ข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดินและการวิเคราะห์แผ่นดินไหวของเจดีย์วัดมหาธาตุ จังหวัดสุโขทัย

TERRESTRIAL LASER SCANNING DATA AND SEISMIC ANALYSIS OF WAT MAHATHAT SUKHOTHAI PAGODA

สิรวิชญ์ สุขศิลา[1,*], พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย[1], ชัยณรงค์ อธิสกุล[1] และ สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์[1]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, จ.กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
[*]Corresponding author address: sirawit.suks@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของแรงแผ่นดินไหวต่อเจดีย์วัดมหาธาตุ จังหวัดสุโขทัยโดยอาศัยข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติแบบภาคพื้นดินในการวิเคราะห์หาขนาดมิติในสภาวะปัจจุบันของเจดีย์ประธาน จากข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติดังกล่าวทำให้สามารถระบุมุมเอียงและการเสียรูปของเจดีย์ประธานในสภาพปัจจุบันได้ ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติของเจดีย์ประธานจะนำไปพัฒนาเป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในเบื้องต้นจะประเมินเจดีย์โดยวิเคราะห์ผลทางสถิตยศาสตร์และการสั่นแบบธรรมชาติ จากนั้นจะทำการให้แรงแผ่นดินไหวกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาผลตอบสนองของแรงแผ่นดินไหวโดยการใช้ข้อมูลการเคลื่อนที่ของพื้นดินจากแผ่นดินไหวอย่างน้อย 3 ข้อมูลที่สอดคล้องตามมาตรฐานเกี่ยวกับแรงแผ่นดินไหว มยผ.1301/1302-61 จากการศึกษาพบว่าการประเมินสภาวะปัจจุบันของเจดีย์ประธานเกิดการเอียงตัวไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ 0.98 องศา การวิเคราะห์สถิตยศาสตร์ของโครงสร้างเจดีย์เนื่องจากน้ำหนักพบว่ามีค่าความเค้นอัดสูงสุดเท่ากับ 3.913 กก./ซม.^{2} และค่าความเค้นดึงสูงสุดเท่ากับ 0.338 กก./ซม.^{2} และการวิเคราะห์โครงสร้างเจดีย์รับแรงแผ่นดินไหวพบว่ามีค่าการเคลื่อนตัวของยอดเจดีย์สูงสุดอยู่ในช่วง 15.50 ถึง 21.64 เซนติเมตร โดยตั้งแต่บริเวณพุ่มข้าวบิณฑ์ถึงยอดเจดีย์เป็นส่วนที่พบว่ามีการเคลื่อนตัวสูงกว่าโครงสร้างส่วนอื่นๆ

คำสำคัญ: *การวิเคราะห์แผ่นดินไหว, เจดีย์ของไทย, เจดีย์วัดมหาธาตุ สุโขทัย, เทคโนโลยีสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดิน, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์*

Abstract

This research investigates the effect of seismic load on Wat Mahathat Sukhothai Pagoda. The current dimensions of the main pagoda are determined based on the terrestrial 3D laser scanning data. According to the obtained data, the main pagoda's current inclination angle and deformation can be reported. The 3D point cloud data of the main pagoda is applied to develop the finite element model. The static analysis and free vibration analysis of the main pagoda are evaluated at first. At least three different ground motions, which are compatible with DPT1301/1302-61, are applied to the finite element model for seismic response investigation. The results show that the main pagoda's current inclination angle is 0.98 degree southwest. The static analysis shows that the maximum compressive stress is 3.913 kg/cm^2 and the maximum tensile stress is 0.338 kg/cm^2. The maximum seismic displacement at the top pagoda is higher than other areas, and the maximum displacement at the top of pagoda is in range of 15.50 cm. to 21.64 cm.

Keywords: *Finite element method, Seismic analysis, Terrestrial 3D laser scanning, Thai pagoda, Wat Mahathat Sukhothai Pagoda*

1. ที่มาและความสำคัญ

วัดมหาธาตุ จังหวัดสุโขทัยเป็นวัดที่มีความสำคัญมากของอาณาจักรสุโขทัย สร้างขึ้นตั้งแต่สมัยสุโขทัยช่วงต้นโดยวัดตั้งอยู่ใจกลางเมืองเปรียบเสมือนเป็นพระอารามหลวงแห่งสมัยสุโขทัย ภายในวัดมีพื้นที่กว้างขวางที่แสดงให้เห็นถึงความรุ่งเรืองของยุคสมัย ปัจจุบันวัดมหาธาตุ สุโขทัยตั้งอยู่บริเวณอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยที่เป็นโบราณสถานขนาดใหญ่ภายในประกอบด้วยเจดีย์ประธาน วิหาร มณฑป อุโบสถ และเจดีย์รายมากถึง 200 องค์ โดยเจดีย์ประธานมีลักษณะเป็นเจดีย์ทรงพุ่งข้าวบิณฑ์หรือทรงยอดดอกบัวตูมที่แสดงถึงศิลปะที่เป็นเอกลักษณ์ของสุโขทัย บริเวณโดยรอบของเจดีย์ประธานประกอบด้วยปรางค์ประจำทิศและปรางค์ประจำมุม ซึ่งปรางค์ประจำทิศ 4 องค์เป็นเจดีย์ทรงปราสาทแบบสุโขทัยที่ได้รับอิทธิพลจากศิลปะขอมและปรางค์ประจำมุม 4 องค์เป็นเจดีย์ทรงปราสาทห้ายอดแสดงถึงศิลปะที่ได้รับอิทธิพลจากพุกามและล้านนา [1] จากที่กล่าวมาข้างต้นวัดมหาธาตุ สุโขทัยจึงเป็นศูนย์รวมของแหล่งศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมอันหลากหลายที่หลงเหลืออยู่จากสมัยสุโขทัยมาจนถึงปัจจุบัน จึงทำให้ได้รับการขึ้นทะเบียนเป็นมรกดกโลกทางวัฒนธรรม

วัดมหาธาตุ สุโขทัยเป็นโครงสร้างที่เก่าแก่มีอายุยาวนานจึงเกิดความเสื่อมโทรมที่เกิดจากผลกระทบทางด้านสภาพแวดล้อมและ

การเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา อีกทั้งมีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายจากภัยแผ่นดินไหว โดยจังหวัดสุโขทัยเป็นจังหวัดที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงต่อการได้รับผลกระทบจากการเกิดแผ่นดินไหว เนื่องจากอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับแหล่งรอยเลื่อนที่มีพลังหลายแห่ง เช่น รอยเลื่อนอุตรดิตถ์ที่มีการเกิดแผ่นดินไหวในช่วงไม่กี่ปีมานี้ ดังนั้น การศึกษาผลกระทบของแรงแผ่นดินไหวที่มีต่อโครงสร้างโบราณสถานที่มีความสำคัญแห่งนี้จึงเป็นสิ่งจำเป็น

เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการเก็บข้อมูลพิกัดจุดสามมิติที่มีความละเอียดและแม่นยำสูง และสามารถเก็บข้อมูลพิกัดจุดของโครงสร้างได้เป็นจำนวนมากในระยะเวลาอันสั้น การศึกษานี้จึงมุ่งศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติในการเก็บรวบรวมข้อมูลเจดีย์วัดมหาธาตุ สุโขทัย เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ประเมินสภาพปัจจุบันของวัด และนำไปใช้ประกอบการสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีเป้าหมายเพื่อศึกษาผลกระทบของแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้างเจดีย์วัดมหาธาตุ สุโขทัย

2. หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. เทคโนโลยีการสแกนวัตถุสามมิติ

เทคโนโลยีการสแกนวัตถุสามมิติที่ใช้ในการศึกษานี้ มีหลักการทำงานคือการวัดความต่างเฟสของลำแสงเลเซอร์ที่ปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่อง การคำนวณระยะทางจะคิดจากความแตกต่างของเฟสขาออกและขาเข้าของเลเซอร์ จากนั้นจะได้เป็นข้อมูลพิกัดกลุ่มจุด 3 มิติของโครงสร้างเป็นจำนวนมากในระยะเวลาอันสั้น [2] ด้วยความสามารถนี้เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์จึงเหมาะสมในการใช้งานกับโครงสร้างอาคารที่ไม่มีข้อมูลอาคารหลงเหลืออยู่ เช่น อาคารโบราณ รวมถึงโบราณสถานต่างๆ โดยเมื่อได้ข้อมูลจากภาคสนามสำหรับแต่ละจุดตั้งเครื่องมือแล้ว จากนั้นนำข้อมูลไปประมวลผลเพื่อให้ข้อมูลเชื่อมต่อกันโดยใช้หลักการซ้อนทับของกลุ่มจุดด้วยวิธี image based registration จะได้เป็นข้อมูลพิกัด 3 มิติที่เหมือนกับสถานที่จริง ซึ่งทำให้สามารถนำไปใช้ประเมินรายละเอียดพิกัด ขนาด และรูปร่าง ได้อย่างแม่นยำ

โบราณสถานและโครงสร้างในอดีตมักมีรูปร่าง รูปทรงที่มีรายละเอียดสูง มีความสวยงาม การสำรวจที่อาศัยบุคลากรที่ชำนาญการและเครื่องมือแบบดั้งเดิมมีข้อจำกัดในด้านการรวบรวมข้อมูลจำนวนมากให้มีความต่อเนื่องและละเอียดเพียงพอต่อการศึกษาในด้านต่างๆ อีกทั้งยังใช้เวลาในการทำงานยาวนาน เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แล้วการเก็บข้อมูลของโบราณสถานที่มีความละเอียดดังกล่าวจึงทำได้สะดวก รวดเร็ว และมีความละเอียดเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก โดยกรณีศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติกับโบราณสถานสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากตัวอย่างงานวิจัยในอดีตต่อไปนี้

Korumaz M., et al. [3] นำเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์มาใช้ในการเก็บข้อมูลอาคารโบราณทางประวัติศาสตร์ กรณีศึกษาเป็นอาคารสุเหร่าที่โครงสร้างเป็นอิฐก่อโบราณตั้งแต่ช่วงต้นของยุคกลางตั้งอยู่ในประเทศตุรกี จากการศึกษาพบว่าเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็วเพื่อนำไปใช้ในวิเคราะห์ตรวจสอบความสมบูรณ์ของอาคารโดยไม่เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง

สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ และคณะ [4] ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลพิกัดของโบราณสถานของไทย โดยเป็นการนำข้อมูลพิกัดและมิติต่างๆ ของโบราณสถานไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เช่น วิเคราะห์การทรุดเอียงและการเอียงตัวของโครงสร้าง รวมถึงการจัดเก็บข้อมูลเพื่อใช้สำหรับการติดตามสภาพโครงสร้างและการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานให้คงอยู่ต่อไปได้อย่างยาวนาน

นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีตัวอย่างกรณีศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติอีกเป็นจำนวนมาก ได้แก่ Invernizzi S., et al. [5] ติดตามประเมินสภาพโครงสร้างของหอสูงโบราณ D'Altri A., et al [6] วิเคราะห์สเถียรภาพการเอียงของโครงสร้างอิฐก่อโบราณ และ Liang H., et al [7] จัดทำข้อมูลของสวนโบราณในประเทศจีนที่ได้ขึ้นทะเบียนมรดกโลก เป็นต้น

2.2. การวิเคราะห์โครงสร้างโบราณสถานของไทยโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างของโบราณสถานเพื่อศึกษาพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างและวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างที่ได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ โดยการศึกษานี้จะนำข้อมูลที่ได้จากการจัดเก็บข้อมูลผ่านการใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติพัฒนาเป็นแบบจำลองที่สามารถวิเคราะห์โครงสร้างได้โดยใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาพฤติกรรมโบราณสถานของไทย ดังต่อไปนี้

สุดชาย พานสุวรรณ [8] ได้วิเคราะห์โครงสร้างของเจดีย์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของหน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักของเจดีย์ โดยทำการวิเคราะห์สถิตยศาสตร์ในระนาบ 2 มิติ จากการศึกษาทำให้สามารถทราบถึงจุดที่มีความเสี่ยงในการรับน้ำหนักของเจดีย์แต่ละรูปทรง โดยพฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างเจดีย์รูปทรงต่างๆ จะเกิดหน่วยแรงอัดเป็นส่วนใหญ่และผลของการวิเคราะห์ที่ได้จากงานนี้สามารถนำไปใช้ประกอบการพิจารณาวิธีการและรูปแบบในการบูรณะซ่อมแซมโบราณสถานของไทยได้

ชนาฉัตร อภิชาตยะกุล [9] ได้ศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างของเจดีย์อิฐก่อโดยใช้แบบจำลองสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการศึกษาผลทางสถิตยศาสตร์ที่เกิดจากน้ำหนักของเจดีย์และ

ศึกษาสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง จากการศึกษาพบว่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงที่เกิดจากน้ำหนักของเจดีย์เป็นสาเหตุของการเกิดรอยแตกร้าวและความเสียหายของโครงสร้าง การเอียงของเจดีย์มีผลโดยตรงต่อค่าความถี่ธรรมชาติซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปแบบทิศทางการเอียงที่เกิดขึ้นในอดีต

ในส่วนของการศึกษาผลกระทบเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวที่มีต่อโบราณสถานของไทยนั้น ยังพบว่ามีผลการศึกษาในประเด็นนี้อย่างจำกัด โดย ภคพงศ์ ภัทราคม [10] ได้วิเคราะห์โครงสร้างของพระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคลภายใต้แรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหว โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินความมั่นคงและหาอัตราส่วนความปลอดภัยของโบราณสถาน จากการศึกษาพบว่าส่วนของโครงสร้างเจดีย์ที่เมื่อได้รับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวแล้วจะทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยลดลง เสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายคือบริเวณตั้งแต่บัลลังก์เหนือองค์ระฆังไปจนถึงยอดของโครงสร้าง

จากงานวิจัยในอดีตที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าการประเมินผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวสำหรับโบราณสถานในเขตพื้นที่จังหวัดสุโขทัย โดยเฉพาะเจดีย์วัดมหาธาตุยังไม่มีงานวิจัยที่แสดงผลการวิเคราะห์ไว้อย่างชัดเจน ดังนั้นการศึกษานี้จึงจะนำเสนอการใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติเก็บรวบรวมข้อมูล และประเมินสภาพปัจจุบัน รวมถึงแสดงผลการวิเคราะห์ผลกระทบของแรงแผ่นดินไหวที่มีต่อโครงสร้างเจดีย์วัดมหาธาตุ สุโขทัยในเบื้องต้น เพื่อประโยชน์ในด้านการอนุรักษ์ในระยะยาวต่อไป

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย เริ่มจากการลงพื้นที่ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติเก็บข้อมูลด้านมิติและขนาดของวัดมหาธาตุ สุโขทัย จากนั้นนำข้อมูลกลุ่มจุดที่ได้มาทำการวิเคราะห์ประเมินขนาดมิติของโครงสร้าง และทำการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางสถิตยศาสตร์ พร้อมทั้งหาสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง และประเมินการเคลื่อนตัวของเจดีย์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยขั้นตอนดังกล่าวสามารถสรุปเป็นวิธีการพอสังเขปได้ดังนี้

3.1. การเก็บข้อมูลและการประมวลผลข้อมูล 3 มิติ

การเก็บข้อมูลของวัดมหาธาตุ สุโขทัย ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการลงพื้นที่โดยใช้เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์รุ่น Faro X330 เก็บข้อมูลในพื้นที่ภาคสนาม ดังรูปที่ 1 โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการเก็บข้อมูลดังนี้ กำหนดค่าความละเอียดของจุด (Resolution) ประมาณ 28 ล้านจุดต่อจำนวน 1 จุดตั้งกล้อง ค่าความเร็วที่ใช้ในการเก็บข้อมูลอยู่ที่ 122000 จุดต่อวินาที และระยะห่างระหว่างจุดที่ระยะ 10 เมตรอยู่ที่ระยะ 7.67 มิลลิเมตร

รูปที่ 1 การลงพื้นที่เก็บข้อมูลภาคสนาม

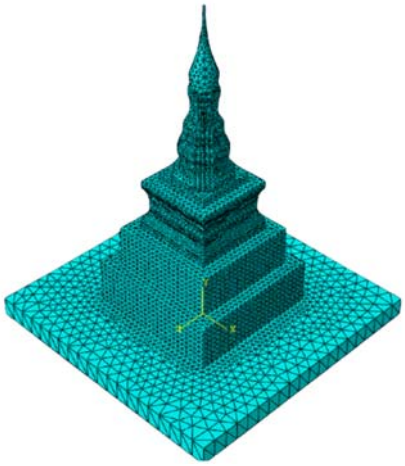
จากนั้นนำผลข้อมูลที่ได้จากงานภาคสนามทำการประมวลผลผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้เป็นข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ (point cloud data) ของวัดมหาธาตุ สุโขทัยและสามารถประยุกต์ใช้สำหรับการสร้างแผนผังบริเวณ วิเคราะห์ขนาดมิติและใช้ประกอบการสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ดังจะแสดงผลในส่วนต่อไป

3.2. การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การศึกษานี้ทำการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างเจดีย์ประธานของวัดมหาธาตุ สุโขทัย ดังรูปที่ 2 โดยใช้ข้อมูลขนาดมิติจากการประมวลผลข้อมูลพิกัดจุด 3 มิติ (point cloud data) ที่ได้จากเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ จากนั้นนำแบบจำลองเข้าสู่โปรแกรม Abaqus เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 2 แบบจำลองเจดีย์ประธานวัดมหาธาตุ สุโขทัย

สำหรับการศึกษานี้จะแบ่งชิ้นส่วนของแบบจำลองเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ จำนวน 136108 เอลิเมนต์ ดังแสดงรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบจำลองเจดีย์ประธานวัดมหาธาตุ สุโขทัย สำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

ขอบเขตของการศึกษานี้จะทำการวิเคราะห์โครงสร้างของเจดีย์ประธานวัดมหาธาตุ สุโขทัย ในสภาวะสถิต และหาสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างอันได้แก่ความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่น จากนั้นจะทำการวิเคราะห์หาค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดอันเนื่องมาจากผลของแรงแผ่นดินไหว โดยข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ในส่วนต่างๆ แสดงได้ดังต่อไปนี้

3.2.1. การวิเคราะห์ทางสถิตยศาสตร์และการหาสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง

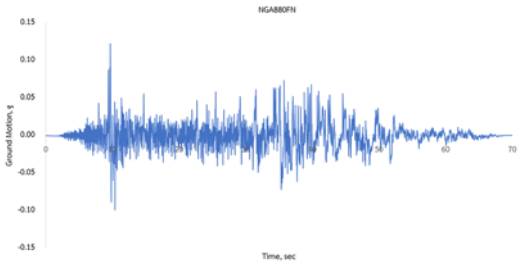
การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรม Abaqus ทางสถิตยศาสตร์จะประเมินผลที่เกิดจากน้ำหนักของเจดีย์เป็นหลักโดยค่าสมบัติของวัสดุที่กำหนดในแบบจำลองจะอ้างอิงตามผลการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโบราณและวัสดุทดแทน สำหรับโบราณสถานของไทย ซึ่งรายงานไว้ในงานวิจัยของ Wonganan N., et al. [11] ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสมบัติสำหรับเจดีย์ประธานวัดมหาธาตุ สุโขทัย

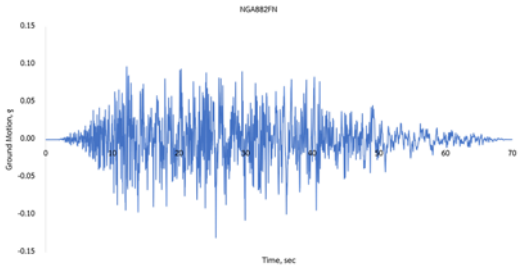
วัสดุ	ความหนาแน่น (กรัม/ซม.^{3})	โมดูลัสความยืดหยุ่น (MPa)	อัตราส่วนปัวซอง
อิฐ	1.6	444	0.216

3.2.2. การวิเคราะห์ผลตอบสนองของแผ่นดินไหว

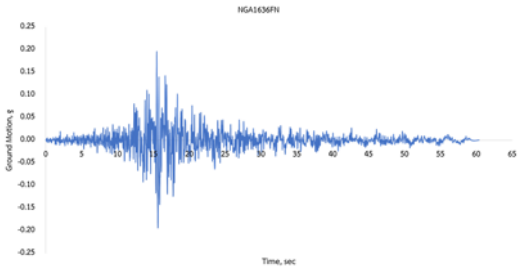
การศึกษานี้จะใช้ข้อมูลการเคลื่อนที่ของพื้นดินจากแผ่นดินไหวอย่างน้อย 3 ข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของโครงสร้าง เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวซึ่งแต่ละชุดข้อมูลจะประกอบด้วยคู่ข้อมูลความเร่งของพื้นดินในแนวราบที่ตั้งฉากกัน คือ fault normal (FN) และ fault parallel (FP) โดยแสดงตัวอย่างของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ดังรูปที่ 4 เป็นคลื่นแผ่นดินไหว Landers วัดจากสถานีแผ่นดินไหว Mission Creek Fault รูปที่ 5 เป็นคลื่นแผ่นดินไหว Landers วัดจากสถานีแผ่นดินไหว North Palm Springs และรูปที่ 6 เป็นแผ่นดินไหว Manjil- Iran จากสถานีแผ่นดินไหว Qazvin



รูปที่ 4 ข้อมูลการเคลื่อนที่ของพื้นดิน NGA880FN

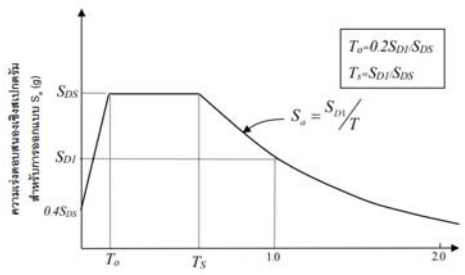


รูปที่ 5 ข้อมูลการเคลื่อนที่ของพื้นดิน NGA882FN



รูปที่ 6 ข้อมูลการเคลื่อนที่ของพื้นดิน NGA1636FN

โดยข้อมูลการเคลื่อนที่ของแผ่นดินไหวจะต้องปรับแต่งให้มีรูปร่างสเปกตรัมการตอบสนองใกล้เคียงกับสเปกตรัมการตอบสนองออกแบบตามมยผ.1301/1302-61 [12] ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ [12]

จากรูปที่ 7 S_{DS} คือค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที และS_{D1} คือค่าความเร่ง

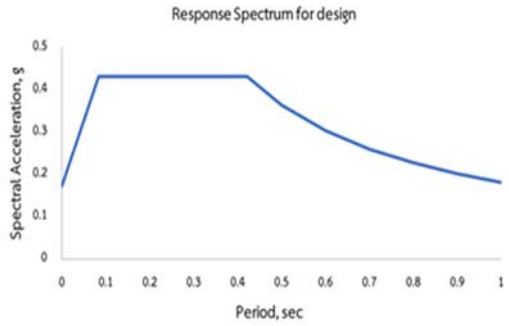
ตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 1 วินาที สามารถหาได้จากสมการ

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (1)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2)$$

โดย S_{MS} คือค่าความเร่งตอบสนองสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาทีที่ปรับแก้จากผลของชั้นดิน และS_{M1} คือค่าความเร่งตอบสนองสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1.0 วินาทีที่ปรับแก้จากผลของชั้นดิน ซึ่ง S_{MS} และS_{M1} จะขึ้นอยู่กับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุด (Maximum Considered Earthquake : MCE) สำหรับวัดมหาธาตุ สุโขทัยตั้งอยู่อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย จะใช้ค่าค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม MCE ที่คาบการสั่น 0.2 และ 1 วินาทีเท่ากับ 0.449 และ0.117 ตามลำดับ [12]

ซึ่งสเปกตรัมการตอบสนองออกแบบของจังหวัดสุโขทัยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8



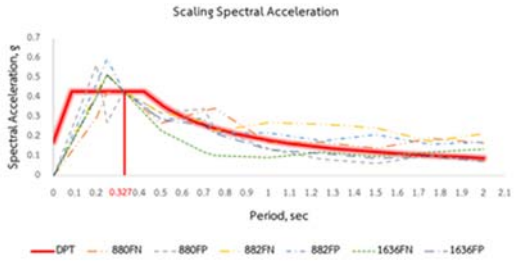
รูปที่ 8 สเปกตรัมการตอบสนองออกแบบจังหวัดสุโขทัย

การปรับแต่งสเปกตรัมการตอบสนองของข้อมูลแผ่นดินไหวทั้ง 3 ข้อมูลให้เหมาะสมกับสเปกตรัมการตอบสนองออกแบบของจังหวัดสุโขทัยจะได้ค่าสเกล (scaling factor) สำหรับใช้ในการศึกษานี้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสเกลสำหรับปรับแต่งข้อมูลแผ่นดินไหว

ข้อมูลแผ่นดินไหว	ค่าสเกล (scaling factor)
880FN	1.6756
880FP	1.6343
882FN	1.2568
882FP	1.3613
1636FN	0.7219
1636FP	1.2594

เมื่อปรับค่าแล้วจะได้ความเร่งสเปกตรัมตอบสนองของแผ่นดินไหวที่เหมาะสมกับความเร่งสเปกตรัมตอบสนองออกแบบตามมยผ.1301/1302-61 ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความเร่งสเปกตรัมตอบสนองของแผ่นดินไหวปรับค่า

4. ผลการศึกษา

4.1. ผลการประมวลผลข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติ

ข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติที่เก็บจากการลงพื้นที่สามารถนำมาประมวลผลให้ได้เป็นข้อมูลกลุ่มจุดที่สามารถสร้างแผนผังบริเวณ หาขนาดมิติ และวัดการเอียงตัวของเจดีย์ได้ โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุดที่ได้จากการสแกนวัตถุ 3 มิติ แสดงได้ดังนี้

4.1.1. ผลของการรวมข้อมูลพิกัดจุด 3 มิติ

จากการประมวลผลข้อมูลโดยใช้หลักการซ้อนทับกันของภาพจะได้เป็นข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติที่แสดงพื้นที่โดยรวมของวัดมหาธาตุสุโขทัยได้ ดังรูปที่ 10 และข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติเฉพาะบริเวณเจดีย์ประธานและเจดีย์บริวาร ดังรูปที่ 11

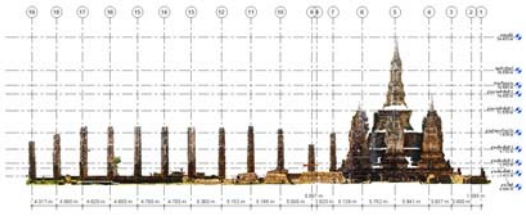
รูปที่ 10 ภาพกลุ่มจุด 3 มิติแสดงพื้นที่โดยรวมของวัดมหาธาตุสุโขทัย

รูปที่ 11 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติของเจดีย์ประธานและเจดีย์บริวาร

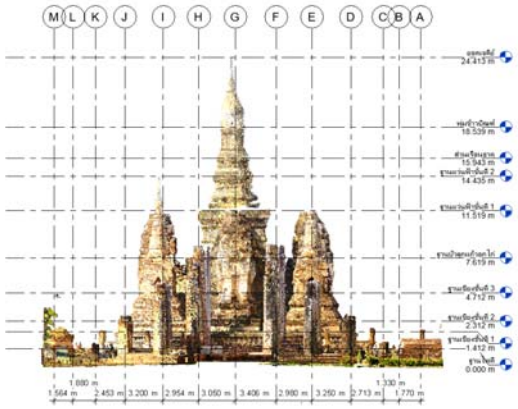
4.1.2. ผลของการวัดขนาดมิติและการเอียงตัว

จากการวิเคราะห์ขนาดมิติ ทำให้สามารถสร้างผังบริเวณของวัดได้ ดังรูปที่ 12 และภาพรูปด้านได้ดังรูปที่ 13 และ 14

รูปที่ 12 ผังบริเวณของวัดมหาธาตุ สุโขทัย

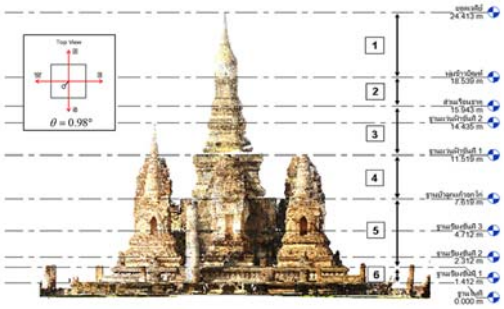


รูปที่ 13 ภาพด้านทิศเหนือของวัดมหาธาตุ สุโขทัย



รูปที่ 14 ภาพด้านทิศตะวันออกของวัดมหาธาตุ สุโขทัย

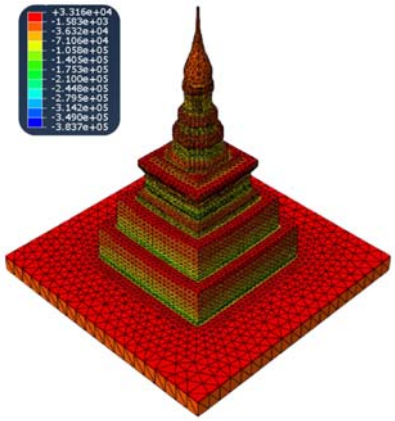
ผลของการวัดความเอียงของยอดเจดีย์ประธานวัดมหาธาตุ จังหวัดสุโขทัยพบว่าเอียงตัวไปในทิศตะวันตกเฉียงใต้เป็นมุม 0.98 องศาดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 ทิศการเอียงตัวของเจดีย์ประธานวัดมหาธาตุ สุโขทัย

4.2. ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ทางสถิตยศาสตร์

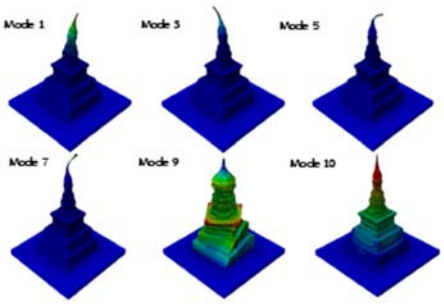
จากการวิเคราะห์โครงสร้างเนื่องจากผลของน้ำหนักเจดีย์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม Abaqus สามารถแสดงการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นได้ในตำแหน่งต่างๆ ได้ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 การกระจายตัวของหน่วยแรงที่เกิดจากน้ำหนักเจดีย์

จากการวิเคราะห์พบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 3.913 กก./ซม.^{2} เป็นหน่วยแรงอัดโดยเมื่อเปรียบเทียบกับรายงานของสุทัศน์และคณะ [4] กำลังรับแรงอัดของอิฐก่อโบราณมีค่าประมาณ 14.9 กก./ซม.^{2} พบว่าความเค้นอัดเนื่องจากน้ำหนักของเจดีย์ที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินกว่ากำลังที่อิฐก่อจะรับได้และค่าความเค้นดึงดึงเท่ากับ 0.338 กก./ซม.^{2} มีค่าความเค้นดึงมีค่าเป็น ร้อยละ 8.638 ของความเค้นอัดที่เกิดขึ้นซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Wethyavivorn B., et al. [13] และสอดคล้องกับพฤติกรรมของวัสดุอิฐก่อที่รับแรงอัดได้ดีกว่าแรงดึง จากนั้นวิเคราะห์โครงสร้างหาความถี่ธรรมชาติได้ดังตารางที่ 3

โดยค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีค่าเท่ากันเป็นช่วง เนื่องจากเป็นการสั่นรูปแบบเดียวกันแต่เกิดขึ้นในทิศทางที่ตั้งฉากกัน ซึ่งตัวอย่างรูปร่างการสั่นไหวที่มีความแตกต่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 รูปร่างการสั่นไหวของเจดีย์ประธานวัดมหาธาตุ

ตารางที่ 3 ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างเจดีย์

รูปแบบ	ความถี่ (เฮิรตซ์)
1	3.0566
2	3.0566
3	5.7701
4	5.7709
5	8.7772
6	8.7812
7	10.5990
8	10.6000
9	10.9790
10	12.3010
11	14.9230
12	14.9280

4.3. ผลการหาค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว

ผลของการวิเคราะห์หาค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างเจดีย์ประธานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้ข้อมูลการเคลื่อนตัวของพื้นดิน 3 ชุด ทำการวิเคราะห์ภายใต้สมมุติฐานตามหลักการความเท่ากันของการเคลื่อนที่สูงสุดในสภาวะยืดหยุ่นเชิงเส้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดจากการประเมินแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยสามารถหาค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของยอดเจดีย์ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการเคลื่อนตัวที่สูงสุดของยอดเจดีย์

ข้อมูลแผ่นดินไหว	การเคลื่อนตัวสูงสุดยอดเจดีย์ (ซม.)	อัตราส่วนการเคลื่อนตัวต่อความสูง
880FN	17.14	1:142.43
880FP	21.19	1:115.21
882FN	21.64	1:112.81
882FP	17.08	1:142.93
1636FN	15.50	1:157.50
1636FP	18.36	1:132.67

จากการวิเคราะห์เจดีย์ประธานวัดมหาธาตุ สุโขทัยภายใต้การรับแรงแผ่นดินไหวของข้อมูล 3 ชุด พบว่าการเคลื่อนตัวบริเวณยอดเจดีย์สูงสุดที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วง 15.50 – 21.64 เซนติเมตรและส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวบริเวณพุ่มข้าวบิณฑ์สูง และมีอัตราส่วนการเคลื่อนตัวไปเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงอยู่ในช่วง 1:112.81 ถึง 1:157.50

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโบราณสถานโดยการใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติในการเก็บข้อมูลและประยุกต์ใช้ข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งทางสถิตยศาสตร์ การหาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างรวมถึงการวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้างเมื่อได้รับผลกระทบของแรงแผ่นดินไหว โดยสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1.เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติสามารถนำมาประมวลผลสร้างเป็นแผนผังบริเวณ รูปด้าน อีกทั้งสามารถหาความเอียงที่เกิดขึ้นในปัจจุบันของวัดมหาธาตุ สุโขทัยได้ โดยพบว่าปัจจุบันมีการเอียงเกิดขึ้น 0.98 องศา ในทางทิศตะวันตกเฉียงใต้

2.การศึกษาผลทางด้านสถิตยศาสตร์ที่เกิดจากน้ำหนักของโครงสร้างเจดีย์พบว่าเกิดความเค้นอัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 3.913 กก./ซม.^{2} และเกิดความเค้นดึงสูงสุดเท่ากับ 0.338 กก./ซม.^{2}

3.การศึกษาผลทางด้านพลศาสตร์สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างได้โดยแบ่งออกเป็น 12 รูปแบบการสั่นและส่วนของการวิเคราะห์ผลตอบสนองที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้าง 3 ชุดข้อมูลพบว่าค่าการเคลื่อนตัวของยอดเจดีย์มีค่าอยู่ในช่วง 15.50 ถึง 21.64 เซนติเมตร ซึ่งจะมีการเคลื่อนตัวเกิดขึ้นสูงบริเวณพุ่มข้าวบิณฑ์ถึงยอดเจดีย์ทำให้เสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกกว.) และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และขอขอบคุณผู้บริหารและเจ้าหน้าที่อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยสำหรับการอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ศักดิ์ชัย สายสิงห์ (2558). *เจดีย์ในประเทศไทย* :แนวคิด คติการสร้าง พัฒนาการทางรูปแบบ และการวิเคราะห์ทางประวัติศาสตร์. สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร, หน้า 325-336

[2] Lemmens M. (2011) *Terrestrial Laser Scanning. In: Geo-information*. Geotechnologies and the Environment, vol 5. Springer, Dordrecht.

[3] Korumaz M., Betti M., Conti A., Tucci G., Bartoli G., Bonora V., Korumaz A. G. & Fiorini, L. (2017). An integrated Terrestrial Laser Scanner (TLS), Deviation Analysis (DA) and Finite Element (FE) approach for health assessment of historical structures. A minaret case study. *Engineering Structures*, 153(October), 224–238.

[4] สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัยณรงค์ อธิสกุล, รักติพงษ์ สหมิตรมงคล และ เสน่ห์ มหาผล (2562). *โครงการพัฒนาฐานข้อมูลทางวิศวกรรมเพื่อการประเมินและติดตามสภาพโครงสร้างโบราณสถานของไทย*. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, หน้า 20-140

[5] Invernizzi S., Lacidogna G., Lozano-ramírez N. E. & Carpinteri A. (2019). Structural monitoring and assessment of an ancient masonry tower. *Engineering Fracture Mechanics*, 210(March 2018), 429–443. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.05.011

[6] D'Altri A. M., Milani G., de Miranda S., Castellazzi G. & Sarhosis V. (2018). Stability analysis of leaning historic masonry structures. *Automation in Construction*, 92(April), 199–213. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.04.003

[7] Liang H., Li W., Lai S., Zhu L., Jiang W. & Zhang Q. (2018). The integration of terrestrial laser scanning and terrestrial and unmanned aerial vehicle digital photogrammetry for the documentation of Chinese classical gardens – A case study of Huanxiu Shanzhuang, Suzhou, China. *Journal of Cultural Heritage*, 33, 222–230. DOI: 10.1016/j.culher.2018.03.004

[8] สุดชาย พานสุวรรณ, วงศ์ฉัตร ฉัตรกุล ณ อยุธยา และ อลงกรณ์ แสงนิกร (2561). *โครงการวิจัยการศึกษาระบบโครงสร้างและพฤติกรรมของโบราณสถานประเภทเจดีย์*.สำนักโบราณคดี กรมศิลปากร, หน้า 90-102

[9] ชนาฉัตร อภิชาตยะกุล (2549). *การวิเคราะห์และทวนสอบแบบจำลองของโบราณสถานอิฐก่อ*. วิทยานิพนธ์ปริญญา, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[10] ภคพงศ์ ภัทราคม (2561). บูรณาการการสำรวจลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างและประเมินความมั่นคงโครงสร้างโบราณสถาน : กรณีศึกษา พระเจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล. ดุษฎีนิพนธ์, ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต, วิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

[11] Wonganan N., Athisakul C., Mahasuwanchai P., Tanchirapat W., Sahamitmongkol R. & Leelataviwat S. (2020). Ancient materials and substitution materials used in thai historical masonry structure preservation. *Journal of Renewable Materials*, 9(2), 179–204.

[12] มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (2561). *มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1301/1302-61*. กรมโยธาธิการและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย, ประเทศไทย

[13] Wethyavivorn B., Surit S., Apichatyakul C. & Lerdsivanon N. (2016). Model Verification of Thai Historic Masonry Monuments. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(1), 04014188.