

Vietnam Journal of Marine Science and Technology; Vol. 19, No. 3B; 2019: 91–104
DOI: <https://doi.org/10.15625/1859-3097/19/3B/14517>
<https://www.vjs.ac.vn/index.php/jmst>

Impact of sand mining on sediment transport and morphological change of Hai Phong coastal area

Nguyen Minh Hai^{1*}, Do Gia Khanh², Vu Duy Vinh¹, Tran Dinh Lan¹

¹*Institute of Marine Environment and Resources, VAST, Vietnam*

²*Department of Science and Technology, Hai Phong, Vietnam*

*E-mail: hainm@imer.vast.vn

Received: 25 July 2019; Accepted: 6 October 2019

©2019 Vietnam Academy of Science and Technology (VAST)

Abstract

The paper presents the results of simulating the impact of sand mining on sediment transport and morphological change in Hai Phong coastal area based on Delft3D model. Scenario groups are established: Present scenarios without sand mining and simulated scenarios of the present sand mining (assuming 30% sand compared to plan). The scenario groups are calculated in the dry and rainy seasons for main wind directions (NE, SE, SW) in the case of moderate wind and strong wind. The results show that sand mining reduces sediment flow alongshore (2–81%) and seawards (5–83%). Besides, the increase in depth causes morphological change in this area: Rising the deposition rate (5–10 mm/month) at the sand mining locations; decreasing accretion rate and increasing the erosion rate in the neighboring areas of sand mining location.

Keywords: Sand mining, sediment transport, morphological change, Hai Phong.

Citation: Nguyen Minh Hai, Do Gia Khanh, Vu Duy Vinh, Tran Dinh Lan, 2019. Impact of sand mining on sediment transport and morphological change of Hai Phong coastal area. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 19(3B), 91–104.

Ảnh hưởng của hoạt động khai thác cát đến vận chuyển bùn cát và biến động địa hình đáy vùng ven biển Hải Phòng

Nguyễn Minh Hải^{1*}, Đỗ Gia Khánh², Vũ Duy Vĩnh¹, Trần Đình Lân¹

¹Viện Tài nguyên và Môi trường biển, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Việt Nam

²Sở Khoa học và Công nghệ, Hải Phòng, Việt Nam

*E-mail: hainm@imer.vast.vn

Nhận bài: 25-7-2019; Chấp nhận đăng: 6-10-2019

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả mô phỏng ảnh hưởng của hoạt động khai thác cát đến vận chuyển bùn cát và biến động địa hình đáy ở khu vực ven bờ Hải Phòng dựa trên mô hình Delft3D. Các nhóm kịch bản được thiết lập: Nhóm kịch bản hiện trạng khi chưa có hoạt động khai thác cát và nhóm kịch bản mô phỏng hiện trạng khai thác cát (với giả thiết khai thác 30% trữ lượng so với dự kiến của các dự án đã được cấp phép). Các nhóm kịch bản tính toán mô phỏng trong mùa khô và mưa với các hướng sóng gió chính (đông bắc, đông nam và tây nam) trong các trường hợp điều kiện gió bình thường và gió mạnh. Kết quả cho thấy hoạt động khai thác cát làm giảm dòng vận chuyển bùn cát dọc bờ (2–81%) và từ bờ ra ngoài (5–83%). Bên cạnh đó, sự tăng độ sâu tại các điểm khai thác cát đã làm thay đổi xu thế biến động địa hình của khu vực: Tăng tốc độ bồi (5–10 mm/tháng) tại vị trí khai thác cát; giảm tốc độ bồi tụ và tăng nhẹ tốc độ xói ở các vùng lân cận với vị trí khai thác cát.

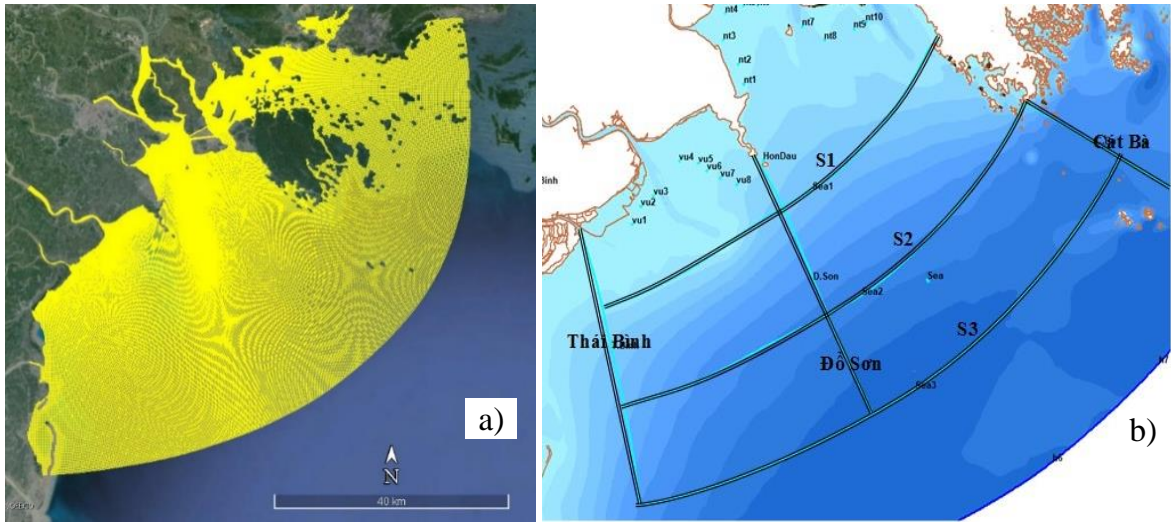
Từ khóa: Khai thác cát, vận chuyển bùn cát, biến động địa hình đáy, Hải Phòng.

MỞ ĐẦU

Trong những năm gần đây, hoạt động khai thác cát ở Hải Phòng đang diễn ra rất mạnh mẽ. Theo số liệu của Ủy ban Nhân dân thành phố, tính đến tháng 8 năm 2019 tổng diện tích khu vực được cấp phép khai thác cát trên địa bàn thành phố là 1.953,1 ha với tổng trữ lượng khoáng sản cát được cấp phép khai thác gần 81,5 triệu m³. Tổng lượng khai thác hàng năm của các dự án đã được cấp phép đến nay là khoảng 9,3 triệu m³/năm. Việc khai thác cát có đóng góp nhất định đến sự phát triển kinh tế, xã hội của thành phố, cung cấp nguồn vật liệu tại chỗ cho các dự án phát triển cơ sở hạ tầng như Tân cảng Đình Vũ, cảng Nam Đình Vũ, cảng cá Cát Hải...

Bên cạnh những ảnh hưởng do phát tán độ đục, các chất gây ô nhiễm trong quá trình khai thác cát, sự thay đổi địa hình khi quá trình khai

thác cát kết thúc chắc chắn cũng sẽ ảnh hưởng đến các điều kiện thủy động lực, lan truyền sóng, vận chuyển bùn cát và bồi xói đáy của khu vực. Những tác động này có thể đến chậm, diễn ra sau khi hoạt động khai thác cát kết thúc nhưng những hậu quả để lại của nó sẽ tác động lâu dài đến vùng bờ của khu vực, đặc biệt là những hậu quả về xói lở do sự mất cân bằng và thiếu hụt bùn cát. Vì vậy, việc đánh giá dự báo những tác động này sau khi kết thúc các hoạt động khai thác cát sẽ có ý nghĩa lớn cả về khoa học và thực tiễn, góp phần hạn chế những tác động tiêu cực của hoạt động đó. Bài báo này sẽ trình bày các kết quả đánh giá dự báo những ảnh hưởng do khai thác cát (đến thời điểm hiện tại khi độ sâu ở các khu vực khai thác cát tăng thêm 2,1 m) đến vận chuyển bùn cát và biến động bồi xói đáy ở vùng ven biển Hải Phòng.



Hình 1. Lưới tính mô hình (a) và mặt cắt tính vận chuyển bùn cát (b)

TÀI LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

Tài liệu

Số liệu độ sâu và đường bờ ở khu vực nghiên cứu được thu thập xử lý từ các bản đồ địa hình UTM hệ tọa độ địa lý VN 2000 tỷ lệ 1:50.000 và 1:25.000. Độ sâu của khu vực phía ngoài sử dụng cơ sở dữ liệu GEBCO-1/8 có độ phân giải 0,5 phút được xử lý từ ảnh vệ tinh kết hợp với các số liệu độ sâu [1, 2]. Các dữ liệu địa hình này được xử lý bằng phần mềm MapInfo và Arcview để đưa về cùng hệ tọa độ làm đầu vào cho mô hình tính.

Số liệu gió quan trắc ở trạm hải văn Hòn Dấu và Bạch Long Vĩ với tần suất 6 h/lần trong năm 2017 và 2018 được xử lý làm đầu vào cho mô hình tính.

Dao động thủy triều tại Hòn Dấu được dùng để hiệu chỉnh mô hình. Đây là những số liệu quan trắc do trạm Khí tượng Thủy văn Hòn Dấu thực hiện với khoảng thời gian 1 h/lần trong khoảng thời gian 2016–2017. Ngoài ra, số liệu thủy triều tại các biên mở phía biển là những hằng số điều hòa thủy triều được tính toán từ chuỗi số liệu quan trắc mực nước trong khoảng thời gian dài trong một số đề tài, dự án của Trung tâm Khí tượng Thủy văn biển, Phân viện cơ học biển, Viện Tài nguyên và Môi trường biển, Viện Địa lý... Những điểm biên lòng phía biển không có số liệu quan trắc thì số liệu được lấy từ cơ sở dữ liệu các hằng số điều hòa thủy triều FES2014 [3, 4] của LEGOS (Laboratoire d'Etude en Géophysique et

Océanographie Spatiales, Toulouse) và CLS (Collecte Localisation Satellites) thuộc Trung tâm Quốc gia nghiên cứu không gian Pháp (CNES- Centre National d'Etudes Spatiales) nghiên cứu phát triển.

Lưu lượng nước sông trung bình trong mùa khô và mùa mưa từ năm 2010–2018 tại một số trạm như Cửa Cấm, Trung Trang và Quyết Chiến do Trung tâm KTTV Quốc gia thực hiện.

Trong khuôn khổ thực hiện đề tài cấp thành phố Hải Phòng: “Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của hoạt động khai thác cát đến môi trường vùng cửa sông ven biển Hải Phòng” đã tiến hành đo đạc dòng chảy, hàm lượng trầm tích tại một số vị trí ở vùng cửa Nam Triệu và cửa Văn Úc trong đợt khảo sát mùa mưa tháng 9/2017 và mùa khô tháng 1/2018. Ngoài ra các số liệu đo đạc về dòng chảy, trầm tích của đề tài cấp thành phố Hải Phòng “Nghiên cứu xây dựng luận cứ phục vụ lập quy hoạch các bãi đổ bùn cát do nạo vét trên địa bàn Hải Phòng” trong các đợt khảo sát tháng 1 và 7 năm 2016. Các số liệu này được xử lý để phục vụ thiết lập, hiệu chỉnh và kiểm chứng mô hình. Cơ sở dữ liệu WOA13 [5] với độ phân giải 0,25 độ cho khu vực Biển Đông cũng được khai thác để sử dụng làm đầu vào cho các điều kiện biên nhiệt-muối của mô hình tính phía ngoài.

Phương pháp

Một số phương pháp xử lý số liệu đã được sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm:

Phương pháp GIS để số hóa và xử lý số liệu địa hình từ các bản đồ địa hình; *Phương pháp tính toán và phân tích thống kê* để xử lý số liệu đầu vào, các tham số, tính toán xử lý các số liệu cho điều kiện biên mở của mô hình; *Phương pháp khai thác số liệu* từ cơ sở dữ liệu nhiệt muối WOA13 và cơ sở dữ liệu thủy triều FES2014; *Phương pháp mô hình toán*.

Thiết lập mô hình

Trong nghiên cứu này các đối tượng nghiên cứu chủ yếu là thủy động lực và vận chuyển bùn cát (lơ lửng và sát đáy) được mô hình hóa trên cơ sở mô hình Delft3D do Viện Thủy lực Delft (Hà Lan) nghiên cứu phát triển [6]. Mô hình thủy động lực cho khu vực cửa sông ven bờ Hải Phòng sử dụng hệ lưới cong trục giao. Phạm vi vùng tính của mô hình bao gồm vùng nước của các cửa sông ven biển trải dài từ vùng phía bắc khu vực vịnh Hạ Long đến phía nam Trà Lý. Miền tính có kích thước khoảng 106 km theo chiều đông bắc - tây nam và 64 km theo chiều tây bắc, đông nam, với diện tích mặt nước khoảng 5.085 km² được chia được chia thành 628 × 488 điểm tính với các ô lưới có kích thước biến đổi từ 8,3 m đến 340 m. Các ô lưới tính theo chiều thẳng đứng sử dụng hệ tọa độ σ và được chia thành 5 lớp nước với tỷ lệ đều nhau từ mặt xuống đáy (20% độ sâu cho mỗi lớp nước).

Các tham số tính toán khác của mô hình

Tham số nhám đáy (bottom roughness) trong nghiên cứu này lựa chọn sử dụng các hệ số Manning (n) biến đổi theo không gian với giá trị 0,019–0,023 m^{-1/3}s. Các hệ số Manning lớn hơn ở điều kiện trầm tích đáy là vật liệu thô và nhỏ hơn ở điều kiện trầm tích đáy là hạt mịn. Căn cứ để tính toán các hệ số này dựa vào bản đồ phân bố trầm tích tầng mặt và tài liệu hướng dẫn lựa chọn các hệ số Manning [7, 8].

Các giá trị liên quan đến điều kiện rối có thể được xác định do người dùng như là một hằng số, hoặc tham số biến đổi theo không gian hoặc tính toán với cách tiếp cận HLES (mô phỏng xoáy lớn bình lưu - Horizontal Large Eddy Simulation). Mô hình HLES gần đây đã được tích hợp trong hệ thống mô hình Delft3D theo lý thuyết của Uittenbogaard [9] và được thảo luận trong nghiên cứu của Van Vossen [10]. Trong nghiên cứu này, hệ số khuếch tán

rối và nhớt rối nên theo phương ngang được lựa chọn là 8,6 m²/s. Các hệ số này theo phương thẳng đứng là 5×10⁻⁵ m²/s.

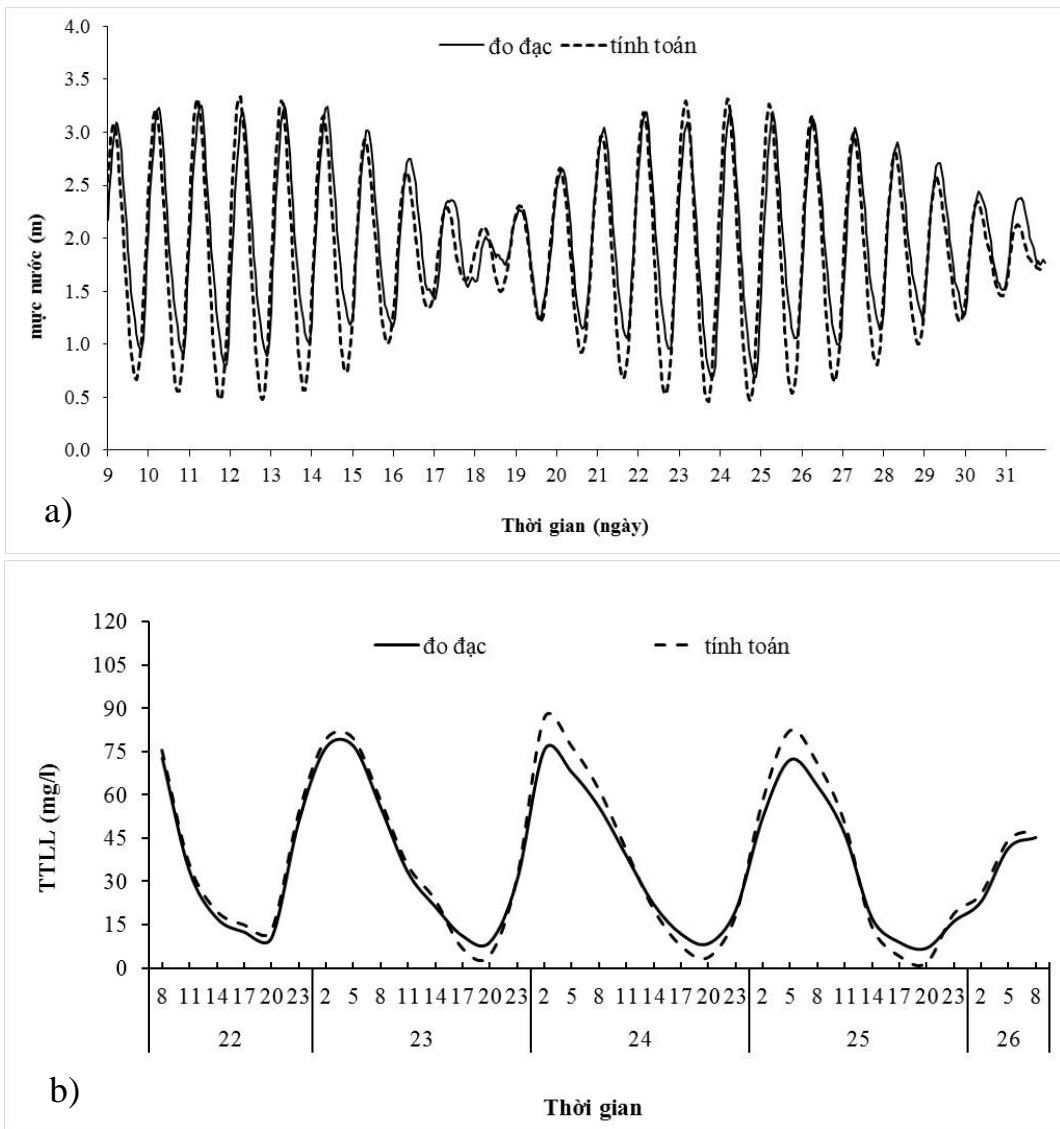
Hiệu chỉnh kiểm chứng các kết quả của mô hình

Để đánh giá mức độ tin cậy trong các tính toán, trong nghiên cứu này, các chỉ số được sử dụng là hệ số tương quan Bravais-Pearson (R) và chỉ số Nash và Sutcliffe (E). Các kết quả tính toán dự báo sẽ tốt nhất khi R tiến tới 1 và độ tin cậy thấp nhất khi R tiến tới 0 [11]. Giá trị E tiến tới 1 thì các kết quả dự báo có hiệu quả tốt nhất, ngược lại khi E tiến tới 0 thì các dự báo không đáng tin cậy. Khi E mang dấu âm (-), các đặc trưng trung bình tính từ chuỗi quan trắc cho kết quả dự báo tốt hơn từ mô hình [12].

Trong nghiên cứu này, các kết quả tính toán của mô hình trong các kịch bản hiện trạng đã được so sánh kiểm chứng với số liệu đo mực nước tại Hòn Dấu (tháng 1 và tháng 7/2016), các số liệu đo dòng chảy, trầm tích lơ lửng (TTLL) (1/2016; 7/2016) tại khu vực cửa Nam Triệu, ven bờ Cát Hải, Đồ Sơn và cửa Văn Úc. Các kết quả phân tích sau lần hiệu chỉnh cuối cho thấy giữa đo đạc và tính toán khá phù hợp. Hệ số E tính toán thay đổi trong khoảng 0,62–0,83, hệ số tương quan R biến đổi trong khoảng 0,73–0,91.

Các kịch bản tính toán

Nhằm đánh giá các ảnh hưởng của hoạt động khai thác cát đến vận chuyển bùn cát và biến động địa hình đáy ở vùng cửa sông ven biển Hải Phòng, các nhóm kịch bản mô phỏng khác nhau đã được thiết lập, bao gồm: Nhóm kịch bản hiện trạng: Chưa có hoạt động khai thác cát, chưa có sự thay đổi về địa hình do khai thác cát; Nhóm kịch bản khai thác cát. Các mỏ cát được cấp phép hiện nay ở vùng ven biển Hải Phòng hiện nay đang được khai thác ở các mức độ khác nhau nhưng phần lớn đều khai thác với tiến độ khá chậm, phổ biến chỉ 20–40%. Trong nghiên cứu này giả thiết đến thời điểm hiện tại, các mỏ cát này khai thác khoảng 30% trữ lượng so với dự kiến của các dự án đã được cấp phép (2,79 triệu m³/năm). Độ sâu ở các khu vực khai thác tăng lên trung bình 2,1 m, gồm các kịch bản trong mùa mưa (tháng 7, 8, 9) và mùa khô (tháng 12, 1, 2).



Hình 2. So sánh số liệu đo đạc và tính toán: a-mức nước tại Hòn Dấu (1/2016), b-TSSL (7/2016)

Khu vực nghiên cứu chủ yếu chịu tác động của các hướng sóng gió như NE, SE, N, E, SW. Tuy nhiên, để đánh giá, dự báo ảnh hưởng từ sự thay đổi độ sâu ở các khu vực khai thác cát đến điều kiện thủy động lực, vận chuyển bùn cát và bồi xói đáy, trong nghiên cứu này chỉ đánh giá tác động của 3 hướng gió chính: Đông bắc (NE), đông nam (SE) và tây nam (SW). Mỗi hướng gió sẽ được tính với 2 nhóm trường hợp: điều kiện gió bình thường (5,5 m/s) và gió mạnh (10 m/s).

Nhằm đánh giá vận chuyển bùn cát qua một số mặt cắt trong khu vực dưới ảnh hưởng của

khai thác cát. Các mặt cắt dọc bờ và vuông góc với bờ đã được thiết lập (hình 1).

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Ảnh hưởng đến cân bằng bùn cát trong mùa mưa

Trường hợp sóng gió hướng NE, hoạt động khai thác cát đã làm giảm đáng kể dòng bùn cát từ bờ ra phía ngoài qua mặt cắt s1: Giảm từ 16.134 tấn/ngày xuống còn 14.147 tấn/ngày. Xu hướng tương tự cũng thể hiện ở mặt cắt s2 và s3: Giảm dòng bùn cát ra ngoài tương ứng 1.687 tấn ngày xuống còn 1.685 tấn/ngày và

466 tấn/ngày xuống còn 401 tấn/ngày (giảm khoảng 1% và 13%) lượng bùn cát từ bờ ra phía ngoài. Trong khi đó, dòng bùn cát di chuyển dọc bờ qua mặt cắt phía ngoài Đồ Sơn xuống phía tây nam cũng giảm mạnh từ 986 tấn/ngày (trước khai thác cát) xuống còn 459 tấn/ngày trong điều kiện hiện nay (giảm 53%). Dòng bùn cát từ các sông khu vực Hải Phòng di chuyển về ven bờ phía nam đồng bằng Bắc Bộ qua mặt cắt phía ngoài Thái Bình cũng giảm mạnh từ 9.055 tấn/ngày xuống còn 8.356 tấn/ngày (hình 3a).

Trường hợp sóng gió hướng SE, hoạt động khai thác đã làm giảm dòng bùn cát từ bờ ra phía ngoài qua mặt cắt s1: Giảm từ 5.201 tấn/ngày xuống còn 4.529 tấn/ngày. Xu hướng tương tự cũng thể hiện ở mặt cắt s2 và s3: Giảm dòng bùn cát ra ngoài tương ứng 654 tấn/ngày xuống còn 571 tấn/ngày và 521 tấn/ngày xuống còn 207 tấn/ngày lượng bùn cát từ bờ ra phía ngoài. Trong khi đó, dòng bùn cát di chuyển dọc bờ qua mặt cắt phía ngoài Đồ Sơn cũng giảm mạnh từ 233 tấn/ngày xuống còn 139 tấn/ngày, dòng bùn cát từ các sông khu vực Hải Phòng di chuyển về ven bờ phía nam đồng bằng Bắc Bộ cũng giảm mạnh từ 3.499 tấn/ngày xuống còn 666 tấn/ngày (hình 3c).

Dưới ảnh hưởng của trường sóng gió hướng SW, dòng bùn cát từ phía bờ ra ngoài cũng suy giảm sau khi có hoạt động khai thác cát. Tại mặt cắt s1, dòng bùn cát bị giảm nhẹ từ 1.208 tấn/ngày xuống còn 1.121 tấn/ngày (giảm khoảng 7%). Xu hướng suy giảm này tiếp tục được thể hiện ở các mặt cắt phía ngoài s2 và s3 với các giá trị lần lượt là 817 tấn/ngày xuống 409 tấn/ngày (giảm khoảng 50%) và 321 tấn/ngày xuống còn 172 tấn/ngày (giảm khoảng 46%). Trong khi đó, dòng bùn cát dọc bờ đi lên phía bắc bán đảo Đồ Sơn cũng suy giảm nhẹ từ 12.515 tấn/ngày xuống 11.215 tấn/ngày (hình 3e).

Dưới ảnh hưởng của trường sóng gió mạnh hướng NE, khu vực ven biển Hải Phòng nhận được nhiều lượng bùn cát từ phía vịnh Hạ Long đưa xuống với giá trị khoảng trên 2.000 tấn/ngày. Dòng bùn cát dọc bờ qua mặt cắt phía ngoài bán đảo Đồ Sơn có hướng đi xuống phía tây nam là chủ yếu với giá trị trước khi khai thác cát là 20.926 tấn/ngày và giảm nhẹ sau khi

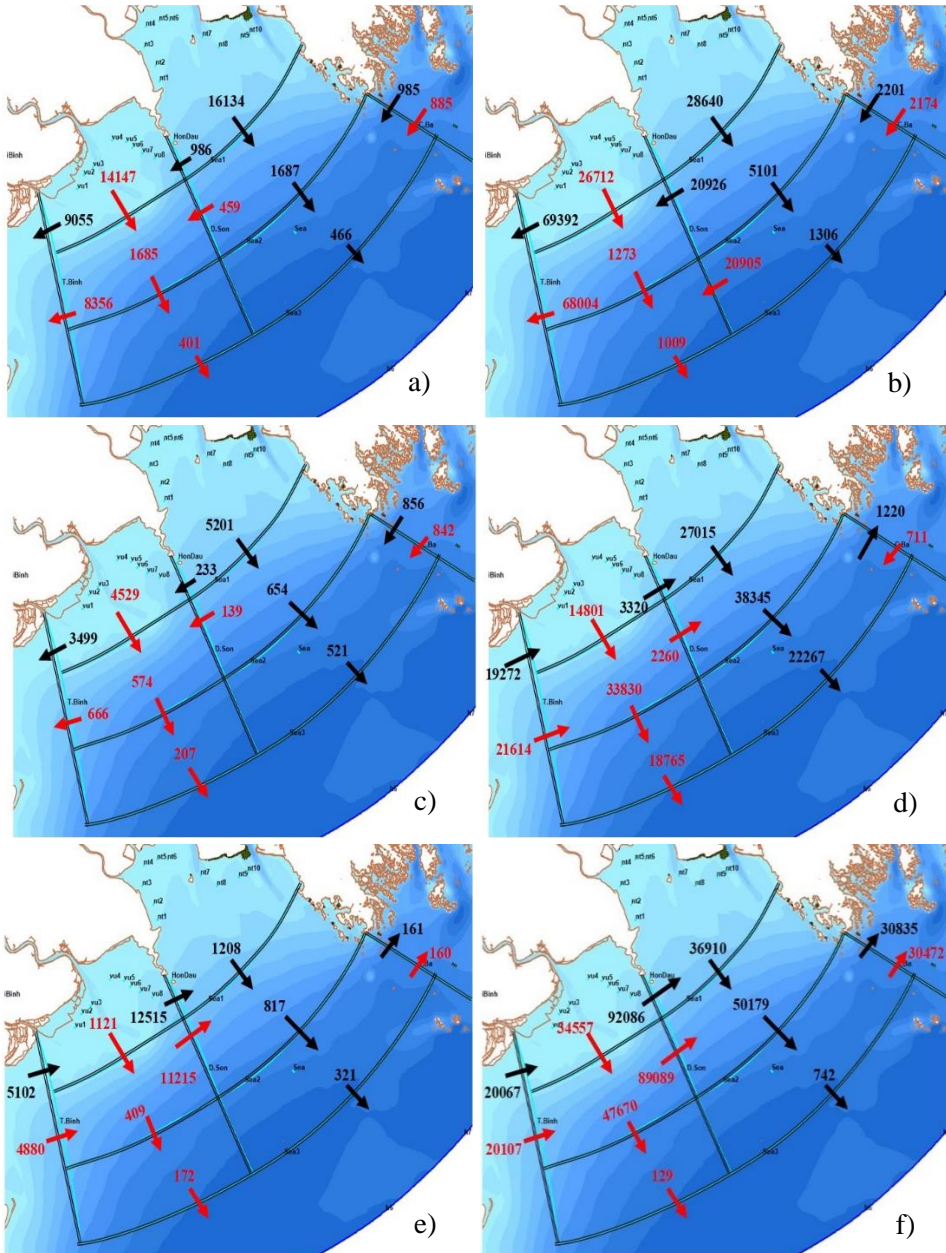
có hoạt động khai thác cát xuống còn 20.905 tấn/ngày. Xu hướng giảm cũng xảy ra ở mặt cắt phía ngoài cửa Thái Bình - nơi khống chế dòng bùn cát đi từ vùng biển Hải Phòng xuống ven bờ phía nam đồng bằng Bắc Bộ: Giảm từ 69.392 tấn/ngày xuống còn 28.004 tấn/ngày. Trong khi đó, dòng bùn cát từ ven bờ đưa ra phía ngoài cũng có xu hướng giảm rõ rệt qua các mặt cắt. Dòng bùn cát qua mặt cắt s1 giảm từ 28.640 tấn/ngày xuống còn 26.712 tấn/ngày. Ở mặt cắt s2, dòng bùn cát sau khi khai thác cát giảm mạnh từ 5101 tấn/ngày xuống còn 1.273 tấn/ngày và dòng bùn cát qua mặt cắt s3 giảm từ 1.306 tấn/ngày xuống còn 1.009 tấn/ngày (giảm 23%) (hình 3b).

Trong điều kiện tác động của gió mạnh hướng SE, những ảnh hưởng do khai thác cát đến dòng bùn cát cũng được thể hiện giống như các trường hợp trước. Dòng bùn cát dọc bờ qua mặt cắt phía ngoài Đồ Sơn lên phía đông bắc suy giảm mạnh sau khi khai thác cát: Giảm từ 3.320 tấn/ngày xuống còn 2.260 tấn/ngày (giảm 32%). Tương tự với xu hướng này dòng bùn cát từ bờ ra phía ngoài qua mặt cắt s1 giảm từ 27.015 tấn/ngày xuống còn 18.801 tấn/ngày sau khi có hoạt động khai thác cát (giảm 30%). Tuy nhiên, ở mặt cắt phía ngoài (s2), dòng bùn cát đi ra phía ngoài lại tăng lên lần lượt là 38.345 tấn/ngày và 33.830 tấn/ngày. Điều này có thể được giải thích là do quá trình xói lở dưới ảnh hưởng của trường sóng gió mạnh từ hướng SE tác động vào vùng bờ. Trong khi đó dòng bùn cát đưa ra phía ngoài qua mặt cắt s3 cũng thể hiện xu thế suy giảm do khai thác cát: Giảm từ 22.267 tấn/ngày xuống 18.765 tấn/ngày, giảm 16% (hình 3d).

Sóng gió mạnh từ hướng SW làm tăng cường sự vận chuyển bùn cát từ phía tây nam lên phía đông bắc ven bờ Hải Phòng. Khu vực này nhận từ phía nam đưa lên khoảng trên 20.000 tấn bùn cát/ngày qua mặt cắt phía ngoài cửa Thái Bình. Dòng bùn cát dọc bờ đi lên phía đông bắc Đồ Sơn là 92.086 tấn/ngày nhưng sau khi có hoạt động khai thác cát đã giảm xuống còn 89.089 tấn/ngày. Dòng bùn cát từ ven bờ ra phía ngoài qua mặt cắt s1 cũng có xu hướng giảm từ 36.910 tấn/ngày (trước khi khai thác cát xuống còn 34.557 tấn/ngày. Xu hướng này tiếp tục được thể hiện ở các mặt cắt phía ngoài

(s2 và s3) với các giá trị giảm lần lượt là 50.179 tấn/ngày xuống 47.670 tấn/ngày và 742

tấn/ngày giảm xuống còn 129 tấn/ngày (giảm 83%) (hình 3f).



Hình 3. Dòng bùn cát vận chuyển qua các mặt cắt vào mùa mưa (a- Gió NE bình thường; b- Gió NE mạnh; c- Gió SE bình thường, d- Gió SE mạnh; e- Gió SW bình thường; f- Gió SW mạnh; màu đen- trước khi khai thác cát; màu đỏ- hiện nay)

Ảnh hưởng đến cân bằng bùn cát trong mùa khô

Vào mùa khô dòng bùn cát từ sông và vùng ven bờ đưa ra bị suy giảm rõ rệt. Trong khi đó

các yếu tố động lực làm tăng cường hơn quá trình xói. Với các điều kiện bình thường, khi sóng gió NE tác động làm cho dòng bùn cát tăng cường di chuyển về phía tây nam Đồ Sơn. Dòng

bùn cát về khu vực này đã giảm từ 208 tấn/ngày xuống còn 90 tấn/ngày (giảm 57%). Xu hướng tương tự cũng xảy ra ở mặt cắt phía ngoài cửa Thái Bình: Giảm từ 3.669 tấn/ngày xuống còn 3.545 tấn/ngày (giảm 34%). Hoạt động khai thác cát cũng làm giảm đáng kể dòng bùn cát từ bờ ra phía ngoài: Giảm từ 1.567 tấn/ngày xuống 1.508 tấn/ngày (mặt cắt s1, 38%); giảm từ 171 tấn/ngày xuống 128 tấn/ngày (qua mặt cắt s2) và giảm 121 tấn/ngày xuống còn 88 tấn/ngày (qua mặt cắt s3) (hình 4a).

Trong điều kiện sóng gió SE vào mùa khô, dòng bùn cát dọc bờ Hải Phòng có xu hướng đi về 2 phía. Tại khu vực phía ngoài Đồ Sơn, dòng bùn cát có hướng di chuyển lên phía đông bắc. Do ảnh hưởng của hoạt động khai thác cát, dòng bùn cát giảm từ 1.921 tấn/ngày xuống còn 1.431 tấn/ngày. Trong khi đó, dòng bùn cát về phía nam đông bằng Bắc Bộ (qua mặt cắt phía ngoài Thái Bình) cũng giảm từ 2.905 tấn/ngày xuống còn 1.070 tấn/ngày, giảm 63%. Xu hướng suy giảm này tiếp tục được thể hiện qua dòng bùn cát di chuyển các mặt cắt từ bờ ra phía ngoài. Tại mặt cắt s1, dòng bùn cát ra phía ngoài giảm từ 2.625 tấn/ngày xuống còn 1.945 tấn/ngày (giảm khoảng 26%). Tại mặt cắt s2, dòng bùn cát đưa ra tiếp tục giảm từ 327 tấn/ngày xuống còn 160 tấn/ngày sau khi có hoạt động khai thác cát. Trong khi đó, dòng bùn cát ra phía ngoài cùng (mặt cắt s3), giảm từ 125 tấn/ngày xuống còn 119 tấn/ngày (giảm 4%) (hình 4c).

Với ảnh hưởng của sóng gió hướng SW trong mùa khô dòng bùn cát dọc bờ chủ yếu có hướng từ tây nam lên phía đông bắc. Với điều kiện này, khu vực ven bờ Hải Phòng tiếp nhận khoảng trên 2.700 tấn bùn cát/ngày. Do ảnh hưởng của hoạt động khai thác cát, dòng bùn cát qua mặt cắt dọc bờ phía ngoài Đồ Sơn đã giảm từ 9.521 tấn/ngày xuống còn 8.850 tấn/ngày. Trong khi đó, dòng bùn cát từ bờ ra phía ngoài cũng thể hiện xu thế giảm dần từ bờ ra ngoài với các mức độ khác nhau. Tại mặt cắt s1, dòng bùn cát sau khi khai thác cát giảm từ 327 tấn/ngày xuống còn 289 tấn/ngày (giảm khoảng 12%). Sự suy giảm này tiếp tục diễn ra tại mặt cắt s2: Giảm từ 109 tấn/ngày trước khi có khai thác cát xuống còn 76 tấn/ngày sau khi khai thác cát (giảm khoảng 30%). Ở mặt cắt ngoài cùng (s3), dòng bùn cát cũng giảm từ 84

tấn/ngày (trước khai thác cát) xuống còn 68 tấn/ngày (giảm khoảng 19%) (hình 4e).

Với trường sóng gió mạnh từ hướng NE vào mùa khô, dòng bùn cát đi xuống phía tây nam qua mặt cắt phía ngoài Đồ Sơn có xu hướng giảm nhẹ từ 18.651 tấn/ngày thời kỳ trước khi khai thác cát xuống còn 18.311 tấn/ngày thời kỳ sau khi có hoạt động khai thác cát. Trong khi đó dòng bùn cát từ ven biển Hải Phòng đi xuống phía nam đông bằng ven biển Bắc Bộ không có sự thay đổi đáng kể (49.714 tấn/ngày thời kỳ trước khai thác cát so với 50.007 tấn/ngày sau khi khai thác cát). Trong trường hợp này, dòng bùn cát ven bờ ra phía ngoài cũng giảm rõ rệt sau khi có hoạt động khai thác cát: Giảm từ 16.134 tấn/ngày xuống còn 14.847 tấn/ngày. Xu thế này tiếp tục diễn ra ở các mặt cắt phía ngoài (s2 và s3) với các giá trị lần lượt giảm từ 1.398 tấn/ngày xuống 1.284 tấn/ngày và giảm từ 1.273 tấn/ngày xuống 1.213 tấn/ngày (giảm 5%), (hình 4b).

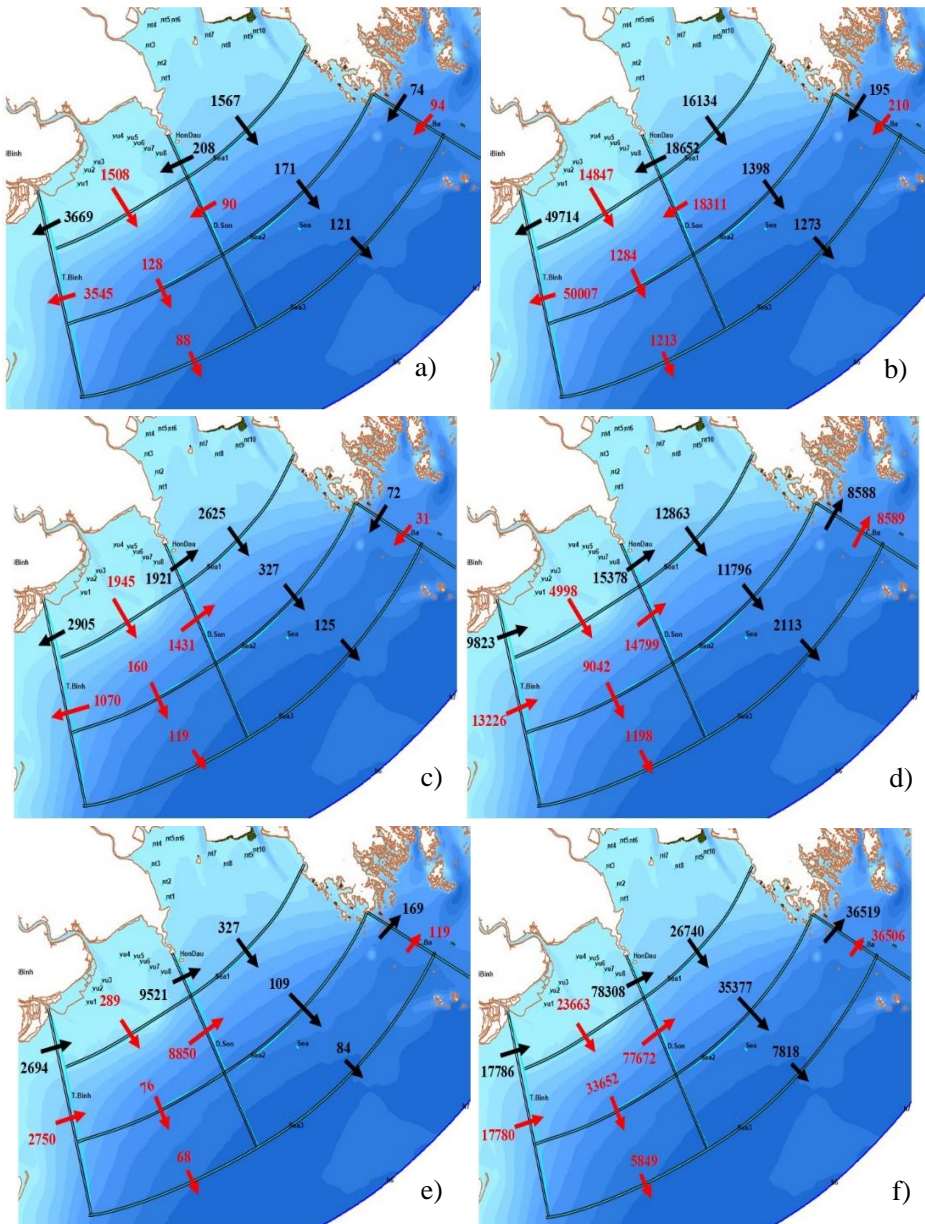
Trường sóng gió hướng SE khi gió mạnh làm cân bằng bùn cát hướng chủ yếu về phía đông bắc. Sau khi có hoạt động khai thác cát, khu vực ven biển Hải Phòng nhận thêm bùn cát từ phía tây nam cửa Thái Bình đưa lên từ 9.823 tấn/ngày tăng lên 13.226 tấn/ngày. Trong khi đó, dòng bùn cát qua mặt cắt phía ngoài Đồ Sơn lên phía đông bắc giảm nhẹ từ 15.378 tấn/ngày xuống còn 14.799 tấn/ngày (giảm khoảng 4%). Dòng bùn cát từ ven bờ ra phía ngoài (mặt cắt s1) cũng giảm mạnh từ 12.863 tấn/ngày xuống còn 4.998 tấn/ngày thời kỳ sau khi khai thác cát (giảm 61%). Xu hướng giảm này tiếp tục diễn ra ở các mặt cắt phía ngoài (s2 và s3): Dòng bùn cát ra ngoài khơi giảm từ 11.796 tấn/ngày xuống còn 9.042 tấn/ngày (giảm 23%) và giảm từ 2.113 tấn/ngày xuống còn 1.198 tấn/ngày thời kỳ sau khi khai thác cát (hình 4d).

Trường hợp ảnh hưởng do hướng sóng gió mạnh từ SW trong mùa khô, dòng bùn cát từ phía nam đưa lên khu vực ven biển Hải Phòng khoảng 17.780 tấn/ngày. Lượng bùn cát di chuyển tiếp lên phía đông bắc qua mặt cắt phía ngoài Đồ Sơn khoảng 78.308 tấn/ngày và giảm nhẹ xuống còn 77.672 tấn/ngày sau khi có hoạt động khai thác cát (giảm khoảng 1%). Trong khi đó, dòng bùn cát ven bờ đi ra phía ngoài khơi qua mặt cắt s1 cũng có xu hướng giảm từ

26.740 tấn/ngày xuống 23.663 tấn/ngày (giảm khoảng 12%). Mặc dù dòng bùn cát tăng lên khi qua mặt cắt s2 nhưng ảnh hưởng do hoạt động khai thác cát cũng được thể hiện rõ hoạt động khai thác cát làm giảm từ 35.377 tấn/ngày xuống còn 33.652 tấn/ngày (giảm khoảng 5%). Những ảnh hưởng tương tự cũng xuất hiện ở mặt cắt s3: Dòng bùn cát ra phía ngoài khơi

tiếp tục giảm từ 7.818 tấn/ngày xuống còn 5.849 tấn/ngày (giảm khoảng 25%) (hình 4f).

Như vậy, sự thay đổi địa hình đáy sau khai thác cát gây ra mất cân bằng bùn cát ở các khu vực ven bờ Văn Úc - Thái Bình và Nam Triệu - Lạch Tray. Điều này sẽ dẫn đến thay đổi diễn biến bồi xói ở vùng ven biển Hải Phòng.



Hình 4. Dòng bùn cát vận chuyển qua các mặt cắt vào mùa khô (a- Gió NE bình thường; b- Gió NE mạnh; c- Gió SE bình thường; d- Gió SE mạnh; e- Gió SW bình thường; f- Gió SW mạnh; màu đen- trước khi khai thác cát; màu đỏ- hiện nay)

Ảnh hưởng đến biến động địa hình, bồi xói của khu vực vào mùa mưa

Các kết quả tính toán mô phỏng cho thấy do ảnh hưởng của sóng gió hướng SE, dòng bùn cát dọc bờ khu vực ven bờ Hải Phòng có thể di chuyển cả về phía đông bắc và tây nam. Vì vậy xu thế xói lở nhiều hơn bồi trong điều kiện bình thường. Vùng xói xuất hiện ngay phía ngoài các cửa sông (với tốc độ khoảng 5–15 mm/tháng). Trong khi vùng bồi tụ bị đẩy ra phía ngoài ở khu vực đường đẳng sâu 5–10 m với tốc độ 2–15 mm/tháng (hình 5a). Sau khi hoạt động khai thác cát diễn ra, khu vực này xuất hiện các vùng bồi tụ ở các khu vực có hoạt động khai thác cát với tốc độ bồi từ 10–15 mm/tháng. Ngoài ra, bên cạnh các vùng bồi ở khu vực có hoạt động khai thác cát thì xuất hiện các vùng xói với tốc độ xói tăng lên, đồng thời giảm tốc độ bồi ở khu vực lân cận do bùn cát ở những khu vực đó bị mất đi để cân bằng bùn cát ở những khu vực đã bị lấy đi do khai thác cát (hình 5b).

Dưới ảnh hưởng của sóng gió mạnh, hướng SE, xu thế xói lở chiếm ưu thế và xuất hiện các vùng xói nhiều hơn so với vùng bồi tụ. Trong điều kiện trước khi có khai thác cát, các khu vực xói xuất hiện ở toàn bộ dải ven bờ Hải Phòng với tốc độ có thể lên tới 10–20 mm/tháng. Trong khi đó, vùng bồi tụ bị đẩy ra phía ngoài đường đẳng sâu 5–7 m, tốc độ bồi ở những khu vực này có thể lên tới 5–15 mm/tháng (hình 5c). Sau khi có hoạt động khai thác cát, dòng bùn cát di chuyển vào các hố khai thác cát để tạo ra sự cân bằng bùn cát, điều này làm xuất hiện các vùng bồi tụ ở các khu vực trước kia xảy ra xói. Tốc độ bồi tụ ở các điểm khai thác cát có thể lên tới 10–15 mm/tháng. Mặc dù vậy, do sự thiếu hụt bùn cát (để bù đắp cho lượng bùn cát ở các điểm khai thác cát) nên đã làm tăng nhẹ tốc độ xói và giảm nhẹ tốc độ bồi ở vùng phía ngoài cửa Nam Triệu và khu vực cửa Văn Úc (hình 5d).

Với hướng sóng gió NE, trong điều kiện bình thường, xu thế xói xuất hiện khá ít, chủ yếu ở các lạch triều, phía trong các cửa Bạch Đằng - Nam Triệu, tây nam Cát Hải và phía ngoài cửa Văn Úc với tốc độ khoảng 5–10 mm/tháng. Ngược lại xu thế bồi xuất hiện ở vùng biển phía ngoài với tốc độ khoảng 2–

8 mm/tháng. Sau khi có hoạt động khai thác cát, hình thành các khu vực có độ sâu khác nhau nhưng sâu hơn so với thời điểm hiện tại, những khu vực đó chính là nơi có tốc độ bồi tụ cao. Trong trường hợp này, những khu vực khai thác cát có tốc độ bồi từ 2–6 mm/tháng. Mặt khác, sau khi khai thác cát, các vùng lân cận nơi khai thác cát có xu hướng giảm nhẹ tốc độ bồi tụ hoặc tăng cường xói hơn như khu vực cửa Nam Triệu, cửa Văn Úc.

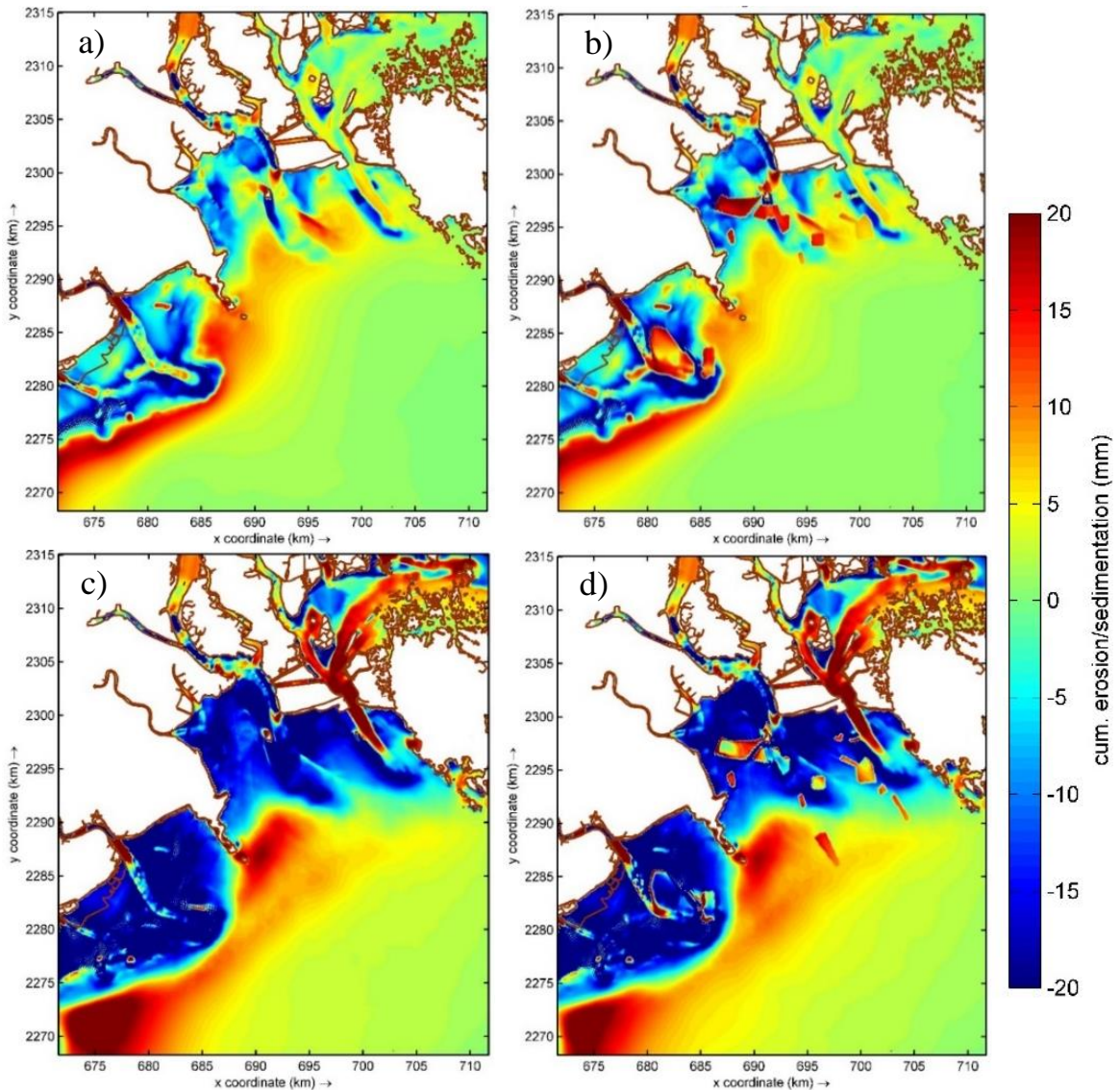
Khi xuất hiện sóng gió mạnh, hướng NE, xu thế xói lở chiếm ưu thế và xuất hiện các vùng xói nhiều hơn so với vùng bồi tụ. Trong điều kiện trước khi có khai thác cát, các khu vực xói xuất hiện ở phía đảo Cát Hải, Nam Triệu, Lạch Tray và Văn Úc với tốc độ có thể lên tới 5–15 mm/tháng. Trong khi đó vùng bồi khá nhỏ chỉ xuất hiện ở phía tây nam Đồ Sơn, khu vực luồng Văn Úc và một số khu vực khác với tốc độ khoảng 10–15 mm/tháng. Dưới ảnh hưởng của hoạt động khai thác cát, làm xuất hiện các vùng bồi ngay tại vị trí khai thác cát. Điều này có thể được giải thích là do dòng bùn cát từ các khu vực lân cận di chuyển vào các điểm độ sâu lấy đi do khai thác cát để tạo ra sự cân bằng về trầm tích.

Các kết quả tính toán mô phỏng cho thấy ảnh hưởng của sóng gió hướng SW, dòng bùn cát dọc bờ khu vực ven bờ Hải Phòng chủ yếu di chuyển về phía đông bắc. Vì vậy trong điều kiện bình thường xu thế bồi tụ là chủ yếu và xuất hiện ở phía nam Đồ Sơn, tây nam Cát Hải, ven bờ Văn Úc, đông bắc Đồ Sơn (tốc độ khoảng 5–10 mm/tháng). Các vùng xói khá nhỏ, chỉ xuất hiện ở phía ngoài lạch triều cửa Văn Úc, Thái Bình và phía cửa Nam Triệu - tây Cát Hải (tốc độ khoảng 5–15 mm/tháng). Sau khi hoạt động khai thác cát diễn ra, khu vực này xuất hiện các vùng bồi tụ ở các khu vực có hoạt động khai thác cát với tốc độ bồi từ 5–10 mm/tháng. Đồng thời, cũng giống như các trường hợp khác, bên cạnh các vùng bồi xuất hiện ở vùng có hoạt động khai thác cát thì tốc độ xói cũng tăng lên ở khu vực lân cận do bùn cát ở những khu vực này bị mất đi để cân bằng với những khu vực đã bị lấy đi do khai thác cát.

Khi xuất hiện sóng gió mạnh, hướng SW trong mùa mưa, dòng bùn cát di chuyển mạnh về phía đông bắc làm xuất hiện các vùng xói

nhều hơn so với vùng bồi tụ. Trong điều kiện trước khi có khai thác cát, các khu vực xói xuất hiện ở phía tây, phía nam đảo Cát Hải, khu vực phía ngoài cửa Nam Triệu, phía ngoài cửa Văn Úc với tốc độ có thể lên tới 5–20 mm/tháng (ở phía đông Đồ Sơn). Trong khi đó, vùng bồi tụ khá nhỏ và bị đẩy ra phía ngoài đường đặng sâu 5–10 m, tốc độ bồi ở những khu vực này có thể lên tới 5–15 mm/tháng. Sau khi có hoạt động khai thác cát, dòng bùn cát di chuyển vào các

hố khai thác cát để tạo ra sự cân bằng bùn cát, điều này làm xuất hiện các vùng bồi tụ ở các khu vực trước kia xảy ra xói. Tốc độ bồi tụ ở các điểm khai thác cát có thể lên tới 5–15 mm/tháng. Mặc dù vậy, do sự thiếu hụt bùn cát (để bù đắp cho lượng bùn cát vào các điểm khai thác cát) nên đã làm tăng nhẹ tốc độ xói và giảm nhẹ tốc độ bồi ở vùng phía ngoài cửa Nam Triệu và khu vực cửa Văn Úc.



Hình 5. Biến động địa hình đáy (mm/tháng) do ảnh hưởng của gió SE trong mùa mưa (a- Trước khi khai thác cát, gió bình thường; b- Hiện tại, gió bình thường; c- Trước khi khai thác cát, gió mạnh; d- Hiện tại, gió mạnh)

Ảnh hưởng đến biến động địa hình, bồi xói của khu vực vào mùa khô

Vào mùa khô, dưới ảnh hưởng của hướng sóng gió NE trong điều kiện bình thường, vùng bồi là chủ yếu nhưng tốc độ bồi khá nhỏ (chỉ từ 1–4 mm/tháng). Một số vùng xói lở nhẹ cũng xuất hiện trong trường hợp này ở phía tây đảo Cát Hải, phía ngoài lạch triều của cửa Văn Úc với tốc độ khoảng 3–7 mm/tháng (hình 6a). Sau khi có hoạt động khai thác cát, hình thành các khu vực có độ sâu khác nhau nhưng sâu hơn so với thời điểm hiện tại, những khu vực đó chính là nơi có tốc độ bồi tụ cao sau khi khai thác cát. Trong trường hợp này, những khu vực khai thác cát có tốc độ bồi từ 2–6 mm/tháng. Mặt khác, sau khi khai thác cát, các vùng lân cận nơi khai thác cát có xu hướng giảm nhẹ tốc độ bồi tụ hoặc tăng cường xói hơn như khu vực cửa Nam Triệu, cửa Văn Úc (hình 6b).

Khi xuất hiện sóng gió mạnh, hướng NE trong mùa khô, các vùng xói lở xuất hiện nhiều hơn so với vùng bồi tụ. Trong điều kiện trước khi có khai thác cát, các khu vực xói xuất hiện ở phía tây đảo Cát Hải, phía ngoài cửa Nam Triệu, Lạch Tray và Văn Úc với tốc độ có thể lên tới 5–15 mm/tháng. Trong khi đó vùng bồi khá nhỏ chỉ xuất hiện ở phía tây nam Đồ Sơn, khu vực luồng Văn Úc và một số khu vực khác với tốc độ khoảng 10–15 mm/tháng (hình 6c). Dưới ảnh hưởng của hoạt động khai thác cát, làm xuất hiện các vùng bồi ngay tại vị trí khai thác cát. Điều này có thể được giải thích là do dòng bùn cát từ các khu vực lân cận di chuyển vào các điểm độ sâu lấy đi do khai thác cát để tạo ra sự cân bằng về trầm tích. Vì vậy, mặc dù làm hình thành nên các vùng bồi tụ ở các khu vực khai thác cát nhưng sự mất cân bằng bùn cát này đã làm cho tốc độ bồi tụ giảm ở các khu vực có hiện tượng bồi. Trong khi đó, tốc độ xói cũng tăng nhẹ ở những vùng lân cận của khu vực khai thác cát (hình 6d).

Tương tự, các kết quả tính toán mô phỏng cho thấy do ảnh hưởng của sóng gió hướng SE, dòng bùn cát dọc bờ khu vực ven bờ Hải Phòng bị di chuyển cả về vùng ven bờ phía đông bắc và tây nam. Vì vậy xu thế xói lở nhiều hơn bồi trong điều kiện bình thường. Vùng xói xuất hiện ngay phía ngoài các cửa sông (với tốc độ khoảng 5–15 mm/tháng). Trong khi vùng bồi tụ bị đẩy ra phía ngoài ở khu vực đường đặng sâu 5–10 m

với tốc độ 2–15 mm/tháng. Sau khi hoạt động khai thác cát diễn ra, xuất hiện các vùng bồi tụ ở các khu vực có hoạt động khai thác cát với tốc độ bồi từ 10–20 mm/tháng. Ngoài ra, bên cạnh các vùng bồi này xuất hiện các vùng xói với tốc độ xói tăng lên, đồng thời giảm tốc độ bồi ở khu vực lân cận do bùn cát ở những khu vực đó bị mất đi để cân bằng bùn cát với những khu vực đã bị lấy đi do khai thác cát.

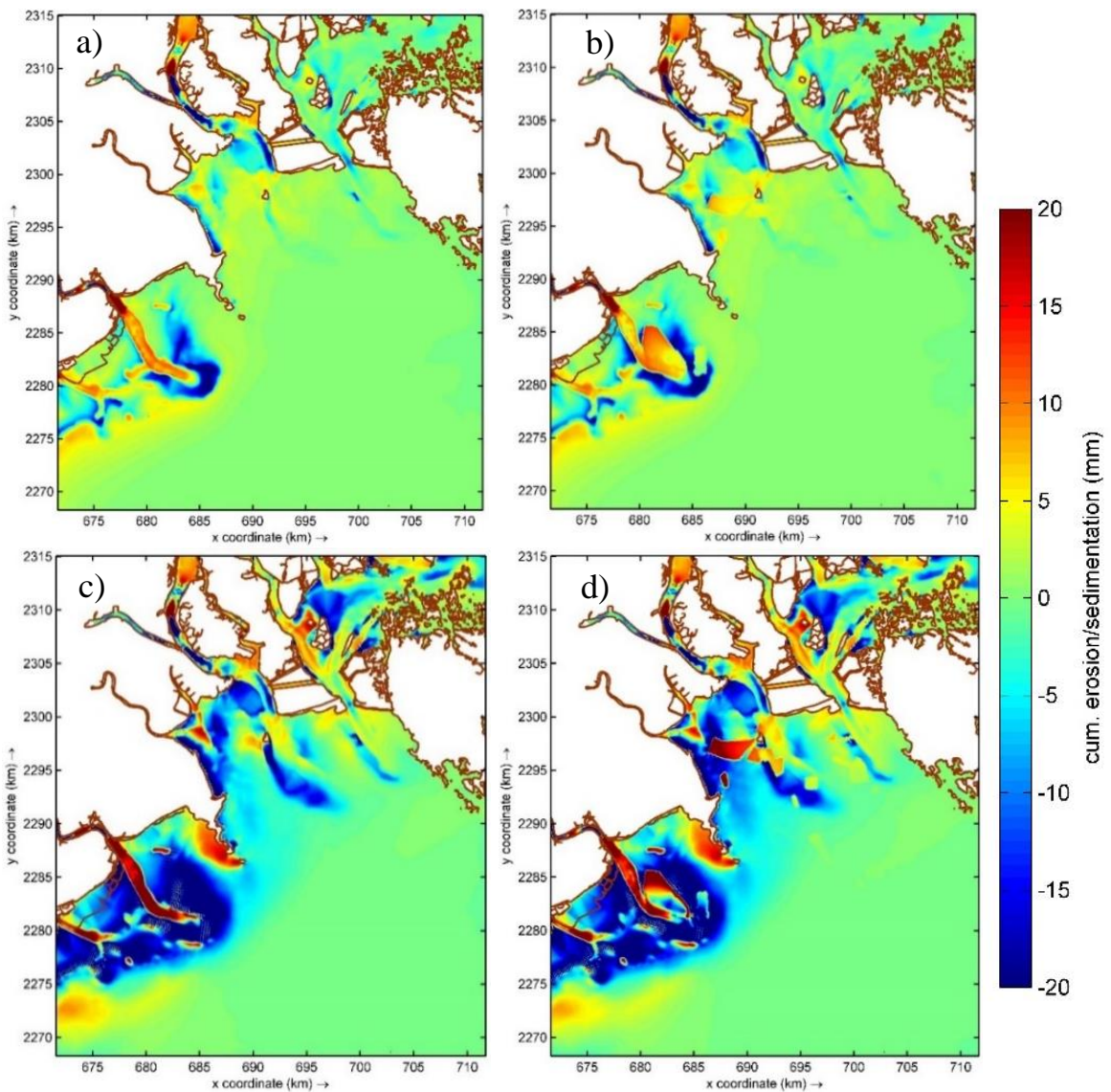
Khi xuất hiện sóng gió mạnh, hướng SE, xu thế xói lở chiếm ưu thế (giống như với mùa mưa) và xuất hiện các vùng xói nhiều hơn so với vùng bồi tụ. Trong điều kiện trước khi có khai thác cát, các khu vực xói xuất hiện ở toàn bộ dải ven bờ Hải Phòng với tốc độ có thể lên tới 10–20 mm/tháng. Trong khi đó, vùng bồi tụ bị đẩy ra phía ngoài đường đặng sâu 5–10 m, tốc độ bồi ở những khu vực này có thể lên tới 5–20 mm/tháng. Sau khi có hoạt động khai thác cát, dòng bùn cát di chuyển vào các hố khai thác cát để tạo ra sự cân bằng bùn cát, điều này làm xuất hiện các vùng bồi tụ ở các khu vực trước kia xảy ra xói. Tốc độ bồi tụ ở các điểm khai thác cát có thể lên tới 10–15 mm/tháng. Mặc dù vậy, do sự thiếu hụt bùn cát nên đã làm tăng nhẹ tốc độ xói và giảm nhẹ tốc độ bồi ở vùng phía ngoài cửa Nam Triệu và khu vực cửa Văn Úc.

Dưới ảnh hưởng của sóng gió hướng SW, dòng bùn cát dọc bờ khu vực ven bờ Hải Phòng chủ yếu di chuyển về phía đông bắc. Vì vậy trong điều kiện bình thường xu thế bồi tụ là chủ yếu và xuất hiện ở phía nam Đồ Sơn, phía tây nam Cát Hải, ven bờ Văn Úc, đông bắc Đồ Sơn (tốc độ khoảng 3–8 mm/tháng). Các vùng xói khá nhỏ, chỉ xuất hiện ở phía ngoài lạch triều cửa Văn Úc, Thái Bình và phía cửa Nam Triệu-tây Cát Hải (tốc độ khoảng 5–15 mm/tháng). Sau khi hoạt động khai thác cát diễn ra, xuất hiện các vùng bồi tụ ở các khu vực có hoạt động khai thác cát với tốc độ bồi từ 5–10 mm/tháng. Đồng thời, cũng giống như các trường hợp khác, bên cạnh các vùng bồi xuất hiện ở vùng có hoạt động khai thác cát thì tốc độ xói cũng tăng lên đồng thời giảm tốc độ bồi ở khu vực lân cận do bùn cát ở những khu vực đó bị mất đi để cân bằng bùn cát với những khu vực đã bị lấy đi do khai thác cát.

Khi xuất hiện sóng gió mạnh, hướng SW trong mùa mưa, dòng bùn cát di chuyển mạnh

về phía đông bắc làm xuất hiện các vùng xói nhiều hơn so với vùng bồi tụ. Trong điều kiện trước khi có khai thác cát, các khu vực xói xuất hiện ở phía tây, phía nam đảo Cát Hải, khu vực phía ngoài cửa Nam Triệu, phía ngoài cửa Văn Úc với tốc độ có thể lên tới 5–20 mm/tháng (ở phía đông Đồ Sơn). Trong khi đó, vùng bồi tụ khá nhỏ và bị đẩy ra phía ngoài đường đặng sâu 5–10 m, tốc độ bồi ở những khu vực này có thể lên tới 5–15 mm/tháng. Sau khi có hoạt động

khai thác cát, dòng bùn cát di chuyển vào các hố khai thác cát để tạo ra sự cân bằng bùn cát, điều này làm xuất hiện các vùng bồi tụ ở các khu vực trước kia xảy ra xói. Tốc độ bồi tụ ở các điểm khai thác cát có thể lên tới 5–20 mm/tháng. Mặc dù vậy, do sự thiếu hụt bùn cát (để bù đắp cho lượng bùn cát vào các điểm khai thác cát) nên đã làm tăng nhẹ tốc độ xói và giảm nhẹ tốc độ bồi ở vùng phía ngoài cửa Nam Triệu và khu vực cửa Văn Úc.



Hình 6. Biến động địa hình đáy (mm/tháng) do ảnh hưởng của gió NE trong mùa khô (a- Trước khi khai thác cát, gió bình thường; b- Hiện tại, gió bình thường; c- Trước khi khai thác cát, gió mạnh; d- Hiện tại, gió mạnh)

KẾT LUẬN

Sự thay đổi địa hình do khai thác cát đến hiện tại (giả thiết khai thác 30% dự kiến) đã làm ảnh hưởng nhất định đến cân bằng bùn cát khu vực ven biển Hải Phòng. Các kết quả phân tích đánh giá cho thấy dòng bùn cát vận chuyển dọc bờ và từ bờ ra ngoài khơi đều bị suy giảm do sự lắng đọng bùn cát để bù đắp lượng bùn cát bị lấy đi khi khai thác cát. Những ảnh hưởng đến cân bằng bùn cát này trở lên rõ rệt hơn khi có những tác động kết hợp với điều kiện sóng gió mạnh.

Sự tăng độ sâu ở các điểm khai thác cát (đến thời điểm hiện tại) cũng đã làm thay đổi nhẹ xu thế biến động địa hình, bồi xói ở vùng ven biển Hải Phòng. Dòng bùn cát từ lân cận các vị trí khai thác cát di chuyển vào các hố khai thác cát đã làm tăng tốc độ bồi ở những vị trí này lên 5–10 mm/tháng. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của hoạt động này cũng đã làm giảm tốc độ bồi tụ, tăng nhẹ tốc độ xói ở các vùng lân cận với vị trí khai thác cát.

Ngoài những tác động đến vận chuyển bùn cát và biến động bồi xói ở ven biển Hải Phòng, hoạt động khai thác cát cũng làm giảm dòng bùn cát dọc bờ (2–81%) từ ven bờ Hải Phòng, cung cấp cho khu vực phía nam ven bờ Bắc Bộ.

Lời cảm ơn: Bài báo nhận được sự hỗ trợ về tài liệu của đề tài nghiên cứu khoa học cấp thành phố Hải Phòng: “Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của hoạt động khai thác cát đến môi trường vùng cửa sông ven biển Hải Phòng”, các tác giả xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ quý báu đó.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Becker, J. J., Sandwell, D. T., Smith, W. H. F., Braud, J., Binder, B., Depner, J., Fabre, D., Factor, J., Ingalls, S., Kim, S.-H., Ladner, R., Marks, K., Nelson, S., Pharaoh, A., Trimmer, R., Von Rosenberg, J., Wallace, G., and Weatherall, P., 2009. Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30_PLUS. *Marine Geodesy*, 32(4), 355–371. doi: 10.1080/01490410903297766.
- [2] Jones, M. T., Weatherall, P., and Cramer, R. N., 2009. User guide to the Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas and its data sets. *Natural Environment Research Council*.
- [3] Lefevre, F., Lyard, F. H., Le Provost, C., and Schrama, E. J., 2002. FES99: a global tide finite element solution assimilating tide gauge and altimetric information. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(9), 1345–1356.
- [4] Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., and Francis, O., 2006. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean dynamics*, 56(5–6), 394–415.
- [5] World Ocean Atlas 2013 Version 2 (WOA13 V2). Available online: <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/> (accessed on 20 April 2016).
- [6] Delft Hydraulics, 2003. Delft3D-FLOW User Manual; Delft3D-WAVE User Manual.
- [7] Simons, D. B., and Şentürk, F., 1992. Sediment transport technology: water and sediment dynamics. *Water Resources Publication*.
- [8] Uittenbogaard, R. E., 1998. Model for eddy diffusivity and viscosity related to sub-grid velocity and bed topography. *Note, WL/ Delft Hydraulics*.
- [9] Van Vossen, B., 2000. Horizontal large eddy simulations; evaluation of computations with DELFT3D-FLOW. *Report MEAH-197, Delft University of Technology, Delft*.
- [10] Van Rijn, L. C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas (Vol. 1006). *Amsterdam: Aqua publications*.
- [11] Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- [12] de Vriend, H. J., Capobianco, M., Chesher, T., De Swart, H. D., Latteux, B., and Stive, M. J. F., 1993. Approaches to long-term modelling of coastal morphology: a review. *Coastal Engineering*, 21(1–3), 225–269. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3839\(93\)90051-9](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3839(93)90051-9).