การผันแปรของความถี่วิกฤตและความสูงสูงสุดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ F2 เหนือบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรในช่วงที่มีกิจกรรมสุริยะต่ำ

Critical Frequency and Peak Height Variations of the F2 Ionospheric Layer in the Near-Equatorial Region During Low-Solar Activity

ปฐม์พงศ์ พันธ์พิบูลย์[1*] และ สหรัฐ สาทิพจันทร์[2]

[1]คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

[2]ศูนย์วิศวกรรมเทคโนโลยีดาราศาสตร์วิทยุ สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

Patapong Panpiboon[1*] and Saharat Sathipchan[2]

[1]Faculty of Science and Technology, Rajabhat Maha Sarakham University

[2]Center for Radio Astronomy and Engineering, National Astronomical Research Institute of Thailand (Public Organization)

Corresponding Author Email : patapong.pa@rmu.ac.th

Received 12 April 2025

Revised 29 August 2025

Accepted 08 September 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผันแปรของความถี่วิกฤต (foF2) และความสูงสูงสุดของชั้น F2 (hmF2) ในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกช่วงกิจกรรมสุริยะต่ำ โดยใช้ข้อมูลจากสถานี Ionosonde BVJ03 ปี พ.ศ. 2561 จำนวน 35,749 จุดข้อมูล ผลการศึกษาพบ foF2 มีค่ามัธยฐาน 6.85 MHz (IQR: 4.30-8.68 MHz) และ hmF2 มีค่ามัธยฐาน 282.9 กิโลเมตร (IQR: 251.1-316.7 km) การผันแปรรายเดือนแสดง Equinox Anomaly โดย foF2 ลดลงจาก 8-9 MHz (มกราคม-เมษายน) เหลือ 5-6 MHz (กรกฎาคม-สิงหาคม) ขณะที่ hmF2 มีแนวโน้มตรงกันข้าม การผันแปรรายฤดูกาลพบ foF2 สูงสุดในฤดูใบไม้ร่วง (~11 MHz) การผันแปรรายวันพบ foF2 ต่ำสุดก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (2-3 MHz) และสูงสุดช่วงบ่าย (13:00-15:00 LT) hmF2 ต่ำสุดช่วงเช้า (220-250 km) และสูงสุดช่วงเย็น (320-350 km) การทดสอบ Mann-Whitney U พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดย foF2 กลางวัน (8.16 MHz) สูงกว่ากลางคืน (4.35 MHz) เกือบสองเท่า ขณะที่ hmF2 กลางคืน (291.80 km) สูงกว่ากลางวันเล็กน้อย (275.70 km) การเปรียบเทียบกับ IRI-2020 พบแบบจำลองประมาณค่า hmF2 สูงเกินไป โดยเฉพาะช่วงกลางวัน (RMSE = 52.84 km) งานวิจัยยืนยันว่า foF2 ได้รับอิทธิพลจากรังสีสุริยะเป็นหลัก จึงมีความแตกต่างกลางวัน-กลางคืนชัดเจน ขณะที่ hmF2 ได้รับอิทธิพลร่วมจากพลวัตบรรยากาศ ผลการศึกษาช่วยเสริมสร้างความเข้าใจพฤติกรรมไอโอโนสเฟียร์ละติจูดต่ำและสามารถนำไปใช้ปรับปรุงแบบจำลองทำนายพารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

คำสำคัญ: ความถี่วิกฤต, ความสูงสูงสุดชั้น F2, ไอโอโนสเฟียร์, กิจกรรมสุริยะต่ำสุด

Abstract

This study investigated the variability of the critical frequency (foF2) and F2 layer peak height (hmF2) in the equatorial magnetic region during low solar activity, utilizing 35,749 data points from the BVJ03 Ionosonde station throughout 2018. Results revealed foF2 median values of 6.85 MHz (IQR: 4.30-8.68 MHz) and hmF2 median values of 282.9 km (IQR: 251.1-316.7 km). Monthly variations exhibited equinox anomaly characteristics, with foF2 declining from 8-9 MHz (January-April) to 5-6 MHz (July-August), while hmF2 demonstrated opposite trends. Seasonal analysis showed maximum foF2 values during autumn (~11 MHz). Diurnal variations indicated minimum foF2 values before dawn (2-3 MHz) and maximum values during afternoon (13:00-15:00 LT), while hmF2 exhibited minimum values in the morning (220-250 km) and maximum values in the evening (320-350 km). Mann-Whitney U tests revealed statistically significant differences, with daytime foF2 (8.16 MHz) nearly doubling nighttime values (4.35 MHz), whereas nighttime hmF2 (291.80 km) slightly exceeded daytime values (275.70 km). Comparison with IRI-2020 models indicated systematic overestimation of hmF2, particularly during daytime hours (RMSE = 52.84 km). This research confirmed that foF2 was primarily influenced by solar radiation, resulting in pronounced day-night variations, while hmF2 was additionally affected by atmospheric dynamics. These findings enhanced understanding of low-latitude ionospheric behavior and can contribute to improving ionospheric parameter prediction models.

Keywords: Critical Frequency, Peak Height, Ionosphere, Solar Minimum

1. บทนำ

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศโลกที่มีผลกระทบอย่างมากต่อระบบการสื่อสาร การแพร่กระจายของคลื่นวิทยุและการทำงานของดาวเทียม ความผันแปรของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นนี้สามารถทำให้เกิดการสะท้อน (Reflection) การหักเห (Refraction) หรือการรบกวนสัญญาณ (Scintillation) ส่งผลให้ความแม่นยำของระบบนำทางด้วยดาวเทียมลดลง เกิดการสูญเสียสัญญาณ (Signal Loss) หรือทำให้คุณภาพของการสื่อสารทางคลื่นวิทยุด้อยลง [1] ชั้นบรรยากาศนี้เป็นบริเวณที่โมเลกุลของก๊าซดูดกลืนพลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเลตสุดขั้วจากดวงอาทิตย์ (Extreme Ultraviolet; EUV) และรังสีเอ็กซ์ (X-ray) จนเกิดกระบวนการไอออนไนซ์ (Ionization) ส่งผลให้มีความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและไอออนอิสระสูงขึ้น [1] ไอโอโนสเฟียร์จึงมีบทบาทสำคัญต่อการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุความถี่สูง (HF) และระบบนำทางผ่านดาวเทียม เช่น GPS, GLONASS และ Galileo

ชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงที่สุด จึงมีความสำคัญต่อการสะท้อนคลื่นวิทยุและการมีปฏิสัมพันธ์กับสภาพอวกาศ (Space Weather) [2] ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถสะท้อนคลื่นวิทยุ HF ไปยังพื้นโลกได้ในเวลากลางวัน ส่งผลดีต่อการสื่อสารทางไกลแบบคลื่นสั้น อย่างไรก็ตาม ความผันแปรอย่างรวดเร็วของความหนาแน่นอิเล็กตรอนโดยเฉพาะในช่วงกลางคืน อาจทำให้เกิดสภาวะ Scintillation ซึ่ง

เป็นผลกระทบที่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนและความผิดพลาดของระบบนำทางด้วยดาวเทียม กิจกรรมของดวงอาทิตย์มีบทบาทสำคัญเนื่องจากระดับของรังสี EUV และ X-ray ที่เปลี่ยนไปตามวัฏจักรสุริยะ [3] รวมทั้งปัจจัยที่ส่งผลต่อการผันแปรพลวัตของบรรยากาศ เช่น ลมแนวดิ่ง ลมแนวนอน และคลื่นความถี่ต่ำซึ่งมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศ [4] อิทธิพลจากพายุแม่เหล็กโลกที่ขับเคลื่อนจากการพ่นมวลคอโรนาของดวงอาทิตย์ (Coronal Mass Ejections) และลมสุริยะความเร็วสูง (High-Speed Streams) สามารถกระตุ้นให้เกิดความปั่นป่วนอย่างฉับพลันในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [5] การผันแปรสนามไฟฟ้าในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดจากกลไกต่างๆ เช่น ไดนาโมในชั้น E (E-region Dynamo) และสนามไฟฟ้าที่แทรกซึมฉับพลัน (Prompt Penetration Electric Fields) ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและความสูงของชั้นต่างๆ ได้ โดยเฉพาะบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรในบางเหตุการณ์จะมีพฤติกรรมของพลาสมาแบบเฉพาะตัวและโครงสร้างสนามแม่เหล็กโลกในแนวนอนจะเพิ่มเติมการผันแปรของไอโอโนสเฟียร์ได้อย่างมาก [6] นอกจากนี้ความผันแปรของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรมีผลโดยตรงต่อการสะท้อนและการหักเหของคลื่นวิทยุ HF ซึ่งมีความสำคัญต่อการสื่อสารทางทหาร อุตุนิยมวิทยา และระบบนำทางด้วยดาวเทียม [7]

ความสูงของความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดในชั้น F2 (Peak Height of the F2-layer) เรียกว่า hmF2 ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งแนวดิ่งที่ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนมีค่าสูงสุด โดยมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับพลศาสตร์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เช่น ลมแนวดิ่งและแรงไฟฟ้า [6], [8] ขณะที่ foF2 ซึ่งเป็นความถี่วิกฤตของชั้น F2 (Critical Frequency of the F2-layer) นั้นใช้บ่งชี้ค่าความหนาแน่นสูงสุดของอิเล็กตรอน โดยมีความสัมพันธ์กับปริมาณการไอออไนซ์จากดวงอาทิตย์ [3], [9] โดยทั่วไปทั้งสองพารามิเตอร์มีความสัมพันธ์ร่วมกันอย่างซับซ้อนซึ่งในบางช่วงเวลา foF2 เพิ่มขึ้นขณะที่ hmF2 ลดลง [10], [11]

บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก โดยเฉพาะที่อยู่ภายในละติจูด ±20° มักมีพฤติกรรมของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ซับซ้อน เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กโลกในแนวนอนมากกว่าบริเวณละติจูดสูง ทำให้เกิดปรากฏการณ์เฉพาะ เช่น Equatorial Ionization Anomaly (EIA) และ Equatorial Spread F (ESF) ทำให้เกิดพลาสมาไม่สม่ำเสมอซึ่งกระทบต่อการส่งผ่านของสัญญาณวิทยุอย่างรุนแรง [12], [13], [14] พื้นที่ศึกษาที่อยู่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกหรือที่ตั้งอยู่ใกล้แนวเส้นศูนย์สูตรการเอียงแม่เหล็ก (Magnetic Dip Equator) เหมาะสมต่อการศึกษาผลกระทบของกลไกเฉพาะในชั้น F2 [15] การวิจัยในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรยังมีจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับบริเวณละติจูดกลางและสูง [16], [17] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเป็นช่องว่างที่มีคุณค่าในการเติมเต็มความเข้าใจของพลศาสตร์ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

สถานี Ionosonde รหัส BVJ03 ตั้งอยู่ที่เมือง Boa Vista ประเทศบราซิล (2.8S°, 60.7°W) อยู่ใกล้กับเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของไอโอโนสเฟียร์ในเขตศูนย์สูตรโดยเฉพาะปรากฏการณ์ EIA และ ESF [15] ในปี พ.ศ. 2561 ได้รับการจัดให้อยู่ในช่วงของกิจกรรมสุริยะต่ำ (Low-solar Activity) ตามค่าดัชนีสุริยะเฉลี่ย เช่น F10.7 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าปกติอย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีพายุสุริยะรุนแรง ทำให้เหมาะสมต่อการศึกษาพฤติกรรมพื้นฐานของชั้น F2 ภายใต้เงื่อนไขสงบของสภาพอวกาศ [2], [18] มีงานวิจัยจำนวนมากที่แสดงถึงความผันแปรของ foF2 และ hmF2 ในช่วงที่กิจกรรมสุริยะอยู่ในระดับต่ำ [19], [15] ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแม้ในสภาพที่ไม่มีพายุสุริยะ ความผันแปรจากคลื่นแรงโน้มถ่วง ลมกลางวัน-กลางคืน และกระบวนการไดนาโมในชั้น E ก็ยังมีบทบาทต่อโครงสร้างของไอโอโนสเฟียร์ได้อย่างมีนัยสำคัญ [20], [8]

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ foF2 และ hmF2 ในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกในปี พ.ศ. 2561 โดยพิจารณาตามช่วงเวลาแบบรายวัน รายเดือน และรายฤดูกาล (2) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่ากลางของ foF2 และ hmF2 ระหว่างช่วงเวลากลางวันและกลางคืน (3) เปรียบเทียบค่า hmF2 ที่สังเกตได้กับค่าที่ได้จากแบบจำลอง International Reference Ionosphere (IRI) เพื่อประเมินความถูกต้องของ

แบบจำลองในสภาวะกิจกรรมสุริยะต่ำ ผลการวิจัยในครั้งนี้จะช่วยเสริมสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของไอโอโนสเฟียร์ในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร

2. ขอบเขตงานวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นวิเคราะห์พฤติกรรมของตัวแปรที่สนใจคือค่า foF2 และ hmF2 จากแหล่งข้อมูลคือสถานี Ionosonde รหัส BVJ03 ที่ตั้งอยู่ ณ เมืองโบอาวิสตา (Boa Vista) ประเทศบราซิล ซึ่งมีละติจูด 2.8°S ลองจิจูด 60.7°W และละติจูดแม่เหล็ก 9.14°S โดยมีเวลาท้องถิ่น (Local Time; LT) เท่ากับ UTC-4 (Coordinated Universal Time-4) ใช้ข้อมูลตลอดปี พ.ศ. 2561 โดยการวัดข้อมูลตัวแปรซึ่งมีความละเอียดราย 10 นาที (ค่าคาดหวัง 144 จำนวนต่อวัน) จำนวนข้อมูลทั้งหมดก่อนลบค่าผิดปกติตัวแปรละ 35,983 จำนวน และหลังจากลบค่าผิดปกติเหลือข้อมูลตัวแปรละ 35,749 จำนวน แบ่งเป็นจำนวนข้อมูลตอนกลางวันและกลางคืนเป็น 18,882 และ 16,867 จำนวน ตามลำดับ โดยแสดงข้อมูลเป็นรายเดือนและรายฤดูกาล (ซีกโลกใต้) ดังตารางที่ 1 ทั้งนี้ไม่มีการบันทึกข้อมูลในช่วงวันที่ 1 สิงหาคม - 16 กันยายน พ.ศ. 2561

ตารางที่ 1 จำนวนข้อมูลของ foF2 และ hmF2 จำแนกรายเดือนและรายฤดูกาลตลอดปี พ.ศ. 2561

ฤดูกาล	ฤดูร้อน			ฤดูใบไม้ร่วง			ฤดูหนาว		ฤดูใบไม้ผลิ		
เดือน	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.
จำนวนข้อมูล	2,421	3,944	3,550	3,892	3,565	3,782	3,254	2,663	1,682	3,656	3,340

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง foF2 และ hmF2

ค่า foF2 (MHz) คือความถี่สูงสุดของคลื่นวิทยุที่สะท้อนจากชั้น F2 โดยไม่ทะลุผ่าน ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุด ค่า foF2 ผันแปรตามกระบวนการไอออไนซ์จากรังสี EUV และ X-ray ของดวงอาทิตย์ โดยสูงในช่วงกลางวันและฤดูร้อน และลดลงในช่วงกลางคืนและฤดูหนาว [21], [22]

ค่า hmF2 (km) คือความสูงที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดในชั้น F2 (ประมาณ 250-450 km) ซึ่งผันแปรตามพลวัตบรรยากาศ ได้แก่ ลมแนวดิ่ง สนามไฟฟ้า และการไหลของพลาสมา ช่วงกลางวันบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก พลาสมาจะยกตัวสูงขึ้นทำให้ hmF2 เพิ่มขึ้น ขณะที่กลางคืนจะลดลง [16], [23]

โดยทั่วไป foF2 และ hmF2 มีความสัมพันธ์เชิงบวก เมื่อกระบวนการไอออไนซ์เข้มข้นทั้งสองค่าจะเพิ่มขึ้นพร้อมกัน อย่างไรก็ตาม ในบางสถานการณ์ เช่น มีลมแนวดิ่งรุนแรง อาจพบความสัมพันธ์แบบกลับกัน โดย hmF2 เพิ่มขึ้น แต่ foF2 ลดลง [24] ความสัมพันธ์นี้อาจเป็นแบบเชิงเส้นในช่วงที่ไอโอโนสเฟียร์เสถียร แต่มักเป็นแบบไม่เชิงเส้นโดยเฉพาะในช่วงกลางคืนหรือเมื่อมีความปั่นป่วนของสภาพอวกาศ [9]

3.2 การกระจายตัวและรูปแบบตามช่วงเวลาของ foF2 และ hmF2

การกระจายตัวของ foF2 และ hmF2 ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ F2 มีรูปแบบที่แตกต่างกันตามพื้นที่ภูมิศาสตร์และระดับความผันแปรของกิจกรรมสุริยะ โดยเฉพาะในช่วงกิจกรรมสุริยะต่ำ ความสัมพันธ์ระหว่าง foF2 กับดัชนีกิจกรรมสุริยะต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลและละติจูด [3] การตอบสนองของพลาสมาในชั้น F2 มีการหน่วงเวลาหลายวันจากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ดวงอาทิตย์ 27 วัน [2] การกระจายตัวนี้ยังได้รับอิทธิพลจากกระแสไฟฟ้าในชั้นไดนาโม (Dynamo Currents) ที่มีความซับซ้อนในบริเวณเส้นศูนย์สูตร [6] ในช่วงกิจกรรมสุริยะต่ำ ความผันแปรของ hmF2 มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบที่แตกต่างจากช่วงกิจกรรมสุริยะสูง [19] การเปลี่ยนแปลงตาม

ฤดูกาลและรายวันของ foF2 ในช่วงกิจกรรมสุริยะต่ำจะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนมากขึ้น [23] และมีผลจากปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาและแรงโน้มถ่วงจากชั้นบรรยากาศส่วนล่างที่ส่งผลต่อการหมุนเวียนในเทอร์โมสเฟียร์ [8]

3.3 การทดสอบทางสถิติด้วย Mann-Whitney U test

สถิติ Mann-Whitney U test เป็นการทดสอบทางสถิติแบบไม่อิงพารามิเตอร์ (Non-parametric Test) ที่ใช้เปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างสองกลุ่มที่เป็นอิสระต่อกัน โดยไม่จำเป็นต้องมีข้อตกลงเบื้องต้นว่าข้อมูลต้องมีการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ทั้งนี้สถิติ Mann-Whitney U Test ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้แทนสถิติ t-test ในกรณีที่ข้อมูลไม่เป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้นของการทดสอบแบบอิงพารามิเตอร์ คือข้อมูลไม่แจกแจงปกติ (ไม่เป็นรูประฆังคว่ำ) แทนที่จะใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เหมือนในสถิติ t-test การทดสอบนี้จะใช้การจัดอันดับ (Ranks) ของข้อมูล ข้อมูลจากทั้งสองกลุ่มจะเรียงลำดับจากน้อยไปมาก แล้วให้อันดับในแต่ละค่า โดยค่าที่เท่ากันจะจัดให้เป็นอันดับเฉลี่ย หลังจากนั้นจะคำนวณผลรวมของอันดับ (Sum of Ranks) สำหรับแต่ละกลุ่ม ซึ่งการคำนวณค่า U สำหรับแต่ละกลุ่ม [25] โดยใช้สมการที่ 1 และ 2 ดังนี้

$$U_1 = n_1n_2 + n_1(n_1+_1)/2 - R_1 \quad (1)$$

$$U_2 = n_1n_2 + n_2(n_2+_1)/2 - R_2 \quad (2)$$

โดยที่ n_1 คือจำนวนข้อมูลในกลุ่มที่ 1, n_2 คือจำนวนข้อมูลในกลุ่มที่ 2, R_1 คือผลรวมของอันดับในกลุ่มที่ 1 และ R_2 คือผลรวมของอันดับในกลุ่มที่ 2 โดยค่า U ที่ใช้ในการตัดสินใจทางสถิติคือค่าที่น้อยกว่าระหว่าง U_1 และ U_2 ค่า U ที่คำนวณได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าวิกฤติจากตาราง Mann-Whitney U โดยพิจารณาขนาดของกลุ่มตัวอย่างทั้งสอง ถ้าค่า U ที่คำนวณได้น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าวิกฤติ จะปฏิเสธสมมติฐานหลักซึ่งบ่งบอกว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มตัวอย่างทั้งสอง ข้อดีของสถิติ Mann-Whitney U Test คือไม่ต้องมีข้อตกลงเบื้องต้นเกี่ยวกับการแจกแจงของข้อมูล อีกทั้งยังเหมาะสำหรับข้อมูลที่มีลักษณะเบ้ (Skewed) หรือมีค่าผิดปกติ (Outliers) รวมทั้งสามารถใช้กับข้อมูลเชิงลำดับ (Ordinal Data) ได้ [25]

3.4 แบบจำลอง IRI-2020

IRI เป็นแบบจำลองเชิงประจักษ์สำหรับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของโลกที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยรุ่นล่าสุดคือ IRI-2020 แบบจำลองนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในงานวิจัย และถือเป็นแบบจำลองมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง แบบจำลอง IRI-2020 ทำการผสมผสานข้อมูลจากการตรวจวัดภาคพื้นดินและจากอวกาศทั่วโลกเข้าด้วยกัน สามารถคำนวณค่าเฉลี่ยรายเดือนของพารามิเตอร์สำคัญในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้ทั่วโลก ที่ระดับความสูงตั้งแต่ 60 ถึง 20,000 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน โดยพารามิเตอร์เหล่านี้ประกอบด้วย ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (Electron Density) อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (Electron Temperature) อุณหภูมิของไอออน (Ion Temperature) และองค์ประกอบของไอออน (Ion Composition) เป็นต้น [16]

การปรับปรุงแบบจำลอง IRI-2020 ได้รวมคุณสมบัติใหม่หลายประการเข้าไว้ด้วยกันได้แก่ การประมาณค่าการเคลื่อนที่ของไอออนในบริเวณเส้นศูนย์สูตร ความน่าจะเป็นของการเกิดชั้น Spread-F และชั้น F1 ขอบเขตของแสงเหนือ (Auroral Boundaries) และปริมาณอิเล็กตรอนทั้งหมด (Total Electron Content) จากชั้นล่างของไอโอโนสเฟียร์ถึงระดับความสูงที่กำหนด [1] นอกจากนี้ยังได้รวมข้อมูลใหม่ที่แม่นยำเข้าไว้ด้วยกัน พร้อมทั้งใช้ประโยชน์จากข้อมูลเก่าย้อนหลังไปประมาณสองทศวรรษ ซึ่งมีความสำคัญต่อการพัฒนาแบบจำลอง IRI แบบเรียลไทม์ การเปรียบเทียบค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริงจะช่วยปรับปรุงความแม่นยำและขอบเขตการใช้งานของแบบจำลองให้ดียิ่งขึ้น [1]

4. การดำเนินการวิจัย

กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การรวบรวมข้อมูล การทำความสะอาดข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การทำนาย hmF2 ด้วยแบบจำลอง IRI-2020 และการเปรียบเทียบ hmF2 จากข้อมูลสังเกตการณ์และแบบจำลอง โดยเริ่มจากการตรวจจับและลบค่าผิดปกติรวมถึงการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล จากนั้นเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างของ foF2 และ hmF2 ด้วยแผนภาพการกระจาย (Scatter Plot) และวิเคราะห์ความผันแปรตามฤดูกาลโดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 4 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูร้อน ฤดูใบไม้ร่วง ฤดูหนาว และฤดูใบไม้ผลิ เปรียบเทียบพฤติกรรมของ foF2 และ hmF2 ระหว่างเวลากลางวันและกลางคืน โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลากลางวัน (06:00–18:00 LT) และช่วงเวลากลางคืน (18:00–06:00 LT) เปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างด้วยแผนภูมิกล่อง (Box Plot)

การเปรียบเทียบค่า hmF2 ที่ได้จากแบบจำลองมาตรฐาน IRI-2020 กับข้อมูลที่สังเกตจากสถานี BVJ03 เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง การเปรียบเทียบทั้งในช่วงกลางวันและกลางคืน ดำเนินการผ่านแผนภาพความหนาแน่นและการแจกแจงของค่าความคลาดเคลื่อน โดยใช้ข้อมูลจากการสุ่มตัวอย่างแบบเป็นระบบ (Systematic Sampling) และเลือกข้อมูลรายชั่วโมงที่ช่วงเวลาคงที่ (Fixed Interval Sampling) หากข้อมูลในชั่วโมงใดไม่สมบูรณ์ข้อมูลจะถูกตัดออก

การเปรียบเทียบค่า hmF2 ที่สังเกตได้จริง (Observed) กับค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลอง IRI-2020 (Predicted) โดยวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองด้วยค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error; RMSE) ดังสมการที่ 3 นอกจากนี้ยังได้มีการสร้างกราฟความหนาแน่น (Density Plot) และวิเคราะห์การกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual Distribution) จากสมการที่ 4 [20]

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\mathrm{Observed}_i - \mathrm{Predicted}_i)^2}{n}} \tag{3}$$

$$\mathrm{Residual}_i = \mathrm{Observed}_i - \mathrm{Predicted}_i \tag{4}$$

เมื่อ $\mathrm{Residual}_i$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายในช่วงเวลา i และ n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด (ช่วงเวลาที่มีการเปรียบเทียบ) ทั้งนี้ในปี พ.ศ. 2561 เป็นช่วงที่มีกิจกรรมสุริยะอยู่ในระดับต่ำจึงไม่มีเหตุการณ์พายุแม่เหล็กโลกรุนแรง การศึกษานี้จึงไม่รวมผลกระทบจากพายุแม่เหล็กโลกในการพิจารณา

5. ผลการวิจัย

5.1 การผันแปรรายวันและรายเดือน

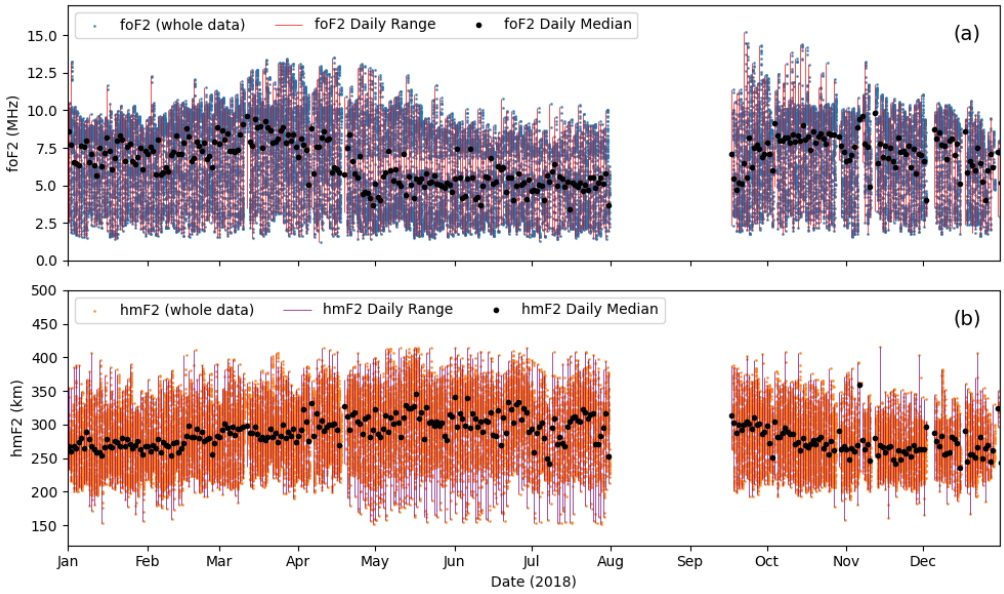
การวิเคราะห์และแสดงสถิติพรรณนาของข้อมูลแสดงไว้ในตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นแสดงค่า foF2 ที่ต่ำสุดคือ 1.25 MHz ขณะที่ค่าสูงสุดอยู่ที่ 15.2 MHz บ่งชี้ให้เห็นว่า foF2 สามารถลดลงได้อย่างมากในเวลากลางคืน และเพิ่มขึ้นในช่วงเวลากลางวัน ค่า foF2 มีมัธยฐานอยู่ที่ประมาณ 6.85 MHz การวิเคราะห์ช่วงควอร์ไทล์ (IQR) แสดงว่า ข้อมูลร้อยละ 50 อยู่ในช่วงระหว่าง 4.30 MHz ถึง 8.68 MHz ส่วนค่า hmF2 มีค่าต่ำที่สุดคือ 152.8 กิโลเมตร ขณะที่ค่าสูงสุดอยู่ที่ 414.9 กิโลเมตร มีมัธยฐานอยู่ที่ 282.9 กิโลเมตร การวิเคราะห์ IQR แสดงว่าข้อมูลร้อยละ 50 อยู่ในช่วงระหว่าง 251.1 กิโลเมตร ถึง 316.7 กิโลเมตร

จากรูปที่ 1 แสดงการผันแปรของพารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์ F2 ตลอดปี พ.ศ. 2561 ในช่วงกิจกรรมสุริยะต่ำ โดยรูปที่ 1 (a) ค่า foF2 มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจากประมาณ 8-9 MHz ในช่วงเดือนมกราคม-เมษายน ลงมาเหลือ 5-6 MHz ในช่วงเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม จากนั้นเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงเดือนกันยายน-ธันวาคม ขณะที่รูปที่ 1 (b) ค่า hmF2 แสดงการผันแปรที่ตรงกันข้าม โดยมีค่าต่ำสุดประมาณ 250-270 km ในช่วงเดือนมกราคม-เมษายน แล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นสู่ค่าสูงสุดประมาณ 310-330 km ในช่วงเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม ก่อนลดลงอีกครั้งในช่วงปลายปี ลักษณะการผันแปรนี้สอดคล้องกับปรากฏการณ์ Equinox Anomaly ที่พบในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร โดยมีค่า foF2 สูงสุดและ hmF2 ต่ำสุดในช่วง Equinox (มีนาคม-เมษายน และ กันยายน-ตุลาคม) และมีลักษณะตรงกันข้ามในช่วง Solstice (มิถุนายน-สิงหาคม และ ธันวาคม-กุมภาพันธ์) [23], [26], [13]

ค่า foF2 มีการแจกแจงแบบหลายยอด (Multimodal) ดังรูปที่ 2 (a) แสดง 3 จุดยอดที่ประมาณ 3, 6, และ 8 MHz ซึ่งสะท้อนถึงการผันแปรตามฤดูกาลที่แตกต่างกัน ขณะที่ hmF2 ในรูปที่ 2 (b) มีการแจกแจงแบบยอดเดียว (Unimodal) ที่ใกล้เคียงกับการแจกแจงปกติ โดยมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 280 km การทดสอบด้วย Q-Q plot ดังรูปที่ 2 (c) แสดงว่า foF2 มีการเบี่ยงเบนจากเส้นตรงสีแดงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงค่าต่ำและสูง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าข้อมูลไม่มีการแจกแจงปกติ ในขณะที่รูปที่ 2 (d) hmF2 มีการแจกแจงที่ใกล้เคียงกับการแจกแจงปกติมากกว่า แม้จะมีการเบี่ยงเบนเล็กน้อยในช่วงขอบ ผลการทดสอบการแจกแจงของข้อมูลด้วยวิธี Shapiro–Wilk test พบว่า foF2 ได้ค่า W = 0.969 และสำหรับ hmF2 ได้ค่า W = 0.992 โดยทั้งสองตัวแปรมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าข้อมูลทั้ง foF2 และ hmF2 ไม่เป็นการแจกแจงปกติ และจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์แบบไม่อิงพารามิเตอร์

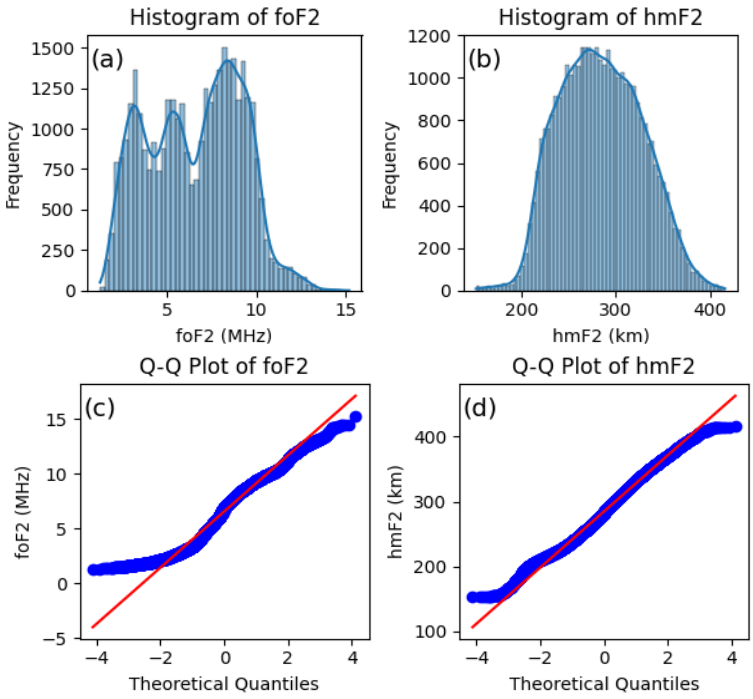
ตารางที่ 2 สถิติพรรณนาของค่า foF2 และ hmF2 ตลอดปี พ.ศ. 2561

Parameter	count*	min	25%	50%	75%	max
foF2	35,749	1.25	4.30	6.85	8.68	15.2
hmF2	35,749	152.3	251.1	282.9	316.7	414.5

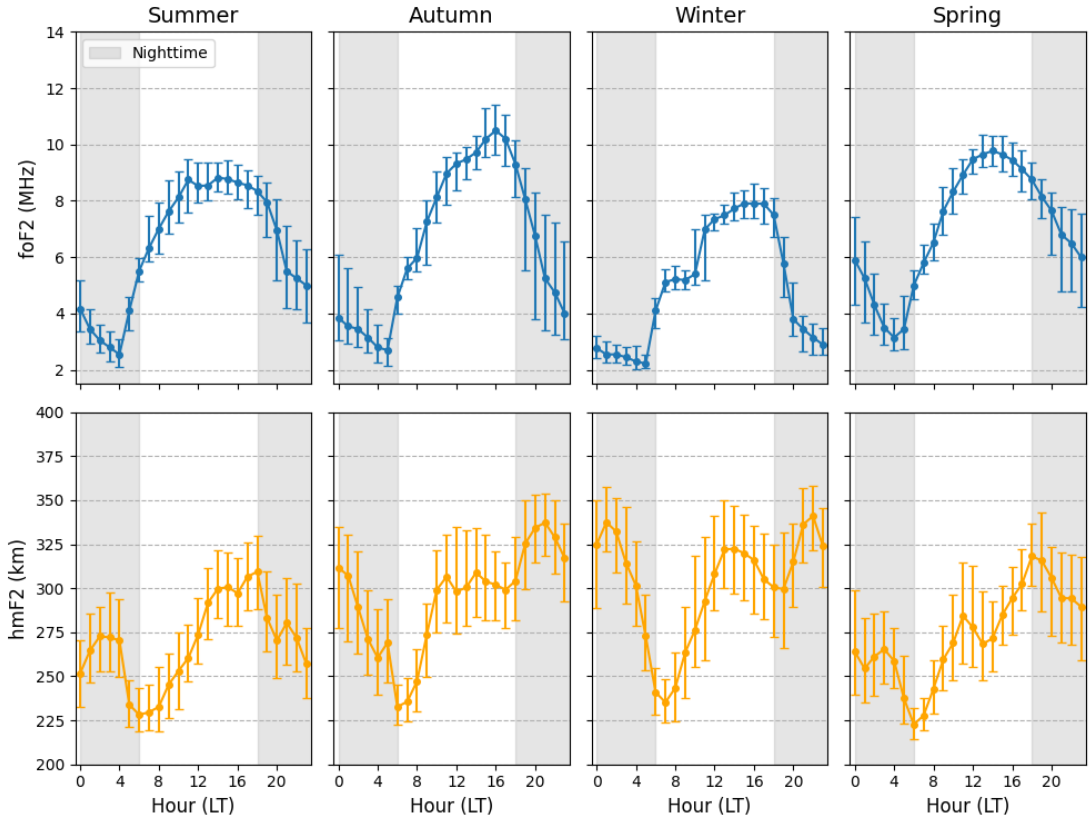


รูปที่ 1 การผันแปรรายวันและรายเดือนของ (a) foF2 และ (b) hmF2 ตลอดปี พ.ศ. 2561

***หมายเหตุ** ไม่มีการบันทึกข้อมูลในช่วงวันที่ 1 สิงหาคม – 16 กันยายน พ.ศ. 2561*



รูปที่ 2 การแจกแจงสถิติของ (a) foF2 และ (b) hmF2 และการทดสอบการแจกแจงปกติของ (c) foF2 และ (d) hmF2 ตลอดปี พ.ศ. 2561



รูปที่ 3 การผันแปรรายวันจำแนกตามฤดูกาลของ (a) foF2 และ (b) hmF2 ตลอดปี พ.ศ. 2561

5.2 การผันแปรรายวันจำแนกตามฤดูกาล

จากรูปที่ 3 แสดงการผันแปรรายวันของค่า foF2 และความสูงสูงสุด hmF2 ในแต่ละฤดูกาลตลอดปี พ.ศ. 2561พบว่า foF2 มีรูปแบบการผันแปรที่คล้ายคลึงกันในทุกฤดูกาล โดยมีค่าต่ำสุดในช่วงกลางคืนและก่อนพระอาทิตย์ขึ้น(02:00-06:00 LT) ประมาณ 2-3 MHz จากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังพระอาทิตย์ขึ้น และมีค่าสูงสุดในช่วงบ่าย (13:00-15:00 LT) โดยฤดูใบไม้ร่วงมีค่าสูงสุดประมาณ 11 MHz รองลงมาคือฤดูใบไม้ผลิ (~10 MHz) ฤดูร้อน (~9 MHz) และฤดูหนาว (~8 MHz) ตามลำดับ ขณะที่ hmF2 แสดงรูปแบบที่ซับซ้อนกว่า โดยมีค่าต่ำสุดในช่วงเช้า (06:00-10:00 LT) ประมาณ 220-250 km และเพิ่มขึ้นสู่ค่าสูงสุดในช่วงเย็น (16:00-20:00 LT) ประมาณ 320-350 km ซึ่งฤดูใบไม้ร่วงมีค่า hmF2 สูงสุด รองลงมาคือฤดูหนาว ฤดูร้อน และฤดูใบไม้ผลิ ลักษณะการผันแปรนี้สอดคล้องกับกลไกของการยกตัวของชั้น F2 ในช่วงเย็น (Pre-reversal Enhancement) [1], [17], [15]

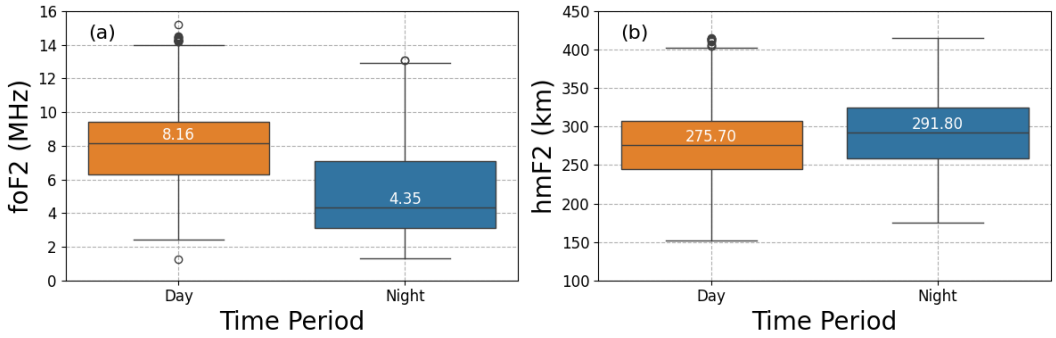
5.3 ความแตกต่างระหว่างกลางวันกับกลางคืน

รูปที่ 4 (a) ค่า foF2 แสดงความแตกต่างเด่นชัด โดยกลางคืนมีค่ามัธยฐาน 4.35 MHz และการกระจายแคบกว่า ขณะที่กลางวันมีค่ามัธยฐาน 8.16 MHz สูงกว่าเกือบสองเท่าและกระจายกว้างกว่า พร้อมมีค่าผิดปกติที่สูงได้ถึง ~15 MHz ส่วนในรูปที่ 4 (b) ค่า hmF2 มีช่องว่างระหว่างกลางวัน–กลางคืนเล็กกว่า โดยค่ามัธยฐานกลางคืน (~291.80 km) สูงกว่ากลางวันเล็กน้อย (~275.70 km) สอดคล้องกับลักษณะการยกตัวของชั้น F2 ในช่วงกลางคืน การทดสอบ Mann–Whitney U ยืนยันความแตกต่างของทั้งสองพารามิเตอร์ระหว่างกลางวันและกลางคืนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (foF2: U = 260,157,483.00; hmF2: U = 127,833,138.50; p-value ทั้งคู่ < 0.00001) ซึ่งสะท้อนว่ากลไกควบคุมของ foF2 และ hmF2 แตกต่างกัน โดย foF2 ไวต่อรังสีสุริยะมากกว่าจึงผันแปรกลางวัน–กลางคืนชัดเจน ขณะที่ hmF2 ผันแปรน้อยกว่า [3], [26], [17]

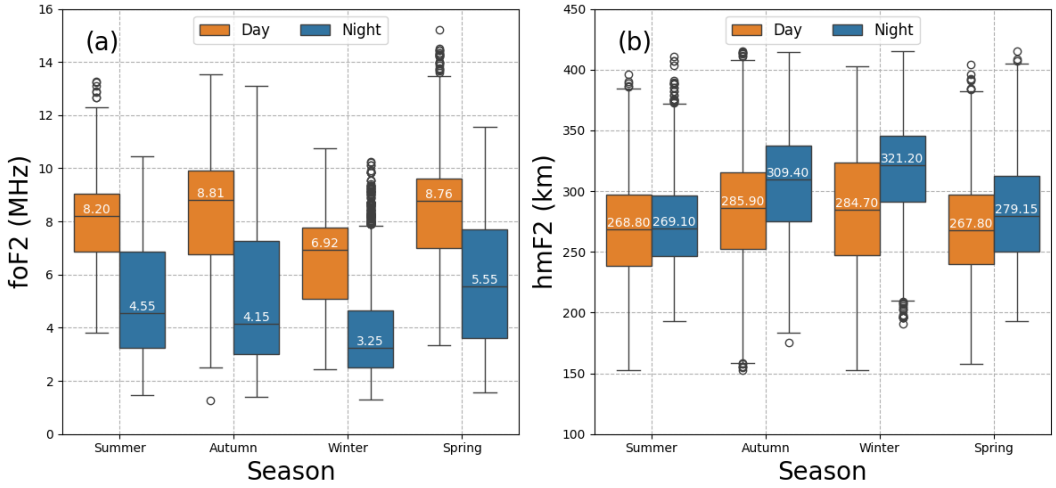
สำหรับผลเชิงฤดูกาลในรูปที่ 5 การทดสอบ Mann–Whitney U พบความแตกต่างระหว่างกลางวันและกลางคืนอย่างมีนัยสำคัญในทุกฤดูกาลทั้งสำหรับ foF2 และ hmF2 (Summer: foF2 $p < 0.00001$, hmF2 $p = 0.00047$; Autumn: ทั้งคู่ $p < 0.00001$; Winter: ทั้งคู่ $p < 0.00001$; Spring: ทั้งคู่ $p < 0.00001$) [11] โดยภาพรวม foF2 ยังคงมีค่ากลางวันสูงกว่ากลางคืนชัดเจนทุกฤดู ซึ่งสอดคล้องกับความไวของ foF2 ต่อการไอออไนซ์จากรังสีสุริยะ [3, 4, 15, 24] ขณะที่ hmF2 ในช่วงกลางคืนมีแนวโน้มสูงกว่าเล็กน้อยและมีความผันแปรทับซ้อนระหว่างสองช่วงเวลามากกว่า foF2 [6], [8], [17]

ในระดับรายเดือน (รูปที่ 6) ผลการทดสอบยืนยันว่า foF2 แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลางวันและกลางคืนในทุกเดือนที่พิจารณา (เช่น มกราคม–กรกฎาคม, กันยายน–ธันวาคม; $p < 0.00001$ ตลอด) โดยยังคงรูปแบบ “กลางวันสูงกว่า–กลางคืนต่ำกว่า” อย่างสม่ำเสมอ ตรงกันข้าม hmF2 แม้จะแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในหลายเดือน (กุมภาพันธ์, มีนาคม, เมษายน, พฤษภาคม, มิถุนายน, กรกฎาคม, กันยายน, ตุลาคม; $p < 0.00001$) แต่มีบางเดือนที่ไม่พบความแตกต่างเชิงสถิติ ได้แก่ มกราคม ($p = 0.46$), พฤศจิกายน ($p = 0.37$) และธันวาคม ($p = 0.48$) สะท้อนว่ากลางวัน–กลางคืนของความสูงชั้น F2 ในช่วงต้นปีและปลายปีมีความต่างเล็กเมื่อเทียบกับความผันแปรภายในช่วงกลางปี ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะความผิดปกติในฤดูหนาว (Winter Anomaly) ของชั้น F2 [25], [26], [13]

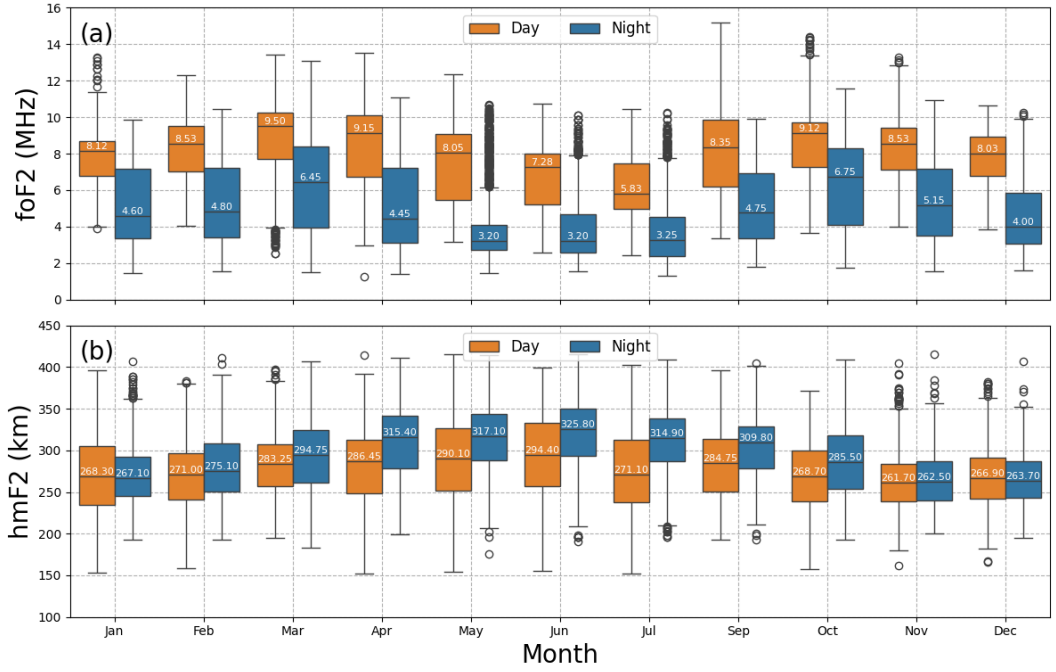
ภาพรวมตลอดปี ฤดูกาล และรายเดือนแสดงผลลัพธ์ตรงกันว่า foF2 ถูกควบคุมโดยการไอออไนซ์จากรังสีสุริยะเป็นหลัก จึงมีความต่างกลางวัน–กลางคืนสูงและเสถียร ขณะที่ hmF2 ได้รับอิทธิพลร่วมจากพลวัตบรรยากาศสู่ไอโอโนสเฟียร์ ทำให้ความต่างกลางวัน–กลางคืนโดยรวมเล็กกว่าและไม่เด่นชัดในบางเดือน [6], [8], [17] ผลการทดสอบแบบไม่อิงพารามิเตอร์เหมาะสมกับข้อมูลที่ไม่เป็นการแจกแจงปกติ [25]



รูปที่ 4 ความแตกต่างระหว่างกลางวันและกลางคืนของข้อมูลตลอดปี พ.ศ. 2561 (a) foF2 และ (b) hmF2



รูปที่ 5 ความแตกต่างระหว่างกลางวันและกลางคืนของข้อมูลรายฤดูกาล (a) foF2 และ (b) hmF2



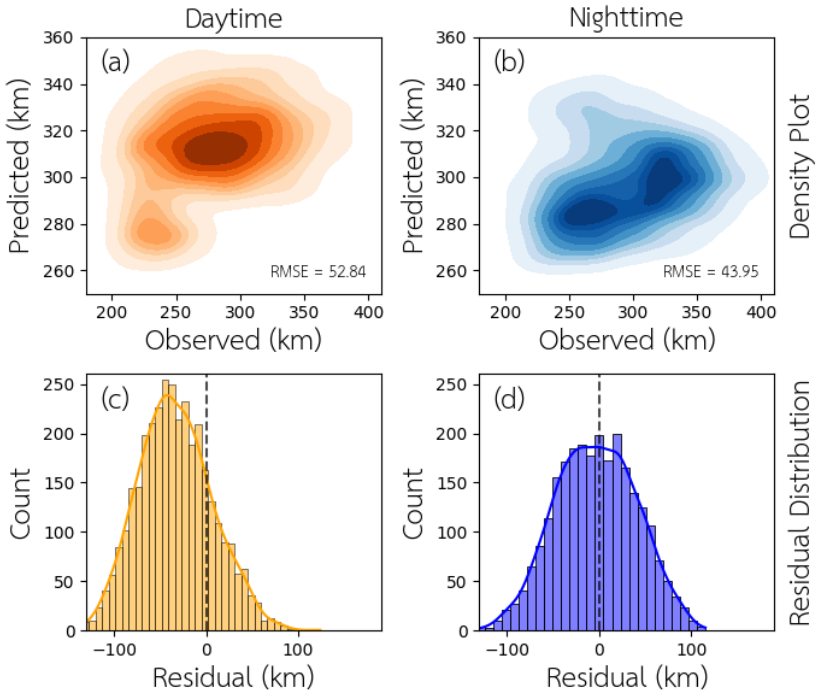
รูปที่ 6 ความแตกต่างระหว่างกลางวันและกลางคืนของข้อมูลรายเดือน (a) foF2 และ (b) hmF2

5.4 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลสังเกตการณ์กับค่าทำนายโดยแบบจำลอง IRI-2020

งานวิจัยในหัวข้อนี้ใช้การสุ่มตัวอย่างแบบเป็นระบบ โดยเป็นวิธีที่จัดเรียงข้อมูลประชากรไว้อย่างเป็นลำดับ จากนั้นแบ่งประชากรออกเป็นช่วงที่มีขนาดเท่ากัน โดยช่วงดังกล่าวคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างจำนวนหน่วยตัวอย่างที่ต้องการกับจำนวนประชากรทั้งหมด เริ่มต้นด้วยการสุ่มเลือกหน่วยตัวอย่างแรก แล้วเลือกหน่วยถัดไปตามระยะช่วงที่กำหนดไว้จนได้ครบตามจำนวนที่ต้องการ ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการเลือกข้อมูลรายชั่วโมงที่ช่วงเวลาคงที่ แสดงจำนวนที่สุ่มตัวอย่างได้ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่า hmF2 ที่วัดจากสถานี Ionosonde BVJ03 กับแบบจำลอง IRI-2020 ในรูป Density Plot ช่วงกลางวัน (7a) พบข้อมูลแจกแจงยอดเดียวแต่กระจายกว้างรอบเส้นแนวทแยง (RMSE = 52.84 km) ขณะที่ช่วงกลางคืน (7b) มีการกระจายแบบวงรีที่หนาแน่นกว่าและแม่นยำกว่า (RMSE = 43.95 km) บ่งชี้ว่า IRI-2020 ทำนายค่า hmF2 ช่วงกลางคืนได้ดีกว่าช่วงกลางวัน

การวิเคราะห์ Residual Distribution (7c-d) แสดงการกระจายใกล้เคียงปกติในทั้งสองช่วง โดยค่าเฉลี่ย Residual ใกล้ศูนย์ สะท้อนว่าแบบจำลองไม่มี Systematic Bias อย่างไรก็ตาม RMSE สูงกว่าในช่วงกลางวันอาจเกิดจากความซับซ้อนของกระบวนการฟิสิกส์เมื่อมีรังสีสุริยะ [23], [8]

Independent Samples t-test แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.001$) ระหว่างข้อมูลสังเกตและแบบจำลอง โดยช่วงกลางวันมีค่าเฉลี่ย hmF2 จากข้อมูลสังเกต (278.08 km, n=3,421) ต่ำกว่าแบบจำลอง (311.68 km) ถึง 33.6 km ($t=-42.227$) ขณะที่ช่วงกลางคืนแตกต่างเพียง 3.3 km โดยข้อมูลสังเกต (293.45 km, n=2,545) ต่ำกว่าแบบจำลอง (296.78 km, $t=-3.618$) ข้อมูลสังเกตมีการกระจายสูงกว่า (SD ≈ 42-43 km) เทียบกับแบบจำลอง (SD ≈ 18-19 km) ยืนยันว่า IRI-2020 ประมาณค่า hmF2 สูงเกินไปในช่วงกลางวัน [12, 13, 18]



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่า hmF2 ที่วัดได้จากสถานี Ionosonde BVJ03 และค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลอง IRI-2020 แยกตามช่วงเวลากลางวันและกลางคืน โดย (a) และ (b) เป็นกราฟความหนาแน่น ส่วน (c) และ (d) แสดงการแจกแจงของค่าความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ 3 สถิติพรรณนาของค่า hmF2 (km) แบบรายชั่วโมงที่วัดได้จากสถานี Ionosonde BVJ03 และค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลอง IRI-2020 โดยแยกตามช่วงเวลากลางวันและกลางคืน

Period	Resources	Count*	min	25%	50%	75%	max
Daytime	BVJ03	3421	154.4	244.9	275.7	308.7	413.9
	IRI-2020	3421	264.0	301.0	313.0	325.0	351.0
Nighttime	BVJ03	2545	189.1	259.9	291.8	325.9	409.5
	IRI-2020	2545	264.0	283.0	296.0	309.0	367.0

***หมายเหตุ** งานวิจัยนี้เลือกข้อมูลรายชั่วโมงที่ช่วงเวลาคงที่ หากข้อมูลในชั่วโมงใดไม่สมบูรณ์ข้อมูลจะถูกตัดออก*

การศึกษาของ Venkatesh และคณะ [16] พบว่าแบบจำลอง IRI มีแนวโน้มประมาณค่า hmF2 สูงเกินไปในบริเวณอินเดียและละติจูดต่ำ โดยเฉพาะในช่วงกลางวันที่มีกระบวนการไอออไนเซชันที่ซับซ้อน ในทำนองเดียวกัน Wang และคณะ [22] รายงานผลการเปรียบเทียบที่คล้ายคลึงกันในเอเชียตะวันออก ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองยังคงมีข้อจำกัดในการจับการผันแปรท้องถิ่นของ hmF2 โดยเฉพาะในช่วงที่มีกิจกรรมไอโอโนสเฟียร์ที่แข็งแกร่ง เช่น Pre-reversal Enhancement และการขับเคลื่อนจากลมเทอร์โมสเฟียร์ ซึ่งมีผลต่อการกระจายความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้น F2 [19], [15]

6. อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยแสดงลักษณะการผันแปรรายเดือนของพารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์ที่สอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้รับการยอมรับ โดย foF2 ลดลงจากช่วงเดือนแรกของปีมาสู่ช่วงกลางปีแล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงปลายปี สอดคล้องกับปรากฏการณ์ Equinox Anomaly ที่พบในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร [26], [13] ขณะที่ hmF2 มีรูปแบบตรงกันข้ามกับ foF2 ซึ่งสะท้อนความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดและความสูงของชั้น F2 [16], [22] การวิเคราะห์ทางสถิติชี้ให้เห็นว่า foF2 มีการกระจายแบบหลายยอดที่ไม่สอดคล้องกับการแจกแจงปกติ บ่งชี้ถึงความซับซ้อนของกระบวนการทางฟิสิกส์ [9] ส่วน hmF2 มีการกระจายที่ใกล้เคียงกับการแจกแจงปกติมากกว่า แสดงถึงกลไกการควบคุมที่มีความเสถียรกว่า [11]

การผันแปรรายวันชี้ชัดว่า foF2 ต่ำสุดในช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (02:00–06:00 LT) และสูงสุดช่วงบ่าย (13:00–15:00 LT) ซึ่งสอดคล้องกับผลของการไอออไนซ์จากรังสีสุริยะ (Photo-Ionization) และการคืนตัวของอิเล็กตรอนหลังพระอาทิตย์ขึ้น foF2 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะที่ hmF2 มีพฤติกรรมซับซ้อนกว่า-ต่ำสุดในช่วงเช้า (06:00–10:00 LT) และเพิ่มขึ้นในช่วงเย็น (16:00–20:00 LT) ซึ่งสอดคล้องกับปรากฏการณ์ Pre-reversal Enhancement และการยกตัวของชั้น F2 ในช่วงค่ำที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและการขับเคลื่อนจากลมกลางชั้นบรรยากาศ [3], [23], [17]

จากการเปรียบเทียบระหว่างกลางวันและกลางคืน พบว่า foF2 มีความแตกต่างเด่นชัดระหว่างสองช่วงเวลา โดยกลางวันมีค่ามัธยฐานสูงกว่ากลางคืนเกือบสองเท่าและมีการกระจายกว้างกว่า พร้อมค่าผิดปกติที่สูงถึง ~15 MHz [15, 25] ขณะที่ hmF2 มีความแตกต่างระหว่างกลางวันและกลางคืนเล็กกว่า โดยค่ามัธยฐานกลางคืนสูงกว่ากลางวันเล็กน้อย สอดคล้องกับลักษณะการยกตัวของชั้น F2 ในเวลากลางคืน [16], [22], [19] ผลการทดสอบ Mann–Whitney U ทั้งปี รวมถึงในระดับฤดูกาล ยืนยันความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกฤดูสำหรับทั้งสองพารามิเตอร์ (ยกเว้นบางเดือนในกรณีของ hmF2 เช่น มกราคม พฤศจิกายน และธันวาคม) [25] ลักษณะดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า foF2 ถูกควบคุมโดยการไอออไนซ์จากรังสีสุริยะเป็นหลัก จึงมีความแตกต่างกลางวัน–กลางคืนสูงและสม่ำเสมอ [2], [3], [23], [18] ในขณะที่ hmF2 ได้รับอิทธิพลร่วมจากพลวัตบรรยากาศ เช่น ลมเทอร์โมสเฟียร์

กระแสไดนาโม และคลื่นโน้มถ่วง [6], [8], [17] ส่งผลให้ความต่างกลางวัน–กลางคืนโดยรวมมีขนาดเล็กกว่าและไม่เด่นชัดในบางเดือน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะความผิดปกติในฤดูหนาวของชั้น F2 [26], [13]

การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลสังเกตการณ์และค่าทำนายจากแบบจำลอง IRI-2020 แสดงถึงข้อจำกัดและประสิทธิภาพของแบบจำลองในการทำนายพารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์ [1], [10] แบบจำลองสามารถทำนายค่า hmF2 ในช่วงกลางคืนได้แม่นยำกว่าช่วงกลางวัน เนื่องมาจากความซับซ้อนของกระบวนการทางฟิสิกส์ในช่วงที่มีรังสีสุริยะ [23] การที่แบบจำลองมีแนวโน้มประมาณค่า hmF2 สูงเกินไปโดยเฉพาะในช่วงกลางวันแสดงว่าแบบจำลองยังไม่สามารถจำลองความซับซ้อนของกระบวนการทางฟิสิกส์ในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรได้อย่างสมบูรณ์ [16], [22]

ความแตกต่างระหว่างค่าทำนายและข้อมูลสังเกตการณ์ที่พบในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับการศึกษาอื่นๆ ที่ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลอง IRI ยังคงมีข้อจำกัดในการทำนายพารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์ในบริเวณเขตร้อนและใกล้เส้นศูนย์สูตร [27], [15] การที่แบบจำลองไม่สามารถจับความผันแปรตามธรรมชาติของข้อมูลได้ดีเท่าที่ควร แสดงถึงความจำเป็นในการปรับปรุงแบบจำลองให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยเฉพาะสำหรับการใช้งานในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรและในช่วงที่มีกิจกรรมสุริยะต่ำ [10]

7. ข้อเสนอแนะ

แบบจำลอง IRI-2020 ประเมินค่า hmF2 สูงเกินไปในช่วงกลางวัน จึงควรพัฒนาแบบจำลองเชิงประจักษ์ใหม่ที่เหมาะสมกับบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร งานวิจัยครั้งต่อไปควรศึกษาข้อมูลหลายปีเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของวัฏจักรสุริยะ รวมการพิจารณาดัชนีสภาพอวกาศเพื่อประเมินผลของกิจกรรมสุริยะและพายุแม่เหล็กโลก และเปรียบเทียบข้อมูล Ionosonde กับข้อมูลดาวเทียมเพื่อยืนยันความถูกต้องและปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลองทำนาย

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทีมงาน DIDBase Fast Station List เป็นอย่างสูงสำหรับข้อมูล foF2 และ hmF2 จากสถานี Ionosonde BVJ03 และขอขอบคุณ Community Coordinated Modeling Center (CCMC) สำหรับการใช้งานข้อมูลในแบบจำลอง IRI-2020

9. เอกสารอ้างอิง

[1] D. Bilitza, M. Pezzopane, V. Truhlik, D. Altadill, B. W. Reinisch, and A. Pignalberi, “The international reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark,” *Reviews of Geophysics,* vol. 60, no. 4, Dec. 2022, Art. no. e2022RG000792, doi: 10.1029/2022RG000792.

[2] D. Ren, J. Lei, W. Wang, A. Burns, X. Luan, and X. Dou, “Does the peak response of the ionospheric F2 region plasma lag the peak of 27‐day solar flux variation by multiple days?,” *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 123, no. 9, pp. 7906–7916, Sep. 2018, doi: 10.1029/2018JA025835.

[3] J. Laštovička and D. Burešová, “Relationships between foF2 and various solar activity proxies,” *Space Weathe*r, vol. 21, no. 4, Apr. 2023, Art. no. e2022SW003359, doi: 10.1029/2022SW003359.

[4] L. Gu *et al*., “Large anomalies in future extreme precipitation sensitivity driven by atmospheric dynamics,” *Nature Communications*, vol. 14, Jun. 2023, Art. no. 3197, doi: 10.1038/s41467-023-39039-7.

[5] E. A. Kumar and S. Kumar, “Geomagnetic storm effect on F2-region ionosphere during 2012 at

low-and mid-latitude stations in the Southern Hemisphere," *Atmosphere*, vol. 13, no. 3, Mar. 2022, Art. no. 480, doi: 10.3390/atmos13030480.

[6] H. Lühr *et al*., "The interhemispheric and F region dynamo currents revisited with the swarm constellation," *Geophysical Research Letters*, vol. 42, no. 9, pp. 3069–3075, May 2015, doi: 10.1002/2015GL063662.

[7] M. Freeshah *et al*., "Analysis of atmospheric and ionospheric variations due to impacts of super typhoon Mangkhut (1822) in the northwest Pacific Ocean," *Remote Sens*, vol. 13, no. 4, Feb. 2021, Art. no. 661, doi: 10.3390/rs13040661.

[8] Y. Miyoshi and E. Yiğit, "Impact of gravity wave drag on the thermospheric circulation: Implementation of a nonlinear gravity wave parameterization in a whole-atmosphere model," *Annales Geophysicae*, vol. 37, pp. 955–969, 2019, doi: 10.5194/angeo-37-955-2019.

[9] M. Momeni and Y. Migoya-Orué, "Solar activity and ionospheric variation: A comprehensive study using hurst exponent and probability density functions analysis," *Advances in Space Research*, vol. 75, no. 10, pp. 7668–7683, May 2025, doi: 10.1016/j.asr.2025.02.060.

[10] T. V. Rao, M. Sridhar, D. V. Ratnam, P. B. S. Harsha, and I. Srivani, "A bidirectional long short-term memory-based ionospheric foF2 and hmF2 models for a single station in the low latitude region," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, 2022, Art. no. 8005405, doi: 10.1109/LGRS.2020.3045702.

[11] O. V. Mandrikova, N. V Fetisova, and Y. A. Polozov, "Method for Modeling of Ionospheric Parameters and Detection of Ionospheric Disturbances," *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, vol. 61, no. 7, pp. 1094–1105, Aug. 2021, doi: 10.1134/S0965542521070137.

[12] H. Kil, L. J. Paxton, W. K. Lee, and G. Jee, "Daytime evolution of equatorial plasma bubbles observed by the first Republic of China satellite," *Geophysical Research Letters*, vol. 46, no. 10, pp. 5021–5027, May 2019, doi: 10.1029/2019GL082903.

[13] K. Wang, J. Feng, Z. Zhao, and B. Han, "Analysis of winter anomaly and annual anomaly based on regression approach," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 20, 2023, Art. no. 4968, doi: 10.3390/rs15204968.

[14] A. G. Wood *et al*., "Variability of ionospheric plasma: Results from the ESA Swarm mission," *Space Science Reviews*, vol. 218, no. 6, 2022, Art. no. 52, doi: 10.1007/s11214-022-00916-0.

[15] Â. M. Santos *et al*., "Ionospheric variability over the Brazilian equatorial region during the minima solar cycles 1996 and 2009: Comparison between observational data and the IRI model," *Atmosphere (Basel)*, vol. 14, no. 1, 2022, Art. no. 87, doi: 10.3390/atmos14010087.

[16] K. Venkatesh, D. Pallamraju, K. P. Dalsania, D. Chakrabarty, and T. K. Pant, "Evaluation of the performance of F-layer peak height models used in IRI-2016 over the Indian equatorial and low latitudes," *Advances in Space Research*, vol. 73, no. 7, pp. 3797–3807, 2024, doi: 10.1016/j.asr.2023.06.047.

[17] P. Abadi *et al*., "Roles of thermospheric neutral wind and equatorial electrojet in pre-reversal

enhancement, deduced from observations in Southeast Asia," *Earth and Planetary Physics*, vol. 5, no. 5, pp. 387–396, Sep. 2021, doi: 10.26464/epp2021049.

[18] A. G. Elias *et al*., "Comparative analysis of extreme ultraviolet solar radiation proxies during minimum activity levels," *Earth and Planetary Physics*, vol. 7, no. 5, pp. 540–547, 2023, doi: 10.26464/epp2023050.

[19] B. Zhang, Z. Wang, Y. Shen, W. Li, F. Xu, and X. Li, "Evaluation of foF2 and hmF2 parameters of IRI-2016 model in different latitudes over China under high and low solar activity years," *Remote Sens*, vol. 14, no. 4, 2022, Art. no. 860, doi: 10.3390/rs14040860.

[20] M. Hegy *et al*., "Investigation of double geomagnetic storms on 3 and 4 February 2022 using machine learning approach." NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, vol. 14, no. 1, pp. 1-9, 2025, doi: 10.1080/20909977.2025.2458944.

[21] L. F. McNamara and D. C. Thompson, "Validation of COSMIC values of foF2 and M (3000) F2 using ground-based ionosondes," *Advances in Space Research*, vol. 55, no. 1, pp. 163–169, 2015, doi: 10.1016/j.asr.2014.07.015.

[22] J. Wang, Q. Yu, and Y. Shi, "Comparison of observed hmF2 and the IRI-2020 model for six stations in East Asia during the declining phase of the solar cycle 24," *Advances in Space Research*, vol. 73, no. 5, pp. 2418–2432, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.asr.2023.12.001.

[23] A. Danilov, "Seasonal and diurnal variations in foF2 trends," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 120, no. 5, pp. 3868–3882, May 2015, doi: 10.1002/2014JA020971.

[24] N. Yoshida *et al*., "Seasonal and dust-related variations in the dayside thermospheric and ionospheric compositions of Mars observed by MAVEN/NGIMS," *Journal of Geophysical Research: Planets*, vol. 126, no. 11, 2021, Art. no. e2021JE006926, doi: 10.1029/2021JE006926.

[25] R. Wall Emerson, *Mann-Whitney U test and t-test*. Los Angeles, CA, USA: SAGE Publications, 2023.

[26] H. Rishbeth and I. C. F. Müller-Wodarg, "Why is there more ionosphere in January than in July? The annual asymmetry in the F2-layer," *Annales Geophysicae*, vol. 24, no. 12, pp. 3293–3311, Dec. 2006, doi: 10.5194/angeo-24-3293-2006.

[27] R. He, M. Li, Q. Zhang, and Q. Zhao, "A comparison of a GNSS-GIM and the IRI-2020 model over China under different ionospheric conditions," *Space Weather*, vol. 21, no. 10, Oct. 2023, Art. no. e2023SW003646, doi: 10.1029/2023SW003646.