

Nghiên cứu tác động của điều kiện khí tượng nhiệt đới đối với hoạt động của phương tiện bay không người lái ở Việt Nam

Phạm Ngọc Bách^{(1)✉}, Trần Quang Đức⁽²⁾, Trịnh Lê Hùng⁽³⁾

⁽¹⁾ Quân chủng Phòng không Không quân, Hà Nội, Việt Nam

⁽²⁾ Trường Đại học Khoa học Tự nhiên - Đại học Quốc gia Hà Nội, Việt Nam

⁽³⁾ Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội, Việt Nam

✉ Tác giả liên hệ

E-mail: bach50mta@gmail.com

Trích dẫn bài báo

Phạm, N. B., Trần, Q. Đ., Trịnh, L. T. (2026). Nghiên cứu tác động của điều kiện khí tượng nhiệt đới đối với hoạt động của phương tiện bay không người lái ở Việt Nam. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nhiệt đới*, 15(3), 10-23.
<https://doi.org/10.58334/vrtc.jtst.vol.015.890>

Tóm tắt

Phương tiện bay không người lái (UAV) ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong cả lĩnh vực quân sự và dân sự. Tại Việt Nam, điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa với đặc trưng mưa lớn, gió mạnh và nhiệt độ cao đặt ra nhiều thách thức đối với khả năng hoạt động bay. Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của điều kiện khí tượng nhiệt đới đến khả năng bay của UAV tại Việt Nam và khu vực Biển Đông. Ba yếu tố chính được xem xét gồm nhiệt độ không khí, tốc độ gió và lượng mưa, với hai nhóm UAV đại diện: UAV phổ thông (CD) và UAV chịu thời tiết (WRD). Kết quả cho thấy khả năng bay của CD trên đất liền chỉ đạt tối đa 52,7% trong điều kiện bay cả ngày đêm và thấp hơn trên biển, trong khi WRD duy trì mức rất cao, gần 100% trên đất liền. Lượng mưa là yếu tố hạn chế chính đối với CD, còn nhiệt độ không ảnh hưởng đáng kể. Khả năng bay của CD biến động rõ theo không gian và mùa, thuận lợi hơn ở phía Nam và trong mùa đông-xuân, bất lợi nhất vào mùa hè do tần suất mưa gia tăng. Đáng chú ý, việc nâng ngưỡng chịu mưa từ 0 lên 1 mm/h có thể làm tăng khả năng bay trung bình từ 39,1% lên 92,8%, cho thấy khả năng chịu mưa là yếu tố cải tiến kỹ thuật then chốt đối với khu vực nhiệt đới. Kết quả cung cấp cơ sở khoa học cho thiết kế UAV, tối ưu hóa kế hoạch bay và xây dựng chính sách phù hợp với điều kiện khí hậu nhiệt đới.

Từ khoá

Biển Đông; Điều kiện khí tượng UAV; Gió mùa; Khả năng bay; Nhiệt đới; Phương tiện bay không người lái (UAV); Việt Nam.

Đặt vấn đề

Phương tiện bay không người lái (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) đang phát triển nhanh trên toàn cầu. Tính đến năm 2026, số lượng UAV đăng ký thương mại tại Hoa Kỳ là hơn 800 nghìn chiếc (Federal Aviation Administration, n.d.). Tại Việt Nam, thị trường UAV đạt khoảng 73 triệu USD năm 2023 và dự báo tăng lên 191 triệu USD vào năm 2031, với nhiều ứng dụng như nông nghiệp chính xác, khảo sát, giám sát hạ tầng và ứng phó thiên tai (Markets and Data, n.d.). Tuy nhiên, một rào cản kỹ thuật lớn đối với việc triển khai UAV diện rộng là sự phụ thuộc vào điều kiện khí tượng. Trong môi trường nhiệt đới gió mùa, đặc trưng bởi mưa lớn, độ ẩm cao và hoạt động mạnh của các hệ thống thời tiết, UAV phải đối mặt với những thách thức đặc thù mà các nghiên cứu trong điều kiện ôn đới chưa phản ánh đầy đủ như sự suy giảm hiệu suất khí động học do va chạm với các hạt mưa (Li & Cao, 2021), nguy cơ gián đoạn tín hiệu truyền thông do độ ẩm cao (Mishra &

Kaabouch, 2025) và sự hao hụt năng lượng lớn khi chống chịu với gió và nhiễu động (Ercan và cộng sự, 2024). Đây là những rào cản của môi trường nhiệt đới.

Tại Việt Nam, UAV ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kinh tế - kỹ thuật. Trong đo đạc - bản đồ, UAV chi phí thấp cho phép thành lập bản đồ địa chính, địa hình tỷ lệ lớn với độ chính xác cao, đồng thời tiết kiệm thời gian và chi phí so với phương pháp truyền thống (Nguyễn và cộng sự, 2022, Phan và cộng sự, 2022). Trong nông nghiệp, UAV hỗ trợ theo dõi sinh trưởng cây trồng và dự báo năng suất thông qua các chỉ số NDVI, NDRE, góp phần thúc đẩy nông nghiệp chính xác, như tại Đồng bằng sông Cửu Long (Bùi và cộng sự, 2023). Ngoài ra, UAV còn được sử dụng trong giám sát hạ tầng khí tượng và lập bản đồ vi phạm hành lang kỹ thuật (Võ và cộng sự, 2023). Tuy nhiên, tiềm năng ứng dụng UAV tại Việt Nam vẫn chưa được khai thác đầy đủ, do còn thiếu

các đánh giá định lượng về tác động của điều kiện khí hậu nhiệt đới đến khả năng vận hành thực tế.

Việt Nam nằm trong khu vực khí hậu nhiệt đới gió mùa, đặc trưng bởi nền nhiệt cao quanh năm, lượng mưa lớn, độ ẩm cao và phân hóa rõ rệt theo mùa và theo vùng. Lượng mưa trung bình năm dao động từ khoảng 600 đến 5000 mm, phổ biến trong khoảng 1400 – 2400 mm. Khoảng 80 – 90% lượng mưa tập trung trong mùa mưa, với số ngày mưa trung bình từ 60 đến 200 ngày mỗi năm. Ngoài ra, Việt Nam hằng năm còn chịu ảnh hưởng của khoảng 6–8 cơn bão và áp thấp nhiệt đới. Trong những năm gần đây, xu thế gia tăng các cơn bão mạnh, sự dịch chuyển quỹ đạo bão về phía Nam cùng với sự xuất hiện của các hướng di chuyển bất thường và thời gian kết thúc mùa bão muộn hơn đã được ghi nhận (Ministry of Natural Resources and Environment, 2010). Những đặc điểm khí hậu và thời tiết cực đoan này tạo ra nhiều thách thức đối với khả năng khai thác UAV tại Việt Nam.

Nhiệt độ không khí, tốc độ gió và lượng mưa là ba yếu tố khí tượng chính được các nhà sản xuất UAV quy định trong tài liệu hướng dẫn vận hành như các ngưỡng giới hạn an toàn bắt buộc. Những yếu tố này ảnh hưởng đến hoạt động của UAV thông qua nhiều cơ chế vật lý khác nhau: gió mạnh có thể gây mất ổn định tư thế, làm tăng tiêu hao năng lượng và thậm chí dẫn đến mất kiểm soát (Watkins và cộng sự, 2019); mưa có thể xâm nhập vào hệ thống điện tử và che khuất các cảm biến quang học (Frew và cộng sự, 2020); trong khi đó, nhiệt độ thấp làm suy giảm hiệu năng của pin Li-ion (Ji và cộng sự, 2013), còn nhiệt độ cao gây quá nhiệt linh kiện.

Mặc dù tầm quan trọng của các yếu tố khí tượng đối với hoạt động bay của UAV đã được thừa nhận rộng rãi, các nghiên cứu định lượng một cách hệ thống về mức độ ảnh hưởng của khí tượng đến khả năng bay của UAV trên thế giới vẫn còn hạn chế, đặc biệt là tại Việt Nam. Năm 2019, Lundby và các cộng sự đã so sánh trực tiếp số liệu thời tiết lịch sử với các ngưỡng vận hành của UAV, qua đó xác định tỷ lệ thời gian có thể bay dao động từ 53,9 đến 95,8% tại hai thành phố của Đan Mạch (Lundby và cộng sự, 2019). Đến năm 2021, Gao và các cộng sự đã mở rộng phân tích này lên quy mô toàn cầu, sử dụng bộ

dữ liệu tái phân tích ERA5 trong 10 năm để tính toán chỉ số “khả năng bay” (flyability) cho hai dòng UAV đại diện (Gao và cộng sự, 2021). Kết quả cho thấy khả năng bay trung vị toàn cầu của UAV phổ thông chỉ đạt 5,7 giờ/ngày (hoặc 2,0 giờ/ngày nếu chỉ tính ban ngày), đồng thời thể hiện sự biến động không gian lớn giữa các vùng khí hậu khác nhau.

Tuy nhiên, Việt Nam chỉ được xem xét như một phần nhỏ trong phân tích toàn cầu và không có đô thị nào thuộc nhóm 100 thành phố đông dân được phân tích chi tiết. Trong khi đó, khí hậu nhiệt đới gió mùa với mưa lớn, mùa bão từ tháng 6 - 11 và sự phân hóa mạnh theo vùng, theo mùa tạo ra môi trường kỹ thuật rất khác so với các nghiên cứu quốc tế chủ yếu ở khu vực ôn đới. Sự khác biệt này ảnh hưởng trực tiếp đến thiết kế, tiêu chuẩn kỹ thuật và chiến lược vận hành UAV. Tuy nhiên, đến nay vẫn thiếu các nghiên cứu định lượng dựa trên chuỗi số liệu khí hậu dài hạn để đánh giá khả năng bay UAV tại Việt Nam, khiến việc lập kế hoạch, xây dựng quy định và mở rộng ứng dụng còn hạn chế về cơ sở khoa học. Vì vậy, mục tiêu của nghiên cứu này bao gồm: (1) định lượng khả năng bay của hai lớp UAV trên đất liền Việt Nam và khu vực Biển Đông, (2) đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố khí tượng đến khả năng bay của UAV, (3) đề xuất hướng thiết kế và tối ưu hóa cho thiết bị UAV khi hoạt động tại Việt Nam. Kết quả của nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho thiết kế UAV, tối ưu hóa kế hoạch bay và xây dựng chính sách phù hợp với điều kiện khí hậu nhiệt đới.

Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

Số liệu khí tượng

Nghiên cứu sử dụng số liệu ERA5 của Trung tâm Dự báo thời tiết hạn vừa châu Âu (ECMWF) (Hersbach và cộng sự, 2020) với độ phân giải không gian $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ và bước thời gian 1 giờ, trong giai đoạn 15 năm từ 01/01/2010 đến 31/12/2024 với ba biến khí tượng: (1) nhiệt độ không khí tại 2m so với mặt đất (2m temperature, K) được quy đổi về đơn vị $^\circ\text{C}$; (2) thành phần gió hướng đông (u) và hướng bắc (v) tại 100 m so với mặt đất (100m u/v-component of wind, m/s) - độ cao 100 m được chọn vì phản ánh cao độ bay điển hình của UAV và phù hợp với giới hạn pháp lý 120 m của Việt Nam; (3) tổng lượng mưa theo giờ (total precipitation, m/h) được quy đổi về đơn

vị mm/h. Khu vực trích xuất số liệu bao gồm toàn bộ lãnh thổ đất liền Việt Nam và khu vực Biển Đông được giới hạn trong miền tọa độ (8°N – 24°N; 102°E – 120°E).

Phân loại UAV và ngưỡng vận hành

Theo phương pháp luận của Gao và các cộng sự (2021), nghiên cứu xem xét hai lớp UAV đại diện (Bảng 1). Các ngưỡng vận hành khí tượng bao gồm nhiệt độ không khí tối thiểu cho phép

(T_{min}), nhiệt độ tối đa cho phép (T_{max}), tốc độ gió tối đa cho phép (V_{max}) và cường độ mưa tối đa cho phép (P_{max}). Lớp UAV phổ thông (Common Drone - CD) được định nghĩa theo giá trị trung vị của ngưỡng vận hành từ 24 dòng UAV thương mại phổ biến có đầy đủ thông số kỹ thuật. Lớp UAV chịu thời tiết (Weather-Resistant Drone - WRD) đại diện cho các UAV chuyên dụng có khả năng chống nước và chịu gió cao hơn (Gao và cộng sự, 2021).

Bảng 1. Ngưỡng vận hành khí tượng của hai lớp UAV nghiên cứu (CD: UAV phổ thông; WRD: UAV chịu thời tiết) (Gao và cộng sự, 2021)

Lớp UAV	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)	V_{max} (m/s)	P_{max} (mm/h)
UAV phổ thông (CD)	0	40	10	0
UAV chịu thời tiết (WRD)	-20	46	14	50

Trong điều kiện khí hậu nhiệt đới ở Việt Nam, ngưỡng nhiệt độ tối thiểu (0 °C với CD) hiếm khi trở thành yếu tố giới hạn tại vùng đồng bằng. Ngưỡng nhiệt độ tối đa (40 °C với CD) cũng ít bị vượt quá ngoài trời do bốc hơi bề mặt duy trì nhiệt độ không khí thường dưới 38 °C. Do đó, lượng mưa và tốc độ gió được nhận định là hai yếu tố giới hạn chủ yếu tại Việt Nam, và đây là điểm khác biệt quan trọng so với kết quả toàn cầu của Gao và cộng sự (2021) nơi nhiệt độ thấp là yếu tố hạn chế lớn nhất với WRD.

Định nghĩa và tính toán khả năng bay

Khả năng bay được định nghĩa là tỷ lệ phần trăm thời gian mà điều kiện khí tượng cho phép UAV hoạt động an toàn trong một khoảng thời gian nhất định. Cụ thể tại ô lưới i và bước thời gian j (mỗi giờ), bước thời gian được phân loại là có thể bay khi và chỉ khi cả ba điều kiện sau được thỏa mãn đồng thời:

$$T_{min} \leq T_{2m_{i,j}} \leq T_{max} ; MWS_{i,j} \leq V_{max} ; P_{i,j} \leq P_{max} \quad (1)$$

trong đó, $MWS_{i,j}$ là tốc độ gió tổng hợp tại 100m, được tính từ hai thành phần:

$$MWS_{i,j} = \sqrt{u_{i,j}^2 + v_{i,j}^2} \quad (2)$$

Khả năng bay trung bình năm (%) tại ô lưới i được tính bằng tỷ lệ số bước thời gian có thể bay trên tổng số bước thời gian trong 1 năm, lấy trung bình trên toàn bộ 15 năm phân tích:

$$F_i = \frac{\sum_n \left(\frac{1}{N_n} \times \sum_j flyable_{i,j,n} \right)}{15} \times 100\% \quad (3)$$

trong đó N_n là tổng số bước thời gian của năm n .

Khả năng bay được tính song song cho hai trường hợp: Cả ngày đêm và chỉ ban ngày. FAA

định nghĩa “đêm” là khoảng thời gian giữa chạng vạng dân dụng buổi tối và chạng vạng dân dụng buổi sáng (Electronic Code of Federal Regulations, n.d.). Chạng vạng dân dụng buổi sáng và buổi tối tương ứng với góc độ cao mặt trời là 6° dưới đường chân trời (-6°). Từ đó, điều kiện bay ban ngày được xác định khi góc cao mặt trời $SEA_{i,j} > -6^\circ$.

Phân tích mức độ ảnh hưởng

Để xác định yếu tố khí tượng nào có tác động lớn nhất, nghiên cứu tính toán mức độ ảnh hưởng (Impact Intensity – II) của từng yếu tố là tỷ lệ phần trăm các bước thời gian trong mỗi ô lưới được phân loại là không thể bay được do giá trị thông số ERA5 vượt quá giá trị hoặc phạm vi cho phép tương ứng của UAV. Mức độ ảnh hưởng

riêng cho từng biến $X \in \{T, MWS, P\}$ tại mỗi ô lưới, độc lập với trạng thái của hai biến còn lại:

$$II_{X,i} = \frac{\sum_j [X_{i,j} \notin range(X)]}{N} \times 100\% \quad (4)$$

trong đó: $II_{X,i}$ là mức độ ảnh hưởng của biến X tại ô lưới i ; $X_{i,j}$ là giá trị biến X tại ô lưới i và bước thời gian j ; $range(X)$ là khoảng giá trị cho phép của biến X theo thông số của UAV; N là tổng số bước thời gian được xem xét.

Vì đây là phân tích riêng lẻ, tổng ba mức độ ảnh hưởng có thể vượt 100%. Phương pháp này cho phép so sánh mức độ đóng góp của từng yếu tố vào tổng thời gian không thể bay, cung cấp cơ sở để xác định ưu tiên kỹ thuật cải tiến UAV.

Phân tích ngược

Phân tích ngược được thực hiện nhằm xác định việc điều chỉnh ngưỡng vận hành nào mang lại lợi ích lớn nhất đối với khả năng bay của UAV

trên khu vực đất liền Việt Nam. Thay vì sử dụng một bộ ngưỡng cố định, nghiên cứu tiến hành tính toán khả năng bay trung bình tại 30 trạm đại diện cho 30 thành phố trên cả nước (xem Bảng 2) bằng số liệu ERA5 nội suy về trạm với tổng cộng 400 tổ hợp ngưỡng vận hành khác nhau.

Các tổ hợp này được xây dựng từ các dải giá trị của bốn tham số khí tượng, bao gồm: ngưỡng nhiệt độ tối thiểu $\{-40, -30, -20, -10, 0\}^{\circ}\text{C}$; ngưỡng nhiệt độ tối đa $\{10, 20, 30, 40, 50\}^{\circ}\text{C}$, tốc độ gió tối đa cho phép $\{5, 10, 15, 20\} \text{ m/s}$ và lượng mưa tối đa $\{0, 1, 5, 10\} \text{ mm/h}$.

Kết quả phân tích được biểu diễn dưới dạng ma trận đa chiều nhằm xác định các ngưỡng có độ dốc gia tăng khả năng bay lớn nhất, qua đó làm rõ những điều chỉnh tham số mang lại hiệu quả cải thiện kỹ thuật cao nhất đối với hoạt động của UAV.

Bảng 2. Danh sách trạm khí tượng sử dụng trong phân tích khả năng bay UAV

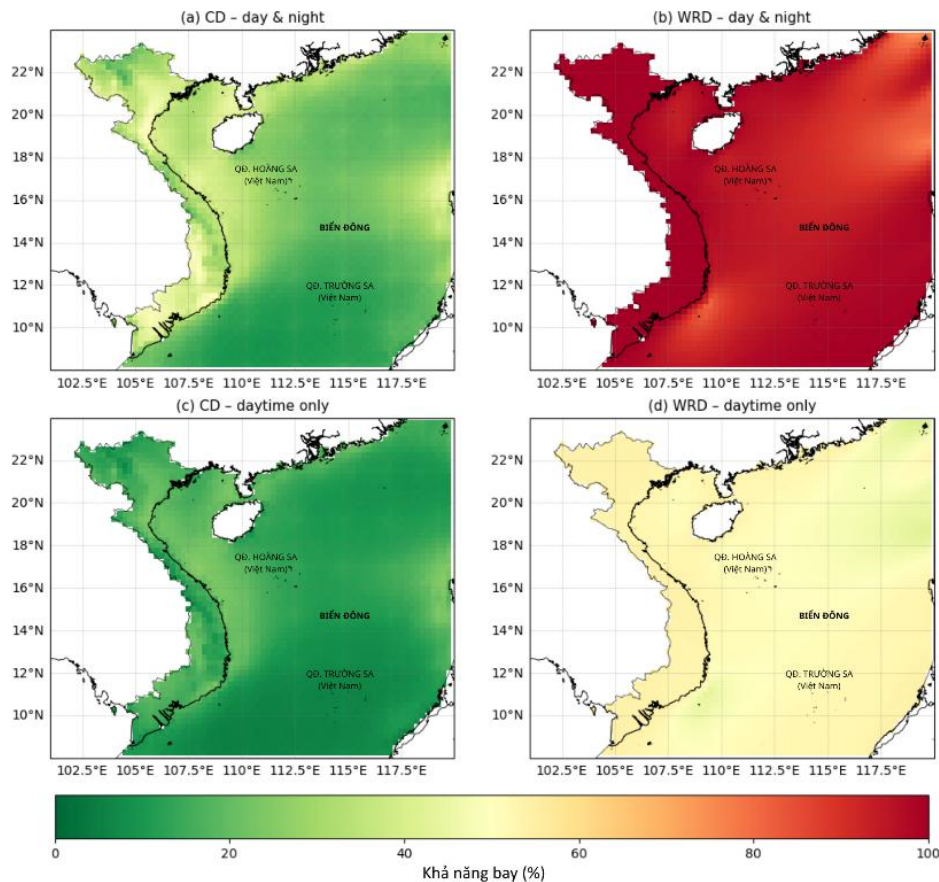
STT	Trạm	Tọa độ (°N, °E)	Vùng khí hậu	STT	Trạm	Tọa độ (°N, °E)	Vùng khí hậu
1	Hà Nội	(21,017; 105,800)	Miền Bắc	16	Đà Nẵng	(16,033; 108,200)	Miền Trung
2	Lạng Sơn	(21,833; 106,767)	Miền Bắc	17	Quảng Ngãi	(15,117; 108,800)	Miền Trung
3	Lào Cai	(22,500; 103,967)	Miền Bắc	18	Nha Trang	(12,217; 109,200)	Miền Trung
4	Sơn La	(21,333; 103,900)	Miền Bắc	19	Phan Rang	(11,583; 108,983)	Miền Trung
5	Hải Dương	(20,933; 106,300)	Miền Bắc	20	Phan Thiết	(10,933; 108,100)	Miền Trung
6	Thái Bình	(20,450; 106,350)	Miền Bắc	21	Tân Sơn Hòa /TP HCM	(10,820; 106,670)	Miền Nam
7	Hòa Bình	(20,817; 105,333)	Miền Bắc	22	Tây Ninh	(11,333; 106,117)	Miền Nam
8	Bắc Giang	(21,300; 106,217)	Miền Bắc	23	Vũng Tàu	(10,367; 107,083)	Miền Nam
9	Việt Trì	(21,300; 105,417)	Miền Bắc	24	Cần Thơ	(10,033; 105,767)	Miền Nam
10	Ninh Bình	(20,233; 105,967)	Miền Bắc	25	Rạch Giá	(10,000; 105,067)	Miền Nam
11	Thanh Hóa	(19,750; 105,783)	Miền Trung	26	Cà Mau	(9,183; 105,150)	Miền Nam
12	Vinh	(18,667; 105,700)	Miền Trung	27	Sóc Trăng	(9,600; 105,967)	Miền Nam
13	Hà Tĩnh	(18,350; 105,900)	Miền Trung	28	Mỹ Tho	(10,350; 106,400)	Miền Nam
14	Đồng Hới	(17,483; 106,600)	Miền Trung	29	Châu Đốc	(10,700; 105,133)	Miền Nam
15	Huế	(16,433; 107,583)	Miền Trung	30	Phú Quốc	(10,217; 103,967)	Miền Nam

Kết quả

Phân bố không gian khả năng bay UAV

Kết quả mô phỏng phân bố không gian khả năng khai thác UAV trên lãnh thổ Việt Nam và Biển Đông (Hình 1) cho thấy sự phân hóa mạnh dựa trên khả năng chống chịu thời tiết của thiết bị và

các ràng buộc về điều kiện chiếu sáng. Đối với CD, ngay cả khi được phép bay cả ngày - đêm, khả năng bay trên đất liền chỉ đạt cao nhất 53% và thấp nhất là 16%, và giảm xuống mức rất thấp tại khu vực nam Biển Đông (thấp nhất đạt 9,3%), khả năng bay trên biển cao hơn ở các khu vực gần đất liền và giảm dần khi ra xa bờ.



Hình 1. Phân bố không gian khả năng bay của 2 lớp UAV (CD và WRD) ở Việt Nam và Biển Đông trong điều kiện bay cả ngày và đêm và chỉ ban ngày. Đối với CD - ngày và đêm (a), chỉ ban ngày (c); Đối với WRD - ngày và đêm (b), chỉ ban ngày (d)

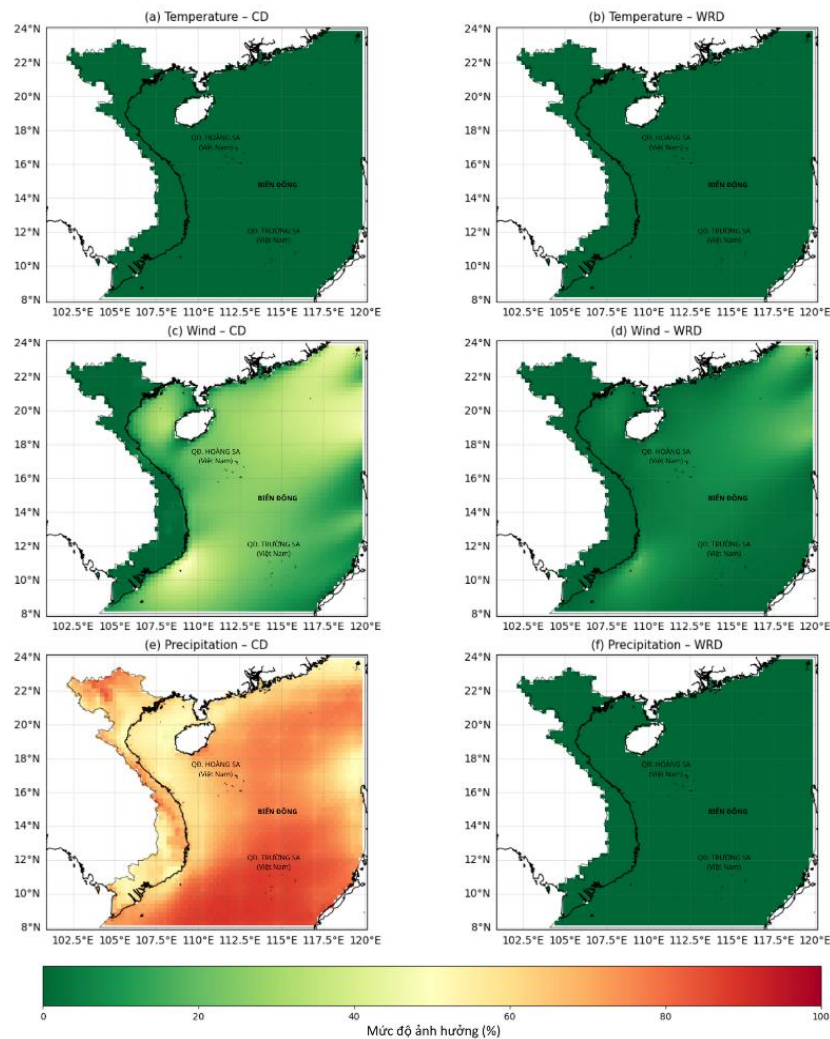
Ngược lại, phân bố không gian khả năng bay của WRD thể hiện hiệu suất vượt trội và tính ổn định cao. Trong kịch bản bay cả ngày và đêm, tỷ lệ khai thác của dòng WRD trên đất liền đạt mức gần như tuyệt đối (98% - 100%) và duy trì ở mức rất cao trên biển (74,7% - 100%).

Khi xem xét kịch bản chỉ ban ngày, số liệu của WRD dao động trong khoảng 53% - 54,2% trên đất liền. Việc tỷ lệ khả năng bay chỉ ban ngày của WRD đạt xấp xỉ ngưỡng tối đa của số giờ có ánh sáng trong năm chứng tỏ rằng: vào ban ngày, dòng WRD gần như không bị cản trở bởi thời tiết. Ngược lại, đối với dòng CD, tỷ lệ khả

năng bay ban ngày chỉ đạt vón vón 6,3% - 25,3%, thấp hơn rất nhiều so với quỹ thời gian ánh sáng cho phép.

Ảnh hưởng của từng yếu tố khí tượng đến khả năng bay UAV

Hình 2 trình bày các biểu đồ thể hiện tỷ lệ thời gian mà từng yếu tố khí tượng riêng lẻ gây hạn chế khả năng bay của UAV trong điều kiện cả ngày và đêm. Kết quả này cho phép xác định các yếu tố khí tượng đóng vai trò chủ yếu, từ đó làm rõ nguyên nhân cốt lõi dẫn đến sự khác biệt về khả năng khai thác giữa 2 dòng thiết bị.



Hình 2. Tỷ lệ thời gian hạn chế bay tách biệt riêng từng yếu tố khí tượng đối với UAV CD và WRD trong điều kiện bay cả ngày và đêm. Các tiểu hình thể hiện: nhiệt độ (CD: a; WRD: b), tốc độ gió (CD: c; WRD: d) và lượng mưa (CD: e; WRD: f)

Yếu tố nhiệt độ được xác định không phải là rào cản đối với hoạt động của UAV tại khu vực nghiên cứu. Các hình 2a và 2b đều cho thấy mức tác động gần như bằng 0% đối với cả 2 lớp UAV. Số liệu thống kê cho thấy ngay cả với dòng UAV thông thường (CD), tỷ lệ ngăn cản do nhiệt độ trên đất liền chỉ đạt mức tối đa không đáng kể là 0,29% và bằng 0% trên biển. Điều này khẳng định dải nhiệt độ khí hậu tại Việt Nam và Biển Đông nằm trọn trong giới hạn vận hành kỹ thuật của hầu hết các thiết bị bay hiện hành.

Ngược lại, lượng mưa được xác định là yếu tố hạn chế nghiêm trọng nhất trong các yếu tố được khảo sát đối với dòng UAV phổ thông. Hình 2e cho thấy tỷ lệ thời gian bị ngăn cản do

mưa ở mức rất cao, dao động từ 46,6% đến 83,9% trên khu vực đất liền và lên tới 89,5% trên biển. Kết quả này cho thấy dòng CD gần như không thể hoạt động trong phần lớn thời gian khi xuất hiện mưa, do không đáp ứng được các điều kiện vận hành cần thiết. Trái lại, đối với dòng WRD, hình 2f thể hiện hoàn toàn màu xanh (tác động 0%), chứng minh hiệu quả của khả năng chống nước trong việc loại bỏ hoàn toàn rào cản này. Nhờ đó, thiết bị có thể duy trì khả năng hoạt động ổn định mà không còn phụ thuộc đáng kể vào điều kiện mưa ẩm đặc trưng của môi trường nhiệt đới.

Đối với yếu tố tốc độ gió, mức độ tác động thể hiện sự khác biệt rõ rệt giữa khu vực đất liền và

trên biển, đồng thời phụ thuộc mạnh vào khả năng kháng gió của từng loại thiết bị. Trên đất liền, gió chỉ gây ảnh hưởng hạn chế đối với dòng CD, với tỷ lệ ngăn cản tối đa đạt 15,5%, và hầu như không ảnh hưởng đến dòng WRD, khi mức tác động cao nhất chỉ khoảng 1,9%. Cần lưu ý rằng con số 15,5% này không phản ánh đồng đều trên toàn lãnh thổ: tại các vùng có địa hình phức tạp như Tây Bắc, Đông Bắc, và ven biển miền Trung - nơi chịu ảnh hưởng trực tiếp của gió mùa Đông Bắc và các cơn bão nhiệt đới, tốc độ gió trong thực tiễn có thể thường xuyên vượt ngưỡng 10 m/s và trở thành yếu tố giới hạn hoạt động UAV quan trọng không kém lượng mưa. Tuy nhiên, tại khu vực Biển Đông, gió trở thành một thách thức đáng kể ở một số vùng. Hình 2c cho thấy dòng CD chịu ảnh hưởng mạnh của gió biển, với tỷ lệ ngăn cản cao nhất lên tới 50,6%. Việc sử dụng dòng WRD giúp giảm đáng kể mức độ rủi ro này, khi tỷ lệ tác động tối đa giảm xuống còn 25,3%. Mặc dù vậy, giá trị này vẫn cho thấy gió là yếu tố môi trường chủ yếu còn lại có khả năng gây gián đoạn hoạt động của các UAV hiện đại tại khu vực biển xa.

Các kết quả này cho thấy đối với các ứng dụng UAV tại vùng biển xa, yêu cầu kỹ thuật về khả năng chịu gió cần được ưu tiên nâng cao trong thiết kế, bên cạnh khả năng chống mưa vốn là yêu cầu ưu tiên hàng đầu trên đất liền.

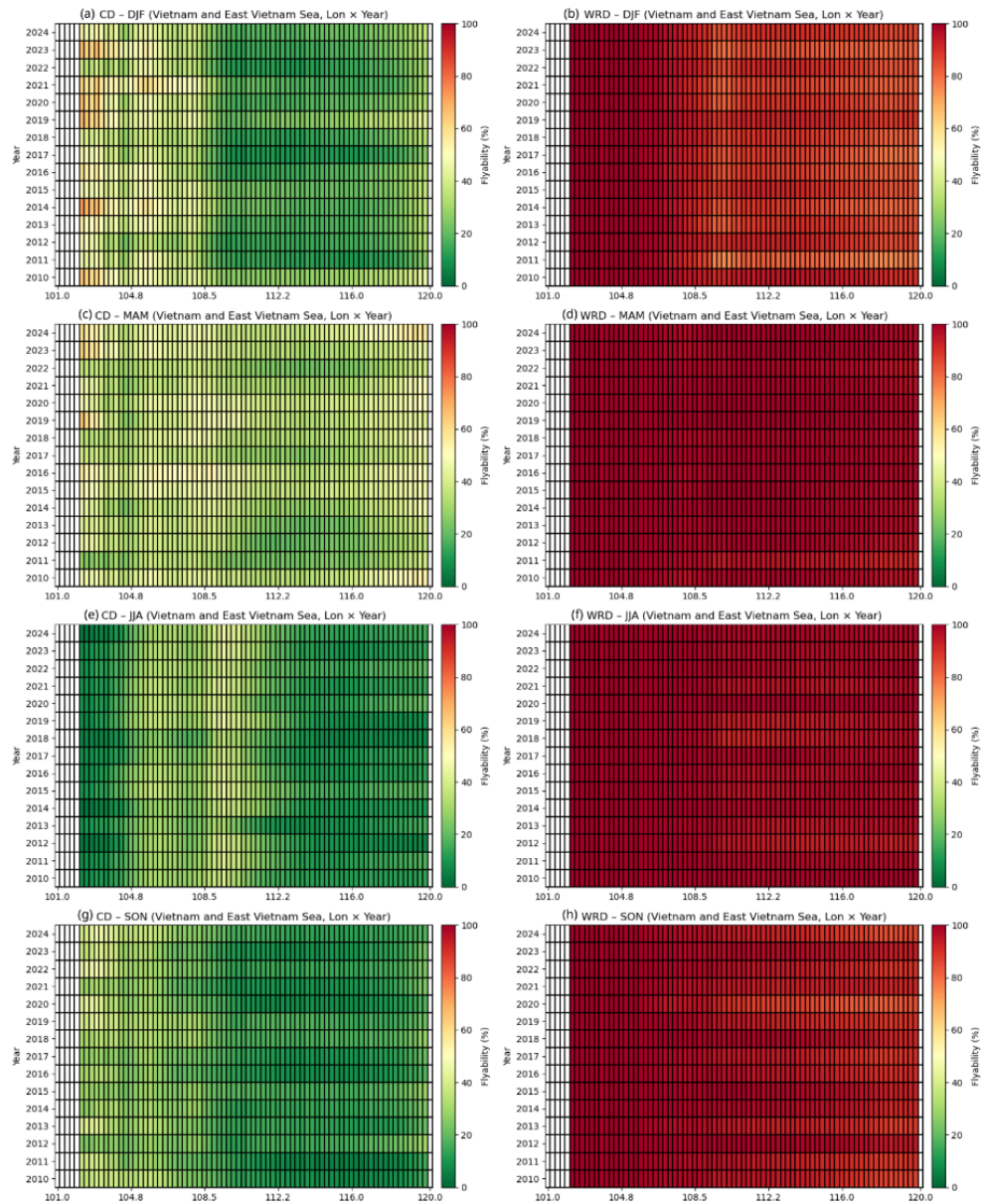
Biến động thời gian khả năng bay của UAV

Phân bố trung bình theo kinh hướng của khả năng bay trong các tháng mùa đông (DJF - Hình 3a, 3b) cho thấy một quy luật rõ rệt: khả năng bay của cả hai loại UAV trên khu vực đất liền Việt Nam nhìn chung cao hơn so với khu vực Biển Đông. Tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng của điều kiện khí tượng khu vực biển đến hai loại thiết bị có sự khác biệt đáng kể. CD thể hiện sự suy giảm khả năng bay mạnh khi hoạt động trên biển, với giá trị tối thiểu có thể giảm xuống rất thấp (khoảng 8–10%), trong khi giá trị tối đa trên đất liền đạt gần 73%. Ngược lại,

WRD duy trì khả năng bay cao và ổn định hơn nhiều trong toàn bộ khu vực nghiên cứu, với giá trị luôn duy trì từ 75% đến 100%.

Phân bố trung bình theo kinh hướng của khả năng bay trong các tháng mùa xuân (MAM - Hình 3c, 3d) tiếp tục cho thấy quy luật khả năng bay trên khu vực đất liền Việt Nam luôn cao hơn so với trên khu vực Biển Đông. Tuy nhiên, mức độ ổn định giữa hai loại thiết bị có sự khác biệt rõ rệt. CD mặc dù có sự cải thiện so với mùa đông nhưng vẫn thể hiện hiệu suất trung bình và biến động lớn, với giá trị tối thiểu dao động khoảng 19–35% và giá trị tối đa chỉ đạt khoảng 39–65%. Ngược lại, WRD duy trì khả năng bay rất cao và ổn định trên toàn khu vực nghiên cứu, với giá trị tối đa luôn đạt 100% và giá trị tối thiểu luôn trên 90%. Kết quả này cho thấy WRD hầu như không bị ảnh hưởng đáng kể bởi điều kiện khí tượng trong mùa xuân, trong khi CD vẫn gặp nhiều hạn chế, đặc biệt khi hoạt động trên khu vực biển.

Phân bố trung bình theo kinh hướng của khả năng bay trong các tháng mùa hè (JJA - Hình 3e, 3f) lại cho thấy sự thay đổi rõ rệt trong quy luật phân bố so với các mùa trước, đặc biệt đối với UAV loại CD. Không giống mùa đông và mùa xuân khi khu vực đất liền có khả năng bay cao hơn, trong mùa hè hiệu suất của CD suy giảm mạnh trên toàn bộ khu vực nghiên cứu và sự khác biệt giữa đất liền và biển gần như bị xóa nhòa. Giá trị khả năng bay của CD rất thấp và biến động lớn, với mức tối đa hiếm khi vượt quá khoảng 30–45%, trong khi mức tối thiểu có thể giảm xuống chỉ khoảng 3%, cho thấy mùa hè là giai đoạn hoạt động kém hiệu quả nhất của loại thiết bị này. Ngược lại, WRD vẫn duy trì khả năng bay rất cao và ổn định trên cả đất liền và biển, với giá trị tối đa luôn đạt 100% và giá trị tối thiểu vẫn trên 90%. Kết quả này cho thấy điều kiện khí tượng mùa hè ảnh hưởng mạnh đến CD nhưng hầu như không làm suy giảm hiệu suất của WRD.

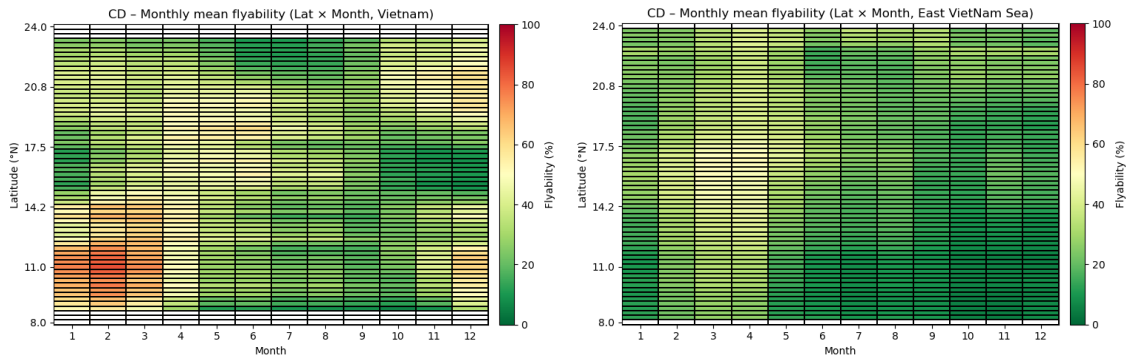


Hình 3. Biến trình nhiều năm phân bố vĩ hướng trung bình kinh hướng (từ 8°N - 24°N) khả năng bay cả ngày đêm trong bốn mùa Đông (DJF), Xuân (MAM), Hè (JJA), Thu (SON) của CD (trái) và WRD (phải) trên đất liền Việt Nam và Biển Đông

Phân bố trung bình theo kinh hướng của khả năng bay trong các tháng mùa thu (SON - Hình 3g, 3h) cho thấy quy luật chung vẫn được duy trì: khả năng bay của cả hai loại UAV trên khu vực đất liền Việt Nam nhìn chung cao hơn so với trên khu vực Biển Đông. Tuy nhiên, đối với CD, hiệu suất hoạt động trong mùa thu nhìn chung khá thấp và biến động lớn. Mặc dù khu vực đất liền vẫn có giá trị cao hơn tương đối so với vùng biển, nhưng mức tối đa của CD phần lớn dưới 50%, trong khi giá trị tối thiểu thường giảm

xuống dưới 10%, cho thấy điều kiện khí tượng mùa thu gây nhiều bất lợi cho loại thiết bị này. Ngược lại, WRD tiếp tục duy trì khả năng bay cao và ổn định trên toàn bộ khu vực nghiên cứu, với giá trị tối đa luôn đạt 100% và giá trị tối thiểu vẫn trên khoảng 82%.

Hình 4 thể hiện phân bố trung bình tháng theo vĩ hướng của khả năng bay của CD trên khu vực đất liền Việt Nam và Biển Đông giai đoạn 2010–2024.



Hình 4. Biểu trình năm phân bố kinh hướng trung bình vĩ hướng (từ 101°E - 120°E) của CD trên đất liền Việt Nam (trái) và Biển Đông (phải) giai đoạn 2010-2024

Tại khu vực phía bắc Việt Nam, từ khoảng 21°N trở lên (tương ứng với các tỉnh vùng Đông Bắc và Tây Bắc), khả năng bay của CD nhìn chung khá thấp trong các tháng mùa hè và đầu mùa thu. Cụ thể, trong các tháng 5–9, giá trị khả năng bay phần lớn chỉ dao động trong khoảng 10–30%, phản ánh điều kiện khí tượng không thuận lợi cho hoạt động bay. Điều kiện hoạt động được cải thiện rõ rệt vào cuối mùa thu và đầu mùa đông (tháng 10–12), khi phần lớn giá trị khả năng bay đạt trên 40%, tuy nhiên giá trị cực đại vẫn chưa vượt quá 60%, cho thấy khu vực này nhìn chung vẫn có hiệu suất bay ở mức trung bình.

Trong khu vực 19–21°N (tương ứng với khu vực trung du và đồng bằng Bắc Bộ), khả năng bay của CD giữa các tháng trong năm có xu hướng ổn định và ít biến động hơn so với khu vực phía bắc. Giá trị khả năng bay thấp nhất xuất hiện vào các tháng 7–9, khi các chỉ số dao động khoảng 26–35%. Ngược lại, điều kiện thuận lợi hơn cho hoạt động bay thường xảy ra vào các tháng 4–6 và 10–12, với giá trị khả năng bay phổ biến trong khoảng 40–60%, phản ánh sự cải thiện của điều kiện khí tượng trong các giai đoạn chuyển mùa.

Đối với khu vực 15–19°N (tương ứng với khu vực Bắc Trung Bộ), khả năng bay của CD đạt mức tốt nhất trong năm vào các tháng 4–6, khi phần lớn giá trị khả năng bay nằm trong khoảng 40–55%. Tuy nhiên, khu vực này lại cho thấy sự suy giảm đáng kể vào các tháng cuối năm và đầu năm sau (tháng 10–12 và tháng 1), khi khả năng bay giảm xuống chỉ còn khoảng 10–16%, phản ánh tác động bất lợi của các hệ thống thời tiết trong giai đoạn này.

Ở khu vực phía nam từ khoảng 15°N trở xuống (tương ứng với Nam Trung Bộ, Tây Nguyên và

Nam Bộ), khả năng bay của CD nhìn chung cao nhất trên toàn lãnh thổ Việt Nam trong nhiều thời điểm của năm. Điều kiện thuận lợi nhất xuất hiện vào các tháng 12–4, khi phần lớn giá trị khả năng bay đều vượt trên 50%, với giá trị cực đại đạt 84,7% vào tháng 2. Ngược lại, giai đoạn tháng 8–10 là thời kỳ bất lợi nhất cho hoạt động bay tại khu vực này, khi phần lớn giá trị khả năng bay giảm xuống dưới 30% và có xu hướng giảm dần về phía các vĩ độ thấp hơn. Đặc biệt, tại khu vực khoảng 8,75°N (vùng cực Nam của lãnh thổ), khả năng bay trong các tháng này đều dưới 10%, với giá trị thấp nhất ghi nhận 5,6% vào tháng 10.

Tại khu vực phía bắc Biển Đông từ khoảng 20°N trở lên (ngoài khơi Vịnh Bắc Bộ và vùng biển phía đông Bắc Bộ), khả năng bay của CD nhìn chung ở mức thấp đến trung bình, với giá trị khả năng bay dao động khoảng 15–40%. Điều kiện hoạt động thuận lợi nhất xuất hiện vào các tháng 3–5, khi phần lớn giá trị khả năng bay nằm trong khoảng 30–40%. Ngược lại, trong các tháng mùa hè (6–8), khả năng bay giảm rõ rệt, với giá trị phổ biến chỉ còn 15–25%, phản ánh ảnh hưởng của các điều kiện khí tượng bất lợi trong giai đoạn này.

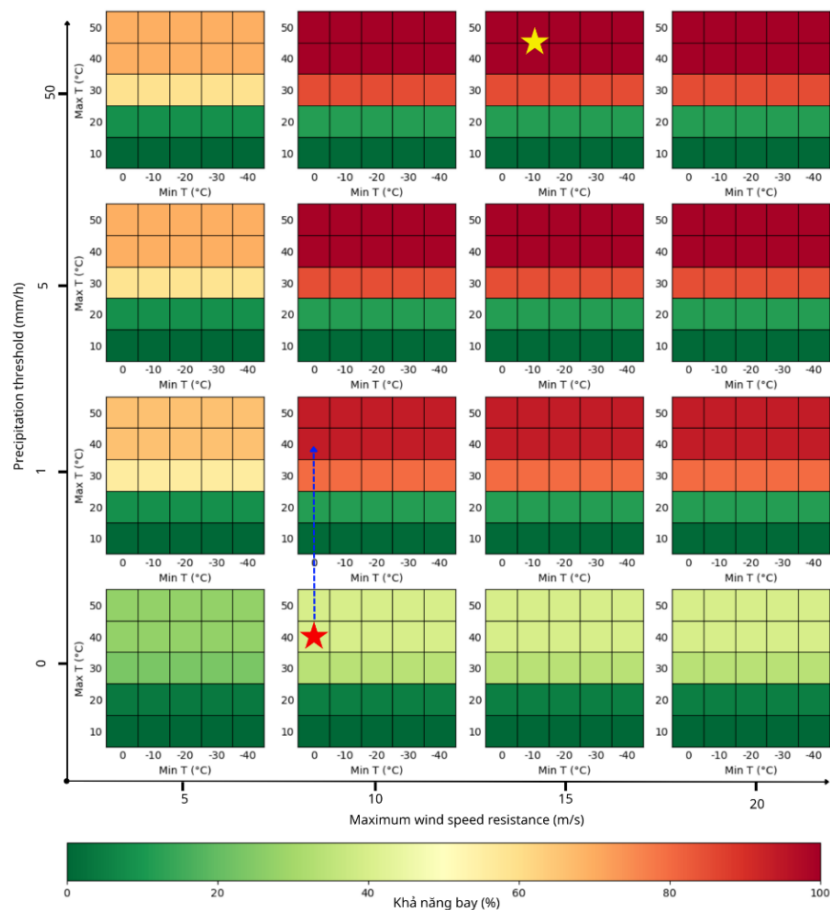
Đối với khu vực giữa Biển Đông trong khoảng 12–20°N (ngoài khơi khu vực Trung Bộ Việt Nam), khả năng bay của CD có xu hướng cao hơn so với khu vực phía bắc trong một số thời điểm của năm. Giá trị khả năng bay cao nhất vẫn xuất hiện vào các tháng 3–5, khi phần lớn khu vực đạt trên 30% và giá trị cực đại có thể đạt khoảng 51%. Tuy nhiên, vào các tháng cuối năm (10–12), khả năng bay giảm mạnh, với khả năng bay phổ biến trong khoảng 6–20%, đồng thời có xu hướng giảm dần từ bắc xuống nam trong khu vực này.

Ở khu vực phía nam Biển Đông dưới 12°N (ngoài khơi Nam Trung Bộ và khu vực lân cận Nam Bộ), khả năng bay của CD thấp hơn rõ rệt so với hai khu vực phía bắc. Điều kiện hoạt động thuận lợi nhất xuất hiện vào các tháng 2–4, khi khả năng bay chỉ dao động trong khoảng 22–33%. Trong phần lớn các tháng còn lại của năm, giá trị khả năng bay đều dưới 20%. Đặc biệt, trong ba tháng cuối năm (10–12), khả năng bay giảm xuống mức rất thấp, với giá trị dưới 8% trên toàn bộ các vĩ độ của khu vực, cho thấy điều kiện khí tượng trong giai đoạn này rất bất lợi đối với hoạt động của thiết bị.

Phân tích ngược xác định ngưỡng kỹ thuật tối ưu

Để xác định mức độ chống chịu thời tiết cần thiết để tăng khả năng bay trung bình, chúng tôi phân tích ngược và vẽ biểu đồ giao điểm của ba biến thời tiết từ 30 thành phố đại diện, kiểm tra ngưỡng tăng khả năng bay (Hình 5). Kết quả

phân tích ngược cho thấy yếu tố kỹ thuật cần được cải tiến để nâng cao hiệu quả hoạt động của UAV chủ yếu liên quan đến ngưỡng chịu mưa. Trong các tổ hợp ngưỡng kỹ thuật được xem xét, mức cải thiện hiệu quả nhất đạt được khi tăng ngưỡng lượng mưa cho phép từ 0 lên 1 mm/h, trong khi các giới hạn kỹ thuật khác được giữ nguyên. Đối với UAV loại CD, sự thay đổi nhỏ này dẫn đến sự gia tăng đáng kể của chỉ số khả năng bay, từ 39,1% lên 92,8%. Mức khả năng bay đạt 92,8% được xem là đủ cao để UAV loại CD sau khi cải tiến có thể hoạt động hiệu quả trên đất liền Việt Nam trong phần lớn thời gian của năm. Kết quả này cho thấy trong điều kiện khí hậu Việt Nam, mưa là yếu tố khí tượng hạn chế chính đối với hoạt động của UAV, và việc cải thiện khả năng bay trong điều kiện mưa nhẹ có thể mang lại hiệu quả đáng kể trong việc nâng cao khả năng khai thác UAV trong thực tế.



Hình 5. Giá trị khả năng bay của UAV trung bình cho 30 thành phố ở Việt Nam theo các tổ hợp ngưỡng vận hành của nhiệt độ, tốc độ gió và lượng mưa. Mỗi ô biểu diễn khả năng bay theo ngưỡng nhiệt độ tối thiểu và tối đa. Các cột tương ứng với ngưỡng chịu gió cực đại tăng dần (5, 10, 15 và 20 m/s), trong khi các hàng thể hiện các ngưỡng lượng mưa (0, 1, 5 và 50 mm/h). Các ngôi sao tương ứng với tổ hợp ngưỡng hiện tại của CD (màu đỏ) và WRD (màu vàng). Mũi tên chỉ ra cơ hội lớn nhất để cải thiện khả năng bay cho CD – tăng ngưỡng lượng mưa thêm 1mm/h

Từ góc độ kỹ thuật, kết quả phân tích ngược cho thấy ngưỡng chịu mưa 1 mm/h là mục tiêu thiết kế ưu tiên đối với UAV thể hệ tiếp theo hoạt động tại Việt Nam và các khu vực nhiệt đới tương tự: đây là ngưỡng đủ thấp để có thể đạt được thông qua các giải pháp kỹ thuật hợp lý về cải tiến vỏ bọc chống thấm, thiết kế tản nhiệt bụi nước và bảo vệ cảm biến, nhưng mang lại hiệu quả cải thiện khả năng khai thác vượt trội (từ 39,1% lên 92,8%). Kết quả này cũng gợi ý rằng trong lập kế hoạch vận hành, các đơn vị sử dụng UAV loại CD tại Việt Nam nên ưu tiên lịch bay vào mùa đông và mùa xuân, đồng thời tránh các khu vực và thời điểm có lượng mưa cao như mùa hè ở miền Bắc và mùa mưa ở miền Nam.

Thảo luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy khả năng vận hành của UAV tại Việt Nam phụ thuộc lớn vào mức độ chịu thời tiết của thiết bị. Dòng CD bị hạn chế đáng kể, đặc biệt trên khu vực Biển Đông, trong khi dòng WRD vẫn duy trì hiệu quả hoạt động cao. Lượng mưa được xác định là yếu tố cản trở chính đối với hoạt động bay, còn ảnh hưởng của nhiệt độ gần như không đáng kể. Điều kiện thuận lợi nhất cho vận hành UAV xuất hiện ở khu vực phía Nam vào mùa Đông - Xuân, trong khi mùa Hè và Biển Đông là các khu vực bất lợi nhất.

Sự chi phối của lượng mưa đối với dòng UAV phổ thông phản ánh rõ đặc trưng khí hậu nhiệt đới gió mùa tại Việt Nam với mùa mưa kéo dài và lượng mưa lớn. Do thiếu các thiết kế chống thấm tiêu chuẩn, ngay cả mưa nhỏ cũng có thể khiến UAV phải ngừng hoạt động để tránh hư hỏng hệ thống điện tử và cảm biến. Ngược lại, nhiệt độ tại Việt Nam phần lớn vẫn nằm trong dải hoạt động an toàn của thiết bị nên ảnh hưởng không đáng kể. Trên khu vực Biển Đông, khả năng bay suy giảm chủ yếu do tốc độ gió cao, hình thành từ đặc tính không gian biển mở kết hợp với hoàn lưu gió mùa và xoáy thuận nhiệt đới, thường xuyên vượt ngưỡng an toàn của dòng CD.

Đối chiếu kết quả nghiên cứu với các công trình trước đây cho thấy sự khác biệt rõ rệt về các yếu tố khí tượng chi phối hoạt động của UAV giữa

vùng ôn đới và nhiệt đới. Năm 2019, Lundby và cộng sự khi đánh giá khả năng khai thác của các UAV thương mại tại Đan Mạch đã ghi nhận tỷ lệ thời gian có thể hoạt động dao động từ 53,9% đối với dòng phổ thông như DJI Phantom 4 đến 95,8% đối với các nền tảng có khả năng chống chịu thời tiết cao như Wingcopter. Sự hạn chế khả năng khai thác tại khu vực ôn đới chủ yếu xuất phát từ các điều kiện khắc nghiệt của mùa đông, bao gồm nhiệt độ thấp vượt quá giới hạn thiết bị, tuyết rơi và đặc biệt là nguy cơ đóng băng.

Ngược lại, trong điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa của Việt Nam, các yếu tố liên quan đến nhiệt độ thấp, tuyết và băng giá hầu như không xuất hiện. Tuy nhiên, khả năng khai thác của dòng UAV phổ thông, có đặc tính kỹ thuật tương đương DJI Phantom 4, chỉ đạt tối đa 52,7% trên đất liền và còn thấp hơn tại khu vực Biển Đông. Mặc dù giá trị này xấp xỉ tỷ lệ thời gian có thể khai thác 53,9% của DJI Phantom 4 được Lundby và cộng sự ghi nhận tại Đan Mạch, nhưng nguyên nhân dẫn đến sự hạn chế hoạt động của UAV ở hai khu vực lại hoàn toàn khác nhau. Nếu tại vùng ôn đới, các giới hạn chủ yếu xuất phát từ nhiệt độ thấp và hiện tượng đóng băng, thì tại Việt Nam, lượng mưa lớn kéo dài cùng các điều kiện thời tiết bất lợi liên quan đến hoạt động đối lưu mới là những yếu tố chi phối chính. Kết quả này cho thấy cùng một nền tảng UAV có thể chịu tác động bởi những yếu tố khí tượng hoàn toàn khác nhau tùy thuộc vào đặc điểm khí hậu khu vực, qua đó khẳng định sự cần thiết của các nghiên cứu đánh giá khả năng khai thác UAV trong những điều kiện khí hậu đặc thù.

Kết quả này cũng phù hợp với xu thế được ghi nhận trong nghiên cứu quy mô toàn cầu. Năm 2021, Gao và cộng sự chỉ ra rằng tại các khu vực ôn đới và vùng cực, nhiệt độ thấp là rào cản chính đối với hoạt động UAV, trong khi ở vùng nhiệt đới, lượng mưa trở thành yếu tố hạn chế quan trọng hơn. Nghiên cứu tại Việt Nam đã minh chứng rõ điều này khi tác động của nhiệt độ gần như không đáng kể, còn lượng mưa là rào cản lớn nhất. Khả năng bay cũng biến động mạnh theo mùa: cao vào mùa khô ở miền Nam

nhưng giảm rõ rệt trong mùa mưa bão. Điều này cho thấy các tiêu chuẩn vận hành UAV xây dựng cho vùng ôn đới khó phản ánh đúng điều kiện thực tế tại môi trường nhiệt đới.

Nghiên cứu này là một trong những đánh giá định lượng đầu tiên về tác động của điều kiện khí tượng đến hoạt động UAV tại Việt Nam. Điểm nổi bật của nghiên cứu là phân tích ngược, cho thấy chỉ cần nâng khả năng chịu mưa của UAV phổ thông từ 0 lên 1 mm/h, khả năng bay trung bình có thể tăng từ 39,1% lên 92,8%. Kết quả này cho thấy các cải tiến chống thấm cơ bản có thể mang lại hiệu quả khai thác rất lớn mà không cần đầu tư vào các hệ thống UAV chịu thời tiết đất đỏ. Ngoài ra, bản đồ khả năng bay theo mùa cũng cung cấp cơ sở khoa học cho việc tối ưu hóa kế hoạch vận hành và quản lý UAV.

Mặc dù mang lại nhiều kết quả mới, nghiên cứu vẫn tồn tại một số hạn chế. Thứ nhất, dữ liệu tái phân tích ERA5 với độ phân giải $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (27×27 km) phù hợp cho đánh giá quy mô lãnh thổ nhưng chưa phản ánh đầy đủ các hiện tượng vi khí hậu cực đoan cục bộ như gió giật địa hình hay nhiễu động đô thị. Thứ hai, nghiên cứu chủ yếu đánh giá các rào cản đối với khả năng hoạt động bay mà chưa xem xét mức tiêu hao năng lượng của UAV dưới điều kiện gió mạnh và nhiễu động kéo dài.

Từ những hạn chế trên, các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào: (1) sử dụng mô hình thời tiết độ phân giải cao như WRF kết hợp số liệu quan trắc để đánh giá an toàn bay trong điều kiện vi khí hậu đô thị và địa hình phức tạp; (2) tích hợp ảnh hưởng của độ ẩm cao, do có thể gây suy hao tín hiệu và ảnh hưởng đến liên lạc điều khiển UAV; và (3) phát triển các mô hình tính toán tiêu thụ năng lượng của UAV dưới tác động của gió mùa và môi trường nhiệt đới nhằm dự báo chính xác thời gian cũng như tầm bay thực tế cho từng nhiệm vụ.

Kết luận

Nghiên cứu đã đánh giá định lượng khả năng bay của hai dòng UAV đại diện tại Việt Nam và khu vực Biển Đông trong điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa giai đoạn 2010 – 2024. Kết

quả cho thấy sự khác biệt rõ rệt về hiệu năng giữa các dòng thiết bị, khi CD bị hạn chế đáng kể với khả năng bay tối đa chỉ đạt 52,7% trên đất liền và giảm mạnh trên biển, trong khi WRD duy trì khả năng hoạt động rất cao trên cả đất liền và phần lớn khu vực Biển Đông. Nghiên cứu cũng xác định trong các yếu tố khí tượng được khảo sát, lượng mưa là rào cản khí tượng quan trọng nhất đối với hoạt động UAV trong môi trường nhiệt đới gió mùa, còn tốc độ gió chủ yếu gây ảnh hưởng tại khu vực biển; ngược lại, nhiệt độ hầu như không tạo ra tác động đáng kể. Ngoài ra, khả năng bay của UAV có sự phân hóa mạnh theo không gian và thời gian, với điều kiện thuận lợi nhất xuất hiện tại khu vực phía Nam trong mùa Đông – Xuân, trong khi mùa Hè, mùa Thu và các vùng biển xa bờ là những khu vực bất lợi nhất cho hoạt động bay.

Điểm mới của nghiên cứu là thông qua phương pháp phân tích ngược, nghiên cứu cho thấy chỉ cần nâng ngưỡng chịu mưa của UAV phổ thông từ 0 lên 1 mm/h, khả năng bay trung bình có thể tăng từ 39,1% lên 92,8%. Kết quả này cung cấp cơ sở định lượng quan trọng cho việc ưu tiên phát triển các giải pháp chống thấm nhằm nâng cao hiệu quả khai thác UAV trong điều kiện khí hậu nhiệt đới. Bên cạnh đó, nghiên cứu đã xây dựng được bản đồ phân bố khả năng bay theo không gian và thời gian, cho phép xác định các khu vực và mùa thuận lợi hoặc bất lợi cho hoạt động UAV, từ đó hỗ trợ xây dựng kế hoạch bay và phương án khai thác phù hợp cho từng vùng cụ thể.

Kết quả nghiên cứu cho thấy tiềm năng ứng dụng thực tiễn trong việc hỗ trợ tối ưu hóa kế hoạch bay UAV theo không gian và thời gian, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho việc xây dựng tiêu chuẩn kỹ thuật và quản lý hoạt động bay trong điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa. Trong tương lai, cần tiếp tục phát triển các nghiên cứu sử dụng mô hình thời tiết độ phân giải cao, tích hợp ảnh hưởng của độ ẩm đến tín hiệu điều khiển, và xây dựng mô hình tiêu thụ năng lượng thực tế của UAV dưới tác động của gió nhằm hoàn thiện đánh giá an toàn bay.

Lời cảm ơn: Các tác giả xin gửi lời cảm ơn đến Khoa Khí tượng Thủy văn và Hải dương học, Trường Đại học Khoa

học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội đã tạo điều kiện thuận lợi về trang thiết bị và vật tư phục vụ nghiên cứu.

Tuyên bố về đóng góp của tác giả: Phạm Ngọc Bách: Xử lý dữ liệu, viết bản thảo gốc; Trần Quang Đức: Kiểm định và xác thực kết quả, hiệu chỉnh bản thảo; Trịnh Lê Hùng: Kiểm tra và xác thực kết quả, hiệu chỉnh bản thảo.

Tuyên bố về khả năng tiếp cận dữ liệu nghiên cứu: Tất cả dữ liệu liên quan hỗ trợ cho các kết quả của nghiên cứu này đều được trình bày trong bài báo và các tài liệu bổ sung.

Tuyên bố về sử dụng Gen AI: Các công cụ AI chỉ được sử dụng cho việc chỉnh sửa ngôn ngữ, diễn đạt/định dạng mà không được dùng để tạo nội dung khoa học. Toàn bộ dữ liệu, phân tích và diễn giải đều do các tác giả thực hiện và kiểm chứng, và các tác giả hoàn toàn chịu trách nhiệm đối với bản thảo

Tuyên bố về xung đột lợi ích: Không có bất kỳ xung đột lợi ích nào liên quan đến nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- Bùi, V. H., Lư, T. H., & Ngô, Q. H. (2023). Ứng dụng công nghệ UAV (drones) theo dõi sinh trưởng và dự báo năng suất lúa tại vùng canh tác lúa tỉnh Hậu Giang. *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, 59, 35–44. <https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2023.027>
- Electronic Code of Federal Regulations. (n.d.). *14 CFR Part 1—Definitions and abbreviations*. Retrieved March 4, 2026, from <https://www.ecfr.gov/current/title-14/part-1>
- Ercan, H., Ulucan, H., & Kılıç, Ş. (2024). Effect of wind on quadrotor battery consumption. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 96(5), 655–661. <https://doi.org/10.1108/AEAT-08-2022-0223>
- Federal Aviation Administration. (n.d.). *FAA by the numbers*. Retrieved March 4, 2026, from <https://www.faa.gov/node/26>
- Gao, M., Hugenholtz, C., Fox, T., Kucharczyk, M., Barchyn, T., & Nesbit, P. (2021). Weather constraints on global drone flyability. *Scientific Reports*, 11, Article 12092. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91325-w>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Ji, Y., Zhang, Y., & Wang, C.-Y. (2013). Li-ion cell operation at low temperatures. *Journal of The Electrochemical Society*, 160(4), A636–A649. <https://doi.org/10.1149/2.047304jes>
- Li, G., & Cao, Y. (2021). Numerical simulation of helicopter rotor performance degradation in natural rain encounter. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2021, Article 5533823. <https://doi.org/10.1155/2021/5533823>
- Lundby, T., Christiansen, M. P., & Jensen, K. (2019). Towards a weather analysis software framework to improve UAS operational safety. In *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 1372–1380). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2019.8798271>
- Markets and Data. (n.d.). *Vietnam unmanned aerial vehicle market size, trends, report 2031*. <https://www.marketsanddata.com/industry-reports/vietnam-unmanned-aerial-vehicle-market>
- Ministry of Natural Resources and Environment. (2010). *Viet Nam's second national communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Ministry of Natural Resources and Environment. <https://unfccc.int/resource/docs/natc/vnmnc02.pdf>
- Mishra, L., & Kaabouch, N. (2025). Impact of weather factors on unmanned aerial vehicles' wireless communications. *Future Internet*, 17(1), 27. <https://doi.org/10.3390/fi17010027>
- Nguyễn, T. Đ., Đỗ, T. N., Ngô, A. T., & Nguyễn, H. X. (2022). Nghiên cứu khả năng ứng dụng của thiết bị UAV chi phí thấp trong đo đạc thành lập bản đồ: Thử nghiệm một số công trình trên địa bàn tỉnh Bình Định. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 736(1), 202–214.
- Phan, N. V., Nguyễn, H. Đ., Chung, M. Q., & Phùng, N. A. (2022). Ứng dụng công nghệ UAV kết hợp WebGIS trong đo vẽ địa hình phục vụ khảo sát, thiết kế công trình. *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, EME4(1), 181–192. [https://doi.org/10.36335/VNJHM.2022\(EME4\).181-192](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2022(EME4).181-192)
- Roseman, C. A., & Argrow, B. M. (2020). Weather Hazard Risk Quantification for sUAS Safety Risk Management. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 37(7), 1251–1268. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0009.1>
- Võ, V. H., Lê, M. T., & Phạm, V. H. (2023). Nghiên cứu ứng dụng thiết bị bay không người lái (UAV) để lập bản đồ vi phạm hành lang kỹ thuật công trình vườn quan trắc khí tượng bề mặt. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 745(1), 1–10.
- Watkins, S., Burry, J., Mohamed, A., Marino, M., Prudden, S., Fisher, A., Kloet, N., Jakobi, T., & Clothier, R. (2019). Ten questions concerning the use of drones in urban environments. *Building and Environment*, 167, Article 106458. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106458>

Abstract

Study on the Impact of Tropical Meteorological Conditions on the Operation of Unmanned Aerial Vehicles in Vietnam

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are increasingly being employed in both military and civilian applications. In Vietnam, the tropical monsoon climate, characterized by heavy rainfall, strong winds, and high temperatures, poses significant challenges to UAV operations. This study evaluates the impacts of tropical meteorological conditions on UAV flyability over Vietnam and the South China Sea. Three key meteorological factors were examined, including air temperature, wind speed, and precipitation, using two representative UAV categories: conventional drones (CD) and weather-resistant drones (WRD). The results show that the flyability of CDs over land reaches a maximum of only 52.7% under day-and-night operational conditions and decreases further when operating over the sea, whereas WRDs maintain very high flyability, approaching 100% over land. Precipitation is identified as the dominant limiting factor for CDs, while air temperature has a negligible effect. The flyability of CDs exhibits pronounced spatial and seasonal variability, with more favorable conditions in southern Vietnam and during the winter–spring season, and the least favorable conditions occurring in summer due to increased rainfall frequency. Notably, increasing the rainfall tolerance threshold from 0 to 1 mm/h can raise average flyability from 39.1% to 92.8%, highlighting rain resistance as a key technical improvement for UAVs in tropical environments. These findings provide a scientific basis for UAV design, optimization of flight scheduling, and the development of policies tailored to tropical monsoon climate conditions.

Keywords: *Flyability; Monsoon; South China Sea; Tropical; UAV meteorological conditions; Unmanned aerial vehicle (UAV); Vietnam.*