

Bài báo khoa học

## Nghiên cứu ảnh hưởng tương tác đại dương–khí quyển trong mô phỏng bão trên khu vực Biển Đông

Vũ Hải Đăng<sup>1</sup>, Nguyễn Thị Thanh<sup>2\*</sup>, Phạm Văn Tiến<sup>2</sup>, Nguyễn Bá Thủy<sup>3</sup>, Đỗ Ngọc Thực<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Viện Địa chất và Địa vật lý biển, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam; vuhaidang@hotmail.com; dothuc.vn@gmail.com

<sup>2</sup> Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu; thanhnt.met@gmail.com; phamvantienbn@gmail.com

<sup>3</sup> Trung tâm Dự báo Khí tượng Thủy văn Quốc gia; thuybanguyen@gmail.com

\*Tác giả liên hệ: thanhnt.met@gmail.com; Tel.: +84–974042757

Ban Biên tập nhận bài: 15/10/2022; Ngày phản biện xong: 24/11/2022; Ngày đăng: 25/11/2022

**Tóm tắt:** Tương tác đại dương–khí quyển ảnh hưởng rất lớn đến sự hình thành và phát triển của bão thông qua việc cung cấp năng lượng cho bão dưới dạng thông lượng ẩn nhiệt và ẩm nhiệt. Nhằm nghiên cứu ảnh hưởng tương tác đại dương–khí quyển đến mô phỏng bão trên khu vực Biển Đông, nghiên cứu tiến hành mô phỏng cơn bão Conson (2021) và siêu bão Noru (2022) bằng mô hình kết hợp WRF và 3DPWP. Kết quả nghiên cứu cho thấy tương tác đại dương–khí quyển làm giảm đáng kể SST tại khu vực tâm bão, dẫn đến giảm cường độ bão khi so sánh với trường hợp không tính đến tương tác đại dương–khí quyển. Kết hợp mô hình WRF và mô hình 3DPWP làm giảm sai số mô phỏng cường độ ở cơn bão Conson từ 1–2,4 m/s nhưng làm tăng sai số mô phỏng cường độ bão ở cơn bão Noru từ 1–4 m/s khi so sánh với trường hợp sử dụng mô hình WRF riêng lẻ. Việc đưa hiệu ứng tương tác đại dương khí quyển vào mô hình WRF cải thiện sai số trung bình khoảng cách khoảng 42 km ở hạn dự báo đến 30 giờ đối với cơn bão Conson, tuy nhiên gia tăng sai số trung bình khoảng cách đến 50 km đối với cơn bão Noru do làm lệch hướng của quỹ đạo hoặc làm bão di chuyển chậm hơn so với trường hợp không tính đến tương tác đại dương–khí quyển.

**Từ khóa:** Bão; Biển Đông; Tương tác đại dương–khí quyển; WRF; 3DPWP.

### 1. Mở đầu

Việt Nam là một trong những quốc gia chịu ảnh hưởng nặng nề của thiên tai và biến đổi khí hậu [1]. Trong đó, bão là một trong những loại hình thiên tai thường gây thiệt hại nghiêm trọng nhất về kinh tế, xã hội, môi trường và đe dọa tính mạng con người. Trong những năm gần đây, hoạt động bão trên khu vực Biển Đông có những diễn biến bất thường, có xu hướng thay đổi về tần suất, cường độ, quỹ đạo do ảnh hưởng của biến đổi khí hậu. Do đó, nghiên cứu cơ chế và dự báo bão là vấn đề cần thiết nhằm nâng cao khả năng phòng, chống, ứng phó với thiên tai. Nhiều nỗ lực nghiên cứu nhằm nâng cao khả năng dự báo bão được thực hiện thông qua những cải tiến trong mô hình số trị và ứng dụng các khoa học kỹ thuật tiên tiến. Trong vài thập kỷ gần đây, kỹ năng dự báo quỹ đạo bão đã được cải thiện đáng kể [2–4], tuy nhiên kỹ năng dự báo cường độ bão chưa được cải thiện nhiều [5–6], một phần nguyên nhân là do sự tương tác phức tạp giữa nội động lực, cấu trúc bão và môi

trường đại dương–khí quyển xung quanh [7–8]. Tương tác đại dương–khí quyển ảnh hưởng rất lớn đến sự hình thành và phát triển của bão thông qua việc cung cấp năng lượng cho bão dưới dạng thông lượng nhiệt và ẩm nhiệt. Sự hội tiếp âm của đại dương trong quá trình tương tác đại dương–khí quyển trong bão là quá trình giảm SST ở khu vực tâm bão, thông qua quá trình xáo trộn thẳng đứng và quá trình nước trời [9].

Quá trình xáo trộn thẳng đứng xảy ra do gió bề mặt biển mạnh lên làm tăng ma sát bề mặt, tạo nên dòng chảy trong lớp xáo trộn. Sự biến đổi của vận tốc dòng chảy theo phương thẳng đứng ở phía trên của đại dương tạo nên xoáy rối, gây nên xáo trộn và cuốn hút phần tử nước lạnh từ lớp nôm nhiệt lên lớp xáo trộn. Quá trình xáo trộn thẳng đứng xảy ra trong vài giờ và thường làm giảm nhiệt độ mặt nước biển ở khu vực tâm bão, làm giảm quá trình bốc hơi và do đó, giảm năng lượng cung cấp cho bão tồn tại và phát triển [10]. Đối với quá trình nước trời, gió trong bão xoáy ngược chiều kim đồng hồ ở Bắc bán cầu gây ra ứng suất bề mặt có dạng xoáy, dẫn đến dòng chảy bề mặt lúc đầu có dạng xoáy ngược chiều kim đồng hồ. Mặt khác, lực Coriolis làm dòng chảy hướng sang phải, kết quả của hai quá trình này làm dòng chảy bề mặt đại dương hướng ra ngoài tâm bão. Khi nước ở lớp bề mặt đại dương được đẩy ra xa tâm bão, nước lạnh ở lớp dưới đại dương chuyển động lên bề mặt biển thay thế, tạo ra quá trình nước trời ở khu vực tâm bão theo lý thuyết lớp biên Ekman. Không giống như quá trình xáo trộn, quá trình nước trời thường xảy ra trong khoảng thời gian từ nửa ngày trở lên. Do đó, đối với những cơn bão di chuyển chậm, hiệu ứng giảm SST ở khu vực tâm bão thể hiện rõ ràng hơn so những cơn bão di chuyển nhanh [11–12]. Nghiên cứu [7] cho thấy SST giảm lớn hơn 2,5°C cản trở sự tăng cường cường độ bão, thậm chí có thể làm suy yếu cường độ bão [11, 13]. Vùng SST giảm do bão có thể tồn tại khoảng 1 đến 2 tuần và có thể ảnh hưởng đến quỹ đạo, cường độ của cơn bão tiếp theo [14–15]. Do đó, cung cấp ước lượng mức độ giảm SST chính xác sẽ góp phần cải thiện kỹ năng dự báo cường độ bão [7, 16].

Nghiên cứu mô hình hóa quá trình tương tác đại dương–khí quyển đã được các nhà khoa học quan tâm từ nửa cuối của thế kỷ XX. Một trong những mô hình đơn giản được sử dụng để nghiên cứu tương tác đại dương–khí quyển là mô hình lớp xáo trộn đại dương 1 chiều (OML) [17]. Các nghiên cứu [18–19] cho thấy kết hợp mô hình nghiên cứu và dự báo thời tiết (WRF) và mô hình OML đã mô phỏng được quá trình giảm SST do bão, do đó, cải thiện được sai số dự báo cường độ bão. Một số nghiên cứu khác sử dụng kết hợp giữa mô hình khí quyển và mô hình đại dương 3 chiều để nghiên cứu tương tác đại dương khí quyển trong bão. Mô hình đại dương 3 chiều Price–Weller–Pinkel (3DPWP) được phát triển bởi [20–21] đưa vào trong lõi động lực của mô hình WRF. Sử dụng mô hình WRF kết hợp với mô hình 3DPWP cho phép mô phỏng sự thay đổi các đặc điểm của lớp xáo trộn đại dương như nhiệt độ, độ muối, độ sâu lớp xáo trộn trong thời gian bão đi qua, dẫn đến giảm SST, thông lượng nhiệt, ẩm và trường gió bề mặt ở khu vực gần tâm bão, từ đó giảm sai số dự báo cường độ bão khoảng 29–47% ở hạn dự báo từ 24 đến 96 giờ [22–23]. Nghiên cứu tương tác đại dương–khí quyển thông qua việc sử dụng kết hợp mô hình đại dương đầy đủ và mô hình khí quyển bất thủy tĩnh cũng đã được thực hiện [11, 24–26]. Các kết quả nghiên cứu cho thấy khả năng dự báo cường độ bão được cải thiện đáng kể khi đưa vào tính toán quá trình giảm SST do bão.

Ở trên ta, nghiên cứu tương tác đại dương–khí quyển trong bão bằng mô hình số trị chưa được quan tâm nhiều. Nghiên cứu [27] kết nối không đồng thời các mô hình khí tượng và đại dương nhằm dự báo bão, sóng và nước dâng trong bão. Nghiên cứu [28] kết nối mô hình khí quyển HWRF với mô hình hải dương ROMS để dự báo quỹ đạo và cường độ bão. Kết quả nghiên cứu cho thấy kết nối mô hình hải dương vào mô hình khí tượng đã biểu diễn được quá trình SST giảm do bão thể hiện qua sự biến đổi nhiệt độ nước biển theo phương thẳng đứng. Quá trình giảm SST này tác động trở lại làm ảnh hưởng tới cường độ và quỹ đạo bão. Theo đó, cường độ cơn bão được mô phỏng bằng mô hình kết hợp đại dương–khí quyển có xu hướng nhỏ hơn về cường độ khi so sánh cơn bão được mô phỏng

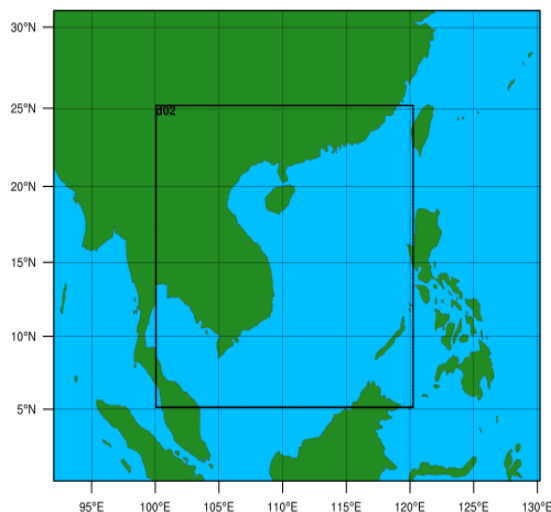
bằng mô hình HWRF chạy độc lập. Tuy nhiên, ảnh hưởng của SST giảm do bão đến quỹ đạo và cường độ thể hiện rõ rệt khi bão mạnh, di chuyển chậm và không thể hiện rõ rệt khi bão yếu hoặc di chuyển với tốc độ tương đối nhanh.

Nhằm nghiên cứu ảnh hưởng tương tác đại dương–khí quyển, cụ thể là ảnh hưởng của sự giảm SST do bão gây ra, đến mô phỏng cường độ và quỹ đạo bão trên khu vực Biển Đông, nghiên cứu tiến hành mô phỏng hai cơn bão Conson (2021) và Noru (2022) bằng việc kết hợp mô hình WRF và mô hình 3DPWP.

## 2. Phương pháp nghiên cứu và số liệu sử dụng

### 2.1. Lựa chọn các tham số cho mô hình WRF

Mô hình số trị được sử dụng trong nghiên cứu này là hệ thống mô hình WRF nghiên cứu nâng cao (ARW) phiên bản 4.1 được phát triển chủ yếu bởi Phòng Khí tượng qui mô nhỏ và qui mô vừa thuộc Trung tâm quốc gia nghiên cứu Khí quyển (NCAR), Trung tâm quốc gia dự báo môi trường (NCEP), Mỹ. Nghiên cứu lựa chọn 2 miền tính lưới lồng: miền tính 1 nằm từ khoảng 0–31°N và 92–130°E với kích thước 135×158 lưới và độ phân giải ngang 27 km; miền tính thứ 2 được lồng vào miền tính trên với khoảng 5–25°N và 100–120°E với kích thước 259×250 lưới và độ phân giải ngang 9 km (Hình 1).



**Hình 1.** Miền tính của mô hình WRF được lựa chọn.

Kế thừa các nghiên cứu lựa chọn tham số hóa các quá trình vật lý cho mô hình WRF [28], nghiên cứu lựa chọn các tham số cho mô hình WRF như sau: Sơ đồ New Thompson [29] cho sơ đồ vi vật lý; Kain–Fritsch [30] cho sơ đồ đối lưu; RRTMG [31] cho sơ đồ bức xạ sóng ngắn và bức xạ sóng dài; YSU [32] cho sơ đồ lớp biên hành tinh.

### 2.2. Mô hình 3DPWP

Mô hình 3DPWP là mô hình hoàn lưu đại dương 3 chiều đầy đủ về mặt vật lý với các quá trình đại dương bao gồm quá trình cuốn hút/ xáo trộn, vận chuyển thẳng đứng/ nước trời, vận chuyển ngang, tuy nhiên, không bao gồm dòng chảy nền và độ sâu đáy biển. Đây là mô hình đại dương thủy tĩnh với các phương trình động lượng, nhiệt và muối như dưới đây:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + fKV + V \cdot \nabla V + W \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial \tau}{\partial z} - \frac{1}{\rho_o} \nabla P \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V \cdot \nabla T + W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{\rho_o C_p} \frac{\partial H}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + V \cdot \nabla S + W \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial E}{\partial z} \quad (3)$$

Trong đó  $T$  và  $S$  là nhiệt độ và độ muối;  $P$  là áp suất thủy tĩnh;  $H$ ,  $E$  và  $\tau$  là các thông lượng nhiệt (ẩn nhiệt và hiển nhiệt), muối và động lượng;  $V$  là dòng chảy ngang và  $W$  là thành phần thẳng đứng của vận tốc;  $f$  là tham số Coriolis.

Mô hình 3DPWP được kết nối trong lõi động lực của hệ thống mô hình ARW với thiết lập các điểm lưới ngang như mô hình WRF, 30 mực thẳng đứng với độ phân giải 10 m đối với lớp từ 5 m đến 195 m và 20 m đối với các lớp từ 210 m đến 390 m. Trong nghiên cứu này, điều kiện ban đầu của mô hình 3DPWP bao gồm trường SST được lấy từ số liệu GFS như trong mô hình WRF, cấu trúc nhiệt, muối theo chiều thẳng đứng tại mỗi nút lưới là các profile nhiệt, muối từ số liệu trung bình nhiều năm. Điều kiện biên xung quanh được coi là biên kín, tất cả giá trị tại điểm đất liền và bên ngoài miền tính được cho bằng 0.

### 2.3. Thiết kế thử nghiệm

Để nghiên cứu ảnh hưởng tương tác đại dương–khí quyển đến cường độ và quỹ đạo bão trên Biển Đông, nghiên cứu thực hiện mô phỏng lại cơn bão Conson (2021) và cơn bão Noru (2022) hoạt động trên khu vực Biển Đông với hai trường hợp thử nghiệm: (1) Mô phỏng bão bằng mô hình WRF (CONTROL); (2) Mô phỏng bão bằng mô hình WRF kết hợp với mô hình 3DPWP (OCEAN). Tất cả các tham số khí quyển, điều kiện ban đầu và điều kiện biên khác được thiết lập như nhau cho cả hai trường hợp mô phỏng.

### 2.4. Số liệu sử dụng

Các trường ban đầu và điều kiện biên cho mô hình WRF là số liệu phân tích của mô hình Hệ thống Dự báo toàn cầu (GFS), độ phân giải ngang  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  kinh, vĩ, các số liệu cách nhau 6 giờ, được cung cấp bởi NOAA thông qua trang web: <https://www.ncei.noaa.gov/data/global-forecast-system/access/grid-004-0.5-degree/forecast>.

Số liệu về bão bao gồm kinh, vĩ độ tại tâm bão, tốc độ gió mực sát bề mặt lớn nhất ở vùng gần tâm bão ( $V_{max}$ ), áp suất mực mặt biển nhỏ nhất tại tâm bão ( $P_{min}$ ) được khai thác từ nguồn dữ liệu quỹ đạo bão chuẩn (*Best Track*) của Trung tâm Cảnh báo Bão Mỹ (JTWC) thông qua trang web: <https://www.metoc.navy.mil/jtwc/>.

## 3. Kết quả và thảo luận

### 3.1. Sơ lược về cơn bão Conson (2021) và cơn bão Noru (2022)

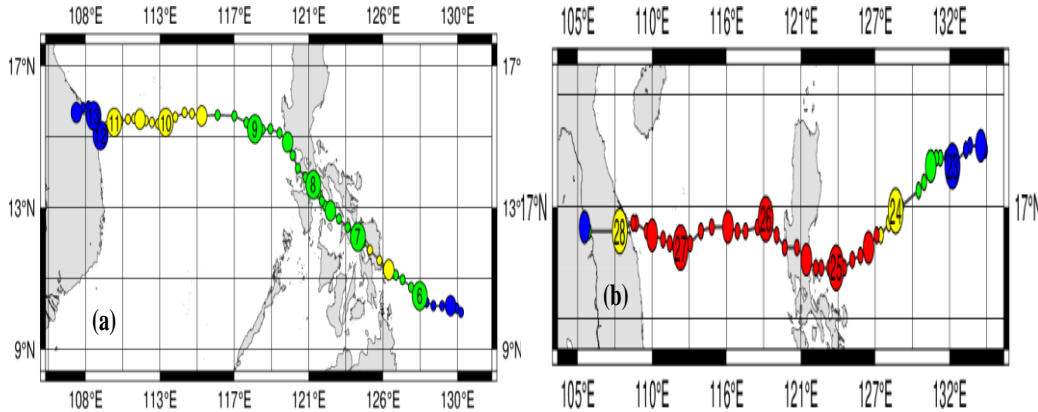
#### 3.1.1. Cơn bão Conson (2021)

Cơn bão Conson (cơn bão số 5 năm 2021) được hình thành từ vùng áp thấp trên khu vực ngoài khơi quần đảo Lu–đông (Philippin), di chuyển theo hướng Tây Bắc và đi vào Biển Đông vào tối ngày 08/9/2021 với  $V_{max}$  đạt cấp 9, giạt cấp 11. Sáng 09/9, bão chuyển hướng di chuyển theo hướng Tây với tốc độ khoảng 20 km/h. Đến đêm 9/9, bão Conson mạnh lên cấp 10, giạt cấp 12, tốc độ di chuyển giảm xuống 15 km/h, sau đó giảm dần cường độ. Tối ngày 11/9, khi di chuyển đến khu vực đảo Lý Sơn,  $V_{max}$  giảm xuống cấp 8, sau đó suy yếu thành áp thấp nhiệt đới và tan trên vùng biển Quảng Nam–Quảng Ngãi vào trưa ngày 12/9 (Hình 2a).

#### 3.1.2. Cơn bão Noru (2022)

Cơn bão Noru (cơn bão số 4 năm 2022) là một siêu bão hình thành từ khu vực biển phía đông Philippin. Sau khi đổ bộ vào quần đảo Lu–đông (Philippin), bão Noru đi vào Biển Đông vào sáng sớm ngày 26/9/2022 với  $V_{max}$  mạnh cấp 12–13, giạt cấp 15 và di chuyển nhanh theo hướng Tây trên khu vực Biển Đông với tốc độ 25 km/h. Hồi 07 giờ ngày 27/9, vị trí tâm bão ở khoảng 15,5 độ Vĩ Bắc; 112,1 độ Kinh Đông, trên vùng biển phía Nam quần đảo Hoàng Sa, với  $V_{max}$  đạt cấp 14–15, giạt trên cấp 17. Bão Noru tiếp tục di chuyển theo hướng Tây với tốc độ 20 km/h và giảm dần cường độ. Hồi 04 giờ ngày 28/9,

vị trí tâm bão ở khoảng 15,8 độ Vĩ Bắc; 108,1 độ Kinh Đông, trên đất liền khu vực Thừa Thiên Huế–Quảng Ngãi,  $V_{max}$  đạt cấp 10–11, giạt cấp 13. Bão tiếp tục đi sâu vào đất liền, suy yếu và tan dần trên khu vực phía nam nước Lào (Hình 2b).

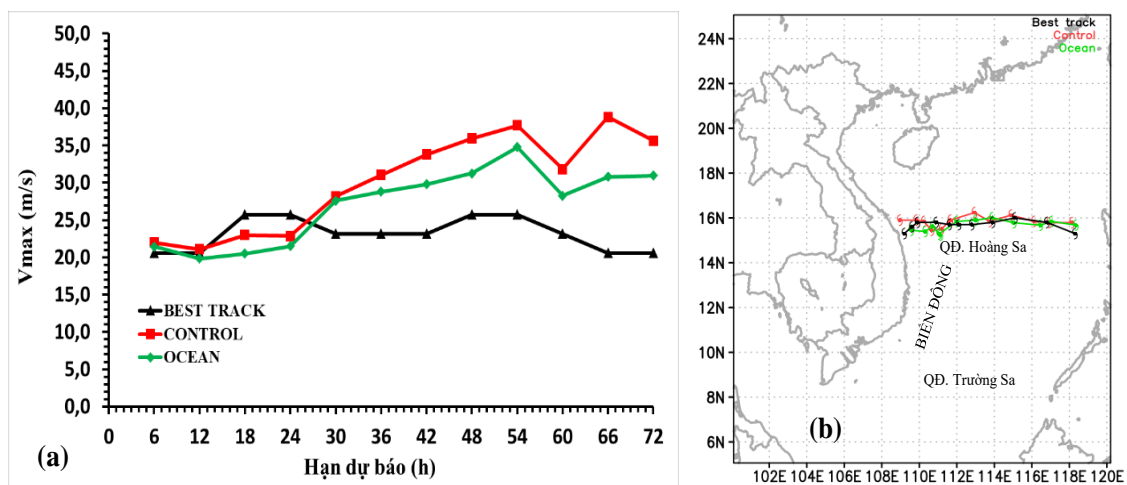


Hình 2. Đường đi của: (a) cơn bão Conson (2021);(b) cơn bão Noru (2022) [33].

### 3.2. Mô phỏng cơn bão Conson (2021)

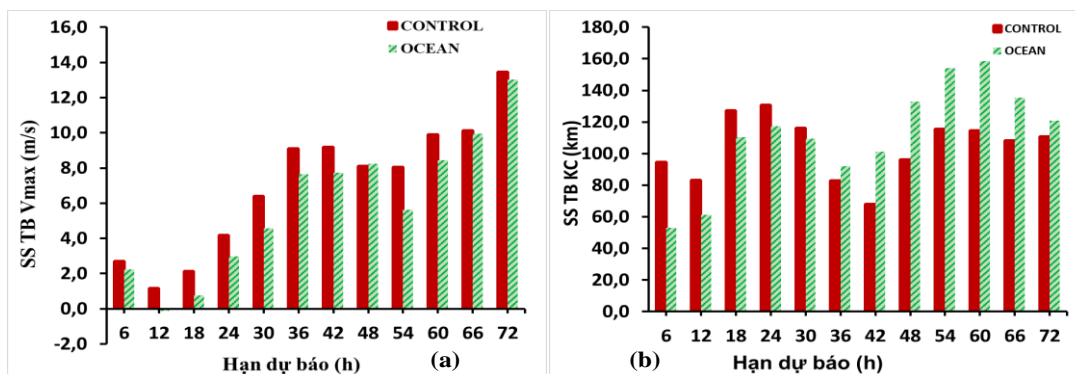
Đối với mỗi trường hợp thử nghiệm, mô phỏng cơn bão Conson (2021) được thực hiện với 4 phiên mô phỏng lần lượt là: 2021090812, 2021090818, 2021090900 và 2021090906. Thông thường, có thể sử dụng cả 2 chỉ số  $V_{max}$  và  $P_{min}$  để đánh giá cường độ bão, tuy nhiên, đối với xấp xỉ cho phép,  $P_{min}$  có thể tính được từ số liệu  $V_{max}$  khi dùng hàm tương quan kinh nghiệm áp suất–gió. Do đó, nghiên cứu này chỉ sử dụng chỉ số  $V_{max}$  để đánh giá cường độ bão mô phỏng.

Mô phỏng  $V_{max}$  và quỹ đạo bão theo 2 trường hợp CONTROL và OCEAN với phiên 2021090818 (ứng với thời điểm bắt đầu mô phỏng 18Z ngày 08/09/2021) được trình bày tại Hình 3. Theo đó, cả hai trường hợp mô phỏng chưa tốt diễn biến tăng giảm cường độ bão Conson. Tại hạn dự báo từ 12 đến 24 giờ,  $V_{max}$  trong cả hai trường hợp mô phỏng đều thấp hơn so với thực tế, ngược lại từ hạn dự báo 30 giờ đến 72 giờ, cả hai trường hợp cho  $V_{max}$  cao hơn so với thực tế. Mô phỏng  $V_{max}$  theo trường hợp OCEAN gần với Best track hơn khi so sánh với trường hợp CONTROL tại các hạn dự báo từ 30 đến 72 giờ. Một điều đáng lưu tâm là cường độ bão mô phỏng bởi OCEAN có xu thế nhỏ hơn so với trường hợp CONTROL tại hầu hết các hạn dự báo (Hình 3a). Điều này sẽ được thảo luận kỹ hơn ở phần sau. Mô phỏng quỹ đạo bão trong hai trường hợp tương đối bám sát so với quỹ đạo bão thực tế (Hình 3b).



Hình 3. Mô phỏng: (a)  $V_{max}$ ; (b) quỹ đạo bão Conson (2021) theo 2 trường hợp CONTROL và OCEAN với thời điểm ban đầu mô phỏng 18Z ngày 08/9/2021.

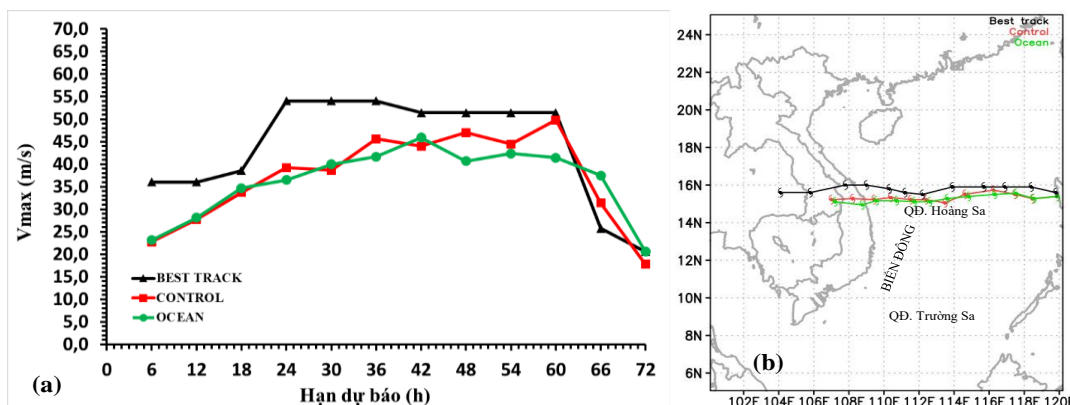
Đánh giá sai số trung bình  $V_{max}$  của cơn bão Conson theo hai trường hợp với 4 phiên mô phỏng cho thấy việc kết hợp mô hình WRF và mô hình 3DPWP làm giảm sai số mô phỏng  $V_{max}$  so với trường hợp sử dụng mô hình WRF riêng lẻ, với giá trị sai số  $V_{max}$  giảm 1–2,4 m/s (Hình 4a). Sai số trung bình khoảng cách trong trường hợp OCEAN được cải thiện với sai số khoảng cách giảm khoảng 42 km khi so sánh với trường hợp CONTROL ở hạn dự báo đến 30 giờ. Tuy nhiên, ở các hạn dự báo từ 36 giờ đến 72 giờ, sai số trung bình khoảng cách ở trường hợp OCEAN lớn hơn đáng kể khi so sánh với trường hợp CONTROL (Hình 4b).



**Hình 4.** (a) Sai số trung bình  $V_{max}$ ; (b) Sai số trung bình khoảng cách của mô phỏng bão Conson (2021) theo 2 trường hợp CONTROL và OCEAN.

### 3.3. Mô phỏng cơn bão Noru (2022)

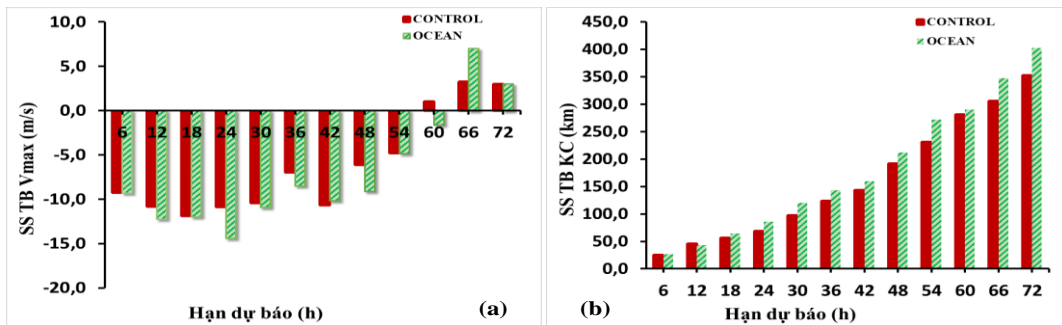
Mô phỏng cơn bão Noru (2022) được thực hiện theo hai trường hợp CONTROL và OCEAN với 4 phiên mô phỏng lần lượt là: 2022092512, 2022092518, 2022092600, 2022092606. Kết quả mô phỏng  $V_{max}$  và quỹ đạo bão Noru theo 2 trường hợp với phiên 2022092512 (ứng với thời điểm bắt đầu mô phỏng 12Z ngày 25/09/2022) được trình bày tại Hình 5.



**Hình 5.** Mô phỏng: (a)  $V_{max}$ ; (b) quỹ đạo bão Noru (2022) theo 2 trường hợp CONTROL và OCEAN với thời điểm ban đầu mô phỏng 12Z ngày 25/9/2022.

Hình 5a mô phỏng  $V_{max}$  trong cả hai trường hợp thấp hơn đáng kể so với cường độ bão Noru thực tế đạt được tại hầu hết các hạn dự báo. Điều này có thể lý giải do Noru là một siêu bão với  $V_{max}$  trên khu vực Biển Đông có thể đạt đến 46 m/s. Thông thường, xoáy bão ban đầu từ mô hình toàn cầu GFS yếu hơn so với thực tế, đặc biệt đối với các cơn bão có cường độ rất mạnh [34]. Tương tự như cơn bão Conson (2021), mô phỏng cường độ bão Noru trong trường hợp OCEAN yếu hơn so với trường hợp CONTROL. Mô phỏng quỹ đạo bão trong cả hai trường hợp có xu thế lệch về phía nam và di chuyển chậm hơn so với thực tế. Quỹ đạo bão được mô phỏng ở trường hợp OCEAN có xu hướng lệch nam hơn so với trường hợp CONTROL.

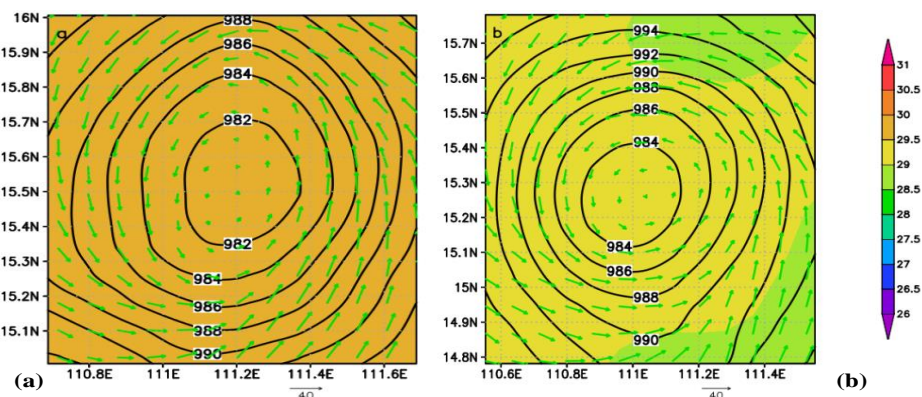
Từ kết quả đánh giá sai số trung bình  $V_{max}$  của cơn bão Noru đối với 4 phiên mô phỏng cho thấy  $V_{max}$  trong cả hai trường hợp có xu thế nhỏ hơn so với thực tế ở các hạn dự báo trước 54 giờ và có xu thế lớn hơn thực tế đối với các hạn từ 60 đến 72 giờ do trên thực tế, ở các thời điểm này bão đã đi vào đất liền khu vực Trung Trung Bộ, suy yếu đáng kể, trong khi mô phỏng trong hai trường hợp cho bão đang hoạt động trên biển. Khác với cơn bão Conson, sai số trung bình  $V_{max}$  của cơn bão Noru ở trường hợp OCEAN lớn hơn ở trường hợp CONTROL, với giá trị chênh lệch 1–4 m/s (Hình 6a). Sai số trung bình khoảng cách trong cả hai trường hợp rất lớn, đặc biệt có thể lên đến 200–400 km ở các hạn dự báo từ 48 giờ đến 72 giờ do mô phỏng bão Noru di chuyển chậm và lệch nam hơn so với thực tế. Sai số trung bình khoảng cách ở trường hợp OCEAN lớn hơn đến 50 km so với trường hợp CONTROL (Hình 6b).



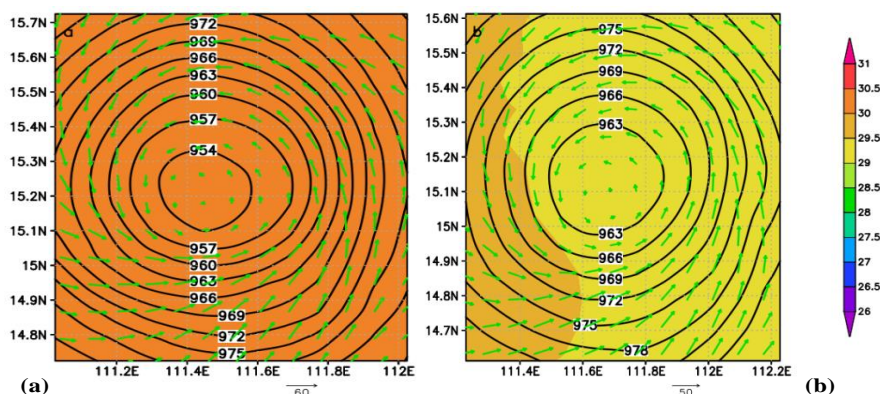
**Hình 6.** (a) Sai số trung bình  $V_{max}$ ; (b) Sai số trung bình khoảng cách của mô phỏng bão Noru (2022) theo 2 trường hợp CONTROL và OCEAN.

### 3.4. Mô phỏng SST, khí áp mực mặt biển, vận tốc gió, thông lượng ẩn nhiệt tại khu vực tâm bão

Để phân tích rõ hơn ảnh hưởng của tương tác đại dương–khí quyển đến mô phỏng bão, bài báo xem xét đến mô phỏng các trường SST, khí áp mực mặt biển, vận tốc gió, thông lượng ẩn nhiệt tại khu vực tâm bão theo hai trường hợp mô phỏng. Hình 7 và hình 8 cho thấy tương tác đại dương–khí quyển trong bão làm giảm đáng kể SST khu vực tâm bão khoảng 1 đến 1,5°C đối với cả 2 cơn bão Conson và Noru sau 48h mô phỏng, tuy nhiên, vùng có SST giảm 1,5°C ở cơn bão Noru lớn hơn so với cơn bão Conson. Theo đó, hiệu khí áp mực mặt biển giữa OCEAN và CONTROL ở cơn bão Noru lớn hơn so với ở cơn bão Conson, với giá trị lần lượt là -9mb và -2mb. Mức độ giảm vận tốc gió khu vực gần tâm bão ở trường hợp OCEAN so với trường hợp CONTROL trong cơn bão Noru thể hiện rõ rệt hơn trong cơn bão Conson. Giá trị lớn nhất của  $V_{max}$  đạt 60 m/s ở trường hợp CONTROL giảm xuống 50 m/s ở trường hợp OCEAN đối với cơn bão Noru và giảm từ 40 m/s ở trường hợp CONTROL xuống 30 m/s ở trường hợp OCEAN đối với cơn bão.

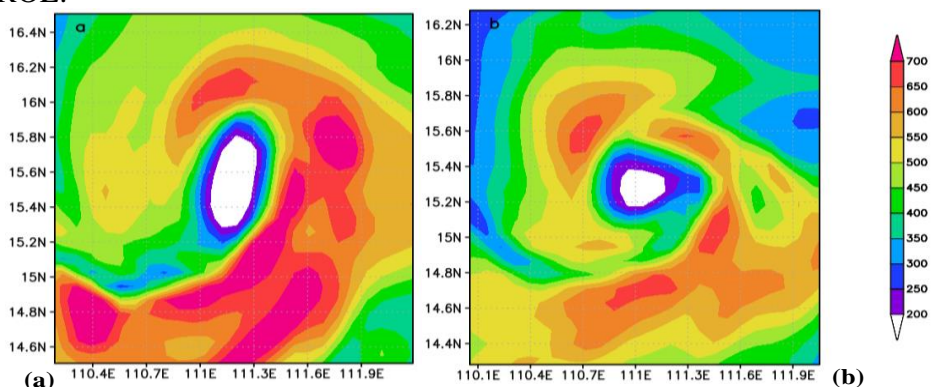


**Hình 7.** Mô phỏng 48h trường SST, khí áp mực mặt biển, gió trong bão Conson (2021) với thời điểm ban đầu mô phỏng 18Z ngày 08/9/2021 theo hai trường hợp: a) CONTROL và b) OCEAN.



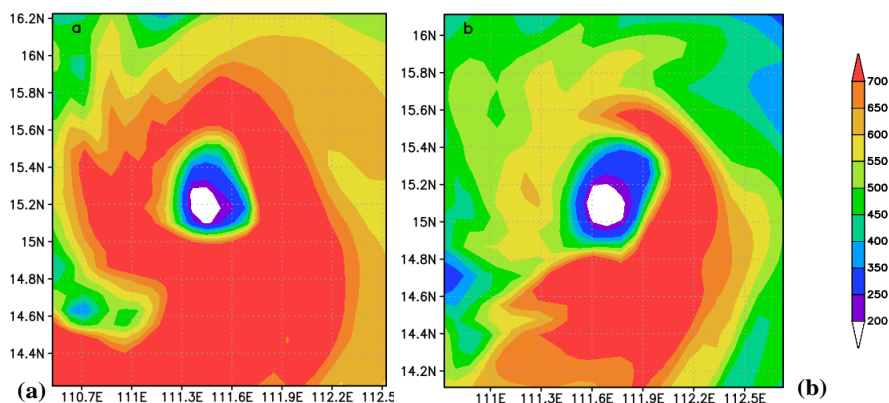
**Hình 8.** Mô phỏng 48h trường SST, khí áp mực mặt biển, gió trong bão Noru (2022) với thời điểm ban đầu mô phỏng 12Z ngày 25/9/2022 theo hai trường hợp: a) CONTROL và b) OCEAN.

Tâm nóng của bão được duy trì do hội tụ ẩm và vận chuyển thông lượng ẩn nhiệt ở lớp biên dưới khí quyển và giải phóng ẩn nhiệt trong khí quyển phía trên. Do đó, phân tích thông lượng ẩn nhiệt và ẩn nhiệt cho thấy đến mức độ mạnh yếu của cường độ bão. Hình 9 và hình 10 biểu diễn mô phỏng 48h thông lượng ẩn nhiệt tại khu vực tâm bão Conson và Noru. Theo đó, việc kết hợp mô hình WRF và mô hình 3DPWP làm giảm đáng kể thông lượng ẩn nhiệt và ẩn nhiệt ở khu vực tâm bão so với trường hợp sử dụng mô hình WRF riêng lẻ ở cả hai cơn bão Noru và Conson. Từ những phân tích trên cho thấy tương tác đại dương–khí quyển làm giảm đáng kể SST tại khu vực tâm và sự phản hồi của đại dương lên khí quyển làm giảm thông lượng ẩn nhiệt, ẩn nhiệt, dẫn đến giảm cường độ bão khi so sánh với trường hợp không tính đến hiệu ứng tương tác đại dương–khí quyển. Một điều thú vị có thể nhận ra là mặc dù kết quả mô phỏng cả hai cơn bão đều chỉ rõ cường độ bão theo trường hợp OCEAN giảm đáng kể so với trường hợp CONTROL, tuy nhiên, kết quả mô phỏng cơn bão Conson cho thấy sự cải thiện đáng kể sai số mô phỏng cường độ bão, ngược lại, kết quả mô phỏng cơn bão Noru làm gia tăng thêm sai số mô phỏng cường độ bão. Một phần nguyên nhân có thể nhận thấy khi xem xét mô phỏng bão từ trường ban đầu GFS. Tại thời điểm ban đầu mô phỏng, dữ liệu GFS mô tả tương đối chính xác cường độ bão đối với cơn bão Conson ( $V_{max}$  tại hạn dự báo 6 giờ, Hình 3a), tuy nhiên, dữ liệu GFS mô tả bão thấp rất nhiều so với thực tế (sau 6 giờ dự báo,  $V_{max}$  ở trường hợp CONTROL và OCEAN chỉ đạt khoảng 23 m/s, trong khi số liệu Best track từ JTWC là 36 m/s, xem Hình 5a). Sự khác biệt giữa mô phỏng và thực tế ở thời điểm ban đầu là một trong những nguyên nhân dẫn đến mô phỏng cường độ bão thấp hơn so với thực tế ở cơn bão Noru. Hiệu ứng tương tác đại dương–khí quyển làm giảm thêm cường độ bão, dẫn đến gia tăng sai số mô phỏng về cường độ bão Noru ở trường hợp OCEAN khi so sánh với trường hợp CONTROL.



**Hình 9.** Mô phỏng 48h thông lượng ẩn nhiệt tại khu vực tâm bão Conson (2021) với thời điểm ban đầu mô phỏng 18Z ngày 08/9/2021 theo hai trường hợp: (a) CONTROL;(b) OCEAN.





**Hình 10.** Mô phỏng 48h thông lượng ản nhiệt tại khu vực tâm bão Noru (2022) với thời điểm ban đầu mô phỏng 12Z ngày 25/9/2022 theo hai trường hợp: a) CONTROL và b) OCEAN.

#### 4. Kết luận

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng tương tác đại dương–khí quyển đến mô phỏng hai cơn bão Conson (2021) và Noru (2022) trên khu vực Biển Đông thông qua việc kết hợp mô hình WRF và mô hình 3DPWP. Kết quả nghiên cứu cho thấy tương tác đại dương–khí quyển làm giảm đáng kể SST tại khu vực tâm bão và phản hồi của đại dương lên khí quyển làm giảm thông lượng ản nhiệt, hiện nhiệt, dẫn đến giảm cường độ bão khi so sánh với trường hợp không tính đến tương tác đại dương–khí quyển. Kết hợp mô hình WRF và mô hình 3DPWP làm giảm sai số mô phỏng cường độ ở cơn bão Conson từ 1–2,4 m/s nhưng làm tăng sai số mô phỏng cường độ bão ở cơn bão Noru từ 1–4 m/s khi so sánh với trường hợp sử dụng mô hình WRF riêng lẻ. Một trong những nguyên nhân dẫn đến sự khác biệt này là do xoáy bão ban đầu từ GFS yếu hơn nhiều so với thực tế đối với siêu bão Noru. Điều này đưa đến lưu ý trong xem xét tính hiệu quả của kết nối mô hình đại dương–khí quyển để dự báo cường độ bão đối với những cơn bão có cường độ rất mạnh và siêu bão. Việc đưa hiệu ứng tương tác đại dương khí quyển vào mô hình WRF cải thiện sai số trung bình khoảng cách khoảng 42 km ở hạn dự báo đến 30 giờ đối với cơn bão Conson, tuy nhiên gia tăng sai số trung bình khoảng cách đến 50 km đối với cơn bão Noru do làm lệch hướng của quỹ đạo hoặc làm bão di chuyển chậm hơn so với trường hợp không tính đến tương tác đại dương–khí quyển. Mặc dù các kết quả của nghiên cứu này cho thấy việc đưa hiệu ứng đại dương khí quyển vào mô hình WRF cải thiện sai số mô phỏng cường độ và quỹ đạo bão ở cơn bão có cường độ yếu như cơn bão Conson, tuy nhiên, cần có những nghiên cứu sâu hơn cho nhiều cơn bão với các đặc trưng khác nhau để có thể ứng dụng vào thực tế dự báo bão. Mặt khác, việc sử dụng cấu trúc nhiệt, muối theo chiều thẳng đứng trung bình nhiều năm chưa phản ánh được điều kiện đại dương trong thực tế, do đó, cần nghiên cứu sử dụng số liệu trường nhiệt, muối phân tích/ tái phân tích làm đầu vào cho mô hình 3DPWP.

**Đóng góp của tác giả:** Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: N.T.T., V.H.Đ., N.B.T.; Lựa chọn phương pháp nghiên cứu: N.T.T., V.H.Đ.; Xử lý số liệu: N.T.T., P.V.T., Đ.N.T.; Viết bản thảo bài báo: N.T.T., V.H.Đ.; Chỉnh sửa bài báo: N.T.T., V.H.Đ., P.V.T., N.B.T.

**Lời cảm ơn:** Tập thể tác giả xin trân trọng cảm ơn Đề tài “Nghiên cứu ảnh hưởng biến động của trường nhiệt bề mặt lên quá trình hoạt động của các cơn bão trên Biển Đông phục vụ công tác dự báo bão”, mã số VAST06.05/20–21, đã hỗ trợ về số liệu và phương pháp luận để thực hiện bài báo này.

**Lời cam đoan:** Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

### Tài liệu tham khảo

1. IMHEN và UNDP. Báo cáo đặc biệt của Việt Nam về Quản lý rủi ro thiên tai và hiện tượng cực đoan nhằm thúc đẩy thích ứng với biến đổi khí hậu. NXB Tài Nguyên – Môi trường và Bản đồ Việt Nam, 2015.
2. Krishnamurti, T.N.; Kishtawal, C.M.; LaRow, T.E.; Bachiochi, D.R.; Zhang, Z.; Williford, C.E; Gadgil, S.; Surendran, S. Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble. *Science* **1999**, 285, 1548–1550.
3. McAdie, C.J.; Lawrence, M.B. Improvements in tropical cyclone track forecasting in the Atlantic basin, 1970–98. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **2000**, 81, 989–997.
4. Montgomery, M.T.; Smith, R.K. Recent developments in the fluid dynamics of tropical cyclones. *Annu. Rev. Fluid. Mech.* **2017**, 49, 541–574.
5. DeMaria, M.; Sampson, C.R.; Knaff, J.A.; Musgrave, K.D. Is tropical cyclone intensity guidance improving? *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **2014**, 95(3), 387–398.
6. Cangialosi, J.P.; Blake, E.; DeMaria, M.; Penny, A.; Latta, A.; Rappaport, E.; Tallapragada, V. Recent progress in tropical cyclone intensity forecasting at the National Hurricane Center. *Weather Forecasting* **2020**, 35, 1913–1922.
7. Emanuel, K.A. Thermodynamic control of hurricane intensity. *Nature* **1999**, 401(6754), 665–669.
8. Kaplan, J.; Rozoff, C.M.; DeMaria, M.; Sampson, C.R.; Kossin, J.P.; Velden, C.S.; et al. Evaluating environmental impacts on tropical cyclone rapid intensification predictability utilizing statistical models. *Weather Forecasting* **2015**, 30(5), 1374–1396.
9. Price, J.F. Upper ocean response to a hurricane. *J. Phys. Oceanogr.* **1981**, 11, 153–175.
10. Wang, Z.Q.; Duan, A.M. A New Ocean Mixed–Layer Model Coupled into WRF. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.* **2012**, 5(3), 170–175.
11. Schade, L.R.; Emanuel, K.A. The Ocean’s Effect on the Intensity of Tropical Cyclones: Results from a Simple Coupled Atmosphere–Ocean Model. *J. Atmos. Sci.* **1999**, 56, 642–651.
12. Vissa, N.K.; Satyanarayana, A.N.V.; Kumar, B.P. Response of upper ocean and impact of barrier layer on Sidr cyclone induced sea surface cooling. *Ocean Sci. J.* **2013**, 48(3), 279–288.
13. Lin, I.I.; Wu, C.C.; Pun, I.F.; Ko, D.S. Upper-ocean thermal structure and the Western North Pacific category 5 typhoons. Part I: ocean features and the category 5 typhoons’ intensification. *Mon. Weather Rev.* **2008**, 136, 3288–3306.
14. Baranowski, D.; Flatau, P.; Chen, S.; Black, P. Upper ocean response to the passage of two sequential typhoons. *Ocean Sci.* **2014**, 10, 559–570.
15. Wu, R.; Li, C. Upper ocean response to the passage of two sequential typhoons. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers **2018**, 132, 68–79.
16. Wu, C.C.; Tu, W.T.; Pun, I.F.; Lin, I.I.; Peng, M.S. Tropical cyclone–ocean interaction in Typhoon Megi (2010), a synergy study based on ITOP observations and atmosphere–ocean coupled model simulations. *J. Geophys. Res.: Atmos.* **2016**, 121(1), 153–167.
17. Pollard, R.T.; Rhines, P.B.; Thompson, R.Y. The deepening of the wind–mixed layer. *Geophys. Fluid. Dyn.* **1973**, 3, 381–404.
18. Yablonsky, R.M.; Ginis, I. Limitation of one–dimensional ocean models for coupled hurricane–ocean model forecasts. *Mon. Weather Rev.* **2009**, 137, 4410–4419.

19. Mohan, G.M.; Srinivas, C.V.; Naidu, C.V.; Baskaran, R.; Venkatraman, B. Real-time numerical simulation of tropical cyclone Nilam with WRF: experiments with different initial conditions, 3D-Var and Ocean Mixed Layer Model. *Nat. Hazards* **2015**, *77*, 597–624.
20. Price, J.F.; Weller, R.A.; Pinkel, R. Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing. *J. Geophys. Res.* **1986**, *91*, 8411–8427.
21. Price, J.F.; Sanford, T.B.; Forristall, G.Z. Observations and simulations of the forced response to moving hurricanes. *J. Phys. Oceanogr.* **1994**, *24*, 233–260.
22. Lee, C.; Chen, S. Stable boundary layer and its impact on tropical cyclone structure in a coupled atmosphere–ocean model. *Mon. Weather Rev.* **2014**, *142*, 1927–1944.
23. Srinivas, C.V.; Mohan, G.M.; Naidu, C.V.; Baskaran, R.; Venkatraman, B. Impact of Air–Sea coupling on the simulation of Tropical Cyclones in the North Indian Ocean using a simple 3D–Ocean model coupled to ARW: Impact of Air–Sea coupling on Cyclones. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2016**, *121*(16), 9400–9421.
24. Bao, J.W.; Wilczak, J.M.; Choi, J.K.; Kantha, L.H. Numerical simulations of sea–air interaction under high wind conditions using a coupled model: A study of hurricane development. *Mon. Wea. Rev.* **2000**, *128*, 2190–2210.
25. Jiang, X.; Zhong, Z.; Liu, C. The Effect of Typhoon–Induced SST Cooling on Typhoon Intensity: The Case of Typhoon Chanchu (2006). *Adv. Atmos. Sci.* **2008**, *25*(6), 1062–1072.
26. Perrie, W.; Ren, X.; Zhang, W.; Long, Z. Simulation of extratropical hurricane Gustav using a coupled atmosphere ocean sea spray model. *Geophys. Res. Lett.* **2004**, *31*, L03110. Doi:10.1029/2003GL 018571.
27. Tiến, T.T. Xây dựng công nghệ dự báo liên hoàn bão, nước dâng và sóng ở Việt Nam bằng mô hình số với thời gian dự báo trước 3 ngày. Báo cáo tổng kết Đề tài NCKH cấp Nhà nước thuộc Chương trình “Khoa học và công nghệ phục vụ phòng tránh thiên tai, bảo vệ môi trường và sử dụng hợp lý tài nguyên thiên nhiên”, MS: KC.08.05/06–10, 2010.
28. Cường, H.Đ. Nghiên cứu ứng dụng mô hình WRF phục vụ dự báo thời tiết và bão ở Việt Nam. Báo cáo tổng kết đề tài NCKH cấp Bộ, 2011.
29. Thompson, G.; Paul, R.F.; Roy, M.R.; William, D.H. Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Mon. Wea. Rev.* **2008**, *136*, 5095–5115.
30. Kain, J.S. The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.* **2004**, *43*, 170–181.
31. Iacono, M.J.; Delamere, J.S.; Mlawer, E.J.; Shephard, M.W.; Clough, S.A.; Collins, W.D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.* **2008**, *113*, D13103.
32. Hong, S.Y.; Noh, Y.; Dudhia, J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.* **2006**, *134*, 2318–2341.
33. Digital Typhoon: Typhoon Images and Information. Available online: <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>.
34. Du, T.D.; Ngo–Duc, T.; Hoang, M.T.; Kieu, C.Q. A Study of Connection between Tropical Cyclone Track and Intensity Errors in the WRF Model. *Meteo. Atmos. Phys.* **2013**, *122*, 55–64.

## The effect of atmosphere–ocean interaction on tropical cyclone simulations in the East Sea

Vu Hai Dang<sup>1</sup>, Nguyen Thi Thanh<sup>2\*</sup>, Pham Van Tien<sup>2</sup>, Nguyen Ba Thuy<sup>3</sup>, Do Ngoc Thuc<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics – Vietnam Academy of Science and Technology; vuhaidang@hotmail.com; dothuc.vn@gmail.com

<sup>2</sup> Vietnam Institute of Meteorology Hydrology and Climate Change; thanhnt.met@gmail.com; phamvantienbn@gmail.com

<sup>3</sup> The National Centre for Hydro–Meteorological Forecasting; thuybanguyen@gmail.com

**Abstract:** The atmosphere–ocean interaction strongly affects the formation and development of tropical cyclones through providing energy for tropical cyclone in the form latent heat and sensible heat fluxes. In order to study the effect of atmosphere–ocean interaction on tropical cyclone simulations in the East Sea, the paper simulates tropical cyclone Conson (2021) and super typhoon Noru (2022) using a coupling WRF and 3DPWP models. Results show that the atmosphere–ocean interaction significantly reduces SST in the center of tropical cyclone, leading to a decrease in tropical cyclone intensity when compared to the non ocean–atmosphere interaction case. Coupling WRF and 3DPWP models reduces the 1–2.4 m/s simulated maximum 10-m sustainable wind errors of the tropical cyclone Conson, however, increases the 1–4 m/s simulated maximum 10-m sustainable wind errors of the super typhoon Noru as compared with the WRF model case. Considering the ocean–atmosphere interaction improves the 42 km mean distance errors at the up to 30–hour forecast for the Conson, but increases the up to 50 km mean distance errors for the Noru due to deflection the track or moving more slowly as compare with the default case.

**Keywords:** Tropical cyclone; the East Sea; The atmosphere–ocean interaction; WRF; 3DPWP.