



ELSEVIER

Coastal Engineering 81, 19-29
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.06.006>



A statistical-process based approach for modelling
beach profile variability
Một cách tiếp cận dựa trên quá trình thống kê để mô hình hóa
sự thay đổi mặt cắt ngang bãi biển

Doug Pender • Harshinie Karunarathna

Biên dịch: Nguyễn Quang Chiến
GV Khoa Kỹ thuật Biển
Trường Đại học Thủy lợi



Photo from Pixabay

Phiên bản 10-2018

A statistical-process based approach for modelling beach profile variability

Một cách tiếp cận dựa trên quá trình thống kê để mô hình hóa sự thay đổi mặt cắt ngang bãi biển

Doug Pender^{1*}, Harshinie Karunarathna²

1 School of Engineering, University of Glasgow, Glasgow G12 8LT, UK

2 College of Engineering, Swansea University, Singleton Park, Swansea SA2 8PP, UK

* Corresponding Author | Tác giả liên lạc.

Received: 24 November 2012 / Revised: 3 May 2013 / Accepted: 23 March 2015 / Available online: 14 July 2013.

Nhận bài: 24-11-2012 / Phản biện xong: 23-03-2015 / Đăng bài: 14-7-2013.

Highlights | Tiêu điểm

- A novel methodology for modelling medium-term beach change is proposed.
Một phương pháp mới để mô hình hóa biến đổi bãi biển trung hạn được đề xuất.
- We calibrate XBeach for modelling storm-induced erosion and post-storm recovery.
Chúng tôi hiệu chỉnh XBeach để mô hình hóa xói lở do bão và phục hồi bãi biển sau bão.
- Annual beach change is successfully simulated using the XBeach calibrations.
Sự biến đổi bãi biển hằng năm được mô phỏng thành công bằng cách hiệu chỉnh XBeach.
- The methodology provides encouraging results at modelling medium-term beach erosion.
Phương pháp này cho kết quả khả quan trong mô phỏng xói bãi trung hạn.

Tóm tắt nội dung

This paper presents a methodology for modelling medium term (annual to decadal) cross shore beach profile change and erosion. The statistical-process based approach (SPA) presented here combines detailed statistical modelling of offshore storm climate with a process based morphodynamic model (XBeach), to assess, and quantify morphodynamic variability of cross shore beach profiles. Until now, the use of process based models has been limited to simulations at storm event timescales. This methodology therefore represents the first application of a fully process based model in longer term simulations, as such, the approach requires simulation of post-storm beach profile recovery as well as individual event impacts. Narrabeen Beach, NSW, Australia was used as a case study for application of the technique due to the availability of an extensive set of storm and beach profile data. The results presented here demonstrate that the methodology produces encouraging results for determining medium term beach profile variability and erosion.

Bài báo này trình bày một phương pháp mô hình hóa trung hạn (giai đoạn năm đến thập kỷ) cho sự biến động và xói lở mặt cắt ngang bãi. Cách tiếp cận dựa trên quá trình ngẫu nhiên (SPA) trình bày ở đây đã kết hợp mô hình thống kê chi tiết về chế độ bão ngoài khơi với một mô hình hình thái dựa theo quá trình (XBeach), để đánh giá và định lượng sự biến đổi hình thái của mặt cắt ngang bãi. Cho đến giờ, việc áp dụng các mô hình dựa theo quá trình đều bị hạn chế chỉ mô phỏng được cho quy mô thời gian trận bão. Do vậy, phương pháp này thể hiện lần đầu một mô hình hoàn toàn dựa theo quá trình được áp dụng để mô phỏng thời đoạn dài hơn. Như vậy cách tiếp cận này yêu cầu mô phỏng sự hồi phục mặt cắt ngang bãi sau bão cũng như tác động của từng cơn bão. Bãi biển Narrabeen thuộc bang NSW, Úc, được chọn làm nghiên cứu điển hình cho việc áp dụng kỹ thuật này, do các số liệu mặt cắt bãi và nhiều số liệu bão có sẵn. Kết quả trình bày ở đây thể hiện rằng phương pháp cho kết quả khả quan khi xác định mức độ xói lở và biến động bãi thời đoạn trung bình.

Keywords: Storm erosion; Extreme storm statistics; XBeach; Beach erosion and accretion; Beach profile morphodynamics; Narrabeen Beach

Từ khóa: xói ở do bão; thống kê bão cực hạn; XBeach; xói lở và bồi tụ bờ biển; động học hình thái mặt cắt ngang bãi; bãi biển Narrabeen

1 Introduction | Giới thiệu

Increasing awareness of the importance of medium to long term morphological change to coastal sustainability has led to a requirement for methodologies to support predictions over these time scales. Linked to this is the rising prevalence of process based morphodynamic modelling. These two factors have resulted in a requirement for the application of process based models to be extended, to allow the assessment of beach change beyond short term time scales. As this has yet to be achieved, this paper discusses how a statistical framework (Callaghan et al., 2008) can be combined with the process based coastal morphodynamic model XBeach (Roelvink et al., 2009), to form a statistical-process based approach for forecasting cross shore, storm driven, beach change at a medium term time scale.

Quantifying beach morphodynamic variability using a benchmark 1 in N year event has inherent limitations. Hawkes et al. (2002) show that, for a forcing system with multiple variates, such as storm events, the return period of the individual variates does not necessarily match those of the system response. One such reason for the difference is that, during beach erosion, the formation of a new equilibrium profile requires a finite time, meaning erosion is dependent on duration (Kriebel and Dean, 1993). A benchmark event is also unable to account for two (or more) storms occurring in quick succession and effectively merging into one erosive event. Should this occur, there is greater erosive impact on the beach than if separated by a time sufficient enough to allow for natural recovery (accretion). To improve the representation of the forcing conditions, Callaghan et al. (2008) developed a statistical framework for modelling extreme storm climate and beach erosion, known as the Full Temporal Simulation (FTS). This model combines the multivariate statistical modelling of individual storm events with a non homogeneous Poisson process for modelling event spacing which allows for the prediction of a time series of storm (erosion) events and calm (accretion) periods, leading to a more realistic quantification of beach erosion. They combined this model with the empirical storm erosion model of Kriebel and Dean (1993) to determine beach erosion. The usefulness of this model was also demonstrated by Ranasinghe et al. (2011a) who combined it with a simplified empirical model (Larson et al. 2004) to estimate dune erosion at Narrabeen Beach over a 110 year period incorporating sea level rise. Both approaches are limited as the post-storm recovery of the profile was estimated using an empirical technique, as the structural functions used to determine erosion are not capable of predicting post-storm beach recovery.

Process based techniques for the modelling of cross shore beach behaviour have existed for some time with numerous models available (UNIBEST-TC (Reniers et al., 1995), CROSSMOR2000 (van Rijn, 1996) and SBEACH (Larson and Kraus, 1989)). van Rijn et al. (2003) provide a detailed review of the capabilities of these models to predict cross shore profile change. This study involved storm and seasonal time scales with some models shown to pro-

Càng nâng cao nhận thức được tầm quan trọng của biến đổi hình thái từ trung hạn đến dài hạn tới sự bền vững vùng bờ, người ta đã có yêu cầu những phương pháp trợ giúp dự đoán theo cỡ thời gian như vậy. Kèm theo đó là sự ưu thế ngày càng tăng của việc mô hình hóa động lực hình thái. Hai yếu tố này đã dẫn đến yêu cầu mở rộng ứng dụng những mô hình dựa trên quá trình, để cho phép đánh giá biến đổi bãi vượt ngoài những cỡ thời gian ngắn hạn. Khi mà điều đó chưa đạt được, bài báo này thảo luận cách kết hợp một khung thống kê (Callaghan & nnk., 2008) với mô hình địa mạo hình thái dựa theo quá trình vùng bờ, XBeach (Roelvink & nnk., 2009), để hình thành một cách tiếp cận dựa trên quá trình thống kê nhằm dự báo sự thay đổi bãi biển hướng ngang bờ do bão trong cỡ thời gian trung bình.

Việc lượng hóa biến đổi động lực hình thái bãi biển bằng cách dùng thang chuẩn là sự kiện xuất hiện 1 lần trong N năm thì có những hạn chế rõ ràng. Hawkes & nnk. (2002) cho thấy rằng với một hệ thống động lực có nhiều biến số, như các trận bão, thì thời kì lặp lại của từng biến đơn lẻ không nhất thiết phải khớp với các biến phản hồi hệ thống. Một trong số các lý do khác biệt là, trong quá trình xói lở bãi, sự hình thành một mặt cắt cân bằng mới đòi hỏi thời gian hữu hạn, nghĩa là xói lở phụ thuộc vào thời đoạn (Kriebel & Dean, 1993). Một sự kiện tiêu chuẩn cũng không thể xét đến hai (hay nhiều) trận bão xảy ra liên tiếp mà thật sự quyện vào tạo nên một sự kiện xói lở duy nhất. Nếu xảy ra điều đó, sẽ có tác động xói bãi lớn hơn là khi các trận bão phân biệt bởi các thời đoạn đủ dài để cho phép tự hồi phục (bồi tụ). Để cải thiện cách biểu diễn các điều kiện động lực, Callaghan & nnk. (2008) đã phát triển một khung tính toán thống kê để mô hình hóa chế độ bão cực hạn và sự xói lở bãi biển, được gọi là Mô phỏng toàn thời gian (FTS). Mô hình này kết hợp cách mô hình hóa thống kê đa biến của từng trận bão với quá trình Poisson không đồng nhất để mô hình hóa khoảng cách thời gian giữa các sự kiện, từ đó cho phép dự đoán một chuỗi thời gian gồm các sự kiện bão (xói) và lắng (bồi tụ), dẫn đến cách lượng hóa xói lở bãi thực tế hơn. Họ kết hợp mô hình này với mô hình xói bão thực nghiệm của Kriebel và Dean (1993) nhằm xác định sự xói lở bãi. Sự hữu ích của mô hình này cũng được giới thiệu bởi Ranasinghe & nnk. (2011a), nhóm tác giả đó đã kết hợp nó với một mô hình thực nghiệm được giản hóa (Larson & nnk. 2004) để ước tính sự xói lở cồn cát ở bãi biển Beach trong suốt thời đoạn 110 năm có xét đến nước biển dâng. Cả hai cách đều bị hạn chế do sự phục hồi sau bão của mặt cắt được ước tính bằng cách thực nghiệm, vì các tính năng mô hình được dùng để xác định xói lở thì không thể ước tính được sự phục hồi bãi sau bão.

Các kĩ thuật dựa trên quá trình để mô hình hóa ứng xử hướng ngang bãi đã tồn tại được một thời gian với nhiều mô hình sẵn có (UNIBEST-TC (Reniers & nnk., 1995), CROSSMOR2000 (van Rijn, 1996) và SBEACH (Larson và Kraus, 1989)). van Rijn & nnk. (2003) trình bày tổng kết chi tiết những tính năng của các mô hình này trong việc dự đoán sự biến động mặt cắt ngang bãi. Nghiên cứu này có những cỡ thời gian trận bão và cỡ mùa với một số

duce good representation of different profile features at the seasonal timescale. However, the sustainability of process based models for simulating beach change beyond a storm timescale has yet to be demonstrated.

XBeach, as a tool for modelling coastal change, has been extensively validated against numerous flume experiments (1D) and some field case studies (2DH) (Roelvink et al., 2009). The model has then been successfully applied to simulate storm response of sandy beaches at Assateague Island, Maryland (Roelvink et al., 2009), Santa Rosa Island, Florida (McCall et al., 2010) and Ostend Beach, Belgium (Bolle et al., 2010). More recently, the use of XBeach has been extended to the modelling of gravel beach variability (de Alegria-Arzaburu et al., 2010; Jamal et al., 2010; Williams et al., 2012). Until now its use has been curtailed at the storm event timescale (hours to days). Although XBeach has been validated and used extensively for erosive conditions, it has not been successfully validated or used to simulate post-storm beach accretion and recovery.

The aim of this paper is to expand on the studies of Callaghan et al. (2008) and Ranasinghe et al. (2011a), to overcome the limitations of their models as a result of using empirical/data driven approaches to determine storm erosion/post-storm recovery. Here we will attempt to simulate medium term beach change using a fully process based approach, by combining the FTS approach with the XBeach model, hereafter known as the Statistical-Process based Approach (SPA). To the authors' knowledge, this is the first attempt of calibrating XBeach to simulate beach recovery and, use a fully process based model to simulate beach change at medium term timescales. The SPA will provide useful insights into current capabilities of XBeach at medium term beach modelling.

2 Field site | Địa điểm khảo sát

2.1 Narrabeen Beach | Bãi biển Narrabeen

Narrabeen Beach is located approximately 20 km north of Sydney, NSW, Australia (Hình 1). It is a 3.6 km long embayed beach that experiences semi diurnal, microtidal conditions with a mean spring tidal range of 1.25 m (Short, 1984). The region is subjected to highly variable, moderate to high energy incoming wave conditions as the wave climate is driven by a number of cyclonic sources, with storms reaching the beach throughout the year (Short, 2006; Short and Trenaman, 1992). The beach predominantly exhibits an intermediate state, but has been shown to frequently change between all states (Wright and Short, 1984).

The beach sediments are quartz and carbonate sands with median diameter (D_{50}) ranging from 0.25 to 0.50 mm (Wright and Short, 1984). The morphodynamic variability has been regularly and extensively monitored during the last few decades with beach profiles being surveyed at 5 locations (Fig. 1) along the beach by the Coastal

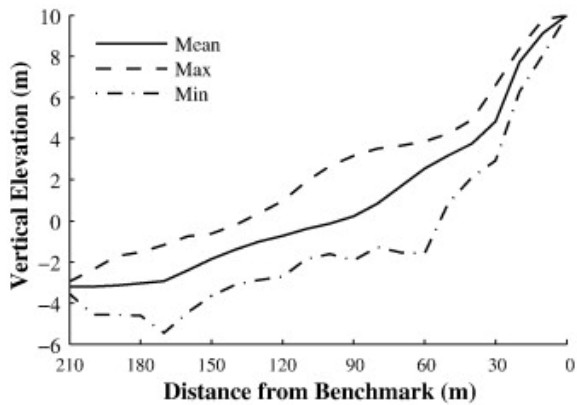
mô hình được cho thấy đã biểu diễn tốt các đặc điểm mặt cắt ngang khác nhau trong quy mô thời gian mùa. Tuy nhiên, sự vững vàng của các mô hình theo quá trình trong việc mô phỏng thay đổi bãi biển với cỡ thời gian lâu hơn trận bão vẫn chưa được thể hiện.

XBeach, một công cụ để mô hình hóa biến đổi bờ biển, đã được kiểm định kỹ qua nhiều thí nghiệm máng sóng (1 chiều) cùng vài nghiên cứu hiện trường cụ thể (2DH) (Roelvink & nnk., 2009). Mô hình sau đó đã được áp dụng thành công để mô phỏng sự phản hồi của bãi biển cát tại Đảo Assateague, bang Maryland (Roelvink & nnk., 2009), Đảo Santa Rosa, bang Florida (McCall & nnk., 2010) và bãi biển Ostend, Bỉ (Bolle & nnk., 2010). Gần đây hơn, cách dùng của XBeach đã được mở rộng để mô hình hóa sự biến đổi bãi biển cuội sỏi (de Alegria-Arzaburu & nnk., 2010; Jamal & nnk., 2010; Williams & nnk., 2012). Đến giờ ứng dụng của nó giờ đây đã được rút gọn về cỡ thời gian trận bão (từ vài giờ đến vài ngày). Dù XBeach đã được kiểm định và dùng nhiều cho các điều kiện xói lở, song nó vẫn chưa được kiểm định thành công hay dùng để mô phỏng quá trình bồi tụ và phục hồi bãi sau bão.

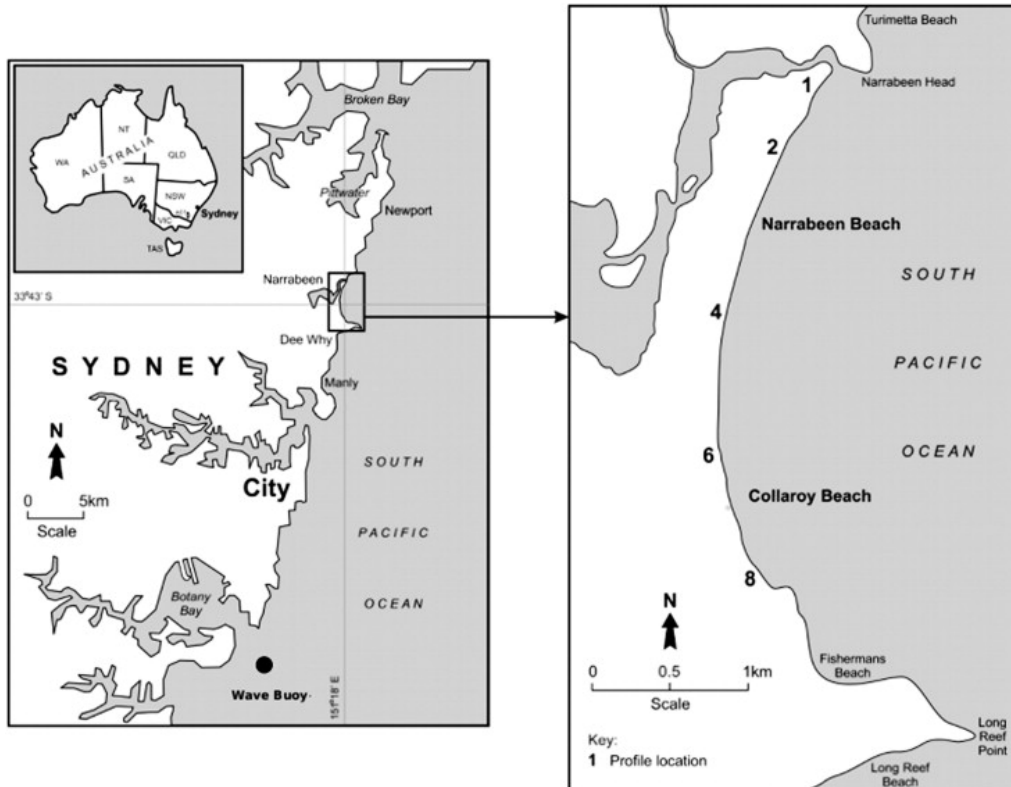
Bài báo này nhằm mở rộng những nghiên cứu của Callaghan & nnk. (2008) và Ranasinghe & nnk. (2011a), để vượt qua những hạn chế trong mô hình của họ như là kết quả sử dụng các phương pháp thực nghiệm/điều khiển bởi dữ liệu, để xác định sự xói trong bão/hồi phục sau bão. Ở đây chúng tôi sẽ cố gắng mô phỏng sự biến đổi bãi biển trung hạn bằng phương pháp hoàn toàn dựa theo quá trình, bằng cách kết hợp cách tiếp cận FTS với mô hình XBeach, từ đây sẽ được gọi với tên Cách tiếp cận theo quá trình thống kê (SPA). Như các tác giả được biết, đây là nỗ lực đầu tiên để hiệu chỉnh XBeach nhằm mô phỏng sự hồi phục bãi, và dùng một mô hình hoàn toàn dựa theo quá trình để mô phỏng sự thay đổi bãi trong cỡ thời gian trung hạn. SPA sẽ cung cấp những thông tin sâu hữu ích về khả năng XBeach để mô hình hóa trung hạn cho bãi biển.

Bãi biển Narrabeen nằm cách khoảng 20 km phía bắc của Sydney, bang New South Wales, Úc (Hình 1). Đó là một bãi biển dài 3.6 km, với chế độ bán nhật triều yếu, độ lớn triều cường trung bình bằng 1.25 m (Short, 1984). Khu vực đón sóng tới có năng lượng sóng biến đổi nhiều, từ trung bình đến mạnh, vì chế độ sóng được kiểm soát bởi nhiều nguồn gió xoáy, với các cơn bão đổ bộ vào bờ biển quanh năm (Short, 2006; Short và Trenaman, 1992). Bãi biển thường thể hiện một trạng thái trung gian, nhưng đã có nghiên cứu chỉ ra sự thay đổi thường xuyên giữa tất cả những trạng thái (Wright và Short, 1984).

Trầm tích bãi biển là cát quartz và carbonat với đường kính trung vị (D_{50}) từ 0.25 đến 0.50 mm (Wright và Short, 1984). Sự biến đổi động lực hình thái được quan trắc kỹ lưỡng và thường xuyên trong suốt vài thập kỷ gần đây với các mặt cắt ngang bãi được khảo sát ở 5 vị trí (Hình 1) dọc theo bãi biển do Ban nghiên cứu bờ biển, Đại học Sydney



Hình 2: | Fig. 2. Variation in profile 4 measurements from 1981 to 2005. • Sự thay đổi trong kết quả đo mặt cắt 4 từ năm 1981 đến 2005.



Hình 1: |Fig. 1. Location of Narrabeen Beach, waverider buoy and measured profiles. Modified after Harley et al. (2011b). • Vị trí bờ biển Narrabeen, phao WaveRider và các mặt cắt đo đạc. Sửa lại từ Harley & nnk. (2011b).

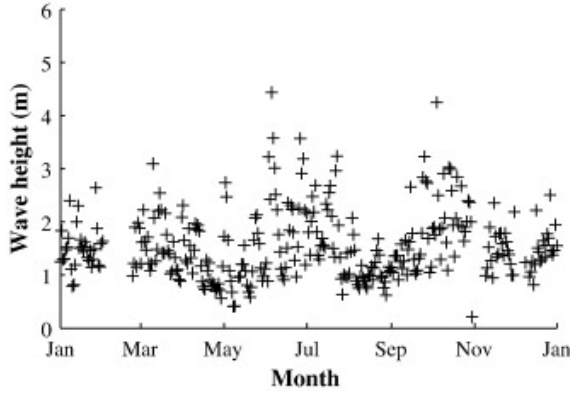
Studies Unit, University of Sydney (Short and Trembanis, 2004). The beach profiles surveyed at profile 4, where long term longshore transport effects are minimal (Harley et al., 2011a; Ranasinghe et al., 2004), are used in the present study. Fig. 2 highlights the variability in profile 4 during the recording period.

thực hiện (Short và Trembanis, 2004). Các mặt cắt ngang bãi khảo sát ở vị trí 4, nơi các hiệu ứng vận chuyển bùn cát dọc bờ dài hạn là tối thiểu (Harley & nnk., 2011a; Ranasinghe & nnk., 2004), được dùng ở nghiên cứu này. Hình 2 cho thấy rõ sự biến động mặt cắt 4 trong quá trình đo đạc.

2.2 Offshore wave data | Số liệu sóng ngoài khơi

Wave data collected between 1981 and 2005, offshore of Botany Bay (Fig. 1) at a water depth of 85 m, using a waverider buoy have been used in this study. During the recording period the means H_s and T_s were approximately 1.5 m and 10 s respectively, with the overall wave climate being highly variable. Fig. 3 shows the plot of daily H_s during 1982 to provide an insight into typical wave conditions in the region. More information on the NSW wave

Số liệu sóng thu thập giữa năm 1981 và 2005, ngoài khơi vịnh Botany (Hình 1) tại điểm sâu 85 m, bằng phao waverider. Trong giai đoạn đo các giá trị trung bình H_s và T_s lần lượt xấp xỉ 1.5 m và 10 s, với chế độ sóng chung biến thiên rất mạnh. Hình 3 cho thấy biểu đồ H_s theo ngày suốt năm 1982 giúp ta xem xét kỹ hơn các điều kiện sóng điển hình trong vùng. Thông tin thêm về khí hậu bang NSW có thể tìm trong các tài liệu của Short và Trenaman



Hình 3: | Fig. 3. Typical annual daily H_s measurements at Botany Bay for 1982. • Các giá trị H_s điển hình đo được hằng ngày trong năm 1982 tại Vịnh Botany.

climate can be found in Short and Trenaman (1992), Lord and Kulmar (2000), Kulmar et al. (2005), and Harley et al. (2010).

(1992), Lord và Kulmar (2000), Kulmar & nnk. (2005), và Harley & nnk. (2010).

3 Statistical modelling | Mô hình hóa thống kê

Statistical modelling of the storm climate at Narrabeen Beach follows the FTS procedure developed by Callaghan et al. (2008). An overview of the procedure used in the present study is given here as the approach adopted slightly differs from that of Callaghan et al. (2008). Here, pairs of peak significant wave height ($H_{s,max}$) of the storm events and the corresponding period ($T_{s,max}$) have been fitted rather than pairs of H_s and T_s . The modified FTS therefore requires $H_{s,max}$, $T_{s,max}$, storm duration (D) of individual storms and spacing (S) between storms only.

Based on the analysis of the incident wave climate and erosion in the Narrabeen region, a correlation between large wave heights and erosion was evident. This led to the recording of storm events in the region being based around a wave threshold of 3.0 m (Kulmar et al., 2005), as this was shown to best correlate with observed erosion. Previous modelling studies at Narrabeen Beach (Callaghan et al., 2008; Harley et al., 2009; Ranasinghe et al., 2011a) have defined storm events when wave height exceeds this threshold. The study of Harley et al. (2009) used this threshold to model the response of Narrabeen Beach to storm events and found that using the 3.0 m value successfully captured the observed erosion.

The storms are extracted by clustering the wave data using the threshold wave height of 3.0 m; a criterion of 24 h between events to ensure independence; and minimum storm duration of 1 h. Following this approach, 539 storm events were identified for the 25 year wave record. Fig. 4(a) and (b) show the details of actual storm events D vs. $H_{s,max}$ và $T_{s,max}$ vs. $H_{s,max}$ respectively.

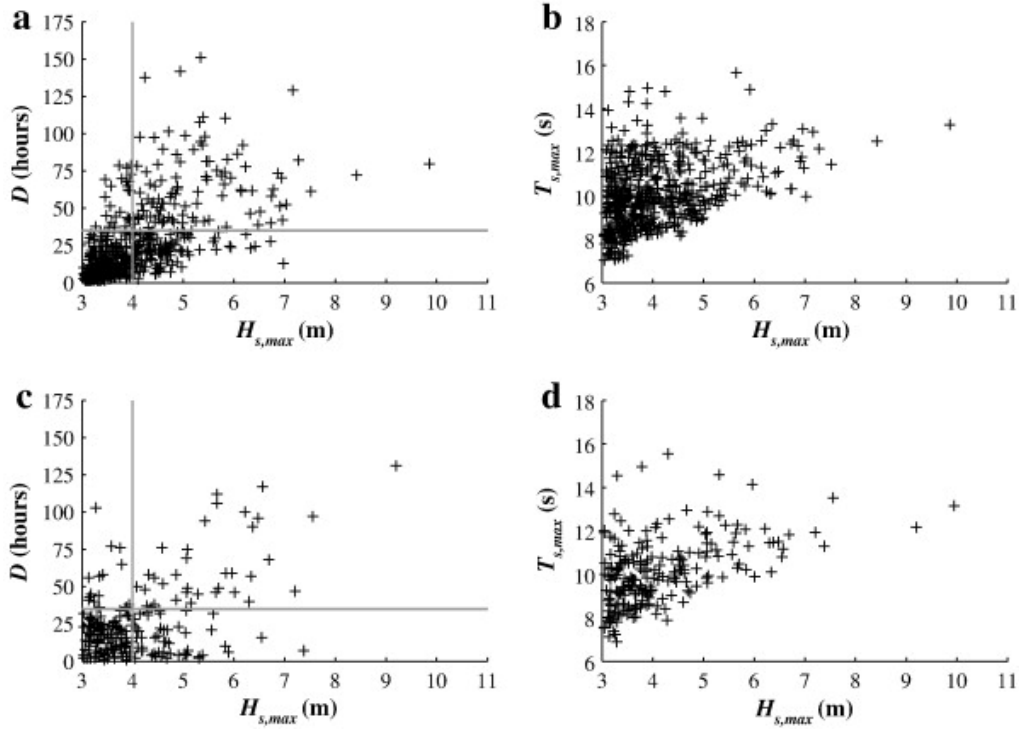
In order to determine a synthetic storm wave climate at Narrabeen Beach, the FTS procedure fits the Generalised Pareto Distribution (GPD), logistics distribution and a 3 parameter lognormal distribution to the storm events identified, following the procedure outlined by Coles (2001) and Callaghan et al. (2008). A Monte Carlo (MC) simulation using a Gibbs sampling technique (Geman and Geman, 1984) and Box–Muller method (Box and Muller,

Mô hình hoá thống kê chế độ sóng bão ở Bãi biển Narrabeen Beach tuân theo quy trình FTS được phát triển bởi Callaghan & nnk. (2008). Tổng quan về quy trình được sử dụng trình bày ở đây vì cách tiếp cận hơi khác với cách của Callaghan & nnk. (2008). Ở đây, những cặp đỉnh chiều cao sóng ý nghĩa ($H_{s,max}$) của những trận bão cùng với chu kỳ tương ứng ($T_{s,max}$) đã được dùng để khớp đường cong thay vì dùng các cặp H_s và T_s . Do vậy FTS hiệu chỉnh chỉ yêu cầu $H_{s,max}$, $T_{s,max}$, thời đoạn bão (D) của từng trận cũng như khoảng cách (S) giữa các trận.

Dựa trên phân tích chế độ sóng tới và xói lở tại khu vực Narrabeen, một tương quan giữa các chiều cao sóng lớn và mức độ xói lở đã rõ ràng. Điều này dẫn đến việc ghi lại các trận bão trong vùng dựa trên một ngưỡng chiều cao sóng bằng 3.0 m (Kulmar & nnk., 2005), vì giá trị này đã cho thấy sự tương quan chặt chẽ nhất với xói lở đã quan trắc được. Các nghiên cứu mô hình hoá trước đây tại bãi biển Narrabeen (Callaghan & nnk., 2008; Harley & nnk., 2009; Ranasinghe & nnk., 2011a) đã định nghĩa các trận bão là khi chiều cao sóng vượt quá ngưỡng này. Nghiên cứu của Harley & nnk. (2009) đã dùng ngưỡng này để mô hình hoá sự phản hồi của bãi biển Narrabeen đối với các trận bão và nhận thấy rằng khi sử dụng giá trị 3.0 m thì đã bắt được số liệu quan trắc xói lở.

Những trận bão đã được kết xuất bằng việc nhóm cụm số liệu sóng bằng ngưỡng chiều cao sóng 3.0 m; một tiêu chí 24 giờ giữa các sự kiện được áp dụng để đảm bảo tính độc lập giữa các trận bão; và bão phải kéo dài tối thiểu 1 giờ. Theo cách này, đã nhận diện được 539 trận bão từ bản ghi sóng 25 năm. Các Hình 4(a) và (b) cho thấy chi tiết của các trận bão thực tế: D so với $H_{s,max}$ và $T_{s,max}$ so với $H_{s,max}$.

Để xác định một chế độ sóng bão tổng hợp tại bãi biển Narrabeen, quy trình FTS khớp dạng phân bố Pareto tổng quát (GPD), phân bố logistics và một phân bố loga-chuẩn 3 tham biến cho các trận bão đã nhận diện, theo quy trình vạch ra bởi Coles (2001) và Callaghan & nnk. (2008). Một mô phỏng (MC) có dùng kĩ thuật lấy mẫu Gibbs (Geman và Geman, 1984) và phương pháp Box–Muller (Box và Muller, 1958) sau đó được dùng để phát sinh một chuỗi



Hình 4: [Fig. 4. Determined storm events between 1981 and 2005. D vs. $H_{s,max}$ (a) and $T_{s,max}$ vs $H_{s,max}$ (b). Simulated random 10 year storm climate D vs. $H_{s,max}$ (c) and $T_{s,max}$ vs $H_{s,max}$ (d). • Các trận bão đã xác định giữa 1981 và 2005. D so với $H_{s,max}$ (a) và $T_{s,max}$ so với $H_{s,max}$ (b). D so với $H_{s,max}$ của chế độ bão 10 năm. (c) và $T_{s,max}$ so với $H_{s,max}$ (d).

1958) is then employed to generate a random synthetic time series of erosion and accretion periods, with parameter values attributed to $H_{s,max}$, $T_{s,max}$, D and S of storm events. For a full description of the FTS see Callaghan et al. (2008) and references therein. The procedure is summarised here for clarity:

1. Identify meteorologically independent storm events.
2. Fit the GPD to $H_{s,max}$ and D .
3. Fit the dependency (logistics) distribution between $H_{s,max}$ and D .
4. Fit the 3-parameter lognormal distribution to $T_{s,max}$.
5. Fit a non-homogeneous Poisson process to S .
6. Simulate the storm climate using the fitted distributions including storm spacing.

The number of random storm events required is dependent on the final use of the synthetic time series. This number has to be large enough to provide accurate estimation of the maximum return level of interest. Generation of more events than required will result in unnecessary computational time. According to Hawkes (2000), the maximum return period of interest requires a MC simulation size equal to the product of ten, the average number of events per year (Ny) and the return period (RP) (i.e. MC size = $10 \times Ny \times RP$).

In order to demonstrate the SPA methodology presented in this paper, the maximum return period of interest was taken as 1 year. For 539 events over the 25

thời gian tổng hợp ngẫu nhiên gồm các thời kì xói và bồi, với các giá trị tham số gồm $H_{s,max}$, $T_{s,max}$, D và S của các trận bão. Để có một mô tả đầy đủ về FTS, hãy xem bài báo Callaghan & nnk. (2008) và những tham khảo trong đó. Quy trình này được tóm tắt ở đây cho rõ:

1. Nhận diện các trận bão độc lập về mặt khí tượng.
2. Khớp GPD cho $H_{s,max}$ và D .
3. Khớp dạng phân bố phụ thuộc (logistics) giữa $H_{s,max}$ và D .
4. Khớp phân bố loga-chuẩn 3 tham biến cho $T_{s,max}$.
5. Khớp một quá trình Poisson không đồng nhất cho S .
6. Mô phỏng chế độ bão bằng các phân bố đã khớp bao gồm cả khoảng cách thời đoạn giữa các trận bão.

Số các trận bão ngẫu nhiên yêu cầu thì phụ thuộc vào cách dùng cuối của chuỗi thời gian tổng hợp. Con số này phải đủ lớn để cung cấp ước tính chính xác giá trị lớn nhất của mức quan tâm lặp lại. Việc phát sinh ra nhiều trận bão hơn yêu cầu sẽ mất thời gian tính toán không cần thiết. Theo Hawkes (2000), thời kì lặp lại lớn nhất phải đòi hỏi một kích cỡ mô phỏng MC bằng tích của 10, số trận bão trung bình mỗi năm (Ny) và thời kì lặp lại (RP) (nghĩa là cỡ MC = $10 \times Ny \times RP$).

Để minh họa phương pháp SPA trình bày trong bài báo, chu kì lặp lại lớn nhất được chọn bằng 1 năm. Với 539 trận bão trong giai đoạn 25 năm, $Ny = 21.56$; và với

year period, $Ny = 21.56$; and with a maximum return period of 1 year this led to a random time series of 216 storm events (corresponding to 10 years) being generated. Fig. 4(c) and (d) gives plots of the randomly generated D vs. $H_{s,max}$; $T_{s,max}$ vs. $H_{s,max}$ respectively. Comparison between the measured (Fig. 4(a) and (b)) and randomly generated events shows good correlation.

một chu kỳ lặp lớn nhất bằng 1 năm thì điều này dẫn đến một chuỗi thời gian ngẫu nhiên gồm 216 trận bão (tương ứng với 10 năm) được tạo nên. Các Hình 4(c) và (d) lần lượt là biểu đồ của những giá trị phát sinh ngẫu nhiên D so với $H_{s,max}$; $T_{s,max}$ so với $H_{s,max}$. Sự so sánh giữa các trận bão đo đạc (Các hình 4(a) và (b)) và trận bão phát sinh đã cho thấy tương quan tốt.

4 XBeach model | Mô hình XBeach

XBeach (Roelvink et al., 2009, 2010) is a 2DH coastal morphodynamic model developed to simulate dune erosion due to hurricane impacts based on the regimes outlined by Sallenger (2000). The model is based on the nonlinear shallow water equations and resolves nearshore hydrodynamics by employing a 2DH description of wave groups and infragravity motions. Wave group forcing is derived from a time varying wave action balance equation, which subsequently drives the infragravity motions and longshore and cross shore currents. The Eulerian flow velocities (u_E) determined by the model governing equations are used to force the sediment transport module.

The Lagrangian flow velocities (u_L) are determined from the shallow water equations and account for the wave induced mass flux and the subsequent return flows (Eqs. (1) to (3)). They are related to u_E by the Stokes drift (u_S) (Eqs. (4) and (5)).

XBeach (Roelvink & mnk., 2009, 2010) là mô hình động lực hình thái 2 chiều mặt bằng, được lập nên để mô phỏng xói lở cồn cát do bão, dựa trên các chế độ theo Sallenger (2000). Mô hình dựa trên các phương trình nước nông phi tuyến và phân giải thủy động lực gần bờ bằng cách dùng một cách mô tả theo 2 chiều mặt bằng cho các nhóm sóng và những chuyển động ngoại trọng lực. Lực tác động bởi nhóm sóng được suy ra từ một phương trình cân bằng hoạt động sóng biến đổi theo thời gian, lực này dẫn dắt chuyển động ngoại trọng lực và dòng chảy dọc bờ cũng như ngang bờ. Vận tốc Euler của dòng chảy (u_E) xác định bởi những phương trình cơ bản được dùng để gây chuyển động của bùn cát.

Vận tốc Lagrăng của dòng chảy (u_L) được xác định từ các phương trình nước nông và có xét đến lưu lượng nước dồn bởi sóng và các dòng chảy hồi quy tương ứng (các PT (1) đến (3)). Chúng liên hệ với u_E thông qua dòng trôi Stokes (u_S) (các PT (4) và (5)).

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - \nu_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} + f u^L - \nu_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$u^E = u^L - u^S \quad \text{and} \quad v^E = v^L - v^S \quad (4)$$

$$u^S = \frac{E_w \cos \theta}{\rho h c} \quad \text{and} \quad v^S = \frac{E_w \sin \theta}{\rho h c} \quad (5)$$

where τ is the bed shear stress; η is the water level; F is the wave induced radiation stress; ν_h is the horizontal viscosity; and f is the Coriolis coefficient.

The sediment transport module uses a depth averaged advection–diffusion equation (Galappatti and Vreugdenhil, 1985) to determine sediment concentration (C_s), using an equilibrium concentration (C_{eq}) as a source term (Eq. (6)). The sediment transport gradients (q_x and q_y) are determined from u^E , C_s and the diffusion coefficient (D_h) (Eqs. (7) and (8)).

trong đó τ là ứng suất tiếp tại đáy; η là mực nước; F là ứng suất phát xạ do sóng; ν_h là độ nhớt theo phương ngang; còn f là hệ số Coriolis.

Mô-đun vận chuyển bùn cát sử dụng một phương trình chuyển tải-khuếch tán trung bình theo độ sâu (Galappatti và Vreugdenhil, 1985) để xác định nồng độ bùn cát (C_s), dùng đến nồng độ cân bằng (C_{eq}) như một số hạng nguồn (PT (6)). Các gra-đien vận chuyển bùn cát (q_x và q_y) được xác định từ u^E , C_s và hệ số khuếch tán (D_h) (các PT (7) và (8)).

$$\frac{\partial h C_s}{\partial t} + \frac{\partial h C_s u^E}{\partial x} + \frac{\partial h C_s v^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_h h \frac{\partial C_s}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_h h \frac{\partial C_s}{\partial y} \right] = \frac{h C_{eq} - h C_s}{T_s} \quad (6)$$

$$q_x(x, y, t) = \left[\frac{\partial h C_s u^E}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left[D_h h \frac{\partial C_s}{\partial x} \right] \right] \quad (7)$$

$$q_y(x, y, t) = \left[\frac{\partial h C_s v^E}{\partial y} \right] + \left[\frac{\partial}{\partial y} \left[D_h h \frac{\partial C_s}{\partial y} \right] \right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{morfac}{(1-p)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (9)$$

$$\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| > m_{cr} \quad (10)$$

C_{eq} is determined from, either, the Soulsby–van Rijn formula (Soulsby, 1997) or the van Thiel–van Rijn formulae (van Rijn, 2007a, 2007b; van Thiel de Vries, 2009) with the change in bed level computed from the sediment transport gradients (q_x and q_y) and avalanching mechanism when a critical bed slope is exceeded (Eqs. (9) and (10)). For storm simulations the Soulsby–van Rijn (SvR) transport equation was used to determine C_{eq} (Eqs. (11) to (14)) with the van Thiel–van Rijn (vTvR) used for the recovery simulations (Eqs. (15) to (17)).

C_{eq} được xác định bằng công thức Soulsby–van Rijn (Soulsby, 1997) hoặc các công thức van Thiel–van Rijn (van Rijn, 2007a, 2007b; van Thiel de Vries, 2009) với sự thay đổi cao trình đáy biển tính từ các gra-đien lưu lượng vận chuyển bùn cát (q_x and q_y) và cơ chế sạt trượt đáy khi độ dốc đáy vượt mức phân giới (các PT (9) và (10)). Với những mô phỏng bão, công thức vận chuyển bùn cát Soulsby–van Rijn (SvR) được dùng để xác định C_{eq} (các PT (11)–(14)) với công thức van Thiel–van Rijn (vTvR) dùng cho mô phỏng phục hồi (các PT (15)–(17)).

$$C_{eq} = \frac{A_s}{h} \left(\left(|u^E|^2 + 0.018 \frac{u_{rms}^2}{C_d} \right) - u_{cr} \right)^{2.4} (1 - \alpha_b m) \quad (11)$$

$$A_s = A_{sb} + A_{ss} \quad (12)$$

$$A_{sb} = \frac{0.005h(D_{50}/h)^{1.2}}{[(s-1)gD_{50}]^{1.2}} \quad (13)$$

$$A_{ss} = \frac{0.012D_{50}D_*^{-0.6}}{[(s-1)gD_{50}]^{1.2}} \quad (14)$$

$$C_{eq} = \frac{A_{sb}}{h} \left(\sqrt{(u^E)^2 + 0.64u_{rms}^2} - u_{cr} \right)^{1.5} + \frac{A_{ss}}{h} \left(\sqrt{(u^E)^2 + 0.64u_{rms}^2} - u_{cr} \right)^{2.4} \quad (15)$$

$$A_{sb} = \frac{0.005h(d_{50}/h)^{1.2}}{[(s-1)gd_{50}]^{1.2}} \quad (16)$$

$$A_{ss} = \frac{0.012d_{50}D_*^{-0.6}}{[(s-1)gd_{50}]^{1.2}} \quad (17)$$

A detailed description of the XBeach model is given in Roelvink et al. (2009), Roelvink et al. (2010) and references therein.

Mô tả chi tiết về mô hình XBeach được trình bày trong Roelvink & nnk. (2009), Roelvink & nnk. (2010) cùng những tài liệu tham khảo nêu trong đó.

5 Modelling storm induced erosion and post-storm recovery | Mô hình hóa xói lở do bão và phục hồi sau bão

The calibration and validation of XBeach for simulating storm induced beach erosion and post-storm recovery are presented below. The results from this section demonstrate the model setups required for use within the SPA.

Việc hiệu chỉnh và kiểm định XBeach để mô phỏng xói lở bãi do bão và phục hồi sau bão sẽ được trình bày sau đây. Kết quả từ mục này giới thiệu cách thiết lập mô hình cần để sử dụng trong phương pháp SPA.

5.1 Storm erosion modelling | Mô hình hóa xói lở trong bão

Calibration and validation of XBeach were achieved by modelling a variety of observed storm events that occurred during the measurement period. It is essential that storm events, which accompany measured pre- and post-storm profiles, are used for calibration. It is also essential that only one storm occurred between the selected profiles.

Việc hiệu chỉnh và kiểm định XBeach đã đạt được bằng cách mô hình hóa một loạt những trận bão quan trắc thấy xảy ra trong giai đoạn đo đạc. Nhất thiết là những trận bão, kèm theo mặt cắt đo đạc trước và sau bão, được dùng để kiểm định. Cũng nhất thiết rằng chỉ có một trận bão xảy ra giữa các mặt cắt đã chọn. Do tần số xuất hiện

Bảng 1: | Table 1. Details of storm events used for XBeach calibration. • Chi tiết các trận bão dùng để kiểm định XBeach.

Storm	Profile dates	Storm dates	$H_{s,max}$ date	$H_{s,max}$ (m)	D (hrs)	T_p (s)
Trận bão	Ngày đo mặt cắt	Ngày bão	Ngày có $H_{s,max}$	$H_{s,max}$ (m)	D (giờ)	T_p (s)
1	Start — 31/05/83 End — 16/06/83	Start — 04/06/83 End — 08/06/83	04/06/83	3.89	77	12.4
2	Start — 30/10/87 End — 27/11/87	Start — 11/11/87 End — 13/11/87	11/11/87	6.32	46	9.85
3	Start — 19/05/94 End — 21/06/94	Start — 09/06/94 End — 11/06/94	09/06/94	4.61	53	9.85
4	Start — 14/10/94 End — 16/11/94	Start — 20/10/94 End — 21/10/94	20/10/94	5.33	22	9.85

Due to the high occurrence frequency of storms in the Narrabeen region (one approximately every two weeks) and the fact that profile measurements had been carried out only once a month, storm events that satisfy both requirements are sparse. Analysing the 25 year storm and beach profile survey records, four storm events with varying $H_{s,max}$ and D were selected for calibration. The selected storms are shown in Table 1.

As the available wave data are non directional, wave approach was assumed to be orthogonal to the shoreline with one directional bin. Hourly H_s values along with the energy spectrum were determined for each storm event, with the offshore wave boundary condition defined in XBeach each hour using the JONSWAP spectrum. Using 1 h duration JONSWAP spectra best encapsulate the actual storm profile.

To produce a computationally efficient setup and ensure that the processes are represented as accurately as possible, variable grid spacing was applied to the simulations. The grid spacing was defined by assuming a minimum short wave period (T_{min}) of 5 s, keeping at least 12 grid points per wave group length and assigning a minimum grid spacing of 2 m (the recommended minimum value). This resulted in 617 grid points across the model domain, with a maximum spacing of 13 m near the offshore boundary varying down to a minimum value of 2 m nearshore. For all simulations, an average D_{50} value of 0.37 mm has been implemented (Wright and Short, 1984).

The accuracy of model simulations is assessed using a Brier Skill Score (BSS), which has become a common practice within coastal numerical modelling (Pedrozo-Acuna et al., 2006; Roelvink et al., 2009; Sutherland et al., 2004; van Rijn et al., 2003; Williams et al., 2012). The BSS for comparing measured and simulated profiles is given in Eq. (18).

$$BSS = 1 - \frac{\langle |x_p - x_m|^2 \rangle}{\langle |x_b - x_m|^2 \rangle} \quad (18)$$

where x_p is the predicted profile from XBeach; x_m is the measured profile (post-storm) and x_b is the initial (pre-storm) profile. The BSS classification given by van Rijn et al. (2003) states that BSS < 0, ‘bad’; 0–0.3, ‘poor’; 0.3–0.6, ‘reasonable/fair’; 0.6–0.8, ‘good’; and 0.8–1.0, ‘excellent’.

As the SvR formula was developed under bed and suspended load conditions, it is not strictly valid for high

cao của những trận bão trong vùng Narrabeen (một trận trong khoảng mỗi 2 tuần) và thực tế rằng đo đạc mặt cắt chỉ được thực hiện khoảng 1 tháng 1 lần, nên những trận bão thoả mãn cả 2 điều kiện trên thì rất tản mát. Sau khi phân tích bản ghi 25 năm bão và mặt cắt ngang bãi đo trên thực địa, có 4 trận bão với $H_{s,max}$ và D biến đổi đã được lựa chọn kiểm định. Các trận bão lựa chọn được chỉ ra trong Bảng 1.

Vì số liệu sóng hiện có đều không chứa hướng, nên sóng tới được coi như là vuông góc đường bờ với một phân hướng. Các giá trị H_s từng giờ cùng phổ năng lượng được xác định cho từng trận bão, với điều kiện biên sóng nước sâu được định nghĩa trong XBeach ở mỗi giờ sử dụng phổ JONSWAP. Việc dùng phổ JONSWAP thời đoạn 1 h đã bao hàm tốt nhất đặc trưng bão thực tế.

Để tạo nên cách thiết lập hiệu quả nhất về mặt tính toán, và đảm bảo rằng các quá trình đều được thể hiện ở mức chính xác nhất có thể, các mô phỏng đều dùng cách chia lưới không đều. Bề rộng ô lưới được xác định bằng cách giả sử một chu kỳ sóng ngắn tối thiểu (T_{min}) bằng 5 s, qua đó giữ ít nhất là 12 điểm nút lưới trong mỗi chiều dài nhóm sóng và ấn định bề rộng ô lưới tối thiểu bằng 2 m (giá trị tối thiểu được khuyến nghị). Điều này dẫn đến có 617 điểm nút lưới dọc miền tính toán, với khoảng cách lớn nhất là 13 m gần biên ngoài khơi và thu hẹp dần về giá trị nhỏ nhất bằng 2 m ở gần bờ. Trong tất cả mô phỏng, một giá trị trung bình D_{50} được lấy bằng 0.37 mm (Wright and Short, 1984).

Độ chính xác của các mô phỏng được đánh giá bằng Điểm kĩ năng Brier (BSS), vốn đã trở thành một quy tắc thực hành chung trong lĩnh vực mô hình hoá số trị vùng ven bờ (Pedrozo-Acuna & nnk., 2006; Roelvink & nnk., 2009; Sutherland & nnk., 2004; van Rijn & nnk., 2003; Williams & nnk., 2012). Điểm BSS để so sánh các mặt cắt mô phỏng và đo đạc được cho bởi PT (18).

trong đó x_p là mặt cắt ước tính từ XBeach; x_m là mặt cắt đo đạc (sau bão) và x_b là mặt cắt ban đầu (trước bão). Cách phân loại BSS của Van Rijn & nnk. (2003) cho rằng BSS < 0 là ‘kém’; 0–0.3, ‘yếu’; 0.3–0.6, ‘thường’; 0.6–0.8, ‘khá’; and 0.8–1.0, ‘tốt’.

Vì công thức SvR được phát triển cho điều kiện tải lượng cát đáy và lơ lửng, nên nó không hoàn toàn đúng với các trường hợp dòng rửa trôi, có tốc độ cao như đang

velocity, sheet flow situations such as those encountered in this application. To overcome this, XBeach allows for a threshold velocity condition to be enforced reducing the stirring velocity ($u_{stirring}^2$) during sheet flow situations (Eq. (16)). Under waves and currents, sheet flow conditions occur when the Shields parameter (θ) exceeds 0.8 (Soulsby, 1997) with a suggested limiting maximum value (θ_{max}) of 0.8 to 1.0 (Roelvink et al., 2010). The $u_{stirring}^2$ limitation is enforced by defining θ_{max} (Eq. (17)). McCall et al. (2010) set $\theta_{max} = 1.0$ for modelling hurricane impact at Santa Rosa Island, FL, USA, and investigate the effects of a range of θ_{max} (0.8–1.2) on model results. As the mean D_{50} at Narrabeen Beach (0.37 mm) is greater than that at Santa Rosa (0.20 mm), the influence of sheet flow will be less and the requirement for a limiting θ_{max} will be lower. However, as θ_{max} is necessary for using the SvR formula in high velocity situations, it was decided to use $\theta_{max} = 1.0$ in the present study.

$$u_{stirring}^2 = \begin{cases} |u^E|^2 + \frac{0.018}{C_D} u_{rms}^2 & \theta < \theta_{max} \\ \theta_{max} \frac{gD_{50}\Delta}{c_f} & \theta \geq \theta_{max} \end{cases} \quad (19)$$

$$\theta_{max} = \frac{c_f u_{stirring}^2}{\Delta g D_{50}} \quad (20)$$

where θ is the Shields parameter; θ_{max} is the maximum Shields parameter (start of sheet flow); δ is the relative density of sediment; c_f is the flow friction coefficient; and C_D is the drag coefficient.

Invoking θ_{max} reduces $u_{stirring}^2$, which in turn reduces C_{eq} and therefore limits the volume of sediment carried by the water column. This will reduce the sediment transport rates, and the overall erosion of the beach. In order to further improve model outputs, three parameters that influence model simulations (Chézy coefficient, C ; permeability coefficient, k ; and wet cell gradient prior to avalanching, `wetslp`) were varied in an attempt to calibrate the model against the measured post-storm profiles.

XBeach uses the Chézy bed friction relationship in the flow module. The relationship between flow friction coefficient (c_f) and C (Eq. (21)) means a reduction in C or an increase in c_f will result in a decrease in erosion, by reducing flow velocities. The default values of c_f and C are set in XBeach as 0.003 and 55 respectively.

When θ_{max} is implemented, in addition to the decrease in flow velocities, reducing C will reduce $u_{stirring}^2$ and C_{eq} . This further limits the volume of sediment that can be transported in the water column, reducing the sediment transport rates and the overall erosion. As sediments at Narrabeen Beach are medium to coarse sands it is possible that the C value may be less than the default value of 55. Sensitivity tests were carried out to determine appropriate C and c_f values for the model setup.

The XBeach model includes a basic groundwater module in order to simulate infiltration and exfiltration to and from the beach. This module utilises the principle of Darcy flow and includes vertical interaction between surface wa-

gấp trong ứng dụng này. Để khắc phục, XBeach cho phép một điều kiện vận tốc ngưỡng để áp đặt nhằm giảm vận tốc khuấy ($u_{stirring}^2$) trong các tình huống dòng rửa trôi (PT (16)). Dưới tác dụng của sóng và dòng chảy, điều kiện rửa trôi xảy ra khi tham số Shields (θ) vượt 0.8 (Soulsby, 1997) với một giá trị lớn nhất (θ_{max}) khuyến nghị từ 0.8 đến 1.0 (Roelvink & nnk., 2010). Hạn chế của $u_{stirring}^2$ bị áp đặt bằng cách định nghĩa θ_{max} (PT (17)). McCall et al. (2010) đặt $\theta_{max} = 1.0$ cho mô hình hóa tác động bão xoáy đối với đảo Santa Rosa, FL, Mỹ, và khảo sát ảnh hưởng của một khoảng biến đổi θ_{max} (0.8–1.2) lên kết quả mô hình. Vì D_{50} trung bình ở bãi Narrabeen (0.37 mm) lớn hơn ở Santa Rosa (0.20 mm), ảnh hưởng của dòng rửa trôi sẽ yếu hơn và ít cần đến giá trị ngưỡng θ_{max} . Tuy vậy, vì θ_{max} cần thiết để sử dụng công thức SvR trong trường hợp vận tốc cao, nghiên cứu này đã quyết định sử dụng $\theta_{max} = 1.0$.

trong đó θ là tham số Shields; θ_{max} là tham số Shields tối đa (bắt đầu có dòng rửa trôi); δ là mật độ tương đối của bùn cát; c_f là hệ số ma sát dòng chảy; còn C_D là hệ số cản.

Việc tăng θ_{max} làm giảm $u_{stirring}^2$, đến lượt nó lại làm giảm C_{eq} và do vậy hạn chế thể tích bùn cát mang đi bởi cột nước. Điều này sẽ làm giảm lưu lượng vận chuyển bùn cát, và mức độ xói lở chung của bãi. Nhằm cải thiện hơn nữa kết quả mô hình, ba tham số ảnh hưởng đến mô phỏng (hệ số Chézy, C ; hệ số thấm, k ; và độ dốc ô lưới ướt trước khi xảy ra sạt trượt, `wetslp`) đã được thay đổi nhằm hiệu chỉnh mô hình theo các mặt cắt thực đo sau bão.

XBeach sử dụng hệ thức ma sát đáy Chézy trong mô-đun dòng chảy. Hệ thức giữa hệ số ma sát dòng chảy (c_f) và C (PT (21)) đồng nghĩa với việc sự giảm C hay tăng c_f sẽ dẫn đến giảm xói lở, qua việc giảm vận tốc dòng chảy. Các giá trị mặc định của c_f và C lần lượt được đặt bằng 0.003 và 55 trong XBeach.

$$c_f = \frac{g}{C^2} \quad (21)$$

Khi thực hiện θ_{max} thì ngoài việc giảm vận tốc dòng chảy, giảm C sẽ làm giảm $u_{stirring}^2$ và C_{eq} . Điều này còn giới hạn thể tích bùn cát có thể vận chuyển trong cột nước, làm giảm lưu lượng vận chuyển bùn cát và sự xói lở nói chung. Vì bùn cát trên bãi biển Narrabeen thuộc loại cát trung đến thô nên có thể giá trị C nhỏ hơn giá trị mặc định bằng 55. Những phép kiểm tra độ nhạy được tiến hành để xác định các giá trị phù hợp của C và c_f phục vụ thiết lập mô hình.

Mô hình XBeach bao gồm một mô-đun cơ bản về nước ngầm nhằm mô phỏng sự thấm xuống và trào ngược nước lên mặt bãi biển. Mô-đun này sử dụng nguyên lý dòng chảy Darcy flow và bao gồm tương tác phương đứng giữa

Bảng 2: | Table 2. Results for XBeach calibration of storm events. • Kết quả hiệu chỉnh XBeach cho các cơn bão.

Storm Cơn bão	BSS	Vol. Err. Sai số thể tích
1	0.91	+6%
2	0.52	+9%
3	0.81	-1%
4	0.78	-1%

ter and groundwater. The infiltration and exfiltration to and from the beach is defined by a flow velocity (w) and is positive from surface water to the groundwater. When the ground water level (η_{gw}) is greater than the bed level (z_b), exfiltration takes place and the volume of groundwater joins the surface water within the same numerical time step (Eq. (22)). Infiltration of surface water into the beach takes place when the groundwater level is less than the bed level and is determined using the Darcy flow relationship (Eq. (23)).

$$w_{i,j}^n = \left(\frac{[\eta]_{i,j}^{n-1} - [z_b]_{i,j}^{n-1}}{\Delta t} \right) \text{por} \quad (22)$$

$$w = -k_z \left(\frac{dp}{dz} + 1 \right) \quad (23)$$

The k values tested were determined using the average grain diameter (0.37 mm), a kinematic viscosity at 20°C and 35 ppt salinity ($\nu = 1.05 \times 10^{-6}$: average conditions at Narrabeen Beach) and a range of porosities suggested for sandy beaches (Soulsby, 1997). All simulations have no geometric variation in k (i.e. $k_x = k_y = k_z$) and the groundwater level remained constant at MSL.

The parameters discussed above were tested systematically in order to determine the most appropriate model setup. The best setup was taken as the one that produced the highest average BSS and lowest average volumetric error across all storm events. Table 2 and Fig. 5 compare measured and simulated post-storm beach profiles for the individual storm events given in Table 1. The results in Table 2 show that the model setup has resulted in BSS ranging from 0.91 ('excellent') to 0.52 ('reasonable/fair'). These give an average BSS and volumetric error of 0.76 ('good') and +3% respectively. The parameters that produce these results are provided in Table 3. A C value of 45 gives a c_f value of 0.005 corresponding to a rippled sandy bed (Soulsby, 1997) and can therefore be considered valid for Narrabeen Beach based on the studies of Short (1984) who shows that the bed across the entire nearshore region at Narrabeen Beach is extensively rippled during median wave conditions.

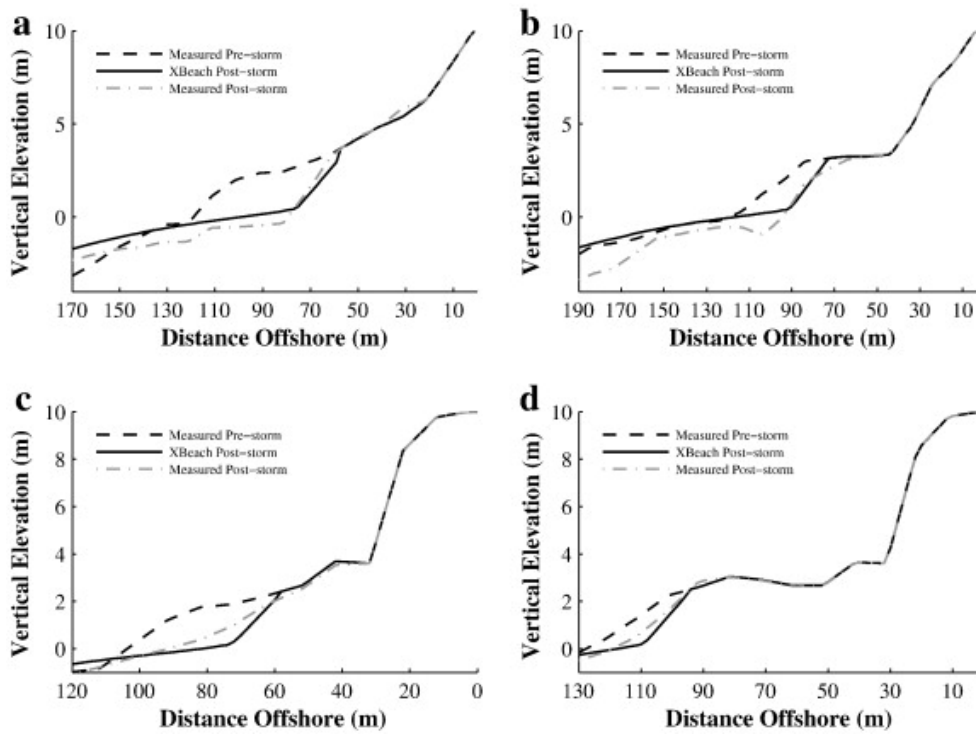
Storm 2 produces the lowest BSS. However, it can be seen from Fig. 5(b) that the measured post-storm profile after storm 2 contains a nearshore bar, which indicates that the profile has not been measured at the end of the storm but during an intermediate state of recovery following the storm event. The post-storm profile in this case was measured 14 days after the end of the storm event allowing sufficient time for this bar to form. If the pro-

nước mặt và nước ngầm. Sự thấm xuống và trào nước lên bãi được định nghĩa bởi một vận tốc dòng chảy (w) và có giá trị dương từ nước mặt xuống nước ngầm. Khi mực nước ngầm (η_{gw}) cao hơn cao trình đáy (z_b), sẽ xuất hiện sự trào nước và thể tích nước ngầm hoà vào nước mặt ngay trong cùng bước thời gian số trị (PT (22)). Sự thấm nước mặt xuống bãi thì xảy ra khi mực nước ngầm thấp hơn cao trình đáy và được xác định qua hệ thức dòng chảy Darcy (PT (23)).

Các giá trị k thử nghiệm được xác định bằng đường kính hạt trung bình (0.37 mm), hệ số nhớt động học ứng với 20°C và độ muối 35 ppt ($\nu = 1.05 \times 10^{-6}$: điều kiện trung bình ở bãi biển Narrabeen) và một khoảng độ rỗng khuyến nghị cho bờ biển cát (Soulsby, 1997). Tất cả mô phỏng đều không có biến đổi hình học về k (tức là $k_x = k_y = k_z$) và mực nước ngầm giữ nguyên tại mực nước biển trung bình.

Các tham số nêu trên được kiểm tra một cách có hệ thống nhằm xác định cách thiết lập mô hình phù hợp nhất. Mô hình được thiết lập tốt nhất khi nó cho ra điểm BSS bình quân cao nhất và sai số thể tích bình quân thấp nhất trong tất cả những trận bão. Bảng 2 và Hình 5 so sánh các mặt cắt bãi sau bão thực đo và mô phỏng cho từng trận bão riêng lẻ liệt kê trong Bảng 1. Kết quả ở Bảng 2 cho thấy rằng mô hình đã thiết lập cho điểm BSS biến đổi từ 0.91 ('xuất sắc') đến 0.52 ('trung bình'). Kết quả cho ta điểm BSS trung bình và sai số thể tích lần lượt là 0.76 ('khá') và +3%. Các tham số cho ra những kết quả này được liệt kê trong Bảng 3. Một giá trị C bằng 45 cho ra giá trị c_f bằng 0.005 tương ứng với một đáy biển gợn cát (Soulsby, 1997) và do vậy có thể coi rằng hợp lý với bãi biển Narrabeen theo những nghiên cứu của Short (1984), người đã cho thấy rằng đáy biển khắp vùng gần bờ của bãi biển Narrabeen đều có gợn cát rộng khắp trong điều kiện sóng trung bình.

Trận bão 2 tạo ra điểm BSS thấp nhất. Tuy nhiên, như thấy được từ Hình 5(b), mặt cắt ngang bãi sau bão có một dải cát gần bờ; điều này thể hiện rằng mặt cắt không được đo đạc cuối trận bão mà đo ở một trạng thái hồi phục trung gian sau bão. Mặt cắt sau bão trong trường hợp này được đo 14 ngày sau khi bão tan, cho phép có đủ thời gian hình thành dải cát này. Nếu việc đo mặt cắt được tiến hành sát gần khi bão tan hơn thì điểm BSS có



Hình 5: | Fig. 5. Comparison of measured and simulated storm profiles for a range of storms at Narrabeen Beach. • So sánh cá mặt cắt bão thực đo và mô phỏng cho một loạt các trận bão tại bãi biển Narrabeen.

Bảng 3: | Table 3. Calibrated parameters for modelling storm induced erosion. • Các tham số được hiệu chỉnh để mô hình hoá xói lở do bão.

Parameter description	Value
Mô tả tham số	Giá trị
Limiting Shields parameter - Tham số Shields giới hạn (θ_{max})	1.0
Chézy coefficient - Hệ số Chézy (C)	45
Coeff. permeability - Hệ số thấm (k)	0.0031 m/s
Wet cell max gradient - Độ dốc lớn nhất của ô ướt ($wetslp$)	0.15

Bảng 4: | Table 4. Details of recovery periods used for XBeach calibration. • Chi tiết các thời đoạn phục hồi cho hiệu chỉnh XBeach.

Recovery	Profile dates	$H_{s,mean}$	D (days)	T_p
Đợt phục hồi	Ngày đo mặt cắt	(m)	(ngày)	(s)
1	25/08/81–23/09/81	1.16	29	9.5
2	25/07/82–16/08/82	1.11	20	9.5

file measurement was taken closer to the end of the storm event the BSS may be considerably higher as the beach would be exhibiting a dissipative state with a wide planar surf zone as in storm 1. Although it is shown in Table 1 that the post-storm profile for storm 3 was measured 26 days after the event, as the profile is curtailed at approximately MSL (+0.02 m AHD) there is no evidence of nearshore morphology meaning the BSS is higher. Given that the average BSS for all storms is 0.76, which results in a ‘good’ BSS rating and an excellent average volumetric error of +3%, it can be concluded that the XBeach model has been effectively calibrated for modelling storm erosion at Narrabeen Beach.

5.2 Post-storm recovery modelling | Mô hình hóa phục hồi sau bão

As with the storm erosion calibration, it is essential to identify extended calm periods between two consecutive profile measurements, where no storm events had occurred, for calibration of the model for beach recovery. This led to two periods being selected from the measured data (Table 4). In Callaghan et al. (2008) a recovery time of 400 h is set to determine full recovery. This translates to approximately 17 days and is slightly higher than the average actual spacing between events (16 days) determined from the measured data. The fact that the periods chosen for calibration have durations (29 and 20 days) greater than the average spacing and the full recovery threshold of Callaghan et al. (2008), the transformation towards a reflective beach state is expected.

Simultaneous analysis of the wave climate during the calm periods between storms shows that they satisfy the calm wave criteria with all measured wave heights being below the 3.0 m threshold. Details of the wave conditions during the recovery periods (average H_s and T_s), are provided in Table 4. Similar to storm erosion modelling, all beach recovery simulations were forced using the JONSWAP spectra that represent the measured wave conditions during the periods.

The sediment transport rate (q_t) in XBeach (Eq. (24)) is determined using a representative velocity (u_{reps}); the sum of the current flow velocity (u^E) and an advection velocity (u^a) from wave skewness and asymmetry (Eqs. (25) and (26)). A strong asymmetric wave motion leads to an increase in shear stress imparted on the bed (Walstra et al., 2007). This leads to greater sediment mobilisation, favouring onshore sediment flux. In addition, high crest velocities in the onshore direction, attributed to skewed waves in the shoaling zone, mobilise and transport more sediment than the wave troughs (directed offshore) further increasing net onshore transport of sediment (Grasso et al., 2011).

thể cao hơn hẳn vì bãi biển sẽ thể hiện trạng thái tiêu tán năng lượng với một vùng sóng vỡ rộng và phẳng như với trận bão 1. Dù đã cho thấy trong Bảng 1 rằng mặt cắt sau trận bão 3 được đo đạc 26 ngày sau bão, mặt cắt lại bị cắt đi từ vị trí xấp xỉ MNTB (+0.02 m AHD) nên không có chứng cứ về hình thái vùng gần bờ ngụ ý rằng điểm BSS cao hơn. Với BSS trung bình của tất cả các trận bão là 0.76, tương ứng với đánh giá BSS ‘tốt’ và sai số thể tích trung bình ở mức xuất sắc là +3%, có thể kết luận rằng mô hình XBeach đã được hiệu chỉnh một cách hiệu quả để mô hình hoá xói lở do bão tại bãi biển Narrabeen.

Giống như hiệu chỉnh xói lở trong bão, cần thiết phải nhận diện những thời kì lặng sóng kéo dài giữa giữa hai lần đo mặt cắt ngang kế tiếp, khi không xảy ra trận bão nào, để hiệu chỉnh mô hình phục hồi bãi. Điều này dẫn đến hai thời kì được lựa chọn từ số liệu thực đo (Bảng 4). Theo Callaghan & nnk. (2008), một thời đoạn phục hồi dài 400 giờ được thiết lập để xác định phục hồi hoàn toàn. Như vậy quy đổi ra khoảng ngày và hơi dài hơn khoảng thời gian thực tế trung bình giữa những trận bão (16 ngày) xác định từ số liệu thực đo. Với thực tế rằng các thời đoạn được chọn để hiệu chỉnh (29 và 20 ngày) đều dài hơn khoảng cách trung bình và ngưỡng phục hồi hoàn toàn theo Callaghan & nnk. (2008), ta dự kiến có sự biến đổi về xu thế trạng thái bãi biển phản xạ.

Việc phân tích đồng thời chế độ sóng trong thời kì lặng giữa các trận bão cho thấy rằng thời đoạn này thỏa mãn tiêu chí lặng sóng với tất cả sóng thực đo đều thấp hơn ngưỡng 3.0 m. Những chi tiết của điều kiện sóng trong các thời kì phục hồi (trung bình H_s và T_s), được cho trong Bảng 4. Giống những mô hình hóa xói lở trong bão, tất cả những mô phỏng hồi phục bãi đều được tác động bởi phổ sóng JONSWAP vốn biểu thị điều kiện sóng đo đạc trong những thời kì này.

Suất vận chuyển bùn cát (q_t) trong XBeach (PT (24)) được xác định bằng một vận tốc đại diện (u_{reps}); tổng của vận tốc dòng chảy (u^E) và một vận tốc chuyển tải (u^a) do độ lệch và bất đối xứng của sóng (các PT (25) và (26)). Một chuyển động sóng bất đối xứng mạnh mẽ dẫn đến sự tăng ứng suất tiếp tác dụng lên đáy (Walstra & nnk., 2007). Điều này dẫn đến sự cơ động lớn hơn của bùn cát, ưu ái cho dòng bùn cát hướng về bờ. Ngoài ra, những vận tốc lớn ở đỉnh sóng hướng về bờ, do những cơn sóng lệch trong vùng nướng nông, sẽ làm cơ động và vận chuyển nhiều bùn cát hơn là chân sóng (hướng ra khơi), làm tăng thêm lượng vận chuyển bùn cát tịnh về phía bờ (Grasso & nnk., 2011).

$$q_t = C_s u_{reps} - D_h h \frac{\partial c}{\partial x} - 1.6 C_s v_{magnu} \frac{dz}{dx} \quad (24)$$

Bảng 5: | Table 5. Tidal variations for Sydney region. • Mức độ biến đổi thủy triều tại Sydney.

Tide	Low level (m)	High level (m)
Triều	Mức nước thấp	Mức nước cao
Trung bình	0.484	0.524
Triều cường	0.607	0.647
Cao	0.856	0.995

where C_s is the sediment concentration, u_{reps} is the Eulerian transport velocity, D_h is the sediment diffusion coefficient, h is the water depth and v_{magu} is the Lagrangian transport velocity

$$u_{reps} = u^E + u^a \quad (25)$$

$$u^a = (facSk \times Sk - facAs \times As)u_{rms} \quad (26)$$

The factors applied to skewness ($facSk$) and asymmetry ($facAs$) determine the magnitude and direction of net sediment transport. The values selected for these factors therefore determine the predominant sediment transport direction. The permeability of the beach also plays a significant role in berm formation during the accretion phase (Jensen et al., 2009). For this reason, the groundwater flow module was activated for all post-storm recovery simulations with the permeability of the beach taken from the storm erosion tests (0.0031 m/s).

In order to calibrate XBeach for post-storm recovery conditions at Narrabeen Beach, a set of sensitivity tests on $facAs$ and $facSk$ was carried out to determine suitable values.

To accurately replicate the upper beach berm formation during the recovery conditions it is important to consider the tidal variation at Narrabeen Beach. The tidal variation controls the maximum level of wave run up and thus the maximum level to which sediment can be transported onshore. Manly Hydraulics Laboratory (MHL) provided data of tidal variation for the Sydney region. These were averaged over 19 years (1990 to 2010) and are provided in Table 5. The sensitivity testing was carried out using simplified semidiurnal mean, spring and high tidal cycles. The high tidal cycle corresponds to a variation between High Spring Water Solstice and Indian Low Water Springs.

Unlike in storm conditions, it is less likely that sheet flow conditions will occur due to the smaller incident wave heights. For this reason the θ_{max} criterion was not implemented in the recovery simulations.

To make the recovery simulations, and the overall SPA methodology computationally feasible a morphological acceleration factor ($morfac$) (Ranasinghe et al., 2011b; Roelvink & Splinter et al., 2011; Vousdoukas et al., 2012) of ten was used for all recovery simulations.

The sensitivity testing was carried out systematically with the model setup producing the highest BSS without tidal variation and then, with tidal variation determined. As earlier, BSS and volumetric errors between measured and simulated profiles were used to assess model performance. Table 6 shows results from the sensitivity tests and Table 7 provides the parameter setup. Fig. 6 com-

trong đó C_s là hàm lượng bùn cát, u_{reps} là vận tốc vận chuyển Euler, D_h là hệ số khuếch tán bùn cát, h là độ sâu nước còn v_{magu} là vận tốc vận chuyển Lagrăng

Những hệ số áp dụng cho độ lệch ($facSk$) và bất đối xứng ($facAs$) sẽ xác định độ lớn và hướng của vận chuyển bùn cát tịnh. Những giá trị chọn cho các nhân tố trên sẽ quyết định hướng vận chuyển cát thịnh hành. Độ thấm của bãi biển cũng đóng vai trò quan trọng để hình thành thềm bãi trong quá trình bồi tụ (Jensen & nnk., 2009). Do vậy, mô-đun dòng chảy ngầm được kích hoạt ở mọi mô phỏng phục hồi sau bão với độ thấm bãi biển được lấy từ các thí nghiệm xói lở bão (0.0031 m/s).

Để hiệu chỉnh XBeach cho các điều kiện phục hồi sau bão tại bãi Narrabeen, một tập hợp các kiểm nghiệm về độ nhạy của $facAs$ và $facSk$ được tiến hành để xác định những giá trị phù hợp.

Để tái hiện chính xác sự thành tạo thềm bãi trên trong điều kiện phục hồi, điều quan trọng là phải xét đến sự biến đổi mực nước triều tại bãi biển Narrabeen. Sự biến thiên mực nước triều quy định chiều cao sóng leo cực đại và do đó quy định cao trình tối đa mà trầm tích có thể được vận chuyển về phía bờ. Phòng thí nghiệm thủy lực Manly (MHL) đã cung cấp số liệu biến đổi thủy triều cho vùng Sydney. Số liệu này được trung bình hóa qua 19 năm (từ 1990 đến 2010) và được cung cấp trong Bảng 5. Phép thử độ nhạy cũng được tiến hành có dùng đến các chu kỳ triều bán nhật được giản hóa, kì triều cường và nước cao. Kì triều nước cao thì tương ứng với sự biến đổi giữa đỉnh nước cao triều cường và nước thấp triều cường.

Khác với điều kiện bão, sẽ ít khả năng là dòng rửa trôi sẽ xảy ra do sóng tới thấp hơn. Vì vậy tiêu chí θ_{max} không được áp dụng trong những mô phỏng phục hồi.

Để làm các mô phỏng phục hồi, và để phương pháp SPA chung khả dĩ về tính toán, giá trị hệ số thúc đẩy hình thái ($morfac$) (Ranasinghe & nnk., 2011b; Roelvink, 2006; Splinter & nnk., 2011; Vousdoukas & nnk., 2012) bằng 10 được dùng cho mọi mô phỏng phục hồi.

Khâu kiểm tra độ nhạy được tiến hành một cách có hệ thống với cách thiết lập mô hình cho ra điểm BSS cao nhất mà không có biến đổi thủy triều, và tiếp theo là với thủy triều biến đổi được xác định. Cũng như trước đây, điểm BSS và sai số thể tích giữa các mặt cắt thực đo và tính toán được dùng để đánh giá hiệu năng của mô hình. Bảng 6 cho thấy kết quả từ việc kiểm tra độ nhạy còn Bảng 7 liệt kê các thiết lập thông số. Hình 6 so sánh các

Bảng 6: | Table 6. Results for XBeach calibration of recovery periods. • Kết quả hiệu chỉnh XBeach cho các thời đoạn phục hồi.

Recovery Lần phục hồi	Tide Triều	BSS	Vol. Err. Sai số thể tích
1	Trung bình	0.84	-2%
1	Triều cường	0.86	-2%
1	Cao	0.89	-2%
2	Trung bình	0.63	-6%
2	Triều cường	0.65	-6%
2	Cao	0.61	-6%

Bảng 7: | Table 7. Calibrated parameters for modelling post-storm recovery for individual events and over the annual period. • Các tham số được hiệu chỉnh để mô hình hóa phục hồi sau bão cho từng trận và cho thời đoạn năm.

Parameter description Mô tả tham số	Event value G.trị theo trận	Annual value G.trị năm
Limiting Shields parameter Tham số Shields giới hạn (θ_{max})	—	—
Factor on skewness Hệ số lệch ($facSk$)	0.1	0.1
Factor on asymmetry Hệ số bất đối xứng ($facAs$)	1.0	0.8
Coeff. permeability Hệ số thấm (k)	0.0031 m/s	0.0031 m/s
Tidal variation Biến đổi triều	Yes Có	Yes Có
Accel. factor Hệ số thúc đẩy ($morfac$)	10	10

pares measured recovery profiles with simulated profiles, for both recovery periods. From these results it can be seen that there is little difference in the average BSS volumetric errors for each tidal range. All tidal variations give ‘good’ average BSS (0.74, 0.76 and 0.75) and volumetric errors (4%).

The results provided in Table 6 are very encouraging and show that, by accounting for the processes that govern accretion, XBeach can be calibrated to produce ‘good’ predictions of post-storm beach accretion.

mặt cắt phục hồi đo được với các mặt cắt mô phỏng, cho cả hai thời đoạn phục hồi. Từ kết quả này, có thể thấy rằng rất ít khác biệt về điểm BSS giữa các độ lớn triều khác nhau. Tất cả biến đổi thủy triều đều cho điểm BSS trung bình loại ‘khá’ (0.74, 0.76 và 0.75) cùng sai số thể tích (4%).

Kết quả cho trên Bảng 6 rất ấn tượng và cho thấy rằng, bằng cách tính đến những quá trình chi phối bồi tụ, XBeach có thể được hiệu chỉnh để tạo nên kết quả dự đoán ‘chuẩn’ về hiện tượng bồi tụ bãi sau bão.

5.3 Simulation of annual beach change | Mô phỏng biến đổi bãi hằng năm

In order to assess the validity of combining the XBeach storm erosion and post-storm recovery model setups, beach profile change that occurred from 25/08/81 and 16/08/82 (ca. one year) at Narrabeen Beach was simulated and compared with measured data (Fig. 7). Between the first and last profile measurements during this period, 19 storm events were recorded. All beach recovery simulations were implemented using a spring tidal variation.

To assess the accuracy of the procedure in predicting the annual time series, the relative mean absolute errors (RMAE) in the subaerial beach volume, the position of the 0 m and 2 m beach contours and the profile envelopes were determined. The position of the beach contours is referenced seaward from the top of the dune (+ 10 m AHD). The RMAE calculations were carried out in line with van Rijn et al. (2003) and changed into percentages for analysis (Eq. (27)). The results are given in Table 7, Figs. 8(a), 9(a) and 10(a).

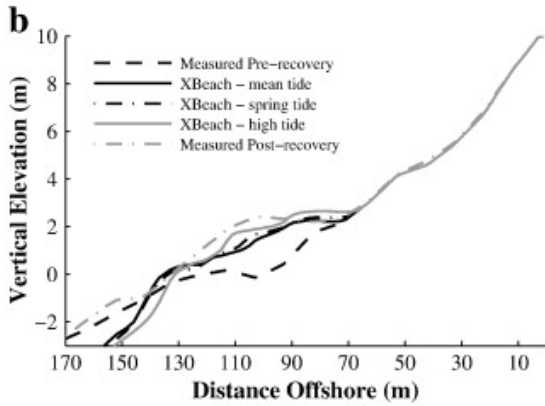
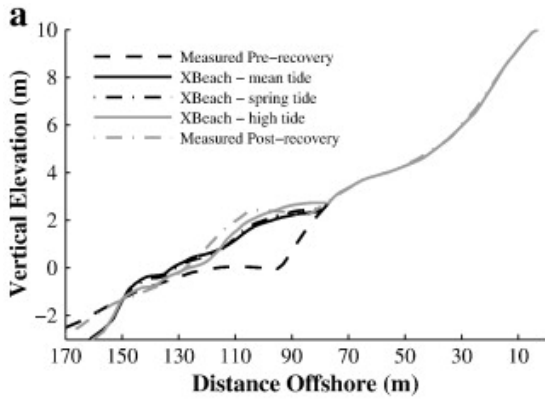
Để đánh giá độ hợp lệ của việc kết hợp thiết lập mô hình tính xói lở trong bão và phục hồi sau bão bằng XBeach, tác giả mô phỏng biến đổi mặt cắt bãi từ 25/08/81 đến 16/08/82 (tức 1 năm) cho bãi biển Narrabeen rồi so sánh với số liệu đo đạc (Hình 7). Trong giai đoạn này giữa hai mặt cắt đầu tiên và cuối cùng đo được, có 19 cơn bão được ghi nhận. Tất cả mô phỏng phục hồi bãi đều được thực hiện với mực nước triều cường.

Để đánh giá độ chính xác của quy trình tính dự đoán chuỗi thời gian 1 năm, các sai số tuyệt đối trung bình tỉ đối (RMAE) về thể tích bãi dưới nước, các vị trí của đường đồng mức 0 m và 2 m, cũng như các đường bao mặt cắt được xác định. Vị trí của đường đồng mức bãi được tham chiếu từ đỉnh cồn cát (+ 10 m AHD) hướng ra biển. Phép tính sai số RMAE được tính theo van Rijn et al. (2003) và quy đổi về phần trăm để phân tích (PT (27)). Kết quả được cho trên Bảng 7, các Hình 8(a), 9(a) và 10(a).

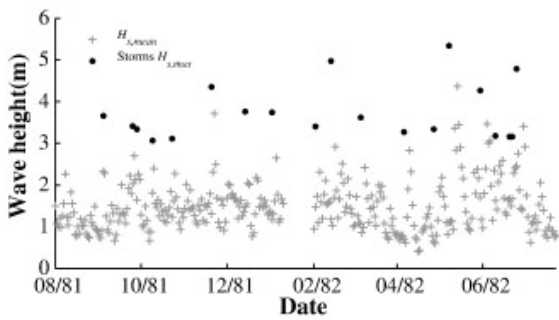
$$RMAE = \frac{\langle |x_p - x_m| \rangle}{\langle x_m \rangle} \times 100\% \quad (27)$$

These results show that the combined model repro-

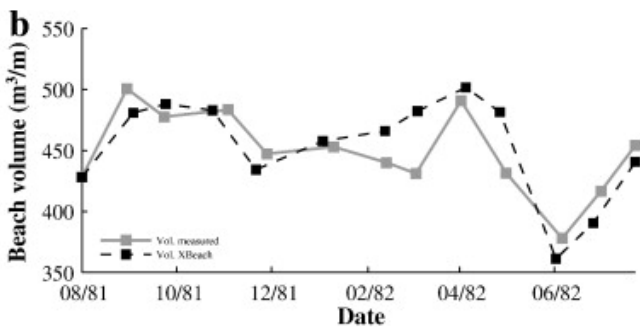
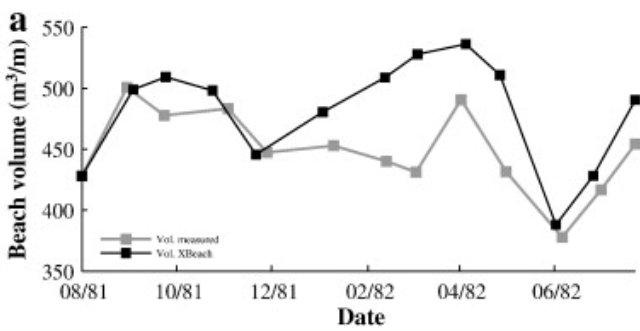
Các kết quả này cho thấy mô hình kết hợp đã tái hiện



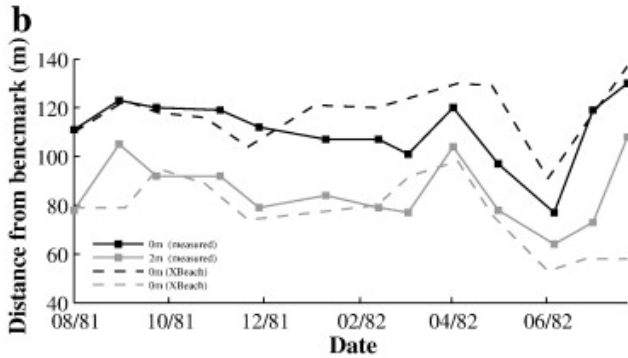
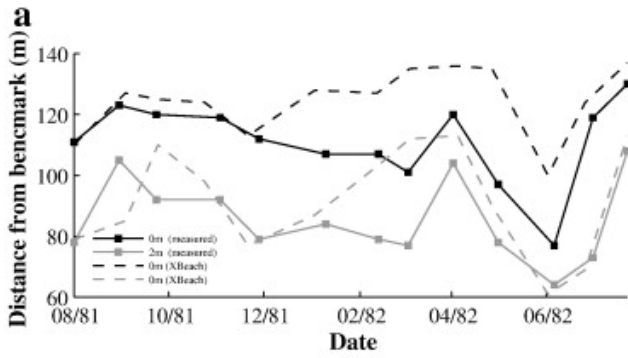
Hình 6: | Fig. 6. Comparison of measured and simulated beach profiles of post-storm recovery. • So sánh các mặt cắt bãi biển mô phỏng và đo đạc cho giai đoạn hồi phục sau bão.



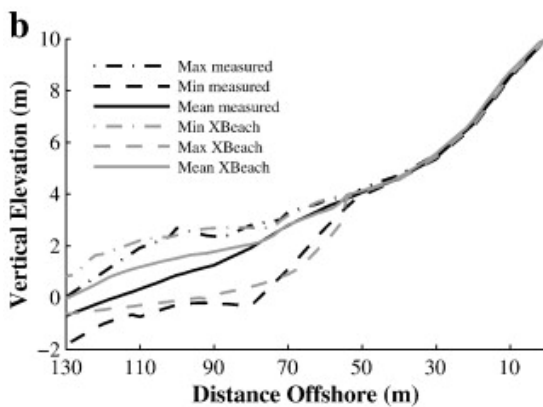
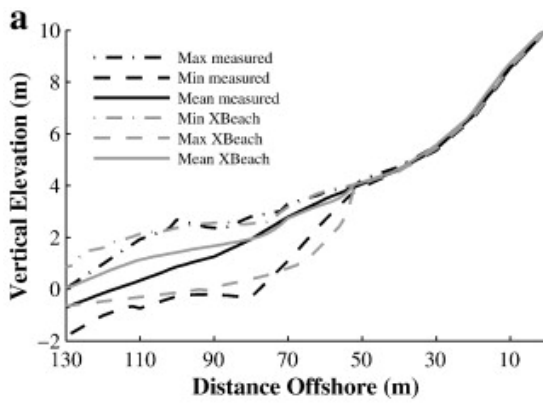
Hình 7: | Fig. 7. Wave measurements and storm events from 25/08/81 to 16/08/82. • Số liệu đo sóng và những trận bão từ 25/08/81 đến 16/08/82.



Hình 8: | Fig. 8. Comparison of simulated and measured beach volumes from 25/08/81 to 16/08/82. Individual event calibration (a) and annual series calibration (b). • So sánh các thể tích bãi mô phỏng và đo đạc từ 25/08/81 đến 16/08/82. Hiệu chỉnh từng trận bão (a) và hiệu chỉnh chuỗi thời gian năm (b).



Hình 9: | Fig. 9. Comparison of simulated and measured contour positions from 25/08/81 to 16/08/82. Individual event calibration (a) and annual series calibration (b). • So sánh các vị trí đường đồng mức mô phỏng và đo đạc từ 25/08/81 đến 16/08/82. Hiệu chỉnh từng trận bão (a) và hiệu chỉnh chuỗi thời gian năm (b).



Hình 10: | Fig. 10. Comparison of beach profile envelopes from 25/08/81 to 16/08/82. Individual event calibration (a) and annual series calibrations (b). • So sánh các đường bao mặt cắt bãi mô phỏng và đo đạc từ 25/08/81 đến 16/08/82. Hiệu chỉnh từng trận bão (a) và hiệu chỉnh chuỗi thời gian năm (b).

duces the volumetric beach change and position of the 0 m and 2 m contours with RMAE of 7%, 13% and 13% respectively. The maximum, minimum and mean profile errors are 5%, 11% and 9% respectively.

The difference between simulated and measured annual profile change may be partly attributed to the simplified approach of using a predefined storm threshold and switching between erosion and accretion mechanisms according to this threshold. This does not allow for the bar dynamics and intermediate beach states, associated with the gradual recovery of the beach, to be captured. This may potentially imply the overestimation of beach volume and the position of the 0 m and 2 m contours evident in Figs. 8(a) and 9(a). However, as the aim of this paper is to demonstrate the first attempt of using a process model for medium term beach change, we adopted this simple approach.

Although a reasonable degree of success is achieved from combining model setups separately calibrated for individual erosion and recovery events, an additional recovery model setup was calibrated using the entire annual time series, to provide a comparison. This procedure will allow for a better representation of the predominant beach state, rather than focusing on a reflective state during the calm periods between storm events.

Calibration was conducted on the same parameters (*facSk* and *facAs*) to determine which combination produced the best representation of the overall annual variability. The results are provided alongside the individual event calibrations in Table 7, Figs. 8(b), 9(b) and 10(b).

These results show that, when calibrating the recovery model over an annual time period, the RMAE of the volumetric change and position of the 0 m and 2 m contours reduced to 4%, 9% and 13% respectively. Additionally, the maximum, minimum and mean profile errors change to 4%, 13% and 5% respectively. It is evident, that although the majority of the RMAEs reduce, there is an increase in the error associated with the minimum profile envelope. This increase is due to a greater level of recession now occurring. This highlights the concern raised previously that not including the reflective state in the recovery simulations will limit the accretion and result in continual recession during longer simulations.

5.4 Medium term erosion modelling | Mô hình hóa xói lở trung hạn

The verification of XBeach for single event and annual timescales justifies its use within the longer term SPA methodology. To demonstrate the SPA, beach variability from a random 10 year synthetic storm climate, derived from the FTS, was simulated and the results compared with measured data. The initial beach profile for model simulation was taken as the average profile determined from the beach profile surveys.

As Narrabeen Beach is subjected to a multidirectional wave climate, the inclusion of wave direction within a longer term simulation is important. Callaghan et al. (2008) showed that there is no correlation between $H_{s,max}$ and wave direction (θ), meaning that θ can be assigned to the synthetic storms from empirical data. Therefore, to provide a more complete realisation of the Narrabeen storm

được sự thay đổi thể tích bãi biển và vị trí các đường đồng mức 0 m and 2 m với RMAE lần lượt bằng 7%, 13% and 13%. Các sai số mặt cắt cực đại, cực tiểu và trung bình lần lượt là 5%, 11% and 9%.

Sự khác biệt giữa thay đổi mặt cắt bãi mô phỏng và đo đạc hàng năm có thể một phần phụ thuộc vào cách tiếp cận giản hoá là dùng một ngưỡng bão định trước và luân chuyển giữa các cơ chế xói lở và bồi tụ căn cứ theo ngưỡng này. Như vậy không cho phép nắm bắt được động lực dài cát ngầm và các trạng thái bãi biển trung gian, gắn với sự hồi phục dần của bãi biển. Đồng thời, cũng ngụ ý dự tính thiên lớn thể tích bãi biển và vị trí các đường đồng mức 0 m và 2 m thấy rõ trên các Hình 8(a) và 9(a). Tuy vậy, do mục tiêu của bài báo là minh hoạ cố gắng bước đầu về sử dụng một mô hình quá trình cho biến đổi bãi biển trung hạn nên ta chấp nhận cách tiếp cận đơn giản này.

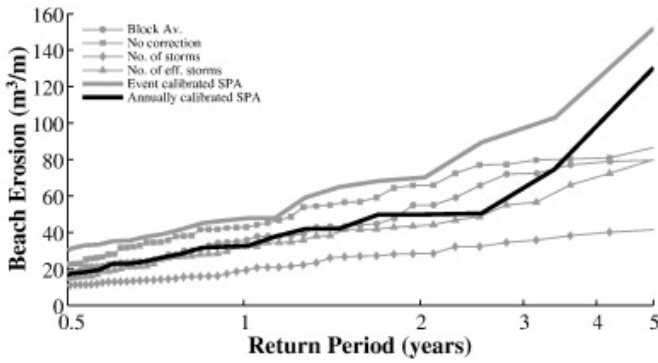
Dù đã đạt được thành công ở mức độ nhất định với việc mô hình kết hợp đã thiết lập được hiệu chỉnh riêng rẽ cho các sự kiện xói và phục hồi, nhưng một thiết lập mô hình bổ sung khác đã được hiệu chỉnh cho toàn bộ chuỗi thời gian năm, để phục vụ so sánh. Quy trình này sẽ cho phép thể hiện rõ hơn trạng thái bãi biển chính, thay vì tập trung vào một trạng thái phản xạ trong những kì biển lạng giữa các trận bão.

Việc hiệu chỉnh được tiến hành với cùng các tham số (*facSk* và *facAs*) nhằm xác định tổ hợp nào cho ra biểu diễn tốt nhất của biến động năm tổng thể. Các kết quả được trình bày bên cạnh những hiệu chỉnh sự kiện riêng rẽ trên Bảng 7, các Hình 8(b), 9(b) và 10(b).

Các kết quả cho thấy rằng, khi hiệu chỉnh mô hình phục hồi với thời đoạn năm, RMAE của biến đổi thể tích cùng vị trí các đường đồng mức 0 m và 2 m giảm đi lần lượt 4%, 9% và 13%. Thêm nữa, các sai số mặt cắt lớn nhất, nhỏ nhất và trung bình lần lượt thay đổi 4%, 13% và 5%. rõ ràng, dù đa số các RMAE đều giảm, nhưng có sự tăng sai số gắn với đường bại mặt cắt tối thiểu. Sự tăng này là do mức độ thoái lui lớn hơn đang xảy ra. Từ đó nhấn mạnh điều quan tâm nêu trên: việc không bao gồm trạng thái phản xạ trong những mô phỏng phục hồi bãi sẽ làm giới hạn sự bồi tụ và dẫn đến sự thoái lui liên tục trong những phỏng dài hơn.

Việc kiểm định XBeach cho các quy mô thời gian sự kiện và năm đã minh chứng công dụng của nó trong phương pháp SPA cho thời kì dài hơn. Để minh hoạ cho SPA, tác giả đã mô phỏng mức độ biến động bãi cho 10 năm chế độ sóng bão tổng hợp (rút ra từ FTS) và kết quả so sánh với số liệu thực đo. Mặt cắt bãi ban đầu để mô phỏng được lấy là mặt cắt trung bình xác định từ các đợt khảo sát mặt cắt.

Vì bãi biển Narrabeen chịu chế độ sóng đa hướng, việc bao gồm hướng sóng trong mô phỏng dài hạn là rất quan trọng. Callaghan & nnk. (2008) đã cho thấy rằng không có mối tương quan nào giữa $H_{s,max}$ và hướng sóng (θ), nghĩa là θ có thể được ấn định cho các trận bão tổng hợp từ số liệu thực nghiệm. Bởi vậy, để cung cấp một bức tranh hoàn thiện hơn cho chế độ bão Narrabeen, mỗi trận bão



Hình 11: | Fig. 11. Measured and SPA simulated subaerial beach erosion return levels. • Xói lở bãi biển phần dưới nước, đo đạc và tính toán, ứng với những chu kỳ lặp lại.

climate, each random event was assigned an empirical direction from storm events recorded between 1992 and 2009 by Manly Hydraulics Laboratory.

From the rule of thumb approach of Hawkes (2000), a 10 year simulation should produce an accurate 1 year erosion return level. In an attempt to quantify this, the erosion return levels from the SPA were determined and compared to those from the measured data. The erosion return levels from the measured profile data were determined using the four methods described by Callaghan et al. (2008), i.e. (a) Block averaging procedure; (b) Consecutive volumes with no correction; (c) Consecutive volumes corrected for the number of storms; and (d) Consecutive volumes corrected for the number of effective storms. In line with the studies of Hoffman and Hibbert (1987); Callaghan et al. (2008) and Ranasinghe et al. (2011a), beach erosion volume above 2 m contour is used for comparison.

Fig. 11 compares return levels of measured and SPA simulated beach erosion. It should be noted that the divergence of the simulated erosion after the 1–2 year return period is a result of only 10 years of simulations being used to determine the return levels.

From Fig. 11 it is clear that, when using the event calibrated recovery model, beach erosion is consistently overestimated. The annually calibrated recovery model gives better results due to its ability to develop an intertidal berm. Harley et al. (2009) showed that the erosive impact of storm events at Narrabeen Beach partially depends on the state of the beach during the precedent calm period. When a reflective state occurs prior to storm events, erosion was shown to be greater as there is a larger volume of sediment available for erosion from the beach; and there is no nearshore bar system to dissipate incoming wave energy. Calibrating the recovery model over an annual time series results in less accretion during calm periods and therefore provides less erodible sediment for the subsequent storm event, explaining the reduction in erosion volumes evident in Fig. 11.

Even though the annually calibrated model gives better results, the model is still unable to reproduce the full range of states, due to the simple mechanism used in the approach to switch between erosive to accretive conditions. Recently, this issue was tackled by Davidson et al. (2013) who employ a disequilibrium technique to define periods of erosion and accretion. The basis of this approach uses a time varying dimensionless fall velocity (Gourlay, 1968; Wright et al., 1985) to distinguish between erosion and

ngẫu nhiên được gán cho một hướng thực nghiệm từ các trận bão thực đo từ 1992 đến 2009 bởi Phòng thủy lực Manly.

Từ phương pháp quy tắc sơ bộ của Hawkes (2000), một mô phỏng 10 năm sẽ tạo ra mức xói lở lặp lại 1 năm. Để cố gắng lượng hoá điều này, các mức lặp lại xói lở từ SPA được xác định và so sánh với số liệu thực đo tương ứng. Các mức xói lở lặp lại từ mặt cắt bãi biển thực đo được xác định theo bốn phương pháp mô tả bởi Callaghan & nnk. (2008): (a) quy trình bình quân hoá theo khối; (b) các thể tích liên tiếp không cần điều chỉnh; (c) các thể tích liên tiếp điều chỉnh bởi số trận bão; và (d) các thể tích liên tiếp điều chỉnh bởi số trận bão hiệu quả. Theo hướng nghiên cứu của Hoffman và Hibbert (1987); Callaghan & nnk. (2008) và Ranasinghe & nnk. (2011a), thể tích xói lở bãi phía trên đường đồng mức 2 m được dùng để so sánh.

Hình 11 so sánh các chu kỳ lặp lại giữa bãi biển xói lở thực đo và mô phỏng theo SPA. Lưu ý rằng sự phân kỳ của sự xói lở mô phỏng sau chu kỳ lặp lại 1–2 năm là kết quả của chỉ 10 năm mô phỏng được dùng để xác định các mực nước lặp lại.

Từ Hình 11, có thể thấy rõ rằng, khi dùng mô hình phục hồi đã hiệu chỉnh theo sự kiện thì xói lở bãi luôn thiên lớn. Mô hình phục hồi được hiệu chỉnh hằng năm cho kết quả tốt hơn do khả năng của nó trong việc phát triển một thềm bãi liên triều. Harley & nnk. (2009) cho thấy rằng tác động xói của những cơn bão tại bãi biển Narrabeen một phần phụ thuộc vào trạng thái bãi biển trong thời kỳ lặng sóng trước đây. Khi một trạng thái phản xạ xảy ra trước các trận bão, xói lở tỏ ra mạnh hơn vì có thể tích cát trên bãi lớn hơn để xói đi; và không có hệ thống dải các gờ bờ để làm tiêu tán năng lượng sóng tới. Việc hiệu chỉnh mô hình phục hồi theo chuỗi thời gian một năm dẫn đến kết quả ít bồi tụ trong thời kỳ sóng lặng và do đó cũng ít bùn cát có thể bị xói trong trận bão kế tiếp; điều này giải thích sự giảm sút thể tích xói lở thể hiện trên Hình 11.

Mặc dù mô hình đã kiểm định hằng năm cho kết quả tốt hơn, nhưng mô hình vẫn chưa thể tái hiện được toàn bộ miền các trạng thái, do cơ chế đơn giản sử dụng trong cách tiếp cận để chuyển giữa những điều kiện xói và bồi. Gần đây, vấn đề này được giải quyết bởi Davidson & nnk. (2013); nhóm đã dùng một kĩ thuật phá vỡ cân bằng để xác định các thời kỳ xói lở và bồi tụ. Nền tảng của cách làm này sử dụng một vận tốc lắng chìm phi thứ nguyên thay đổi theo thời gian (Gourlay, 1968; Wright & nnk., 1985) để phân tách xói lở và bồi tụ tùy thuộc vào tương

accretion depending on its relationship to the equilibrium state. Inclusion of this within their simplified model yielded a good estimation of the variability in the shoreline position at Narrabeen Beach over a six year period.

6 Conclusions and recommendatinos | Kết luận và khuyến nghị

This paper has presented the first attempt at establishing a methodology to allow the simulation of medium term beach change using a fully process based model.

The methodology presented here expands on those of Callaghan et al. (2008) and Ranasinghe et al. (2011a) by replacing the empirical structural functions, used by them, with a fully process based model. The SPA allows for the determination of antecedent beach profiles providing a more detailed continuous simulation of beach variability.

The calibration and validation of the coastal morphodynamic model XBeach at Narrabeen Beach presented here, show the ability of the model to simulate beach recovery under calm conditions as well as storm induced beach erosion. Although Jamal et al. (2010) investigated the accretion of gravel beaches using their XBeach variant, their work is limited to a wave timescale only. The recovery simulations discussed in this paper therefore provide the first attempt at modelling sandy beach accretion at a timescale of days to weeks. The success achieved here is, therefore, not only useful in terms of developing the SPA, but also for longer term coastal morphodynamic simulations using process based models.

The combination of calibrated model setups, presented in Section 5, demonstrates the ability of XBeach to reproduce the behaviour of Narrabeen Beach at an annual time scale, with a reasonable degree of accuracy. However, the simplified storm threshold approach used to switch between storm erosion and post-storm recovery restricts the development of the intermediate state found at Narrabeen Beach. Better results were achieved by the calibration of the recovery model over the annual storm data rather than individual periods.

The use of the SPA methodology with the annually calibrated recovery model, to simulate a 10 year storm climate, was shown to produce erosion volume estimations comparable to those measured at Narrabeen Beach. The event calibrated model consistently overestimated erosion volumes. This highlights the major limitation of the SPA being the inability to simulate the full range of beach states. Even though calibrating the recovery model over an annual time series partially overcomes this limitation, this approach is still unable to reproduce the full range of beach states and rather, provides a compromise between intermediate and reflective states. The implementation of a more detailed mechanism to account for the gradual transition from erosive to accretive conditions, such as that of Davidson et al. (2013), will allow the development of intermediate beach states and significantly improve the credibility of the approach.

Although the SPA approach presented here is not without limitations, it does provide a valuable first step towards modelling beach change at medium term time scales using process based models. The methodology demonstrates

quan của nó với trạng thái cân bằng. Việc bao gồm yếu tố này trong mô hình đơn giản của họ đã cho một ước tính phù hợp về biến đổi vị trí đường bờ tại bãi biển Narrabeen trong thời đoạn dài 6 năm.

Bài báo này đã trình bày nỗ lực bước đầu nhằm thiết lập một phương pháp luận cho phép mô phỏng biến đổi bãi trung hạn bằng một mô hình hoàn toàn dựa quá trình.

Phương pháp trình bày ở đây đã mở rộng phương pháp của Callaghan & nnk. (2008) và Ranasinghe & nnk. (2011a), bằng cách thay thế các cấu trúc thực nghiệm được dùng trước đó, bởi một mô hình hoàn toàn dựa vào quá trình. Phương pháp SPA cho phép xác định các mặt cắt bãi biển trước đó miễn là thực hiện mô phỏng liên tục chi tiết hơn về biến đổi bãi biển.

Khâu hiệu chỉnh và kiểm định mô hình động lực hình thái bờ biển XBeach cho bãi biển Narrabeen được trình bày cho thấy khả năng của mô hình mô phỏng sự hồi phục của bãi trong điều kiện biển lặng cũng như sự xói lở bãi biển do bão. Dù Jamal & nnk. (2010) đã nghiên cứu sự bồi tụ bãi biển cuội sỏi bằng một phiên bản XBeach riêng, nhưng nghiên cứu của họ chỉ giới hạn trong cỡ thời gian con sóng. Do vậy, các mô phỏng sự hồi phục được thảo luận trong bài báo này đã cho sự nỗ lực bước đầu về mô hình hoá sự bồi tụ bãi biển cát trong cỡ thời gian từ ngày đến tuần. Từ đó, thành công đạt được không chỉ ở việc phát triển SPA, mà còn ở mô phỏng động lực hình thái bờ biển theo thời gian dài hơn bằng các mô hình dựa theo quá trình.

Tổ hợp của các thiết lập mô hình hiệu chỉnh, như trình bày ở Mục 5, đã cho thấy năng lực của XBeach trong việc tái lập ứng xử của bãi biển Narrabeen ở quy mô thời gian hàng năm, với độ chính xác hợp lý. Tuy nhiên, phương pháp ngưỡng bão đơn giản được dùng để chuyển tiếp giữa xói lở trong bão và phục hồi sau bão lại hạn chế sự phát triển của trạng thái trung gian đã được phát hiện ở bãi biển Narrabeen. Những kết quả tốt hơn đạt được bằng cách kiểm định mô hình hồi phục với số liệu bão hàng năm thay vì những thời kì riêng lẻ.

Việc dùng phương pháp SPA với mô hình phục hồi được hiệu chỉnh hàng năm, để mô phỏng chế độ bão 10 năm, đã cho thấy tạo ra kết quả ước tính thể tích xói tương đương với số liệu đo đạc ở bãi biển Narrabeen. Mô hình được kiểm định theo trận bão luôn cho kết quả thể tích xói thiên lớn. Điều này cho thấy rõ hạn chế cơ bản của SPA, đó là không thể mô phỏng toàn bộ loạt trạng thái bãi biển. Mặc dù việc hiệu chỉnh mô hình phục hồi trong thời gian hàng năm đã phần nào khắc phục được hạn chế này, nhưng phương pháp vẫn chưa thể tái lập được đầy đủ loạt trạng thái bãi biển mà mới chỉ có sự thoả hiệp giữa các trạng thái trung gian và phản xạ. Sự thiết lập một cơ chế chi tiết hơn để tính đến sự chuyển tiếp dần từ điều kiện xói sang bồi, như của Davidson & nnk. (2013), sẽ cho phép phát triển các trjạng thái bãi biển trung gian và cải thiện đáng kể độ tin cậy của phương pháp.

Mặc dù phương pháp SPA đề cập ở đây không phải là không có hạn chế, nhưng nó cung cấp một bước đầu rất giá trị để hướng về mô hình hoá biến đổi bãi biển trong cỡ

the flexibility of XBeach for continuous simulations of beach change at annual time scales; and estimations of medium term erosion return levels using the SPA approach.

With some further studies to mitigate the limitations highlighted above, this type of modelling framework may become a very valuable decision making tool in future coastal management projects.

Acknowledgements | Lời cảm tạ

The authors would like to thank the Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) for providing a DTA grant to undertake the PhD research of Doug Pender. Prof. Andrew Short (University of NSW) and Assc. Prof. Rosh Ranasinghe (UNESCO-IHE) are greatly appreciated for providing Narrabeen Beach data. Also, the authors wish to thank Dr. David Callaghan (University of Queensland) and Dr. Claire Miller (University of Glasgow) for their support during the statistical modelling; Dr. Jaap van Thiel de Vries (Deltares), Mr. Bas Hoonhout (Deltares) and Mr. Robert McCall (Plymouth University) for their discussions of the XBeach model; Mr. Mark Kulmar (Manly Hydraulics Laboratory) for discussions about the Narrabeen wave climate; Dr. Mitchell Harley (University of Ferrara) for the use of Fig. 1. Finally, the authors are thankful to the reviewers whose constructive comments helped improve the original manuscript.

thời gian trung hạn bằng những mô hình theo quá trình. Phương pháp này minh họa sự linh hoạt của XBeach để mô phỏng liên tục sự biến động bãi trong cỡ thời gian hàng năm; và ước tính những mức lặp lại xói lở trung hạn bằng phương pháp SPA.

Với một số nghiên cứu sâu hơn để giảm thiểu những hạn chế đề cập trên đây, kiểu khung mô hình hoá này có thể trở thành một công cụ lập quyết định rất giá trị trong các dự án quản lý bờ biển trong tương lai.

Nhóm tác giả muốn cảm ơn Cơ quan Nghiên cứu Khoa học Tự nhiên (EPSRC) đã cấp kinh phí DTA để tiến hành nghiên cứu đề tài tiến sĩ cho Doug Pender. Trân trọng cảm ơn GS Andrew Short (Đại học NSW) và PGS Rosh Ranasinghe (UNESCO-IHE) đã cung cấp số liệu bãi biển Narrabeen. Ngoài ra, nhóm tác giả muốn cảm ơn TS David Callaghan (Đại học Queensland) và TS Claire Miller (Đại học Glasgow) đã trợ giúp khâu mô hình hóa ngẫu nhiên; TS Jaap van Thiel de Vries (Deltares), Ô. Bas Hoonhout (Deltares) và Ô. Robert McCall (Đại học Plymouth) đã thảo luận về mô hình XBeach; Ô. Mark Kulmar (Manly Hydraulics Laboratory) về thảo luận về khí hậu sóng Narrabeen; TS Mitchell Harley (Đại học Ferrara) về quyền sử dụng Hình 1. Sau cùng, nhóm tác giả cảm ơn người phản biện có những góp ý mang tính xây dựng đã giúp chúng tôi hoàn thiện hơn bản thảo gốc.

Tài liệu

- [1] A.R. de Alegria-Arzaburu, J.J. Williams, G. Masselink. Application of XBeach to model storm response on a macrotidal gravel barrier. Proceedings of 32nd International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Shanghai, China (2010)
- [2] A. Bolle, P. Mercelis, D. Roelvink, P. Haerens, K. Trouw. Application and validation of XBeach for three different field sites. Proceedings of 32nd International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Shanghai, China (2010)
- [3] G.E.P. Box, M.E. Muller. A note on the generation of random normal deviates. *Annals of Mathematical Statistics*, 29 (1958), pp. 610-611
- [4] D. Callaghan, P. Nielsen, A. Short, R. Ranasinghe. Statistical simulation of wave climate and extreme beach erosion. *Coastal Engineering*, 55 (2008), pp. 375-390
- [5] S. Coles. *An Introduction to Statistical Modelling of Extreme Values* (1st edition), Springer (2001)
- [6] M.A. Davidson, K.D. Splinter, I.L. Turner. A simple equilibrium model for predicting shoreline change. *Coastal Engineering*, 73 (2013), pp. 191-202
- [7] G. Galappatti, C.B. Vreugdenhil. A depth-integrated model for suspended sediment transport. *Journal of Hydraulic Research*, 23 (1985), pp. 359-377 CrossRefView Record in Scopus
- [8] S. Geman, D. Geman. Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and, Machine Intelligence* (1984), pp. 721-741
- [9] M.R. Gourlay. Beach and dune erosion. Delft Hydraulics Laboratory. Report M935/M936 (1968)
- [10] F. Grasso, H. Michallet, E. Barthélemy. Sediment transport associated with morphological beach changes forced by irregular asymmetric, skewed waves. *Journal of Geophysical Research*, 116 (2011), pp. 1-12
- [11] M.D. Harley, I.L. Turner, A. Short, R. Ranasinghe. An empirical model of beach response to storms — SE Australia. Proceedings of 19th Australasian Conference on Coastal and Ocean Engineering, The Institution of Engineers, Australia, Wellington, New Zealand (2009)
- [12] M.D. Harley, I.L. Turner, A.D. Short, R. Ranasinghe. Interannual variability and controls of the Sydney wave climate. *International Journal of Climatology*, 30 (2010), pp. 1322-1335

- [13] M.D. Harley, I.L. Turner, A.D. Short, R. Ranasinghe. A re-evaluation of coastal embayment rotation: the dominance of cross-shore versus alongshore sediment transport processes, Collaroy-Narrabeen Beach, southeast Australia. *Journal of Geophysical Research*, 116 (2011)
- [14] M.D. Harley, I.L. Turner, A.D. Short, R. Ranasinghe. Assessment and integration of conventional, RTK-GPS and image-derived beach survey methods for daily to decadal coastal monitoring. *Coastal Engineering*, 58 (2011), pp. 194-205
- [15] P.J. Hawkes. The joint probability of waves and water levels: JOIN-SEA: a rigorous but practical new approach. HR Wallingford. Report TR 71 (2000)
- [16] P.J. Hawkes, B.P. Gouldby, J.A. Tawn, M.W. Owen. The joint probability of waves and water levels in coastal engineering design. *Journal of Hydraulic Research*, 40 (2002), pp. 241-251
- [17] J. Hoffman, K. Hibbert. PWD Report N0. 87040, Public Works Department, Coastal Branch, NSW, Sydney Australia (1987)
- [18] M.H. Jamal, D.J. Simmonds, V. Magar, S. Pan. Modelling infiltration on gravel beaches with an XBeach variant. Proceedings of 32nd International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Shanghai, China (2010)
- [19] S.G. Jensen, T. Aagaard, T.E. Baldock, A. Kroon, M. Hughes. Berm formation and dynamics on a gently sloping beach; the effect of water level and swash overtopping. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1546 (2009), pp. 1533-1546
- [20] D.L. Kriebel, R.G. Dean. Convolution method for time-dependent beach-profile response. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119 (1993), pp. 204-226
- [21] M. Kulmar, D. Lord, B. Sanderson. Future directions for wave data collection in New South Wales. Proceedings of Coasts and Ports: Coastal Living — Living Coast; Australasian Conference (2005)
- [22] M. Larson, L. Erikson, H. Hason. An analytical model to predict dune erosion due to wave impact. *Coastal Engineering*, 51 (2004), pp. 675-696
- [23] M. Larson, N. Kraus. SBEACH: numerical model for simulating storm induced beach change. Report 1, Empirical Foundation and Model Development, Tech Rept., Coastal Engineering Research Centre, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS (1989)
- [24] D. Lord, M. Kulmar. The 1974 storms revisited: 25 years experience in ocean wave measurement along the south-east Australian coast. Proceedings 27th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Sydney, Australia (2000), pp. 559-572
- [25] R.T. McCall, Van Thiel, J.S.M. de Vries, N.G. Plant, A.R. Van Dongeren, J.A. Roelvink, D.M. Thompson, A.J.H.M. Reniers. Two-dimensional time dependent hurricane overwash and erosion modeling at Santa Rosa Island. *Coastal Engineering*, 57 (2010), pp. 668-683
- [26] A. Pedrozo-Acuna, D.J. Simmonds, A.K. Otta, A.J. Chadwick. On the cross-shore profile change of gravel beaches. *Coastal Engineering*, 53 (2006), pp. 335-347
- [27] R. Ranasinghe, D. Callaghan, M.J.F. Stive. Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun rule. *Climatic Change*, 110 (2011), pp. 561-574
- [28] R. Ranasinghe, R. McLoughlin, A. Short, G. Symonds. The Southern Oscillation Index, wave climate, and beach rotation. *Marine Geology*, 204 (2004), pp. 273-287
- [29] R. Ranasinghe, C. Swinkels, A. Luijendijk, D. Roelvink, J. Bosboom, M. Stive, D. Walstra. Morphodynamic upscaling with the MORFAC approach: dependencies and sensitivities. *Coastal Engineering*, 58 (2011), pp. 806-811
- [30] A.J.H.M. Reniers, J.A. Roelvink, D.J.R. Walstra. Validation study of UNIBEST-TC model. Report H2130., Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands (1995)
- [31] L.C. van Rijn. Unified view of sediment transport by currents and waves. I: initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133 (2007), pp. 649-667
- [32] L.C. van Rijn. Unified view of sediment transport by currents and waves II: suspended transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133 (2007), pp. 668-689
- [33] L.C. van Rijn, D.J.R. Walstra, B. Grasmeyer, J. Sutherland, S. Pan, J.P. Sierra. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering*, 47 (2003), pp. 295-327
- [34] L.C. van Rijn, K.M. Wijnberg. One-dimensional modelling of individual waves and wave-induced longshore currents in the surf zone. *Coastal Engineering*, 28 (1996), pp. 121-145
- [35] J.A. Roelvink. Coastal morphodynamic evolution techniques. *Coastal Engineering*, 53 (2006), pp. 277-287

- [36] J.A. Roelvink, A. Reniers, A. van Dongeren, J. van Thiel De Vries, J. Lescinski, R. McCall. XBeach Model Description and Manual (Delft, The Netherlands) (2010)
- [37] J.A. Roelvink, A. Reniers, A. van Dongeren, J. van Thiel De Vries, R. McCall, J. Lescinski. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56 (2009), pp. 1133-1152
- [38] A.H. Sallenger. Storm Impact Scale for Barrier Islands. *Journal of Coastal Research*, 16 (2000), pp. 890-895
- [39] A. Short, A. Trembanis. Decadal scale patterns in beach oscillation and rotation Narrabeen beach, Australia: time series, PCA and wavelet analysis. *Journal of Coastal Research*, 20 (2004), pp. 523-532
- [40] A.D. Short. Beaches and nearshore facies: southeast Australia. *Marine Geology*, 60 (1984), pp. 261-282
- [41] A.D. Short. Australian beach systems—nature and distribution. *Journal of Coastal Research*, 221 (2006), pp. 11-27
- [42] A.D. Short, N.L. Trenaman. Wave climate of the Sydney region, an energetic and highly variable ocean wave regime. *Australian Journal of Marine Freshwater Research*, 43 (1992), p. 765
- [43] R.L. Soulsby. *Dynamics of Marine Sands* (1st ed.), Thomas Telford, London (1997)
- [44] K.D. Splinter, R.A. Holman, N.G. Plant. A behavior-oriented dynamic model for sandbar migration and 2DH evolution. *Journal of Geophysical Research*, 116 (2011), pp. 1-21
- [45] J. Sutherland, A.H. Peet, R.L. Soulsby. Evaluating the performance of morphological models. *Coastal Engineering*, 51 (2004), pp. 917-939
- [46] J.S.M. van Thiel de Vries. *Dune Erosion During Storm Surges* (2009)
- [47] M.I. Voudoukas, Ó. Ferreira, L.P. Almeida, A. Pacheco. Toward reliable storm-hazard forecasts: XBeach calibration and its potential application in an operational early-warning system. *Ocean Dynamics*, 62 (2012), pp. 1001-1015
- [48] D.J.R. Walstra, L.C. van Rijn, M. van Ormondt, C. Brière, a.M. Talmon. The effects of bed slope and wave skewness on sediment transport and morphology. *Coastal Sediments*, ASCE, New Orleans, USA (2007)
- [49] J.J. Williams, A.R. de Alegría-Arzaburu, R.T. McCall, A. van Dongeren. Modelling gravel barrier profile response to combined waves and tides using XBeach: laboratory and field results. *Coastal Engineering*, 63 (2012), pp. 62-80
- [50] L.D. Wright, A.D. Short. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56 (1984), pp. 93-118
- [51] L.D. Wright, A.D. Short, M.O. Green. Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: an empirical predictive model. *Marine Geology*, 62 (1985), pp. 339-364

Copyright ©2013 Elsevier B.V.

