การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารที่อยู่อาศัยขนาดเล็ก ด้วยการก่อสร้างแบบถอดประกอบได้

The optimum design of modular construction for steel-framed houses

ปวริศ ทัพเสนาธนกิจ[1] ธัชพล คชสาร[2] พชร ทะริยะ[3] และ รศ. ดร. เสวกชัย อร่ามวงศ์[4]

[1,2,3,4] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แสดงถึงการออกแบบที่อยู่อาศัยโครงสร้างเหล็กขนาดเล็กด้วยการก่อสร้างแบบถอดประกอบได้ ระบบการก่อสร้างเป็นแบบ Modular Prefabrication เป็นการผลิตชิ้นส่วนจากโรงงานและนำมาประกอบติดตั้งที่หน้าไซต์งาน สิ่งที่จะพิจารณาคือขนาดของหน้าตัดและ รูปแบบของรอยต่อ การออกแบบจะใช้วิธีการออกแบบโดยวิธี Load Resistance Factor Design (LRFD) ตามมาตรฐานการออกแบบ American Institute of Steel Construction 2016 (AISC 2016) ส่วนการหาคำตอบที่ดีที่สุดในการออกแบบขนาดของชิ้นส่วนโครงสร้าง จะใช้อัลกอริทึม Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization (CLPSO) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากอัลกอลิทึม Particle Swarm Optimization (PSO) ซึ่งอัลกอริทึม CLPSO สามารถใช้สื่อสารระหว่างภาษาทางคอมพิวเตอร์ภายใน Microsoft Visual Basic Application และทำงานร่วมกันกับอีกซอฟท์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างอย่าง SAP2000 การทำงานร่วมกันนี้เรียกว่า Open Application Programming Interface (OAPI) โดยจุดประสงค์ของการนำอัลกอริทึมนี้มาใช้ในการออกแบบที่อยู่อาศัยคือ ต้องการเลือกหน้าตัดเหล็กที่มีอยู่ในท้องตลาดให้มีขนาดเล็กและเหมาะสม เพื่อให้โครงสร้างมีขนาดเบา โดยที่ยังสามารถรับแรงได้อย่างปลอดภัย

คำสำคัญ: การออกแบบที่อยู่อาศัยขนาดเล็กด้วยการก่อสร้างแบบถอดประกอบได้; วิธีการเรียนรู้กลุ่มอนุภาคอย่างครอบคลุม; การออกแบบที่เหมาะสมที่สุด; จุดต่อ

Abstract

This paper indicates the optimum design of modular construction for steel-framed houses. The chosen construction system for the houses is modular prefabrication, which process is manufacturing the parts from the factory and assembling them at the construction site. The cross-sectional dimensions and types of connection are matters needed to be considered. We choose Load Resistance Factor Design (LRFD) under the American Institute of Steel Construction (AISC) standard as our design method. In order to find the most optimal answer for member design, we use the algorithm called Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization (CLPSO), which is based on Particle Swarm Optimization (PSO). The CLPSO algorithm can be used to collaborate with SAP2000, the structural analysis and design software, under the administration of Microsoft Visual Basic Application. This multi-software collaboration is called Open Application Programming Interface (OAPI). The purpose of OAPI is to choose the most appropriate steel cross-sectional dimension for the house to be more lightweight while still being able to safely sustain multiple loads.

Keywords: the design of modular construction for steel-framed houses; Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization; The most optimum design; Connection

1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุที่นิยมนำมาก่อสร้างบ้านมากที่สุดคือคอนกรีต คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการรับแรงได้ดี แต่ในขณะเดียวกันก็จำเป็นต้องใช้เวลาในการก่อสร้างที่ยาวนาน ในการก่อสร้างบ้านที่ต้องการความรวดเร็วและมีต้นทุนที่ต่ำลง เหล็กจึงเป็นตัวเลือกวัสดุที่จะตอบสนองความต้องการได้

การออกแบบโครงสร้างในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง สำหรับค่าใช้จ่ายโดยส่วนมากของโครงการหนึ่ง ๆ จะเป็นค่าใช้จ่ายจากการผลิต การก่อสร้าง และวัสดุ โดยทั่วไปแล้วการออกแบบโครงสร้างอย่างประหยัดจะขึ้นอยู่กับการเลือกหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้าง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับราคาของวัสดุ

ในการที่จะหาขนาดหน้าตัดเหล็กที่มีขนาดเล็กและยังสามารถรับน้ำหนักได้จึงสามารถช่วยลดราคาของวัสดุ ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างโดยทั่วไปผู้ออกแบบจะทำการสุ่มเลือกหน้าตัดของแต่ละชิ้นส่วนก่อน จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์และตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของแต่ละชิ้นส่วน โดยจะใช้วิธีการปรับเปลี่ยนหน้าตัดของชิ้นส่วนด้วยวิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) ทำให้ผลการคำนวนนั้นเป็นหน้าตัดโครงสร้างที่อาจจะมีขนาดใหญ่เกินการใช้งานที่แท้จริง ซึ่งมีค่าใช้จ่ายวัสดุส่วนเกินที่ไม่จำเป็นต้องจ่าย ดังนั้นจึงมีการนำแนวคิดการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดด้วยอัลกอริทึมที่ถือเป็นการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) มาใช้ในการออกแบบโครงสร้างเพื่อลดปริมาณวัสดุและค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง

จากข้อมูลข้างต้น ประกอบกับแบบบ้านการเคหะแห่งชาติที่เป็นโครงสร้างบ้านคอนกรีต เราจึงได้ทำการศึกษาทดลองเปลี่ยนจากระบบบ้านคอนกรีตมาเป็นโครงสร้างบ้านเหล็ก ด้วยการก่อสร้างแบบถอดประกอบได้ เหตุผลเพราะว่าการติดตั้งสามารถติดตั้งได้รวดเร็ว โดยใช้เวลา 1-2 วัน ขนส่งได้สะดวก ความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา ทำการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบที่ดีที่สุด (Optimum design) เพื่อลดขนาดหน้าตัดของตัวเมมเบอร์เหล็ก และศึกษาเกี่ยวกับการต่อประกอบโครงสร้าง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อัลกอริทึม PSO และ CLPSO

วิธีการการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบอนุภาคกลุ่ม (Particle Swarm Optimization) หรือที่ย่อว่า พีเอสโอ (PSO) เป็นวิธีการหาคำตอบแบบสุ่ม (Random Search Algorithm) ประเภทหนึ่ง ถูกพัฒนาขึ้นโดย Kennedy และ Eberhart ซึ่งอ้างอิงจากพฤติกรรมทางสังคมของกลุ่มสัตว์ต่างๆ เช่น ฝูงนก, ฝูงปลาและอาณานิคมมด

วิธีการการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบอนุภาคกลุ่ม เริ่มต้นด้วยการสุ่มเวคเตอร์ความเร็ว (Velocity) และ ตำแหน่ง (Location) ของพาร์ทิเคิล (Particle) พาร์ทิเคิลจะมีประสบการณ์ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว เรียกว่า pbest และทั้งกลุ่มจะมีตำแหน่งที่ดีที่สุดของกลุ่ม เรียกว่า gbest โดย pbest นั้นได้จากการเปรียบเทียบคำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์ หากตำแหน่ง ณ ขณะนั้นให้คำตอบที่ที่ดีกว่าคำตอบที่ได้จากการวนซ้ำก่อนหน้า (น้อยที่สุดหรือมากที่สุด ขึ้นอยู่กับปัญหาในการหาค่าที่ดีที่สุด) จะอัพเดท pbest ด้วยตำแหน่งนั้นๆ สำหรับค่า gbest จะอัพเดทด้วยpbest ของพาร์ทิเคิลที่ให้คำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์ได้ดีที่สุด โดยในแต่ละการวนซ้ำ พาร์ทิเคิลจะมีการอัพเดทเวคเตอร์ความเร็วและตำแหน่งด้วยสมการดังนี้

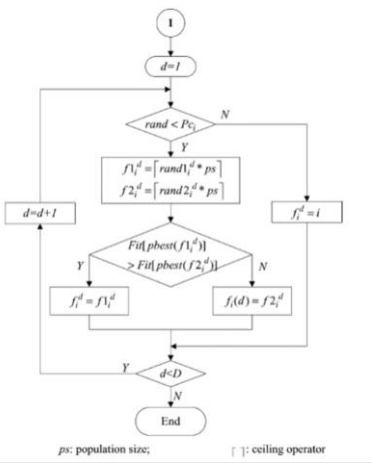
$$v^i_{k+1} = round[\, w v^i_k + c_1 r_1 \frac{p^i_k - x^i_k}{\Delta t} + c_2 r_2 \frac{p^g_k - x^i_k}{\Delta t} \,]$$
$$x^i_{k+1} = x^i_k + v^i_{k+1}\,\Delta t$$

โดย v^i_{k+1} คือ ความเร็วของพาร์ทิเคิล i ภายใต้การวนซ้ำครั้งที่ k+1 , v^i_k คือความเร็วของพาร์ทิเคิล i ภายใต้การวนซ้ำครั้งที่ k , p^i_k คือตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของพาร์ทิเคิล i ของการวนซ้ำครั้งที่ k, p^g_k คือตำแหน่งที่ดีที่สุดของกลุ่ม ของการวนซ้ำครั้งที่ k, x^i_k คือตำแหน่งของพาร์ทิเคิล i ภายใต้การวนซ้ำครั้งที่ k, x^i_{k+1} คือตำแหน่งของพาร์ทิเคิล i ภายใต้การวนซ้ำครั้งที่ k+1, Δt คือ Time step value โดยในการศึกษาครั้งนี้ให้มีค่าเป็น 1 และ r_1 , r_2 คือค่าคงที่การสุ่ม (Random numbers) มีค่าระหว่าง [0,1]

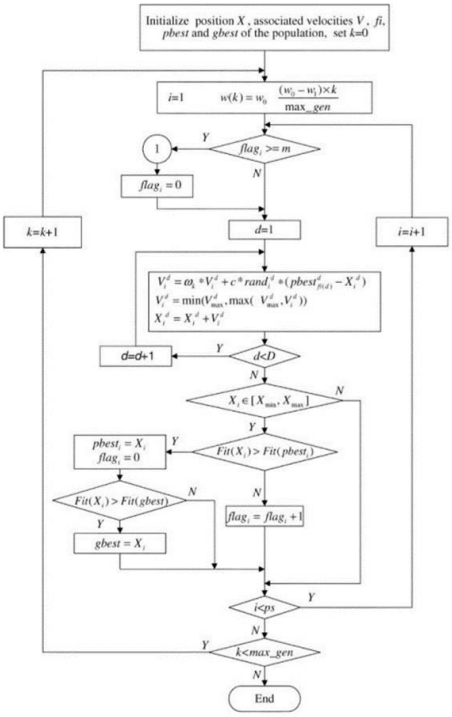
ถึงแม้ว่าวิธีการการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบอนุภาคกลุ่มหรือพีเอสโอ จะเป็นวิธีที่ประมวลผลคำตอบได้เร็ว ใช้ได้ง่าย และได้คำตอบที่ดี แต่วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบอนุภาคกลุ่มก็ยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของการลู่เข้าสู่คำตอบที่รวดเร็วเกินไป (Premature convergence) สำหรับการแก้ปัญหาหลายรูปแบบ (Multimodal Problems) รวมถึงถูกดึงดูดเข้าสู่ค่าค่าที่ดีที่สุดเฉพาะที่ (Local optimum) ได้ง่ายเนื่องจากทุกพาร์ทิเคิลจะเรียนรู้จากประสบการณ์ gbest เท่านั้น ที่แม้ว่าค่า gbest ล่าสุดจะมีค่าที่ไม่ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุดโดยรวม (Global optimum) แต่พาร์ทิเคิลก็จะถูกดึงดูดให้ทำการค้นหาบริเวณนั้นๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดการลู่เข้าสู่คำตอบที่เร็ว แต่คำตอบที่ได้ก็ไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุดโดยรวมแต่เป็นค่าที่ดีที่สุดเฉพาะที่

วิธีซีแอลพีเอสโอ จึงมีการพัฒนากระบวนการเรียนรู้ (Learning strategy) ขึ้นเพื่อกำจัดข้อด้อยของพีเอสโอ ในเรื่องการลู่เข้าสู่คำตอบที่รวดเร็วเกินไป โดยพาร์ทิเคิลจะสามารถเรียนรู้ผ่านประสบการณ์ pbest ของพาร์ทิเคิลอื่นๆได้ รวมถึงสามารถกระโดดไปยังบริเวณอื่นๆ เพื่อมิให้เกิดการดึงดูดเข้าสู่ค่าที่ดีที่สุดเฉพาะที่ โดยมีกระบวนการตาม Flow chart ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2

ซึ่งจากข้อแตกต่างระหว่าง PSO และ CLPSO ที่กล่าวมาข้างต้นนั้น PSO จะทำการค้นหาตั้งแต่ขอบเขตสูงสุดถึงขอบเขตต่ำสุดแต่ใน CLPSO จะทำการแบ่งช่วงการค้นหาระหว่างขอบเขตสูงสุดและขอบเขตต่ำสุดเป็นหลายกรณีซึ่งทำให้การดำเนินการหาคำตอบที่เป็นไปตาม objective function ภายใต้ constraint function นั้นมีความซับซ้อนลดลงส่งผลให้การดำเนินการนั้นมีความเร็วมากกว่า PSO แบบปกติ ดังนั้นผู้ศึกษาจึงเลือกใช้วิธีซีแอลพีเอสโอในการหาคำตอบเชิงโครงสร้างที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบบ้านโครงเหล็ก



รูปที่ 2.1 การคัดเลือกต้นแบบสำหรับอนุภาคที่ i



รูปที่ 2.2 แผนผังการทำงานของ CLPSO

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

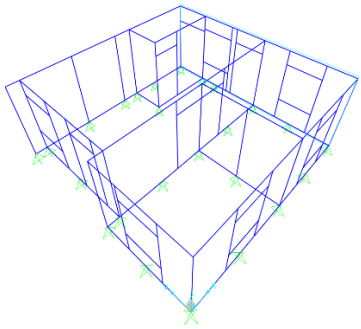
3.1 ปัญหาที่สนใจ

จากแบบบ้านการเคหะที่เป็นโครงสร้างบ้านคอนกรีต เราทำการลองเปลี่ยนจากระบบบ้านคอนกรีตมาเป็นโครงสร้างบ้านเหล็ก ด้วยการก่อสร้างแบบถอดประกอบได้ ระบบการก่อสร้างเป็นแบบ Modular Prefabrication เป็นการผลิตชิ้นส่วนจากโรงงานและนำมาประกอบติดตั้งที่หน้าไซต์ก่อสร้าง เหตุผลเพราะว่าการติดตั้งสามารถติดตั้งได้รวดเร็ว โดยใช้เวลา 1-2 วัน ขนส่งได้สะดวก ความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา ซึ่งสิ่งที่เรายังไม่รู้คือขนาดของหน้าตัดและรูปแบบของ connections

3.2 Model

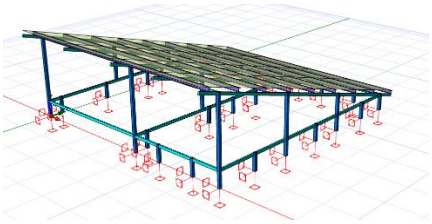
3.2.1 ลักษณะและรูปร่างของโครงสร้าง

จากแปลนบ้านการเคหะจะเป็นแบบบ้าน 2 หลังที่อยู่ติดกัน เราจะทำการพิจารณาบ้านหลังเดียวแล้วใช้ในบ้านอีกหลังด้วย หลังจากแปลงระบบบ้านแล้วเราจะได้เป็นโครงสร้างเหล็กดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แปลนบ้านโครงสร้างเหล็ก

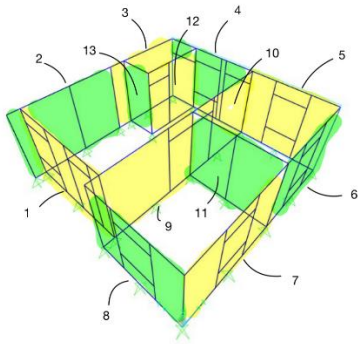
3.2.2 ลักษณะหลังคา



รูปที่ 3.2 แปลนหลังคา

3.2.3 การถอดประกอบ

จากระบบการก่อสร้างแบบ Modular Prefabrication เราได้ทำการแยกผนังของตัวโครงสร้างออกเป็นทั้งหมด 13 Panel เพื่อทำการขนย้ายแล้วไปทำการติดตั้งที่หน้าไซต์งาน



รูปที่ 3.3 การแบ่ง Panel

3.3 ข้อกำหนดต่าง ๆ ในการช่วยหาขนาดหน้าตัด

การหาขนาดของแต่ละ member เราจะใช้ Artificial Intelligence (AI) ซึ่งก็คือ CLPSO มาช่วยในเรื่องการหาขนาดร่วมกันกับโปรแกรม SAP2000 และ Microsoft Visual Basic ภายในโปรแกรม excel

3.3.1 คุณสมบัติของวัสดุ

เหล็กที่ใช้ในการก่อสร้างจะเลือกใช้เหล็ก Square Hollow Section (SHS) ตามมาตรฐาน TIS 1228 / JIS G3192) โดยมีคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุ

คำอธิบาย	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
Yield Strength	F_y	2450	ksc
Ultimate Strength	F_u	4000	ksc
Modulus of Elasticity	E	200000	ksc
Shear Modulus	G	77000	ksc
Density	ρ	7850	kg/m^3
Poisson's Ratio	ν	0.3	-

3.3.2 Load Condition

1.) Gravity Load

a. Dead Load

Wall	36.25	kg/m^2
Metal sheet	15	kg/m^2
Ceiling	25	kg/m^2

b. Live Load

Roof live load	50	kg/m^2

2.) Lateral Load

เนื่องจากในการวิจัยนี้ไม่คิดแรงลมเราจึงเพิ่ม Lateral Load เพื่อเพิ่มความสมบูรณ์ของโครงสร้างโดยเราจะให้ Lateral Load เป็น Live Load

Live Load (Lateral Load)	50	kg

กระทำตรงตำแหน่งที่มีแรงในแนวดิ่งกระทำอยู่ โดยจะทำทั้งหมด 4 กรณีคือ ทิศทาง +X, -X, +Y และ -Y

3.) Load Combination

การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างจะอ้างอิงมาตรฐานของ Load Combinations จาก ASCE 7-10

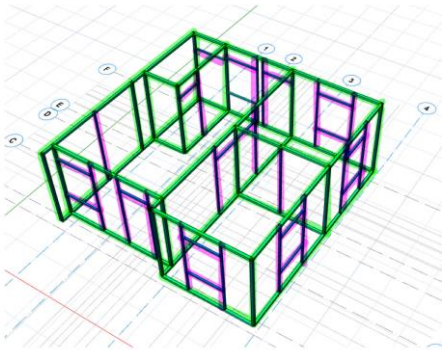
3.1) 1.4D

3.2) 1.2D+1.6L

3.3) D+L

3.3.3 Member Grouping

ทำการแบ่งกลุ่มของหน้าตัดในตัวโครงสร้างออกเป็น 2 กลุ่ม เนื่องมาจากการจัดทำในโรงงานได้ดังนี้



รูปที่ 3.4 การแบ่งกลุ่มเมมเบอร์

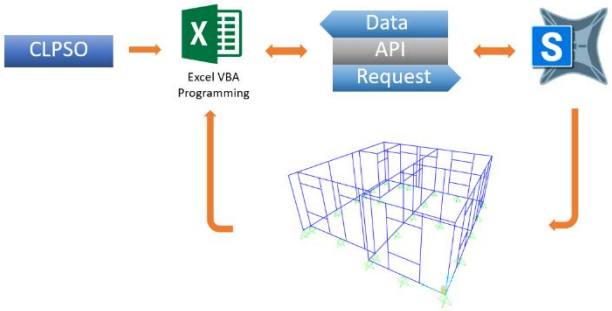
กลุ่มที่ 1 (สีเขียว) มีจำนวนเมมเบอร์ทั้งหมด 40 เมมเบอร์

กลุ่มที่ 1 (สีม่วง) มีจำนวนเมมเบอร์ทั้งหมด 35 เมมเบอร์

3.4 การประยุกต์ใช้วิธีซีแอลพีเอสโอในการช่วยหาขนาดหน้าตัด

3.4.1 กระบวนการวิเคราะห์การออกแบบ

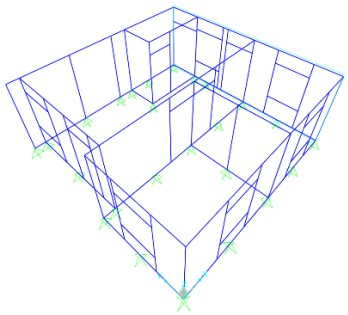
การดำเนินการออกแบบโครงสร้างจะถูกวิเคราะห์วนเป็นรอบอัตโนมัติโดยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ส่วนการวิเคราะห์ผลจะใช้วิธีการ CLPSO และกำหนดเงื่อนไขข้อจำกัดต่าง ๆ ด้วยการเขียนโค้ดในการสื่อสารกับแบบจำลองผ่านทาง Microsoft Visual Basic Application ภายในโปรแกรม Microsoft Excel แล้วจึงติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปของโครงสร้างในแต่ละกรณีที่หน้าตัดของแต่ละกลุ่มมีขนาดต่าง ๆ ผ่านการวิเคราะห์ผลใน SAP2000 โดยการสื่อสารระหว่าง Microsoft Visual Basic Application และ SAP2000 ได้มีตัวเชื่อมหรือตัวแปรสารที่เรียกว่า Open Application Programming Interface (OAPI) ซึ่งเป็นตัวช่วยดึงข้อมูลผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างใน SAP2000 ออกมา กระบวนการดังกล่าวเป็นไปดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กระบวนการการทำงานของวิเคราะห์โครงสร้าง

3.4.2 ขึ้นรูปโครงสร้างใน SAP2000

ก่อนจะเริ่มทำการวิเคราะห์โครงสร้างนั้น สิ่งที่ต้องทำเป็นอันดับแรกคือการขึ้นแบบโมเดลโครงสร้างใน SAP2000 ก่อนพร้อมทั้งตั้งค่าต่างๆให้ตรงกับมาตรฐานที่ใช้



รูปที่ 3.6 โครงสร้างใน SAP2000

แล้วจึงทำการใส่ Load ตาม Load condition ในหัวข้อ 3.3.2 โดยแรงจากหลังคาจะได้เป็นแรง Envelop ลงมากระทำเป็น Point Load แล้วใส่แรง Lateral Load เข้าไปตามตำแหน่งที่มี Gravity load กระทำ

3.4.3 Microsoft Visual Basic Application

ในการเขียน code วิธีการออกแบบโดยใช้วิธีซีแอลพีเอสโอนั้น จะทำการเขียนผ่านโปรแกรม Microsoft Visual Basic Application ซึ่งเป็นภาษาพื้นฐานที่มีอยู่ใน Microsoft Excel อยู่แล้ว แต่ก่อนจะทำการเขียน code ได้นั้น จำเป็นที่จะต้องเตรียมข้อมูลเกี่ยวกับวิธีซีแอลพีเอสโอให้พร้อมเพื่อที่จะนำไปใช้ในการเขียน code ต่อไป โดยข้อมูลที่สำคัญมีดังนี้

1.) ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective function)

ในการออกแบบโครงสร้าง มีจุดประสงค์คือ ต้องการให้โครงสร้างสามารถใช้งานได้ และมีน้ำหนักรวมต่ำที่สุด ซึ่งการที่โครงสร้างสามารถใช้งานได้นั้นจะถูกควบคุมโดยซอฟท์แวร์ SAP2000 อยู่แล้ว เพราะฉะนั้นในการออกแบบโดยใช้วิธีซีแอลพีเอสโอนี้ จะกำหนดให้ฟังก์ชันจุดประสงค์คือน้ำหนักรวมของเหล็กทั้งโครงสร้างที่น้อยที่สุด สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$Minimize\ W(x) = \sum_{i=1}^{ng} A_i \sum_{j=1}^{mk} \rho_j L_j$$

เมื่อ W(x) = น้ำหนักรวมของทั้งโครงเหล็ก

ng = จำนวนกลุ่มของเมมเบอร์ที่เราได้จัดไว้

mk = จำนวนเมมเบอร์ที่อยู่ในแต่ละกลุ่ม i

A_i = พื้นที่หน้าตัดของกลุ่ม i

ρ_j = ความหนาแน่นของเหล็กชิ้นที่ j

L_j = ความยาวเหล็กชิ้นที่ j

2.) การกำหนดตัวแปร

ในการขึ้นแบบโครงสร้าง เพื่อจะนำไปใช้ใน Optimization process จะทำการจัดกลุ่มเมมเบอร์ของโครงสร้าง ตามที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.3.3 เพื่อลดขนาดของประชากรลง รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณอีกด้วย โดยในการศึกษานี้ได้แบ่งกลุ่มของเหล็กออกเป็น 2 กลุ่ม ตัวแปรที่ได้จะเป็น x_1, x_2

3.) ขอบเขตสูงสุด ต่ำสุด ในการแก้ปัญหา

เนื่องจากหน้าตัดเหล็กที่มีตามท้องตลาดนั้นมีจำนวนมาก หากกำหนดให้ตัวแปรทั้ง 2 ตัวแปรทำการค้นหาคำตอบโดยใช้หน้าตัดเหล็กทั้งหมดที่มี จะทำให้เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบนั้นนานจนเกินไป จึงต้องมีวิธีการมาช่วยลดระยะเวลาในส่วนนี้ลง โดยการกำหนดให้ แต่ละตัวแปรนั้นมีพื้นที่ในการค้นหา (search space) ที่พื้นที่ภายในจะมีหน้าตัดเหล็กที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของเมมเบอร์ในกลุ่มนั้น และจะใช้ตัวเลข index ของหน้าตัดแต่ละชนิดมาใช้ในการกำหนดขอบเขตในขั้นตอนการเขียน code

ตารางที่ 3.2 พื้นที่ในการค้นหาคำตอบของเหล็กกลุ่ม 1 และ **2**

No.	Section	No.	Section
1	SHS 150x150x6.3	17	SHS 75x75x2.3
2	SHS 150x150x6.0	18	SHS 50x50x5.0
3	SHS 150x150x5.0	19	SHS 50x50x4.0
4	SHS 150x150x4.5	20	SHS 50x50x3.6
5	SHS 125x125x6.0	21	SHS 50x50x3.2
6	SHS 125x125x5.0	22	SHS 50x50x2.3
7	SHS 125x125x4.5	23	SHS 50x50x2.0
8	SHS 125x125x3.2	24	SHS 50x50x1.6
9	SHS 100x100x6.0	25	SHS 38x38x3.2
10	SHS 100x100x4.5	26	SHS 38x38x2.3
11	SHS 100x100x4.0	27	SHS 32x32x3.2
12	SHS 100x100x3.2	28	SHS 32x32x2.3
13	SHS 100x100x2.3	29	SHS 25x25x3.2
14	SHS 75x75x4.5	30	SHS 25x25x2.6
15	SHS 75x75x4.0	31	SHS 25x25x2.3
16	SHS 75x75x3.2	32	SHS 25x25x2.0

ตารางที่ 3.3 ขอบเขตสูงที่สุด ต่ำที่สุด ของแต่ละตัวแปร

Search Space		
Variable	lower bound	upper bound
x_1	1	32
x_2	1	32

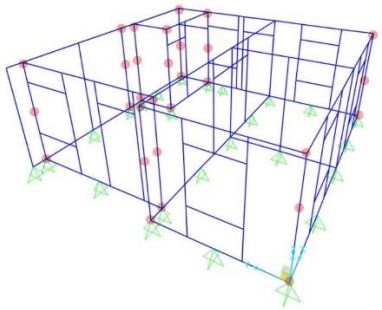
เมื่อกำหนดข้อมูลที่สำคัญแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือการเขียนโค้ดใน Microsoft visual basic application เพื่อใช้ในการสั่งการกระบวนการทำซ้ำด้วย วิธีซีแอลพีเอสโอ และใช้ในการติดต่อสั่งการระหว่าง Excel และซอฟท์แวร์ SAP2000 แต่ในการศึกษานี้จะไม่ลงรายละเอียดในส่วนของขั้นตอนการเขียนโค้ดนี้

3.5 การหารูปแบบ Connections

ก่อนการออกแบบ connections เริ่มจากการทราบแรงที่กระทำที่ตำแหน่ง connections นั้นๆ โดยสาสามารถหาแรงที่กระทำได้ด้วยโปรแกรม SAP2000 คือ แบ่ง panel ออกเป็น 13 แบบ ต่อมาใส่ support ที่อ้างอิงถึง connections ในตำแหน่งที่กำหนดไว้ ซึ่ง support ที่ใช้ในการอ้างอิงจะเป็น pined support จากนั้นใส่แรงที่กระทำในแต่ละ panel แล้วนำไปสู่ขั้นตอนวิเคราะห์เพื่อให้ได้แรงที่ connections ในแต่ละตำแหน่งต่อไป โดยวิธีใส่แรงจะกำหนด Load Combinations ตามบทที่ 3 จากนั้นใส่แรงต่างๆที่กระทำในแต่ละ panel

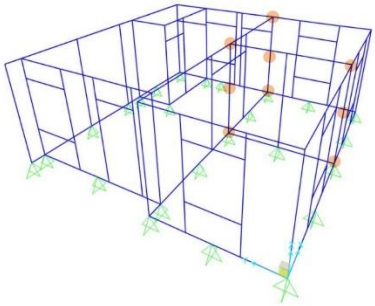
จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SAP2000 ได้แรงที่กระทำที่ตำแหน่ง connection โดยเราเลือกแรงที่กระทำมากที่สุดในแต่ละแนวแกน เพื่อใช้ในการออกแบบแต่ละ type ของ connection ในการออกแบบเราจะคำนึงถึงแรงที่กระทำทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ แรงเฉือน แรงดึง และแรงแบกทาน ซึ่งจากการวิเคราะห์ตำแหน่งที่เชื่อมต่อของแต่ละ panel และการรับแรงของแต่ละ connection พบว่า เราสามารถจำแนกรูปแบบของ connection ได้ทั้งหมด 3 รูปแบบ

Type 1 เป็น connection ที่เชื่อมต่อระหว่าง 2 panels ซึ่งมีตำแหน่งที่เชื่อมต่อดังนี้



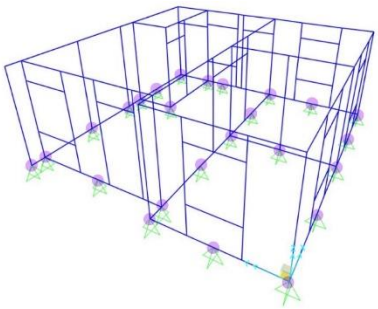
รูปที่ 3.7 ตำแหน่ง connection type 1

Type 2 เป็น connection ที่เชื่อมต่อระหว่าง 3 panels ซึ่งมีตำแหน่งที่เชื่อมต่อดังนี้



รูปที่ 3.8 ตำแหน่ง connection type 2

Type 3 เป็น connection ที่เชื่อมต่อระหว่าง panel และ ฐานราก คอนกรีตสำเร็จรูปซึ่งมีตำแหน่งที่เชื่อมต่อและแรงที่กระทำ ดังนี้



รูปที่ 3.9 ตำแหน่ง connection type 3

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ผลการออกแบบโครงสร้างและการอภิปรายผล

จากที่กล่าวไปในบทที่ 3 เราได้แบ่งกลุ่มของโครงสร้างออกเป็น 2 กลุ่ม น้ำหนักบรรทุกและคุณสมบัติวัสดุกล่าวไปในหัวข้อ 3.3 เราได้สร้างแบบจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรม SAP2000 แล้วทำการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ผลนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบโครงสร้างให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดโดยวัสดุที่เลือกใช้จะมีขนาดหน้าตัดที่เหมาะสมสำหรับการรับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับโครงสร้างและมีความแข็งแรงมากพอที่สามารถรับหน้าหนักบรรทุกบริการตามข้อกำหนดของ AISC-LRFD ได้ ซึ่งข้อจำกัดที่กำหนดไว้จะถูกวิเคราะห์ภายใน SAP2000 รวมถึงวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลอย่าง CLPSO ก็ได้นำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่อง ในเรื่องของหน้าตัดวัสดุที่นำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างดังกล่าว โดยเราได้ใส่ตัวแปรที่เป็นไปได้คือ เหล็กเหล็กชนิด Square Hollow Section (SHS) ทั้งหมด 32 รายการ

เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมในการใช้งานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ได้ผลลัพธ์แสดงดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์การออกแบบหน้าตัดของโครงสร้าง

Group	Section	Ratio
1	SHS	
2	SHS	

รูปที่ 4.1 การลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดของการวิเคราะห์โครงสร้าง

รูปที่ 4.2 อัตราส่วนความเค้นในชิ้นส่วนโครงสร้าง

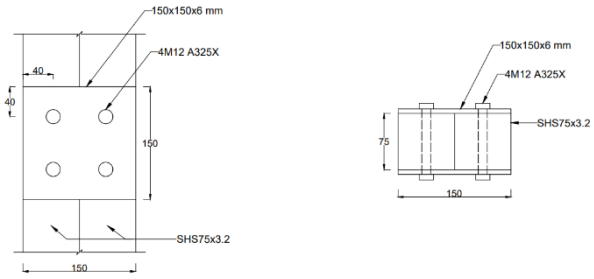
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์หน้าตัดโดย SAP2000

ด้วยการวิเคราะห์ผลโดยใช้วิธีการ CLPSO จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดให้โปรแกรมคำนวณเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยวนรอบการวิเคราะห์ทั้งหมด 100 ครั้ง พบว่าน้ำหนักของโครงสร้างเหล็กลดลงอย่างมีนัยสำคัญ วัสดุที่นำมาใช้ในส่วนของโครงสร้าง ตามลำดับ จากกราฟ Stress Ratio ได้ว่าค่าของความเค้นสูงสุดในแต่ละกลุ่มอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลดังกล่าว เป็นการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

4.2 Connection

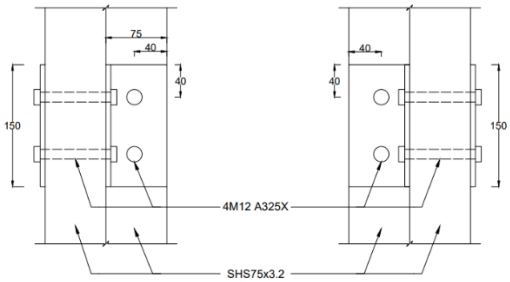
จากการคำนวณ พบว่า connection ในแต่ละ type มีลักษณะดังนี้

Type 1: ใช้สลักเกลียวชนิด A325-X ขนาด 12 มม. (M12) จำนวน 4 ตัว และใช้แผ่นประกับขนาด 6”x6” หนา 6 มม. จำนวน 2 แผ่น ดังรูป

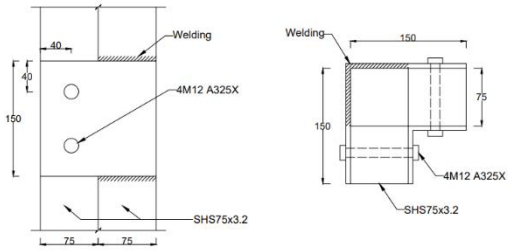


รูปที่ 4.4 connection type 1

Type 2: ใช้สลักเกลียวชนิด A325-X ขนาด 12 มม. (M12) จำนวน 4 ตัว ใช้แผ่นประกับเหล็กฉากด้านนอกขนาด 12”x6” หนา 6 มม. ซึ่งเชื่อมกับเหล็กกล่องที่มุม และใช้แผ่นประกับเหล็กฉากด้านในขนาด 6”x6” หนา 6 มม. ดังรูป

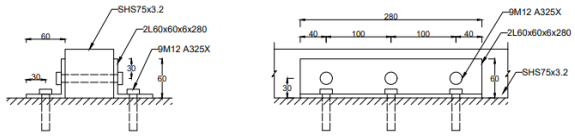


รูปที่ 4.5 connection type 2



รูปที่ 4.6 connection type 2 (ต่อ)

Type 3: ใช้สลักเกลียวชนิด A325-X ขนาด 12 มม. (M12) จำนวน 12 ตัว และใช้แผ่นประกับเหล็กฉาก 2L60x60x6x280 มม. จำนวน 2 แผ่น ดังรูป



รูปที่ 4.7 connection type 3

ในโครงสร้างทั้งหมด ใช้ Connection Type 1 จำนวน 30 ตำแหน่ง ใช้ Connection Type 2 จำนวน 9 ตำแหน่ง และใช้ Connection Type 3 จำนวน 25 ตำแหน่ง ซึ่งรวมทั้งโครงสร้างแล้วใช้วัสดุต่างๆ ดังนี้

1. ใช้สลักเกลียวชนิด A325-X ขนาด 12 มม. (M12) จำนวนทั้งสิ้น 306 ตัว
2. แผ่นประกับขนาด 6”x6” หนา 6 มม. จำนวน 60 แผ่น
3. แผ่นประกับเหล็กฉากด้านนอกขนาด 12”x6” หนา 6 มม. ซึ่งเชื่อมกับเหล็กกล่องที่มุม จำนวน 9 แผ่น
4. แผ่นประกับเหล็กฉากด้านในขนาด 6”x6” หนา 6 มม. จำนวน 9 แผ่น
5. แผ่นประกับเหล็กฉาก 2L60x60x6x280 มม. จำนวน 50 แผ่น

4.3 Model

รูปที่ 4.8 Model

5. สรุปผลการวิจัยและแนวทางการศึกษาเพิ่มเติม

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ออกแบบหน้าตัดของโครงสร้างและการออกแบบข้อต่อในแต่ละ panel ของโครงสร้างแบบถอดประกอบได้ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ว่า การวิเคราะห์ผลด้วยอัลกอริทึม CLPSO จะช่วยจัดหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้างที่เหมาะสม ได้โดยการพิจารณาตัวแปรหน้าตัดที่กำหนดแบบไม่ต่อเนื่อง ผลที่ได้จะลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดตามจำนวนรอบการคำนวณอย่างมีประสิทธิภาพ โดยอัลกอริทึม CLPSO สามารถเขียนได้และใช้ผ่านการสื่อสารกันระหว่างภาษาทางคอมพิวเตอร์ภายใน Microsoft Visual Basic Application และซอฟท์แวร์อื่นได้ๆ เช่น SAP2000 เป็นต้น โดยกระบวนการนี้เรียกว่า OAPI ซึ่งจะช่วยให้สามารถเข้าถึงตัวโมเดลและสามารถควบคุมการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างได้ง่ายยิ่งขึ้นด้วย จากการประยุกต์ใช้ระหว่างอัลกอริทึม CLPSO และซอฟท์แวร์ SAP2000 ทำให้สามารถได้ขนาดหน้าตัดที่ต่ำที่สุด เพื่อใช้ในการออกแบบต่อไปได้ ในส่วนของ connection จากการวิเคราะห์แรงที่กระทำในแต่ละตำแหน่งด้วยซอฟท์แวร์ SAP2000 ทำให้สามารถหา connection เพื่อใช้ในการประกอบแบบบ้านที่สามรถถอดประกอบได้ โดย connection ที่หาได้นั้นมีทั้งหมด 3 ชนิด ซึ่งแต่ละชนิดทำหน้าที่เชื่อมต่อเหล็กแต่ละส่วนที่แตกต่างกัน

จากวัตถุประสงค์ข้างต้น พบว่า สามารถเปลี่ยนแบบบ้านจากแบบคอนกรีตเป็นโครงสร้างเหล็กที่สามารถถอดประกอบได้ โดยอาศัยการดำเนินงานภายใต้อัลกอริทึม CLPSO ร่วมกับซอฟท์แวร์ SAP2000 ในการออกแบบขนาดขนาดหน้าตัดของเหล็กที่มีขนาดต่ำที่สุด และใช้การออกแบบ connection เพื่อใช้เป็นข้อต่อที่ใช้เชื่อมในแต่ละ panel เข้าด้วยกัน ทำให้สามารถถอดและประกอบได้อย่างเป็นระบบมากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตาม การเขียนอัลกอริทึม CLPSO จะต้องปรับเปลี่ยนอย่างละเอียดตามเงื่อนไขการ ออกแบบโครงสร้างของนักออกแบบ หากกำหนดตัวแปรหรือเงื่อนไขบางประการไม่ถูกต้อง จะส่งผล ให้ผลการวิเคราะห์ออกมาไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบนั้น

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

1.) สำหรับโครงสร้างที่มีส่วนของข้อต่อที่แตกต่างกันหลายชนิดจะต้องปรับวิธีการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาข้อต่อเหล่านั้นในการกำหนดตัวแปรต่างๆ เช่นขนาดของแผ่นเหล็ก (plate) หรือขนาดของสลักเกลียว (bolt) เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันมีข้อต่อให้เลือกใช้อยู่มากมายทั้งในงานเฉพาะหรืองานทั่วไป เพื่อให้การออกแบบนั้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของผู้ออกแบบให้มากที่สุด

2.) ในปัจจุบันอัลกอริทึมที่สามารถใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดนั้นมีอยู่จำนวนมาก มิใช่แค่เพียง CLPSO เท่านั้น เช่น Evolutionary structural optimization (ESO) หรือ Mixed ESO-PSO เป็นต้น ซึ่งอัลกอรึทึมที่ต่างกัน ก็มีข้อดี ข้อเสีย และประสิทธิภาพในการทำงานที่แตกต่างกัน ดังนั้นการศึกษาอัลกอรึทึมต่างๆเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ ก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ

3.) ในปัจจุบัน ซอฟท์แวร์ต่างๆได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถใช้ร่วมกันได้ เพื่อให้การทำงานและการออกเป็นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการศึกษาในส่วนนี้อาจทำให้สามารถเลือกซอฟท์แวร์ที่เหมาะสมใช้หาคำตอบและวิเคราะห์ปัญหาต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพได้

4.) เนื่องจากในการศึกษานี้ มิได้พูดถึงรายละเอียดในการเขียนโค้ดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เนื่องจากเนื้อหาในส่วนนี้ต้องใช้เวลาในการเรียนรู้และฝึกฝน ในการศึกษาต่อไปนั้นจะเน้นไปในด้านการใช้โค้ด C++ และ Java Script เป็นต้น เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำงานในอนาคต

5.) ในการศึกษาและการออกในอนาคตนั้นอาจจะมีการออกแบบโครงสร้างของอาคารที่ซับซ้อนมากกว่านี้โดยใช้อัลกอริทึมชนิดอื่น และใช้ร่วมกับซอฟท์แวร์อื่นๆ เพื่อให้มีความเป็นไปได้ในการออกแบบมากยิ่งขึ้น ทำให้เกิดโครงสร้างที่หลากหลายมากยิ่งขึ้นในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่กรุณาให้ความรู้คำปรึกษา คำแนะนำ และกำลังใจในการทำงานตั้งแต่แรกเริ่มตลอดจนถึงการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่เสมอมา

ขอขอบพระคุณบุคลากรอื่นที่เกี่ยวข้องที่อำนวยความสะดวก นายอาณัติ สุธา (พี่นัท) นิสิตปริญญาเอกสาขาโครงสร้าง และนางสาว ธมลวรรณ สุวรรณศร (พี่เบล) นิสิตปริญญาโท ที่คอยช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผลต่างๆและให้คำแนะนำในการปรับแก้งานวิจัย ทั้งในเวลาราชการและนอกเวลาราชการตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาจนงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] Andrew W. Lacey, Chen, W., Hao, H. Structural response of modular buildings. Journal of Building Engineering 16 (March 2018): 45,46.

[2] AISC, L. Manual of steel construction, load and resistance factor design. American Institute of Steel Construction Chicago, IL, (2001).

[3] Ruben E. Perez and Kamran Behdinan. Particle Swarm Optimization in Structural Design. Swarm Intelligence. Pp. 373-394. University of Toronto, n.d. (2007).

[4] Jing J. Liang, A. Kai Qin, Ponnuthurai Nagaratnam Suganthan, and S. Baskar. Evaluation of Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer. Nanyang Technological University, (2006).

[5] Plevris, V., Batavanis, A., Papadrakakis, M. Optimum design of steel structures with the Particle Swarm Optimization method based on EC3. (2011).

[6] Perez, R. L., Behdinan, K. Particle swarm approach for structure design optimization. (2007).

[7] Plevris, V., Papadrakakis, M. A hybrid particle swarm-gradient algorithm for global structural optimization. (2011).

[8] MBMA-2012 Metal Building Manufacturers Association, Base on the 2012 IBC and ASCE 7-10.

[9] American Institute of Steel Construction. Specification for Structural Steel Buildings. American National Standard ANSI/AISC 360-16. (n.p.), (2016).

[10] Jing J. Liang, A. Kai Qin, Studen Member, IEEE, Ponnuthurai Nagaratnam Suganthan, Senior Member, and S. Baskar. Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer for Global Optimizer of Multimodal Functions. (2005).

[11] John O. Oluwafemi, Ofuyatan, O., Ede, A., Solomon O. Oyebisi. A Review on Steel Connections and Structural Behavior. Convenant University, (2021).

[12] Jnead, E. Connection Design Manual-Steel Structures. University of Wollongong, (2018).

[13] Kantamneni, S., Chandramouli, K., Sree Naga Chaitanya, J., Naga Sai, A. A Study on Modular Construction Technique. International Journal for Modern Trends in Science and Technology 7 (July 2021): 278,279,280