stiffeners) เพื่อให้ได้น้ำหนักน้อยที่สุดภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน ถือเป็นปัญหาที่ท้าทาย มีงานวิจัยหลายชิ้นที่พยายามแก้ปัญหาโดยใช้อัลกอริทึมเมตาฮิวริสติกต่างๆ

Ali et al. [12] ได้พัฒนาเครื่องมือบน Excel โดยใช้อัลกอริทึมวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm - EA) เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดในการออกแบบหน้าตัดเสา-คานเหล็กแบบอัดแน่น (Compact Sections) ผล

การศึกษาแสดงให้เห็นถึงการลดต้นทุนได้อย่างมีนัยสำคัญ (สูงถึง 35.82%) และได้นำเสนอแนวโน้มเชิงพาราเมตริกที่สำคัญเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆ เช่น ความลึกเอน เกรดเหล็ก และอัตราส่วนความชะลูด

Jacob et al. [13] ได้พัฒนาวิธีการออกแบบคานที่มีแผ่นเหล็กเสริมความตามขวางตามมาตรฐาน IS 800 (2007) ให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดโดยใช้ อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA) ผลการวิจัยแสดงว่า GA สามารถลดน้ำหนักคานได้ประมาณ 30% เมื่อเทียบกับการออกแบบทั่วไป และยังให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับผลกระทบของตัวแปรการออกแบบ เช่น ความลึกเอน ต่อความหนาของปีกและเอน เพื่อป้องกันการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน

Banimahd และ Rahemi [6] ได้พัฒนาวิธีการออกแบบคานที่มีแผ่นเหล็กเสริมความแข็งแรงตามขวางตามมาตรฐาน ANSI/AISC360-16 ให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดโดยเทคนิค two-stage optimization โดยใน stage แรก จะใช้อัลกอริทึม Artificial Bee Colony (ABC) เพื่อออกแบบหน้าตัดที่เหมาะสมตามข้อจำกัดต่างๆ และใน stage ถัดมาจะทำการปรับความหนาของชิ้นส่วนต่างๆตามความหนาของแผ่นเหล็กมาตรฐาน

เมื่อพิจารณาเฉพาะการใช้ PSO กับกาออกแบบคานเหล็กประกอบ (Plate Girders) ตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 พบว่ายังมีงานวิจัยจำนวนไม่มากนักที่ครอบคลุมข้อกำหนดทั้งหมดอย่างละเอียด รวมถึงพิจารณาความหนาของแผ่นเหล็กมาตรฐานพร้อมทั้งการปรับขนาดหน้าตัดให้เป็นเลขจำนวนเต็มเลขลงตัว เช่น ความลึกคานหรือระยะห่างของแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวางต้องลงท้ายด้วย 0 หรือ 5 เพื่อความสะดวกในการผลิต

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาและประยุกต์ใช้อัลกอริทึม Particle Swarm Optimization (PSO) เพื่อหาขนาดหน้าตัดและการเสริมแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคานเหล็กประกอบแบบสองแกนสมมาตร โดยพิจารณาข้อกำหนดตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 อย่างครอบคลุม รวมทั้งพิจารณาปัจจัยทางด้านขนาดเพื่อความสะดวกในการผลิต ซึ่งจะประโยชน์ในการได้มาซึ่งเครื่องมือออกแบบที่มีประสิทธิภาพและให้ผลลัพธ์ที่ประหยัดสำหรับวิศวกร

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ตัวแปรการออกแบบ (Design Variables)

การออกแบบคานประกอบเหล็กที่เหมาะสมมีตัวแปรการออกแบบหลัก 4 ตัวที่กำหนดรูปร่างหน้าตัด:

- d : ความสูงของคาน (มิลลิเมตร)
- b_f : ความกว้างของปีก (มิลลิเมตร) โดยที่ $b_f < d$
- t_w : ความหนาของเว็บ (มิลลิเมตร) โดยที่ $t_w < b_f$
- t_f : ความหนาของปีก (มิลลิเมตร) โดยที่ $t_f < d/2$

ตัวแปรเหล่านี้จะถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดขนาดและรูปร่างของคานเหล็กประกอบ โดยแต่ละตัวแปรจะมีช่วงของค่าที่เป็นไปได้ (Design Space) ซึ่งอาจถูกกำหนดโดยข้อจำกัดทางด้านวิศวกรรม การผลิต หรือตามแนวทางปฏิบัติทั่วไป ช่วงของค่าเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการกำหนดขอบเขตการค้นหาลูกข่าย PSO

3.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

วัตถุประสงค์หลักของการวิจัยนี้คือการออกแบบคานเหล็กประกอบให้น้ำหนักเบาที่สุด ดังนั้น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ที่จะถูกนำมาใช้ในการหาค่าเหมาะสมคือ ปริมาตรรวมของคานเหล็กประกอบ (V_{total}) สำหรับคานที่มีความยาว L และมีจำนวนตำแหน่งทั้งหมดของแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวาง n_s น้ำหนักรวมสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_{total} = (ht_w + 2b_f t_f) L + (2b_{st} t_{st} h) n_{st} \quad (43)$$

โดยที่ n_{st} คือ จำนวนตำแหน่งทั้งหมดของแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวาง และ $2b_{st} t_{st} h$ คือ ปริมาตรแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวางแบบ double sided 1 ตำแหน่ง

3.3 ข้อจำกัด (Constraints)

เพื่อให้การออกแบบคานเหล็กประกอบเป็นไปตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 กระบวนการหาค่าเหมาะสมจะต้องอยู่ภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ ดังนี้

- ข้อจำกัดด้านความแข็งแรง (Strength Constraints):

ความสามารถรับโมเมนต์ดัด:

$$\frac{M_r}{M_c} \leq 1.0 \quad (44)$$

ความสามารถรับแรงเฉือน:

$$\frac{V_r}{V_c} \leq 1.0 \quad (45)$$

โดยที่ M_r คือ กำลังรับแรงดัดที่ต้องการ

V_r คือ กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ

- ข้อจำกัดด้านการใช้งาน (Serviceability Constraints):

$$\frac{I_{min}}{I_{x_section}} \leq 1.0 \quad (46)$$

โดยที่ $I_{x_section}$ คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหลักของหน้าตัด

$$= (b_f d^3 - (b_f - t_w)(d - 2t_f)^3) / 12 \quad (47)$$

- ข้อจำกัดด้านสัดส่วน (Proportion Constraints):

- สำหรับคานที่ไม่มีการเสริมแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวาง

$$\frac{h}{t_w} / 260 \leq 1.0 \quad \& \quad \frac{dt_w}{b_f t_f} / 10 \leq 1.0 \quad (48)$$

- สำหรับคานที่มีการเสริมแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวาง

$$\text{for } \frac{a}{h} \leq 1.5, \quad \frac{h}{t_w} / 12.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \leq 1.0 \quad (49)$$

$$\text{for } \frac{a}{h} > 1.5, \quad \frac{h}{t_w} / \frac{0.4E}{F_y} \leq 1.0$$

3.4 การละเมิดข้อจำกัด (Violation)

ในระหว่างการทำงานของอัลกอริทึม PSO แต่ละอนุภาคจะแทนชุดของตัวแปรในการออกแบบคานเหล็กประกอบ (หัวข้อ 3.1) จะต้องมีการตรวจสอบว่าชุดตัวแปรในการออกแบบนั้นๆ เป็นไปข้อจำกัดต่างๆ (หัวข้อ 3.3) หรือไม่ หากชุดตัวแปรในการออกแบบใดๆ ที่อนุภาคเป็นตัวแทนอยู่ ไม่เป็นไปตามข้อจำกัดเหล่านี้ จะถือว่าเกิดการละเมิดข้อจำกัด (Constraint Violation)

$$violation_c = \max(constrain_c - 1.0, 0.0) \quad (50)$$

3.5 การลงโทษแบบปรับตัว (Adaptive Penalty Function)

ข้อมูลการละเมิดข้อจำกัดถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงการค้นหาของ PSO โดยใช้แนวคิดของการลงโทษ (Penalty) โดยจะมีการกำหนดค่าปรับให้กับอนุภาคที่มีการละเมิดข้อจำกัด ค่าปรับนี้จะถูกนำไปรวมกับค่าของฟังก์ชัน

วัตถุประสงค์ (หัวข้อ 3.2) เพื่อให้ได้ค่าความเหมาะสมรวม (fitness) ที่จะใช้ในการประเมินความเหมาะสมของอนุภาคนั้นๆ

$$fitness = -(V_{total} + penalty) \quad (51)$$

เนื่องจาก PSO ดำเนินการหาค่าสูงสุด การใช้เครื่องหมายลบเป็นการแปลงปัญหาการหาค่าต่ำสุดของปริมาตรให้เป็นการหาค่าสูงสุด ส่วนการลงโทษจะลดความเหมาะสมของวิธีแก้ปัญหาละเมิดข้อจำกัด

การลงโทษแบบปรับตัวในงานวิจัยนี้มีแนวคิดสำคัญคือการปรับเปลี่ยนความรุนแรงของการลงโทษตามสถานการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการหาค่าเหมาะสม โดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ ได้แก่

1. ระดับความสำคัญของข้อจำกัด: สะท้อนถึงลำดับความสำคัญที่แตกต่างกัน ข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย โมเมนต์และแรงเฉือน) จะมีค่าน้ำหนัก (w_c) มากกว่า ขณะที่ข้อจำกัดด้านสัดส่วนมีค่าน้ำหนัก ต่ำกว่า วิธีนี้ช่วยให้อัลกอริทึมให้ความสำคัญกับการบรรลุข้อจำกัดด้านความปลอดภัยก่อนที่จะพยายามปรับปรุงประสิทธิภาพ ในการศึกษานี้ ค่าน้ำหนักสำหรับข้อจำกัดด้านความแข็งแรง, ด้านการใช้งาน, และด้านสัดส่วน มีค่า 5.0, 2.0, และ 1.0 ตามลำดับ
2. ความก้าวหน้าของการหาค่าเหมาะสม: เพิ่มการลงโทษตามความก้าวหน้าของการคำนวณ $K_I = 1.0 + \frac{current_iteration}{max_iteration}$
3. ขนาดของการละเมิด: การใช้กำลังสอง ($violation_c^2$) ในการคำนวณการลงโทษ ทำให้การละเมิดเล็กน้อยได้รับการลงโทษน้อย ขณะที่การละเมิดมากได้รับการลงโทษที่เพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้นนี้ช่วยสร้างเส้นทางลาดชันที่นำอนุภาคกลับสู่พื้นที่ที่เป็นไปได้ โดยยังคงอนุญาตให้สำรวจพื้นที่ใกล้เคียงขอบเขตข้อจำกัด

นอกจากนี้ เพื่อให้การลงโทษมีขนาดที่สามารถส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อ fitness จึงใช้ตัวคูณ $K_V = L \times 10^6$ เพื่อปรับขนาดของ penalty ให้ขนาดอยู่ในระดับเดียวกับ V_{total} ดังนั้นจึงสามารถคำนวณ penalty ได้จาก

$$penalty = K_V \cdot \sum_{c=1}^{n_{constrain}} w_c \cdot violation_c^2 \cdot K_I \quad (52)$$

โดยที่ $n_{constrain}$ คือ จำนวนข้อจำกัดทั้งหมด

3.6 กระบวนการคำนวณความเหมาะสมของอนุภาค (Particle Fitness Evaluation Process)

รูปที่ 1 แสดงกระบวนการประเมินความเหมาะสมของอนุภาคในอัลกอริทึม PSO สำหรับการออกแบบคานประกอบเหล็ก กระบวนการเริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าตำแหน่งของอนุภาคแต่ละตัว $x_i(t) = [d, b_f, t_w, t_f]$ ซึ่งแทนค่าขนาดต่างๆ ของคานประกอบเหล็ก โดย t คือรอบการคำนวณปัจจุบัน ตัวแปรแต่ละตัวได้รับการสุ่มค่าเริ่มต้นภายในขอบเขตที่กำหนด เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่การค้นหาที่เป็นไปได้ทั้งหมด

เมื่อได้ตำแหน่งอนุภาคแล้ว ระบบจะคำนวณน้ำหนักของคานและเหล็กเสริมกำลังทางขวางเพื่อนำไปรวมกับน้ำหนักบรรทุกกระทำโดยพิจารณาจากขนาดหน้าตัดและความยาวของคาน จากนั้นจะทำการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงเฉือนของคานตามหัวข้อ 2.1 โดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ เช่น การโก่งเดาะด้านข้าง การโก่งเอียง และ การเคี้ยวของเอว พร้อมตรวจสอบความจำเป็นในการใช้เหล็กเสริมกำลัง หากจำเป็นต้องใช้เหล็กเสริมกำลังทางขวาง ระบบจะทำการออกแบบขนาดและระยะห่างที่เหมาะสมตามข้อกำหนดของมาตรฐาน

ขั้นตอนต่อมาเป็นการประเมินความเหมาะสมของคำตอบ โดยคำนวณค่าการฝ่าฝืนข้อกำหนด ($violation_c$) ตามหัวข้อ 3.3 และ 3.4, ซึ่งประกอบด้วยตรวจสอบอัตราส่วนการใช้งานด้านโมเมนต์ดัด แรงเฉือน การโก่งตัว และข้อกำหนดด้านสัดส่วนหน้าตัด จากนั้นคำนวณค่าการลงโทษ ($penalty$) และค่าความเหมาะสม ($fitness$) ตามหัวข้อ 3.5 จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่า $fitness$ ปัจจุบันกับค่าที่ดีที่สุดของอนุภาคแต่ละตัว ($pbest_fitness$) และค่าที่ดีที่สุดของทั้งฝูง ($gbest_fitness$) เพื่อปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้น

อย่างไรก็ตาม การใช้เพียง $gbest$ อาจส่งผลให้ได้คำตอบที่มีค่า $fitness$ ดีแต่อาจไม่เป็นไปตามข้อกำหนดทางวิศวกรรม เนื่องจากอาจมีการลู่เข้าหาคำตอบที่มีน้ำหนักน้อยแต่ฝ่าฝืนข้อกำหนดบางประการ ดังนั้นจึงมีการเพิ่มการตรวจสอบและบันทึกคำตอบที่เป็นไปได้ที่ดีที่สุด ($best_feasible$) ซึ่งเป็นคำตอบที่มีค่า $penalty$ เท่ากับศูนย์ หมายความว่าไม่มีการฝ่าฝืนข้อกำหนดใดๆ และมีน้ำหนักน้อยที่สุด การเพิ่ม $best_feasible$ นี้ช่วยรับประกันว่าคำตอบสุดท้ายจะเป็นการออกแบบที่ใช้งานได้จริงและเป็นไปตามมาตรฐานทางวิศวกรรมทั้งหมด แม้ว่าค่า $fitness$ อาจไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุดก็ตาม นอกจากนี้การมี $best_feasible$ ทำให้อัลกอริทึมสามารถจดจำคำตอบที่ดีที่สุดที่เป็นไปตามข้อกำหนดได้เสมอซึ่งช่วยป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเมื่ออัลกอริทึมติดอยู่ในบริเวณคำตอบที่ไม่เป็นไปได้อีก (infeasible region) เป็นเวลานาน

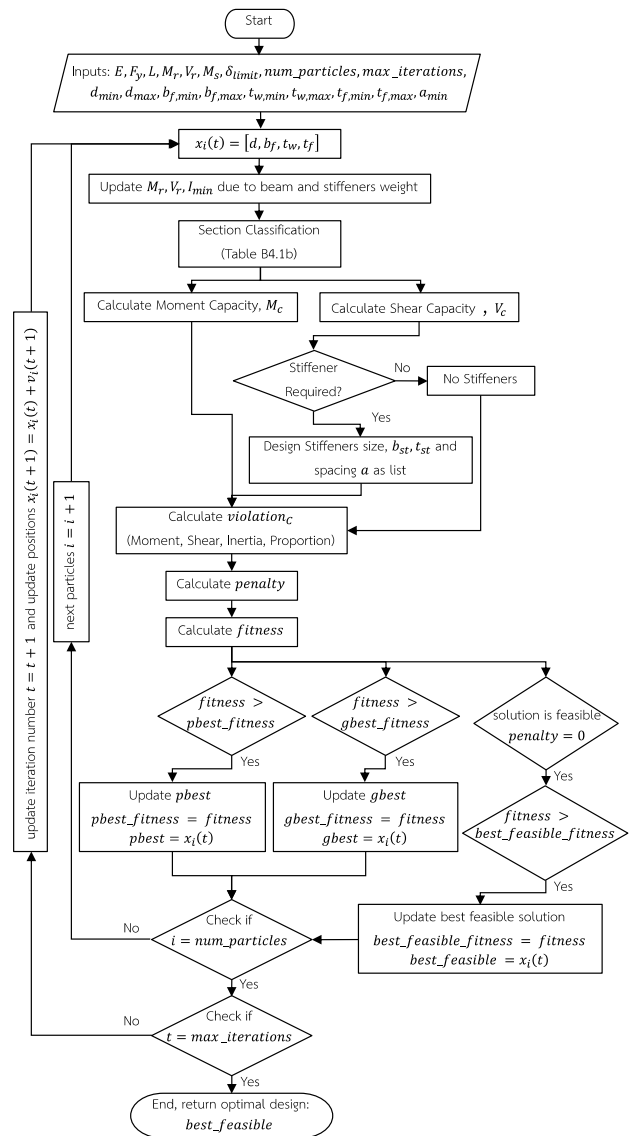
กระบวนการจะดำเนินไปจนครบทุกอนุภาคในแต่ละรอบการคำนวณ โดยอนุภาคจะปรับตำแหน่งตามกฎการเคลื่อนที่ของ PSO ซึ่งพิจารณาทั้งประสบการณ์ที่ดีที่สุดของตัวเอง ($pbest$) และประสบการณ์ที่ดีที่สุดของทั้งฝูง ($gbest$) การคำนวณจะซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าจะถึงจำนวนรอบที่กำหนด ($max_iteration$) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ คำตอบสุดท้ายคือ $best_feasible$ ซึ่งเป็นการออกแบบที่มีน้ำหนักน้อยที่สุดและเป็นไปตามข้อกำหนดทางวิศวกรรมทั้งหมด

3.7 การปรับขนาดให้เหมาะต่อการผลิต

ในการทำงานของอัลกอริทึม PSO ตำแหน่งของอนุภาค $x_i(t)$ ในตอนเริ่มต้นกระบวนการจะเป็นตัวเลขจากการสุ่มใน search space และตำแหน่งของอนุภาคที่ถูกปรับ $x_i(t+1)$ ในรอบถัดมา จะเป็นตัวเลขที่มีจุดทศนิยม (floating-point number) ซึ่งในทางทฤษฎี คำตอบที่ได้จะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด แต่ในทางปฏิบัติ คำนี้อาจไม่สามารถผลิตขึ้นจริงได้ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับตัวเลขขนาดของ $d, b_f, t_w, t_f, b_{st}, t_{st}$ และ a ให้เหมาะสมต่อการใช้งานจริง โดยการปรับตัวเลขนี้จะทำก่อนการหาลำดับรับแรงของหน้าตัด

3.7.1 การปรับขนาดให้เพิ่มลดเป็นขั้น

การปรับขนาดให้เพิ่มลดเป็นขั้นสามารถทำได้โดยการกำหนดขั้นการเพิ่มลดขนาดที่ต้องการ ($step$) ตัวเลขที่ปรับแล้วสามารถคำนวณได้จาก



รูปที่ 1 อัลกอริทึม PSO สำหรับการออกแบบคานประกอบเหล็ก

$$adjusted_value = round\left(\frac{value}{step}\right) \times step \quad (53)$$

โดยที่ $round()$ คือ ฟังก์ชันการปัดเลขทศนิยมให้เป็นจำนวนเต็ม แต่สำหรับตำแหน่งการเสริมแผ่นเหล็กรับกำลังทางขวาง (a) จะใช้ฟังก์ชัน $floor()$ ซึ่งคือฟังก์ชันการปัดเลขทศนิยมทิ้งแทนฟังก์ชัน $round()$ เนื่องจากการใช้ค่า a ที่น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จะทำให้มั่นใจได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนจะเพียงพอต่อการรับแรง

3.7.2 การใช้ความหนาเพลทมาตรฐาน

การใช้ความหนาเพลทมาตรฐานทำได้โดยการหาค่าที่ใกล้เคียงที่สุดจากรายการความหนาเพลทมาตรฐาน โดยในการศึกษานี้ใช้ความหนาเพลทมาตรฐานดังนี้

$$t_{standard} = [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100] \text{mm} \quad (54)$$

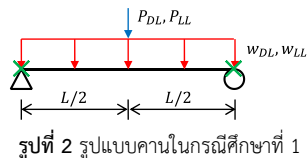
4. กรณีศึกษา

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึม PSO ที่พัฒนาขึ้นในการออกแบบคานประกอบเหล็กที่เหมาะสมที่สุด จะทำการเปรียบเทียบผลการจากอัลกอริทึม PSO ที่พัฒนาขึ้นกับการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม [14] ในกรณีศึกษาที่ 1 และเปรียบเทียบกับค่าที่ดีที่สุดของ Banimahd and Rahemi [6] ในกรณีศึกษาที่ 2 โดยในทั้งสองกรณีศึกษาจะใช้ *step* ในการปรับเพิ่มลดขนาด (หัวข้อ 3.7.1) ของ d และ b_f เท่ากับ 5 และใช้ความหนา t_w และ t_f ตามความหนาเพลทมาตรฐาน (หัวข้อ 3.7.2) นอกจากนี้จะใช้การตั้งค่าพารามิเตอร์ PSO ดังต่อไปนี้

- จำนวนอนุภาค ($num_particles$): 400
- จำนวนรอบสูงสุด ($max_iterations$): 200
- น้ำหนักความเฉื่อย (w): 0.7
- พารามิเตอร์ความรู้ส่วนตัว (c_1): 2.0
- พารามิเตอร์ความรู้ทางสังคม (c_2): 2.0

4.1 กรณีศึกษาที่ 1

ในกรณีศึกษาที่ 1 จะทำการเปรียบเทียบกับตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม [14] คือ กำหนดความลึกคานจากอัตราส่วนความยาวคานต่อความลึกคาน (span-to-depth ratio) ตัวอย่างได้ออกแบบคานยาว $L=18.3\text{ m}$ (60') บนจุดรองรับอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 2 รับน้ำหนักทุกแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ $W_{DL}=24.8\text{ kN/m}$ (1.70 k/ft) ไม่รวมน้ำหนักคานและแผ่นเหล็กเสริมกำลังทางขวาง และ $W_{LL}=18.24\text{ kN/m}$ (1.25 k/ft) และน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเป็นจุด $P_{DL}=347\text{ kN}$ (78 k) และ $P_{LL}=258\text{ kN}$ (58 k) คานมีการค้ำยันด้านข้างตลอดความยาวคาน ออกแบบด้วยวิธี ANSI/AISC360-16 LRFD ค่า E และ F_y มีค่าเท่ากับ 2×10^5 และ 245 MPa ตามลำดับ โดยในการออกแบบได้กำหนดให้ $C_b=1.24$



การออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม [14] ได้ใช้ span-to-depth ratio อยู่ในช่วง 10-12 ตามข้อแนะนำในการออกแบบทั่วไป จึงได้กำหนดให้คานมีความลึกเท่ากับ 1,651 มม. (65") ดังนั้นในการศึกษาชุดแรกจึงกำหนดให้ความลึกคานที่เป็นไปได้มากที่สุด (d_{max}) เท่ากับ 1,650 มม. จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อตั้งค่าให้อัลกอริทึม PSO สามารถเลือกที่จะใช้ stiffener ได้ (Stiffener: Allow) ผลจากอัลกอริทึม PSO ได้หน้าตัดคานที่เบาว่าการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมแต่ใช้จำนวน stiffener (n_{st}) มากกว่า อย่างไรก็ตามน้ำหนักโดยรวมน้อยกว่าการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม 2.7% หากตั้งค่าบังคับให้อัลกอริทึม PSO ไม่ใช้ stiffener อัลกอริทึม PSO ยังคงให้น้ำหนักโดยรวมน้อยกว่าการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม 1.2%

หากไม่มีข้อจำกัดความลึกของคาน ผู้ออกแบบอาจใช้ span-to-depth ratio น้อยกว่า 10 ได้ ดังนั้นในการศึกษาชุดที่สองจึงกำหนดให้ d_{max} เท่ากับ 3,000 มม. ผลการศึกษาพบว่าคำตอบที่ดีที่สุดจากอัลกอริทึม PSO ทั้งในกรณีที่ใช้และไม่ใช้ stiffener ให้น้ำหนักโดยรวมน้อยกว่าการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมประมาณ 10% ทั้งสองกรณี

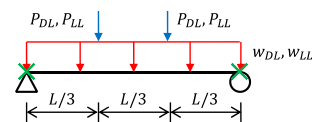
ตารางที่ 1 ผลการออกแบบคานประกอบเหล็กที่เหมาะสมที่สุดกรณีศึกษาที่ 1

Method		[14]	This study PSO			
Set up	d_{max} (mm)	1651	1650	1650	3000	3000
	Stiffener	Yes	Allow	No	Allow	No
Weight (kg)	Beam	6796	6442	6790	5849	6193
	Stiffener	80	249	-	336	-
	Total	6876	6690	6790	6185	6193
	Reduction, %	Base	-2.7	-1.2	-10.1	-9.9
Beam	d (mm)	1651	1640	1650	2015	2370
	b_f (mm)	457.2	610	560	500	280
	t_w (mm)	7.9	6	10	6	10
	t_f (mm)	38.1	29	28	29	36
	Web class*	S	S	NC	S	S
	Flange class*	C	C	C	C	C
Stiffener	h (mm)	1575	1582	-	1957	-
	b_{st} (mm)	101.6	110	-	135	-
	t_{st} (mm)	6.4	7	-	9	-
	n_{st}	5	13	-	9	-
Constrain	Moment	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00
	Shear	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Service, D+L	0.60	0.57	0.60	0.44	0.38
	Proportion	0.76	0.77	0.61	0.95	0.88

*C: Compact, NC: NonCompact, S: Slender

4.2 กรณีศึกษาที่ 2

ในกรณีศึกษาที่ 2 จะทำการเปรียบเทียบผลของการศึกษาของ Banimahd and Rahemi [6] ซึ่งได้ศึกษาคานยาว $L=18\text{ m}$ บนจุดรองรับอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 3 รับน้ำหนักทุกแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ $W_{DL}=1.5\text{ tf/m}$ ไม่รวมน้ำหนักคานและแผ่นเหล็กเสริมกำลังทางขวาง และ $W_{LL}=2.0\text{ tf/m}$ และน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเป็นจุด $P_{DL}=17.5\text{ tf}$ และ $P_{LL}=15.0\text{ tf}$ คานมีการค้ำยันด้านข้างเฉพาะที่จุดรองรับทั้งสอง ออกแบบด้วยวิธี ANSI/AISC360-16 LRFD ค่า E และ F_y มีค่าเท่ากับ 2×10^5 และ 240 MPa ตามลำดับ โดยในการออกแบบได้กำหนดให้ $d_{max}=3,000\text{ mm}$, $b_{f,max}=1,000\text{ mm}$, $t_{w,max}=10\text{ mm}$, $t_{f,max}=30\text{ mm}$ และ $C_b=1.0$



Banimahd and Rahemi [6] ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธี 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกจะทำการหาค่าโดยไม่มีการปรับขนาดใดๆ คำตอบที่ได้จึงเป็นเลขทศนิยมซึ่งไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริง จึงทำการปรับขนาดให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงในขั้นตอนที่สอง ผลที่ได้สุดท้ายแสดงในตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 1 การปรับขนาดให้

เหมาะสม (หัวข้อ 3.7) เกิดขึ้นในอัลกอริทึม PSO เอง ผลที่ได้เมื่อใช้และไม่ใช้ stiffener ทำให้น้ำหนักโดยรวมเมื่อเทียบกับวิธี 2 ขั้นตอน ลดลง 9% และ 4.7% ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการออกแบบคานประกอบเหล็กที่เหมาะสมที่สุดกรณีศึกษาที่ 2

Method		[6]	This study PSO	
Set up	Stiffener	Yes	Allow	No
Weight (kg)	Beam	6046	5806	6383
	Stiffener	651	286	0
	Total	6697	6092	6383
	Reduction, %	Base	-9.0	-4.7
Beam	d (mm)	2015	1990	2105
	b_f (mm)	620	700	680
	t_w (mm)	6	6	10
	t_f (mm)	25	21	18
	Web class*	S	S	S
	Flange class*	NC	NC	NC
Stiffener	h (mm)	1965.0	1948	2069.0
	b_{st} (mm)	no data	130	NA
	t_{st} (mm)	no data	9	NA
	n_{st}	20	8	NA
Constrain	Moment	1.00	1.00	1.00
	Shear	no data	0.97	0.95
	Service (DL+LL)	0.16	0.36	0.35
	Proportion	0.99	0.94	0.80

*C: Compact, NC: NonCompact, S: Slender

5. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอกรอบการออกแบบคานเหล็กประกอบตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 โดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) ที่มีการลงโทษแบบปรับตัว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดน้ำหนักโดยรวมของคานเหล็กประกอบ โดยพิจารณาข้อกำหนดด้านกำลังรับแรงดัด, แรงเฉือน, และสถานะการใช้งาน และพิจารณาความสามารถในการผลิตโดยการปรับขนาดให้เหมาะสมและใช้ความหนาเพลทเหล็กมาตรฐาน เมื่อเปรียบเทียบกับกับการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมซึ่งประเมินความลึกคานจาก span-to-depth ratio อัลกอริทึม PSO ที่นำเสนอสามารถลดน้ำหนักโดยรวมได้ 2.7% เมื่อใช้ span-to-depth ratio เดียวกัน แต่หากไม่พิจารณา span-to-depth ratio จะสามารถลดน้ำหนักรวมได้ 10% และเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Banimahd และ Rahemi [6] อัลกอริทึม PSO ที่นำเสนอสามารถลดน้ำหนักโดยรวมได้ 9% ภายใต้ข้อกำหนดในการออกแบบเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม กรอบการทำงานที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่ เฉพาะการออกแบบคานเหล็กประกอบหน้าตัดสมมาตรสองแกน สำหรับการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต ข้อเสนอแนะ ได้แก่ การขยายขอบเขตวิธีการนี้เพื่อประยุกต์ใช้กับคานที่มีหน้าตัดไม่สมมาตร, การพิจารณาสถานะการรับน้ำหนักที่ซับซ้อนหรือหลากหลายมากขึ้น, การเพิ่มวัตถุประสงค์ในการหาค่าเหมาะสม เช่น การพิจารณาต้นทุนรวมของวัสดุและการผลิต, การเปรียบเทียบและปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึม PSO ร่วมกับเทคนิค

เมตาฮิวริสติกส์อื่นๆ, หรือ การประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning) ร่วมกับ PSO เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของการค้นหา

เอกสารอ้างอิง

- [1] AISC. (2016), *Specification for structural steel buildings*, American Institute of Steel Construction, ANSI/AISC 360-16.
- [2] Mei, L., & Wang, Q. (Feb. 2021). Structural Optimization in Civil Engineering: A Literature Review, *Buildings*, vol. 11, no. 2, Art. no. 2, doi: 10.3390/buildings11020066.
- [3] Zavala, G. R., Nebro, A. J., Luna, F., & Coello Coello, C. A. (Apr. 2014). A survey of multi-objective metaheuristics applied to structural optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 49, no. 4, pp. 537–558, doi: 10.1007/s00158-013-0996-4.
- [4] Kennedy, J., & Eberhart, R. Particle swarm optimization, in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Nov. 1995, pp. 1942–1948 vol.4. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [5] Poli, R., Kennedy, J., & Blackwell, T. (Jun. 2007). Particle swarm optimization, *Swarm Intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 33–57, doi: 10.1007/s11721-007-0002-0.
- [6] Banimahd, S. A., & Rahemi, M. A. (Jun. 2023). A Two-Stage Procedure for Optimum Design of Plate Girders Using a Meta-heuristic Algorithm, *AUT Journal of Civil Engineering*, no. Online First, doi: 10.22060/ajce.2023.21782.5811.
- [7] Frind, E. O., & Wright, P. M. (Apr. 1975). Gradient Methods in Optimum Structural Design, *Journal of the Structural Division*, vol. 101, no. 4, pp. 939–956, doi: 10.1061/JSDEAG.0004042.
- [8] Lin, J. H., Che, W. Y., & Yu, Y. S. (Jan. 1982). Structural optimization on geometrical configuration and element sizing with statical and dynamical constraints, *Computers & Structures*, vol. 15, no. 5, pp. 507–515, doi: 10.1016/0045-7949(82)90002-5.
- [9] Krogh, C., Jungersen, M. H., Lund, E., & Lindgaard, E. (Nov. 2017). Gradient-based selection of cross sections: a novel approach for optimal frame structure design, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 56, no. 5, pp. 959–972, doi: 10.1007/s00158-017-1794-1.
- [10] Kayabekir, A. E., Bekdaş, G., & Nigdeli, S. M. Developments on Metaheuristic-Based Optimization in Structural Engineering, in *Advances in Structural Engineering—Optimization: Emerging Trends in Structural Optimization*, S. M. Nigdeli, G. Bekdaş, A. E. Kayabekir, and M. Yucel, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1–22. doi: 10.1007/978-3-030-61848-3_1.
- [11] Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., Kayabekir, A. E., & Yang, X.-S. Optimization in Civil Engineering and Metaheuristic Algorithms: A Review of State-of-the-Art Developments, in *Computational Intelligence, Optimization and Inverse*

- Problems with Applications in Engineering*, G. M. Platt, X.-S. Yang, and A. J. Silva Neto, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 111–137. doi: 10.1007/978-3-319-96433-1_6.
- [12] Ali, U., Azam, R., Shakeel, M., Adil, M., & Riaz, M. R. (2023). A practical tool for structural design optimization of steel frames: development and application for parametric analysis, *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 9, no. 1, p. 3, doi: 10.1007/s41062-023-01314-3.
- [13] Jacob, P. A., Shanthi, R. M., Justin, S., & C, D. (2022). Minimum Weight Design of Transversely Stiffened Plate Girder Using Genetic Algorithm, *Civil Engineering and Architecture*, vol. 10, no. 4, pp. 1243–1252, doi: 10.13189/cea.2022.100401.
- [14] Segui, W. T. (2017), *Steel Design*, 6th ed. Cengage Learning.