

ارزیابی نتایج شبیه‌سازی عددی معادلات یک‌بعدی غیرخطی آب‌های کم‌عمق در مناطق کم‌عمق ساحلی

احمد شانه‌ساززاده^{۱*}، بلال مرادویسی^۲

۱- دکتری مهندسی سواحل، استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اصفهان، استان اصفهان، اصفهان، پست الکترونیکی:
a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران آب، دانشکده تربیت مدرس، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی:
moradvaisi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۲/۵/۲

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۰/۵/۸

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۲، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

چکیده

در این تحقیق میزان دقت نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی انتقال موج ساحلی مبتنی بر معادلات یک‌بعدی غیرخطی آب‌های کم‌عمق (NSW)، در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی مدل MIKE21 BW 1DH، که براساس معادلات یک‌بعدی بوسینسک توسعه یافته، و نیز داده‌های میدانی، مورد ارزیابی و درستی‌سنجی قرار گرفته است. در معادلات بوسینسک از آن‌جایی که فشار در امتداد عمق آب هیدرودینامیکی فرض شده است، شرایط فیزیکی به نحو واقعی‌تری در نظر گرفته می‌شوند. در این تحقیق همچنین حدود تطابق نتایج بررسی شده و در مورد توانایی استفاده از مدل یک‌بعدی غیرخطی در شرایط مختلف امواج و شیب‌های بستر بحث شده است. مقایسه انجام شده با داده‌های میدانی نشان می‌دهد که در تخمین عمق متوسط آب، مدل بوسینسک مزیت ویژه‌ای نسبت به مدل مبتنی بر معادلات یک‌بعدی غیرخطی آب‌های کم‌عمق از خود نشان نمی‌دهد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی عددی، درستی‌سنجی، معادلات یک‌بعدی غیرخطی آب‌های کم‌عمق، معادلات بوسینسک، داده‌های

میدانی، مدل MIKE21 BW 1DH

۱. مقدمه

ساحلی، نیاز به دانش نظری و روش‌های عددی دقیق‌تری دارد (Andrew, 1999). در این ناحیه نظریه خطی موج تا حدود زیادی اعتبار خود را از دست داده و روش‌های بسط استوکس برای مدل‌کردن موج آب کم‌عمق نیز همگرا نشده و لذا کاربرد ندارند.

روش مستقیم تحلیل هیدرودینامیکی مناطق ساحلی نیاز به حل معادلات بقای جرم و تکانه دارد (معادلات ناویر-استوکس

رفتار موج در ناحیهی کم‌عمق ساحلی و بعد از ناحیهی شکست، موضوع مهمی در هیدرودینامیک دریا است. از آن‌جایی که حرکت موج بر روی ساحل شیب‌دار در اغلب موارد منجر به شکست موج و آزاد شدن مقدار زیادی انرژی و تبدیل آن به آشفتگی می‌گردد، لذا مدل‌کردن این ناحیه و بعد از آن تا خط

بوسینسک کماکان مبتنی بر نظریه موج بلند هستند، اما جمله‌ی اضافه‌ای جهت محاسبه‌ی شتاب عمودی به معادلات افزوده شده است که نتایج را بهبود بخشد. با این وجود مقایسه نتایج مدل‌های مبتنی بر امواج بلند و داده‌های میدانی نشان می‌دهد که مدل‌های مبتنی بر نظریه امواج بلند به‌جز در محل شکست موج به‌طور عمومی مشخصات کلی امواج بعد از شکست در منطقه ساحلی را بخوبی تخمین می‌زنند (Shanehsazzadeh and Holmes, 2007) (Raubenheimer et al., 1996).

استفاده از معادلات غیرخطی آب‌های کم‌عمق جهت مطالعه‌ی هیدرودینامیک ناحیه شکست موج تا خط ساحلی در ابتدا توسط Packwood (۱۹۸۰) و Hibberd و Pergrine (۱۹۷۹) انجام شد. آن‌ها معادلات را جهت بررسی حرکت امواج پیش‌رونده (غلطان)^۴ در ناحیه‌ی زوال و پیشروی موج در خشکی^۵ را به‌صورت عددی حل کردند. Kobayashi و همکاران (۱۹۸۷) این معادلات را برای مطالعه‌ی خیزآب^۶ و بازتاب موج از سازه‌ها به‌کار بردند. Dodd (1998) تکنیک حجم محدود^۷ را برای حل این معادلات به‌کار برد. علاوه بر این، مطالعات پیش‌بینی موج به‌وسیله‌ی این معادلات توسط Shiach و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از روش حجم محدود، جهت حل عددی معادلات انجام شده است.

مدل‌های بوسینسک مهم‌ترین رقیب مدل‌های NSW جهت پیش‌بینی جریان در منطقه‌ی شکست تا خط ساحلی هستند. این مدل‌ها نیز مانند مدل‌های NSW براساس نظریه موج بلند مبتنی هستند، با این تفاوت که جمله‌ی اضافه‌ای جهت محاسبه‌ی شتاب عمودی به معادلات افزوده شده است. برای صرف‌نظرکردن از مختصات عمودی، اثر شتاب عمودی بر توزیع فشار یا به‌عبارت دیگر توزیع عمودی سرعت افقی در نظر گرفته می‌شود. ساده‌ترین روش در نظر گرفتن این اثر، فرض توزیع یکنواخت سرعت افقی در تمام عمق آب است. این فرض منجر به توزیع سرعتی می‌شود که به‌صورت خطی از صفر در بستر تا مقداری بیشینه در سطح آزاد، افزایش می‌یابد و این در مقابل فرض ثابت بودن سرعت در عمق، برای معادلات NSW است. در نتیجه‌ی در نظر گرفتن جمله‌ی هیدرودینامیکی فشار در معادلات بوسینسک، این معادلات دقت بیشتری در مدل‌کردن ناحیه‌ی نزدیک به شکست

یا رینولدز)، اما به‌دلیل وقوع پدیده‌ی شکست و در نتیجه جریان با آشفتگی بالا، و نیز با توجه به شرایط مرزی سطح آزاد (شرط مرزی متغیر با زمان)، معادلات غیرخطی شده و لذا حل کامل آن‌ها با پیچیدگی زیادی روبرو است (Lin and Liu, 1998). یکی از روش‌های ساده کننده، حل معادلات در یک محدوده‌ی زمانی اما فقط در پلان افقی است. این روش براساس این فرض است که مقیاس افقی حرکت موج بسیار بزرگ‌تر از عمق آب است. این فرض که طول موج در مقایسه با عمق آب بزرگ‌تر است، نظریه موج بلند^۱ نامیده می‌شود. طبق این تعریف شرایط هنگامی برآورده می‌شود که نسبت عمق آب به طول موج کوچکتر از (1/50) باشد. مفهوم فیزیکی این شرط به این تقریب می‌رسد که یا می‌توان از شتاب عمودی جریان صرف‌نظر کرد و یا آن‌را از طریق توزیع عمودی سرعت جریان به‌حساب آورد. معادلات غیرخطی آب‌های کم‌عمق^۲ (NSW) و معادلات بوسینسک^۳ دو نوع مهم معادلاتی هستند که به‌ترتیب براساس این تقریب‌ها به‌دست آمده‌اند. سود عملی این فرض، نادیده‌گرفتن مختصات عمودی در شبیه‌سازی انتقال موج است که به‌طور قابل ملاحظه‌ای از پیچیدگی معادلات می‌کاهد و استفاده از آن‌ها را در مسایل مهندسی تسهیل می‌کند.

معادلات NSW با فرض هیدروستاتیک بودن توزیع فشار و یا به‌عبارت دیگر توزیع یکنواخت سرعت در عمق، به‌دست آمده‌اند. با این فرض اثر انحناهای خطوط جریان روی توزیع فشار در نظر گرفته نشده است. این معادلات اساس مدل‌های وابسته به زمان هستند که خصوصیات غیرخطی موج در مناطق کم‌عمق ساحلی را تا حد زیادی در نظر می‌گیرند. مزیت ویژه‌ی این مدل‌ها کاربرد عملی آن‌ها است که حل عددی‌شان پیچیده و وقت‌گیر نیست. این ویژگی یعنی توازن بین صحت و عملی بودن مدل، این مدل‌ها را به‌صورت یکی از رایج‌ترین مدل‌های محققین و مهندسين، در طی سه دهه‌ی اخیر در آورده است.

فرضیات نظریه امواج بلند و در نتیجه صحت معادلات NSW در ناحیه شکست موج کاهش می‌یابد (Van Gent, 1995). در این ناحیه به‌دلیل شتاب عمودی قابل توجه سیال، فرض‌های مورد استفاده در این معادلات معتبر نیستند. برای برطرف کردن این ضعف‌ها معادلات کامل‌تری به‌کار برده شده‌اند. اگر چه معادلات

⁴ bores

⁵ Surf and swash zones

⁶ Run-up

⁷ Finite volume technique

¹ Long wave theory

² Non-Linear Shallow Water Equations (NSW)

³ Boussinesq Equations

شرح معادلات حاکم و روش حل عددی دو مدل، بخشی از مقایسه‌های انجام شده بین دو مدل، در شرایط مختلف موج و ساحل و نیز مقایسه‌های انجام شده با داده‌های میدانی ارائه شده است.

۲. معادلات حاکم و روش حل عددی آن‌ها

۱-۲. مدل MIKE21 BW 1DH

مدل موج بوسینسک MIKE21 BW DH معادلات پیشرفته بوسینسک را در یک بعد افقی و در جملات ارتفاع سطح آزاد، ξ و مؤلفه‌های در عمق انتگرال‌گیری شده‌ی سرعت، P و Q ، حل می‌کند. معادلات بوسینسک به صورت زیر هستند:

$$(1) \text{ پیوستگی: } n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0$$

(۲) تکانه در جهت x :

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{|P|}{h} \right] + \frac{gP|P|}{h^2 C^2} + F_x + n\Psi_1 = 0$$

که جمله‌ی پخشیدگی Ψ_1 به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Psi_1 = - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 P_{xx} - nBgd^3 \xi_{xxx} - dd_x \left(\frac{1}{3} P_{xt} + 2nBgd \xi_{xx} \right)$$

زیرنویس‌های x و t به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مشتقات جزئی نسبت به مکان و زمان هستند. P چگالی شار در جهت x ، $(m^3/m/s)$ عامل پخشیدگی بوسینسک، F_x جمله‌ی تنش افقی در جهت x ، x مختصات کارتزین، t زمان (s) ، h عمق کل آب $(\xi + d)$ ، d عمق ایستابی آب، g شتاب گرانش (≈ 9.81) ، n تخلخل، C ضریب مقاومت شزی $(m^{0.5}/s)$ ، α ضریب مقاومت برای جریان خطی در محیط متخلخل، β ضریب مقاومت برای جریان آشفته در محیط متخلخل و ξ تراز سطح آب روی مبدا (m) هستند. جمله‌ی تنش افقی با استفاده از رابطه‌ی گرادیان-تنش، به صورت زیر بیان می‌شود:

موج دارند. از سوی دیگر تفاوت نحوه‌ی در نظر گرفتن شکست موج نیز امتیاز دیگر معادلات بوسینسک محسوب می‌شود. در معادلات NSW شکست موج با استفاده از تکنیکی عددی که در مدل استفاده می‌شود در نظر گرفته می‌شود. درحالی‌که در معادلات بوسینسک جمله‌ی مجزایی جهت در نظر گرفتن شکست به معادلات افزوده شده و اثر شکست موج بر نیم‌رخ عمودی توزیع سرعت افقی وارد می‌شود.

پیش‌زمینه‌ی معادلات بوسینسک به کارهای صورت گرفته توسط بوسینسک در سال ۱۳۸۲ میلادی برمی‌گردد، اما آنچه مبنای مدل‌های بوسینسک قرار گرفته، مجموعه‌ی کلاسیک معادلاتی است که توسط پرگرایندر دو بعد افقی و بر روی بستر ناصاف به دست آمده است (Peregrine, 1972). مهم‌ترین پارامترهای مربوط به این نوع از معادلات عبارتند از غیرخطی بودن ناشی از اثرات متقابل امواج بر یکدیگر که توسط نسبت دامنه‌ی نوسان^۱ به عمق تحمیل می‌شود و پخشیدگی که توسط نسبت عمق به طول موج دیکته می‌شود. نکته‌ی حائز اهمیت و حساس این معادلات که نقطه تمرکز محققین برای بهبود کیفیت معادلات نیز همان بوده است، نحوه بیان پخش موج است که به طور مستقیم بر روی سرعت امواج تاثیر داشته و تقریباً بر همه فرآیندهای اساسی انتقال موج مانند کم‌عمق شدن، انکسار و بازتاب نیز حاکم است. به این دلیل، معادلات متنوعی برای بهبود مشخصات پخشیدگی ارائه شده‌اند (Madsen et al., 1997b; Nwogu, 1993; Madsen و Sorensen (۱۹۹۱)؛ Madsen و همکاران (۱۹۹۷a)؛ Sorensen و Sorensen (۱۹۹۱)؛ (۲۰۰۰)، برای به حساب آوردن شکست و حرکت رو به ساحل موج، بهبود یافته‌اند.

در تحقیق حاضر مدل عددی MIKE21 BW 1DH که براساس معادلات بهبود یافته‌ی بوسینسک، جهت شبیه‌سازی انتقال موج در ناحیه‌ی نزدیک به ساحل تا خشکی، ایجاد شده است، به دلیل پایه‌ی نظری مناسب‌تر و مقبولیت بیشتر، معیار سنجش مدل عددی ایجاد شده براساس معادلات غیرخطی آب کم‌عمق (مدل NSW)، قرار گرفته است. پس از آن مجموعه‌ای از داده‌های اندازه‌گیری شده در ساحل، معیار سنجش درستی هر دو مدل عددی قرار گرفته‌اند و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از دو مدل مذکور با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این مقاله، پس از

¹ Amplitude

که عمق آب، h سرعت افقی میانگین‌گیری شده در عمق، t زمان، x فاصله افقی، g شتاب گرانش، η ارتفاع سطح و f ضریب اصطکاک است.

روش حل عددی معادلات NSW به این صورت است که برای هر دو معادله‌ی پیوستگی و تکانه روش اختلاف محدود صریح Lax-Wendroff استفاده شده است. مقایسه‌های مختلفی که به‌عنوان نمونه توسط Raubenheimer و همکاران (۱۹۹۶) بین مدل و داده‌های میدانی انجام شده، تطابق خوبی را با خیز آب و نوسانات خط ساحلی اندازه‌گیری‌شده روی چندین ساحل طبیعی نشان داده است.

۳. تحلیل نتایج

به‌منظور بررسی درستی نتایج مدل NSW از دو روش استفاده شده است. برای این منظور ابتدا درستی نتایج مدل NSW به صورت کیفی و در قالب اشکال مقایسه‌ای، نسبت به نتایج مدل MIKE21 BW 1DH سنجیده شده است. سپس درستی سنجی مدل مذکور در قالب مقایسه‌هایی کمی انجام گرفته است، بدین صورت که اختلافات دو مدل در شرایط مختلف موج، شیب و بستر ساحل مورد ارزیابی قرار گرفته است.

برای مقایسه‌ی کمی دو مدل، امواج منظم با ارتفاع و دوره‌های متفاوت به‌عنوان ورودی به دو مدل عددی داده شده و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. این نتایج شامل حداکثر (قله) و حداقل (حوض) عمق آب و نیز سرعت افقی مثبت (رو به ساحل) و سرعت افقی منفی (رو به دریا) هستند. لازم به توضیح است سرعت افقی که این دو مدل محاسبه می‌کنند، سرعت متوسط‌گیری‌شده در عمق است که برای سهولت، در ادامه‌ی نوشتار از عبارت سرعت افقی استفاده می‌شود.

علاوه بر شرایط مختلف جریان، شرایط ساحل نیز در حالات مختلف بررسی شده و اثر شیب ساحل نیز وارد بررسی‌ها شده است. جهت بالابردن کیفیت مقایسه اغلب از کمیت‌های بدون بعد، مانند پارامتر ناحیه‌ی زوال، η ، استفاده شده است. همچنین میزان دقت نتایج در شرایط مختلف بستر نیز در قالب حساسیت-سنجی مدل به پارامتر ضریب اصطکاک نیز مورد بحث قرار گرفته

$$F_x = -\left(\frac{\partial}{\partial x}(v_t \frac{\partial P}{\partial x})\right)$$

که v_t ازجت افقی گردابه‌ای است. R_{xx} ترم مومنتوم اضافی ناشی از توزیع غیریکنواخت سرعت در اثر حضور غلتک است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_{xx} = \frac{\delta}{1 - \delta/d} \left(c_x - \frac{P}{d}\right)^2$$

که $\delta = \delta(x,t)$ ضخامت غلتک سطحی است و c_x مؤلفه‌ی سرعت غلتک سطحی در جهت x است. شرح تفصیلی این کمیت‌ها در مقاله Madsen و همکاران (۱۹۹۷a) آورده شده است.

برای حل عددی، روش المان محدود استاندارد Galerkin با درون‌یابی ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از هر دو نوع المان مثلثی (درون‌یابی درجه دوم شارها و درون‌یابی خطی ارتفاع سطح و متغیر کمکی) و المان چهارضلعی (درون‌یابی درجه چهارم شارها و درون‌یابی دوخطی ارتفاع سطح و متغیر کمکی) استفاده شده است. انتگرال‌گیری زمانی نیز با روش صریح سه مرحله‌ای Taylor-Galerkin انجام شده است. برای تصدیق درستی روش عددی بکار رفته نتایج مدل در سه مورد همزمان با داده‌های آزمایشگاهی و نیز نتایج به‌دست آمده از مدل بوسینسک براساس روش اختلاف محدود مقایسه شده است. تطابق دو مدل با یکدیگر بسیار خوب است (Sorensen and Sorensen, 2001).

۲-۲. مدل NSW

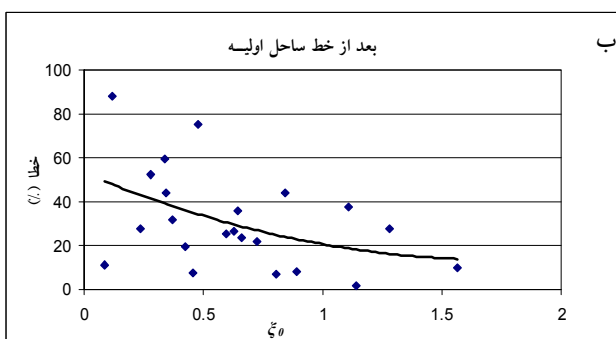
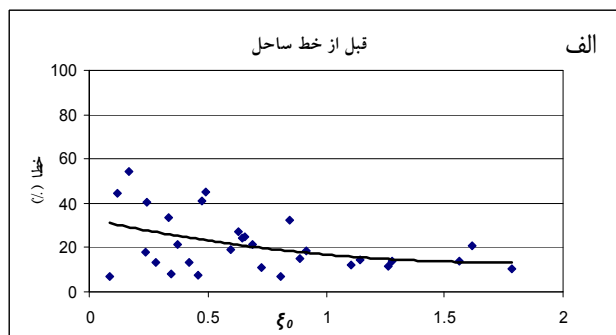
مدل NSW برای حل معادلات غیرخطی موج آب کم‌عمق برای بسترهای نفوذناپذیر (Kobayashi et al., 1987) و بستر نفوذپذیر (Kobayashi and Wurjanto, 1990)، توسعه یافته است. معادلات حاکم بر این مدل در حالت بستر نفوذناپذیر که مورد بحث تحقیق حاضر است به‌صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} = 0 \quad (۳) \text{ پیوستگی:}$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{2} fu|u| \quad (۴) \text{ تکانه:}$$

¹ Surf similarity

طبق رابطه ۵، کاهش تیزی موج منجر به افزایش مقدار ξ_0 شده و براساس نتیجه‌ی اخیر سبب افزایش دقت نتایج مدل NSW می‌شود.



نمودار ۱: اثر تغییرات ξ_0 بر خطای نسبی نتایج مدل NSW برای عمق آب در موقعیت‌های مختلف، (الف) ۱ متر قبل از خط ساحل اولیه، (ب) ۱ متر بعد از خط ساحل

کاهش تیزی موج به معنای ناچیز بودن ارتفاع موج به نسبت طول موج و در نتیجه بلندبودن موج است. همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر شده، مدل NSW برای امواج بلند مناسب‌تر است. بررسی انجام شده بر روی تاثیر تیزی موج بر درستی نتایج نشان می‌دهد مدل برای مقادیر کوچک‌تر تیزی موج ($H_0/L_0 < 0.01$) نتایج بهتری ارائه می‌دهد و با افزایش مقدار تیزی موج ($H_0/L_0 > 0.01$) خطای نسبی نتایج نیز بالا می‌رود. دلیل افزایش خطای نسبی به ازای مقادیر بزرگ تیزی موج، کوتاه‌شدن موج همراه با افزایش مقدار تیزی آن است که موجب می‌شود یکی از فرض‌های اصلی معادلات غیرخطی آب کم‌عمق که بلندبودن امواج است، دچار خدشه گردد (مرادویسی، ۱۳۸۶). جهت بررسی دقیق‌تر این نکته در بخش بعد حساسیت نتایج مدل NSW به تغییرات پارامتر تیزی موج نیز به‌طور مستقل ارزیابی می‌گردد. افزایش ξ_0 از سوی دیگر می‌تواند به معنی افزایش شیب باشد، یعنی دقت نتایج مدل NSW با افزایش شیب بالاتر می‌رود.

است. در پایان این قسمت تغییرات مکانی خطای نتایج مدل NSW در مقایسه با نتایج مدل MIKE21 در طول نیم‌رخ ساحلی نیز به‌منظور یافتن نواحی ضعف و قوت نتایج، مورد بررسی قرار گرفته است.

به‌علاوه، داده‌های میدانی که از انتقال امواج نامنظم (طبیعی) بر روی ساحل در دسترس بوده است، معیار سنجش درستی نتایج هر دو مدل قرار گرفته است. در این راستا نتایج مدل‌های عددی فوق‌الذکر با استفاده از داده‌های صحرایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳-۱. اثر تغییرات ξ_0 بر روی درستی نتایج

رفتار جریان در ناحیه‌ی زوال موج و ناحیه‌ی پیش‌روی موج در خشکی را ترکیبی از شیب ساحل و شرایط موج تعیین می‌کند. از این‌رو پارامتر ناحیه‌ی زوال یا عدد ایری‌بارن^۱، می‌تواند پارامتر مناسبی جهت نشان دادن بسیاری از مفاهیم جریان بر روی شیب‌ها و نیز فرق‌گذاری سواحل شیب‌دار باشد. عدد ایری‌بارن آب عمیق به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\xi_0 = \frac{\tan \beta}{(H_0 / L_0)^{1/2}} \quad (5)$$

که β شیب ساحل است و H_0/L_0 تیزی موج آب عمیق (نسبت ارتفاع موج به طول موج) است. شرایط آب عمیق به این دلیل انتخاب شده است که اثر عمق آب در ساحل از بین رفته و نتایج عمومیت بیشتری پیدا کنند.

همان‌گونه که از نمودار ۱ در دو موقعیت مکانی پایین‌تر از خط اولیه ساحل (ناحیه زوال) و ناحیه بالاتر از آن (ناحیه بالاروی) ملاحظه می‌گردد، به‌طور کلی با افزایش مقدار ξ_0 ، خطای نسبی تخمین عمق آب کمتر می‌گردد، به‌طوری‌که در مقادیر ξ_0 بالاتر از ۱ خطای نسبی نتایج تخمین عمق آب عموماً در منطقه زوال و بالاروی به ترتیب حدود ۱۰ و ۲۰ درصد می‌باشد که نشان از تطابق مناسب نتایج دو مدل دارد. منظور از خطای نسبی اختلاف نتایج مدل NSW نسبت به مدل بوسینسک است.

^۱ Iribarren number

سعی بر آن است که تغییرات صحت نتایج مدل NSW در بازه‌ی وسیع‌تری از پروفیل ساحلی مورد بررسی قرار گرفته و در نتیجه نواحی از ساحل که درستی نتایج بهتر است مشخص گردد.

برای انجام این کار، موجی با ارتفاع ۰/۵ متر و پریود ۵ ثانیه به‌عنوان موج شاخص ورودی به مدل‌های عددی داده شده و انتقال آن بر روی سه شیب مختلف شبیه‌سازی شده است. سپس درستی نتایج مدل NSW در فواصل مشخصی در طول نیم‌رخ ساحلی به‌دست آمده و در نهایت تغییرات طولی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

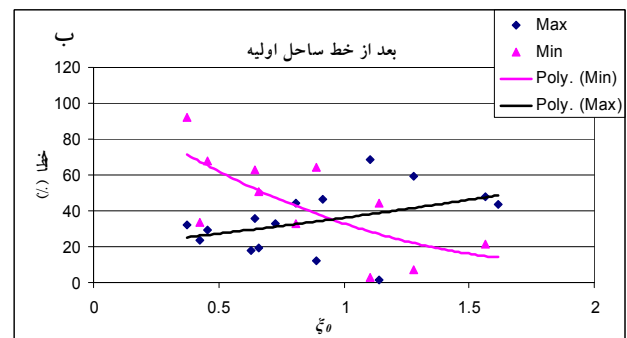
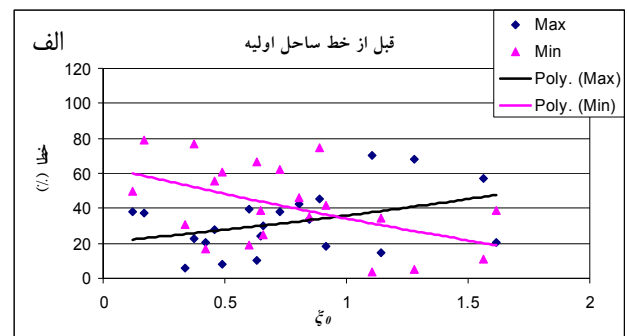
بررسی تغییرات طولی درستی نتایج مدل عددی NSW برای پارامترهای حداکثر عمق آب و سرعت‌های افقی مثبت و منفی انجام گرفته است. نمودار ۳ تغییرات خطای نسبی نتایج مدل NSW را برای عمق آب و نمودار ۴ تغییرات خطای نسبی نتایج سرعت افقی را نشان می‌دهد.

نمودار ۳ (الف) تغییرات طولی خطای نتایج عمق آب را در ساحل با شیب تند نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل برمی‌آید، نتایج دو مدل تا نزدیکی محل شکست تطابق بسیار زیادی با هم دارند. در محل شکست خطای نسبی بیشتر می‌شود. دلیل عمده این اتفاق را می‌توان ضعف معادلات NSW در مدل‌کردن ناحیه‌ی شکست به‌دلیل هیدروستاتیک فرض کردن فشار دانست. شایان ذکر است که فرض مذکور در این ناحیه‌ی اعتبار کمی دارد. بعد از ناحیه‌ی شکست تا نزدیکی خط ساحل اولیه ($x=22.5m$) که خطای مدل مجدداً روند افزایشی پیدا می‌کند، خطای مدل کم‌تر می‌شود. در ناحیه‌ی پیش‌روی موج در خشکی، بعد از خط‌ساحل اولیه (ناحیه بالاروی)، مشاهده می‌شود که ابتدا درستی نتایج بسیار مناسب است و در ادامه با حرکت به سمت خشکی، از دقت نتایج مدل NSW کاسته شده و خطای نسبی نتایج بیشتر می‌گردد.

روند تغییراتی که در بالا مورد بحث قرار گرفت، برای انتقال موج در ساحل با شیب تند بود. در مورد شیب‌های ملایم‌تر، نمودارهای ۳ (ب) و ۳ (ج) نشان می‌دهند که تطابق نتایج مدل حتی در ناحیه‌ی شکست نیز بسیار مناسب است. از آنجایی که نوع شکست در شیب ملایم از نوع ریزشی است، به نظر می‌رسد که اعتبار فرض هیدروستاتیک بودن فشار و توزیع یکنواخت سرعت افقی در عمق بیشتر شده است که با یافته‌های Liu و Lin (۱۹۹۸) انطباق دارد.

دلیل این نکته که چرا تطابق نتایج در ناحیه‌ی شکست بر روی ساحل با شیب تند کمتر است می‌تواند به تیزبودن شکست (آشفته

روند اثرگذاری تغییرات پارامتر ξ_0 بر صحت نتایج مدل NSW برای سرعت افقی مثبت (بیشینه) و منفی (کمینه) در نمودار ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که از شکل مذکور برمی‌آید، اگرچه با افزایش مقدار ξ_0 خطای نسبی نتایج مدل برای سرعت افقی مثبت (رو به ساحل) عموماً بیشتر می‌شود و برعکس خطای نسبی نتایج سرعت افقی منفی (رو به دریا) بهبود پیدا کرده و کمتر می‌گردد، اما به‌طور کلی نتایج به‌دست‌آمده حساسیت بارزی را نسبت به تغییرات ξ_0 نشان نمی‌دهد.

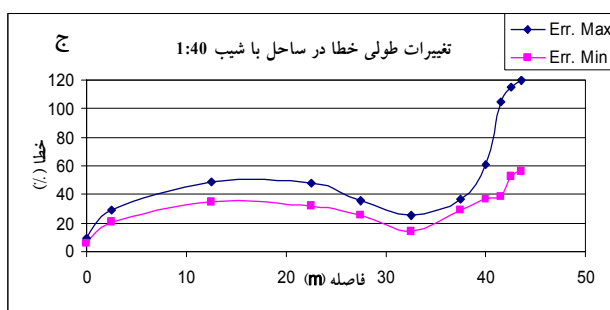
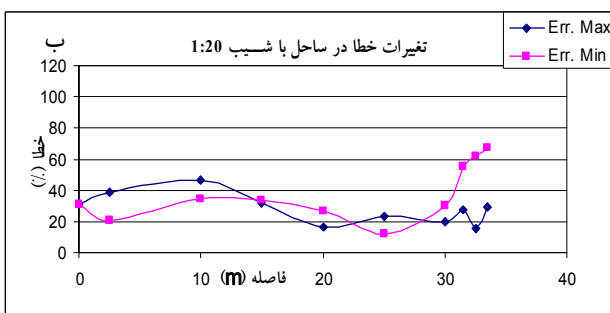
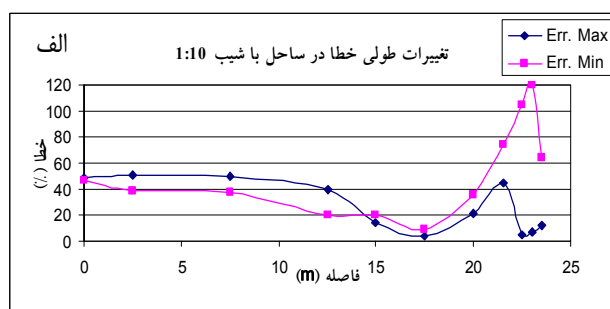


نمودار ۲: اثر تغییرات ξ_0 بر خطای نسبی نتایج مدل NSW برای سرعت افقی در موقعیت‌های مختلف، (الف) ۱ متر قبل از خط ساحل اولیه، (ب) ۱ متر بعد از خط ساحل. برازش‌های نزولی مربوط به حداکثر و برازش‌های نزولی حداقل سرعت هستند.

۲-۳. تغییرات مکانی خطای نتایج مدل NSW

تحلیل‌های انجام‌گرفته تا این قسمت بر روی ناحیه‌ی پیش-روی موج در منطقه بالاروی موج تمرکز یافته بود. اما از آنجایی که هر دو مدل عددی یعنی معادلات غیرخطی آب کم‌عمق و بوسینسک، ناحیه‌ی قبل و بعد از شکست را نیز مدل می‌کنند، لذا مقایسه نتایج دو مدل در تمام مسیر حرکت موج در آب کم‌عمق ساحلی، شامل نواحی قبل از شکست، شکست موج و بعد از شکست موج تا خشکی، نیز می‌تواند مفید باشد. لذا در این بخش

زاویه‌ی بحرانی شکست در مدل بوسینسک نیاز به فراسنجی کردن مجدد داشته باشد، لذا در بررسی مقایسه‌های شیب تند باید در نظر داشت که امکان بهبود نتایج مدل MIKE21 BW 1DH وجود دارد و درستی‌سنجی مدل NSW با استفاده از آن نتایج معتبرتر خواهد بود.

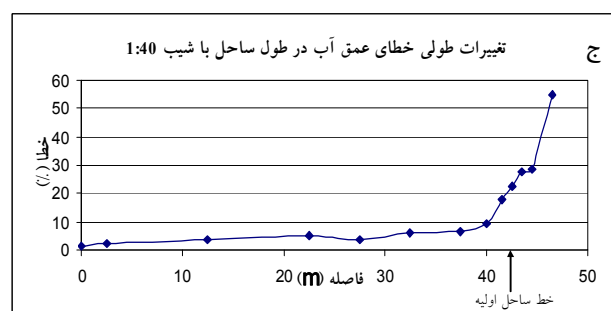
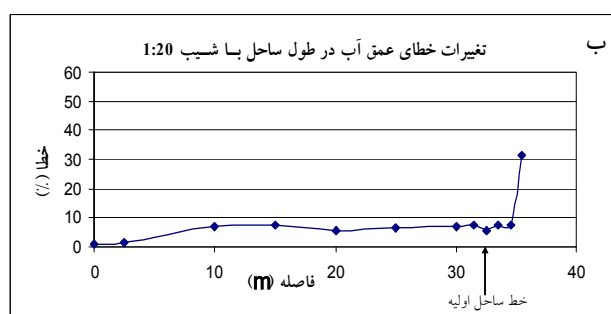
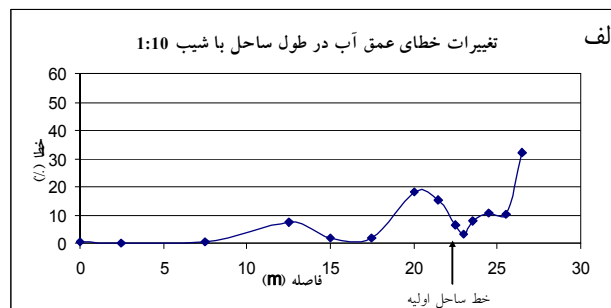


نمودار ۴: تغییرات خطای نسبی نتایج مدل NSW برای سرعت افقی در طول سواحل با شیب مختلف، (الف) ساحل با شیب تند (۱:۱۰)، (ب) ساحل با شیب متوسط (۱:۲۰) و (ج) ساحل با شیب ملایم (۱:۴۰).

به‌طور کلی در ناحیه‌ی پیش‌روی موج در خشکی، با پیش‌رفتن به سمت خشکی، خطای نسبی نتایج مدل NSW نیز افزایش می‌یابد. عمق آب پیش‌بینی‌شده توسط مدل NSW در نقاط انتهایی ناحیه‌ی پیش‌روی موج نسبت به مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل بوسینسک مقدار کم‌تری دارد.

بر اساس نمودار ۴ روند کلی تغییرات خطای نسبی هر دو سرعت مثبت و منفی به این صورت است که مقادیر خطا از

یا لغزان^۱ روی‌داده بر روی شیب تند برگردد که در نتیجه‌ی آن آشفته‌گی جریان بسیار بیشتر از شکست‌های ممتد اما ملایم‌تر بر روی شیب کم است.

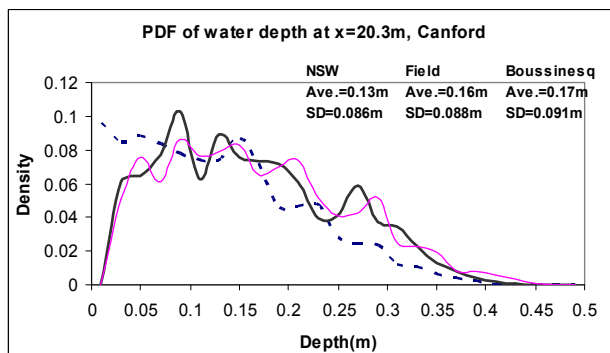
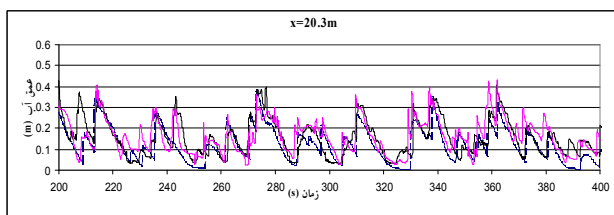
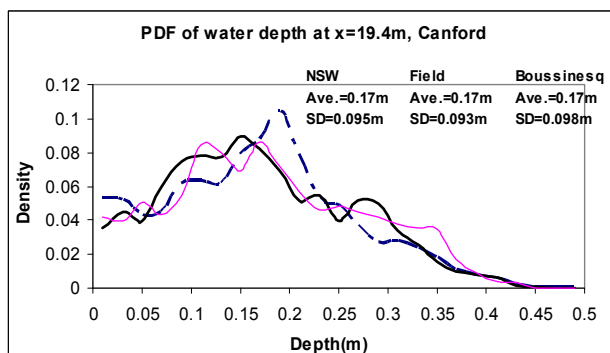
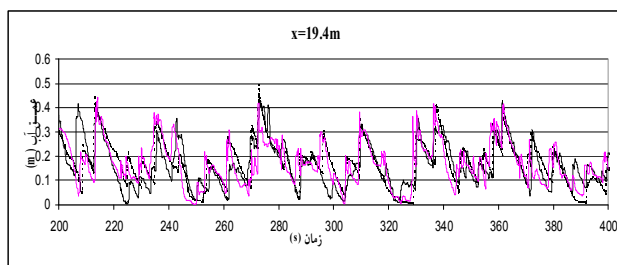


نمودار ۳: تغییرات خطای نسبی نتایج مدل NSW برای حداکثر عمق آب در طول سواحل با شیب مختلف، (الف) ساحل با شیب تند (۱:۱۰)، (ب) ساحل با شیب متوسط (۱:۲۰) و (ج) ساحل با شیب ملایم (۱:۴۰).

ذکر این نکته در این‌جا لازم است که پارامتر زاویه‌ی بحرانی شکست در مدل MIKE21 BW 1DH برای حالتی فراسنجی (کالیبره) شده است که اغلب شامل شکست ریزشی امواج می‌شود. این نوع از شکست اکثراً بر روی شیب‌های کم سواحل رخ می‌دهد و در شیب‌های تندتر ممکن است انواع دیگر شکست نیز رخ بدهد. به این دلیل در این‌جا نیز احتمال آن وجود دارد که در حالت شیب تند نوع شکست ریزشی نبوده و در نتیجه پارامتر

^۱ collapsing یا surging

اغلب مفاهیم انتقال موج را به‌خوبی مدل کرده‌اند، برای مثال بالاروی‌های موج به‌خصوص در قسمت‌های پایینی ناحیه پیش-روی موج با دقت قابل ملاحظه‌ای مدل شده است. هر دو مدل به‌طور کلی از رفتار کلی تغییرات سطح آب تبعیت می‌کنند. البته تطابق نتایج در قسمت فوقانی ناحیه پیش‌روی موج در خشکی نسبتاً کمتر می‌شود.



ابتدای شروع شیب تا انتهای ناحیه‌ی زوال موج تقریباً حالت ثابتی دارد. در ادامه و در انتهای ناحیه‌ی زوال و ابتدای ناحیه‌ی پیش-روی موج در خشکی (ناحیه‌ی پایین‌روی موج)، مقادیر خطا روند کاهش یافته و سپس در ادامه‌ی ناحیه‌ی پیش‌روی موج در خشکی (ناحیه‌ی بالاروی موج) مقادیر خطای نسبی روند افزایشی به خود می‌گیرد.

خطای نسبتاً زیاد ناحیه‌ی قبل و بعد از شکست موج و نیز بخش عمده‌ی ناحیه‌ی زوال موج، احتمالاً به نحوه‌ی فرض نیمرخ تغییرات سرعت آب در عمق برمی‌گردد. همان‌طور که قبلاً نیز توضیح داده شد، در معادلات غیرخطی آب‌های کم‌عمق سرعت در تمام عمق آب ثابت فرض می‌شود، در حالی‌که در معادلات بوسینسک این‌گونه نیست. در ادامه‌ی ناحیه‌ی پیش‌روی موج در خشکی و با پررنگ‌تر شدن نقش اصطکاک کف، به همان دلیلی که قبلاً برای عمق آب گفته شد، مقادیر سرعت در معادلات NSW سریع‌تر دچار تغییر شده و کاهش می‌یابند، لذا خطای نتایج نیز بالا می‌رود.

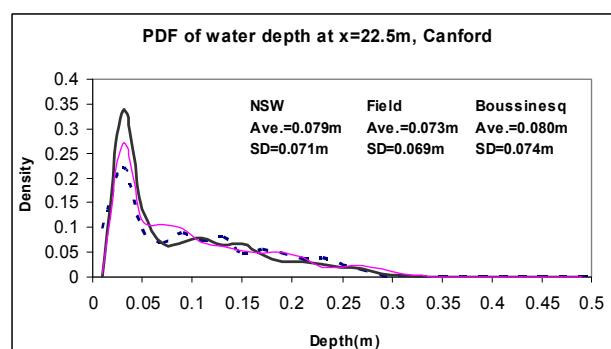
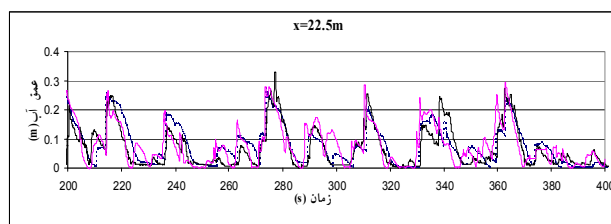
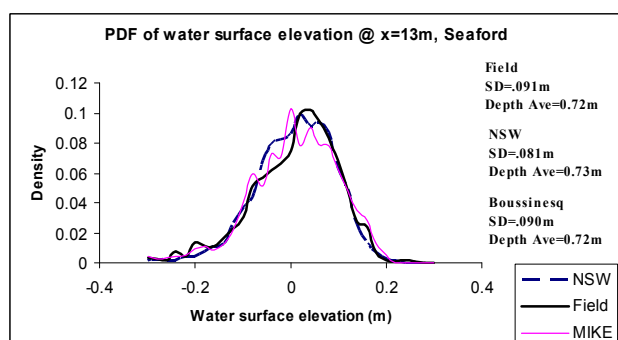
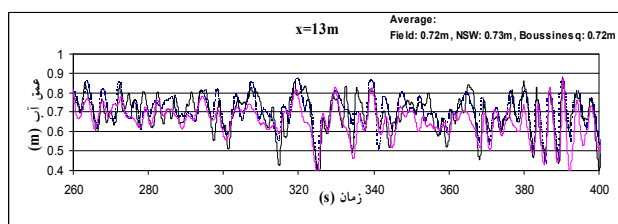
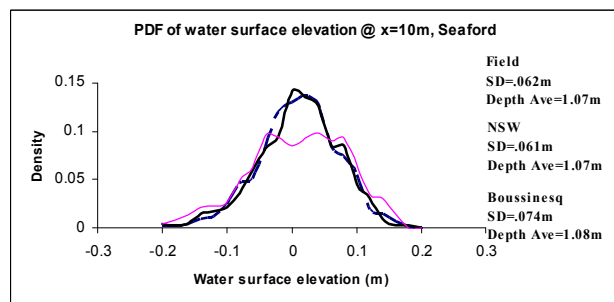
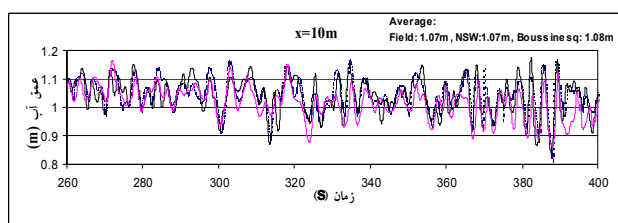
۳-۳. مقایسه نتایج با داده‌های میدانی

در این بخش نتایج هر دو مدل با دو مجموعه داده‌ی میدانی مورد مقایسه اولیه قرار می‌گیرد. داده‌های موجود مربوط به اندازه-گیری‌هایی می‌شود که بین سال‌های ۱۹۹۸ و ۲۰۰۱ برای دو ساحل مختلف از سواحل جنوب انگلستان برداشت شده است. یکی از این داده‌ها مربوط به ساحل Canford با شیب ملایم (۲۰:۱) و دیگری ساحل Seaford با شیب نسبتاً تند (۱۰:۱) است که جزئیات بیشتر آن در Holmes و Shانه‌sazzadeh (۲۰۰۷) آمده است.

شیب ملایم - ساحل کانفورد: در شکل ۵ سری زمانی عمق آب پیش‌بینی‌شده توسط دو مدل عددی با نتایج اندازه‌گیری‌شده مقایسه شده است. این شکل شامل نتایج انتهای ناحیه‌ی زوال موج (بالا، $x=19.4m$)، ناحیه‌ی تحتانی پیش‌روی موج (وسط، $x=20.3m$) و ناحی فوقانی پیش‌روی موج (پایین، $x=22.5m$) می‌شود. فاصله‌های مذکور نسبت به دستگاه اندازه‌گیری واقع در مرز روبه دریا محدوده‌ی شبیه‌سازی است.

همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود هر دو مدل عددی NSW و MIKE21 BW 1DH به‌طور کلی عمق آب، شامل بالآمدگی و فرورفتگی امواج را در طول ناحیه‌ی زوال موج و پیش‌روی موج در خشکی به‌درستی پیش‌بینی می‌کنند. هر دو مدل

احتمال و نیز مقادیر متوسط عمق آب و انحراف معیار، به‌جز در ناحیه‌ی فوقانی پیش‌روی موج در خشکی، تطابق مناسبی با داده‌های اندازه‌گیری شده دارند. در این‌جا نیز نتایج هیچ‌کدام از دو مدل برتری محسوسی نسبت به دیگری ندارند. در بخش فوقانی ناحیه‌ی پیش‌روی موج در خشکی نتایج هر دو مدل تطابق کمتری با نتایج اندازه‌گیری شده دارند. دلیل این امر را می‌توان تشکیل پله‌های موضعی بستر در ناحیه‌ی پیش‌روی موج در ساحل با شیب تند دانست که در نتیجه آن فروریزش سطح آب در این قسمت از ناحیه‌ی پیش‌روی موج اتفاق می‌افتد. این فرآیند یعنی اثر متقابل توپوگرافی و هیدرودینامیک بر یکدیگر توسط مدل‌های عددی حاضر مدل نمی‌شود (Shanehsazzadeh, 2003).



نمودار ۵: سری زمانی عمق آب و تابع توزیع احتمال (PDF) عمق آب در ساحل کانفورد در فواصل مختلف از مرز سمت دریا، داده‌های صحرایی (سیاه ممتد)، نتایج مدل NSW (خطچین) و نتایج مدل MIKE21 BW 1DH (خطکسر) (خاکستری). مقادیر عمق میانگین آب (Ave.) و انحراف از معیار (SD) نیز نشان داده شده است.

برای بررسی بیشتر نتایج، تابع توزیع احتمال^۱ عمق آب متناظر با سه موقعیت مختلف خط ساحلی نیز در شکل رسم شده است. عمق متوسط آب و انحراف معیار^۲ هر کدام از نتایج نیز بر روی شکل نشان داده شده است. شکل کلی منحنی توزیع احتمال موقعیت‌های مختلف تطابق بهتر نتایج مدل بوسینسک را نشان می‌دهد، درحالی‌که مقادیر عمق متوسط آب و انحراف معیار نتایج دو مدل به یکدیگر بسیار نزدیک بوده و با نتایج اندازه‌گیری شده نیز تطابق مناسبی دارند. با استفاده از این کمیت‌ها نمی‌توان در مورد برتری مدل خاصی قضاوت کرد. شیب تند-ساحل سیفورد: نمودار ۶ سری‌زمانی‌های نتایج دو مدل عددی را در مقابل نتایج اندازه‌گیری شده برای ساحل با شیب تند سیفورد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج هر دو مدل از رفتار کلی تغییرات سطح آب به خوبی تبعیت می‌کنند. همچنین تابع توزیع احتمال متناظر با هر یک از موقعیت‌ها به همراه عمق متوسط و انحراف معیار مربوطه نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار ۶ نشان داده شده است، نتایج هر دو مدل عددی از نظر شکل کلی تابع توزیع

^۱ Probability distribution function (PDF)

^۲ Standard Deviation (SD)

از طرفی قوی‌تر بودن مبنای نظری معادلات حاکم بر آن و از سوی دیگر عمومی و مورد قبول بودن آن در بین محققین بوده است. مقایسه‌ی بین دو مدل در حالت‌های مختلفی از شرایط موج و ساحل انجام گرفته و همچنین اثر تغییرات دانه‌بندی بستر نیز بر روی درستی نسبی نتایج مدل مورد بررسی قرار گرفته است. در روش دوم با استفاده از دو مجموعه از داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی میدانی، درستی نتایج هر دو مدل NSW و بوسینسک به‌طور محدود مورد ارزیابی قرار گرفت.

ارزیابی نتایج مدل NSW با استفاده از مدل‌های دقیق‌تر و داده‌های آزمایشگاهی و میدانی از آن جهت می‌تواند اهمیت داشته باشد که اجرای مدل NSW در مقایسه با مدل‌های پیچیده‌تر بسیار ساده و کم‌هزینه‌تر بوده و نیز سرعت اجرای کمتری را طلب می‌کند. این مزیت در بررسی طولانی مدت انتقال رسوب و تغییرات ریخت‌شناختی ساحل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

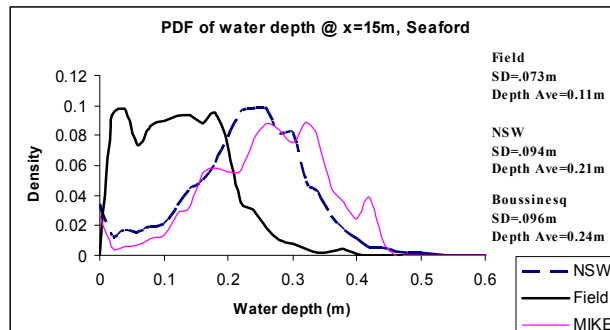
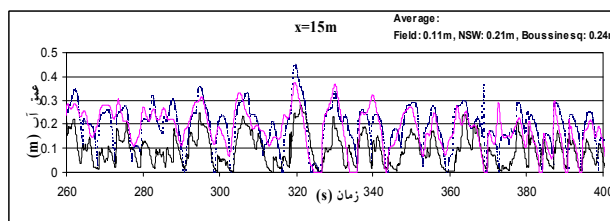
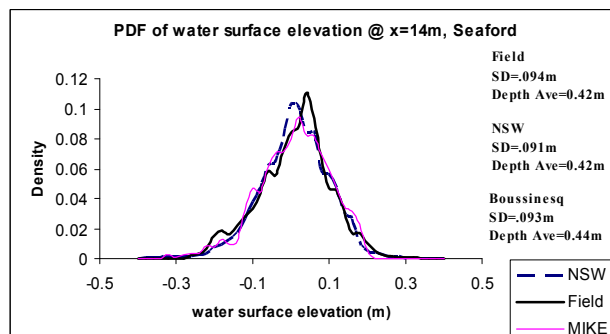
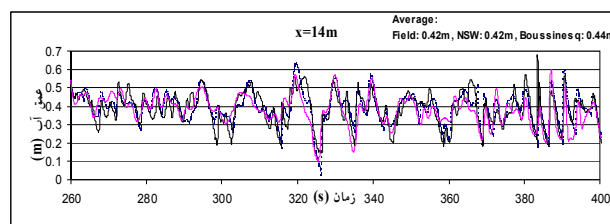
به‌طور کلی از مقایسه‌ی مدل NSW با مدل MIKE21 BW IDH می‌توان نتیجه گرفت که:

مدل NSW برای شرایط معمول موج و ساحل در تمام طول پروفیل ساحلی به‌طور کلی نتایج خوبی برای عمق آب ارائه می‌دهد (درصد اختلاف نتایج به‌طور متوسط حدود ۲۰ درصد می‌باشد). افزایش ارتفاع موج و کاهش پریود موج روی نتایج مدل اثر منفی می‌گذارد. این شرایط منجر به نقض فرض بلندبودن موج می‌شود که در معادلات غیرخطی آب کم‌عمق نقش اساسی دارد.

مدل NSW در ناحیه‌ی انتهایی زوال موج و نیز قسمت پایینی ناحیه‌ی پیش‌روی موج در خشکی، نتایج مناسبی برای سرعت افقی می‌دهد. در شیب تند ساحلی، نتایج سرعت در ناحیه شکست موج دچار خطا می‌شود. همچنین در قسمت فوقانی ناحیه‌ی پیش‌روی موج در خشکی نیز خطای نتایج سرعت افقی بالا می‌رود. مورد اخیر را باید محدودیت عمده‌ی معادلات NSW برای پیش‌بینی هیدرودینامیک جریان در ناحیه‌ی پیش‌روی موج در خشکی قلمداد کرد.

در مقایسه‌ی نتایج دو مدل بایستی این نکته را مد نظر قرار داد که مدل بوسینسک نیز فرض‌های ساده‌کننده‌ای دارد که به‌طور طبیعی درستی نتایج آنرا تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مقایسه‌ی نتایج هر دو مدل عددی با نتایج اندازه‌گیری‌های صحرائی انجام‌شده به‌طور کلی تطابق مناسب هر دو مدل را نشان می‌دهد. درستی نتایج مدل NSW در پیش‌بینی عمق آب در



نمودار ۶: سری زمانی عمق آب و تابع توزیع احتمال (PDF) عمق آب در ساحل سیفورد در فواصل مختلف از مرز سمت دریا، داده‌های میدانی (سیاه ممتد)، نتایج مدل NSW (خط‌چین) و نتایج مدل MIKE21 BW IDH (نیز خاکستری). مقادیر عمق میانگین آب (Ave.) و انحراف از معیار (SD) نیز نشان داده شده است.

در تحقیق حاضر محدودیت‌ها و توانایی‌های معادلات غیرخطی آب کم‌عمق (NSW) در شبیه‌سازی عددی انتقال موج در نواحی کم‌عمق ساحلی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از دو روش استفاده گردید: در روش اول مدل عددی MIKE21 BW IDH که براساس معادلات بوسینسک ایجاد شده است مبنای درستی‌سنجی واقع شده است. دلیل انتخاب این مدل

Madsen, P.A.; Sorensen, O.R.; Schaffer, H.A., 1997a. Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves. *Journal of Geophysical Research*, 32: 255-287.

Madsen, P.A.; Sorensen, O.R.; Schaffer, H.A., 1997b. Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part II. Surf beat and swash zone oscillations for wave groups and irregular waves. *Coastal Engineering*, 32: 289-320.

Madsen, P.A.; Murray, R.; Sorensen, O.R., 1991. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Part 1. *Journal of Coastal Engineering*, 15: 371-388.

Nwogu, O. N., 1996. Numerical Prediction of Breaking Waves and Currents with a Boussinesq Model. Proc. 25th International Conference on Coastal Engineering, 4807-4820.

Packwood, A. R., 1980. Surf and run-up on beaches. PhD Thesis, School of Mathematics, University of Bristol.

Peregrine, D.H., 1972. Equations for water waves and the approximations behind them. In Meyer, R.E (editor). *Waves on beaches resulting sediment transport*, Academic press, New York, 95-121.

Raubenheimer, B.; Guza, R. T.; Elgar, S., 1996. Wave transformation across the inner surf zone. *Journal of Geophysical Research*, 101(10): 25589-25597.

Shanehazzadeh, A.; Holmes, P., 2007. Field Investigation on the Results of Non-linear Shallow Water Equations in the Swash Zone. *Journal of Coastal Engineering*, 54: 835-855.

Shanehazzadeh, A., 2003. Swash zone hydrodynamics and sediment transport. Imperial college, Unpublished PhD Thesis.

Shiach, J.B.; Mingham, C.G.; Ingram, D.M.; Bruce, T., 2004. The applicability of the shallow water equations for modelling violent wave overtopping. *Journal of*

نواحی زوال موج و پیش‌روی موج در خشکی در بعضی از موارد حتی از نتایج مدل بوسینسک نیز بهتر است. به نظر می‌رسد تعداد زیاد فرض‌هایی که در معادلات بوسینسک از جمله برای در نظر گرفتن شکست و حرکت خط‌ساحل در نظر گرفته شده است، ممکن است نقاط قوت آنرا تحت تأثیر قرار دهد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت در مقایسه با داده‌های صحرایی مدل بوسینسک مزیت ویژه‌ای در مدل کردن عمق آب نسبت به مدل NSW از خود نشان نمی‌دهد. لذا مدل‌های ساده مبتنی بر معادلات NSW می‌توانند با دقت کافی در شبیه‌سازی انتقال رسوب و تغییرات خط ساحل مورد استفاده قرار گیرند.

منابع

مرادویسی، ب، ۱۳۸۶. کاربرد و محدودیت‌های شبیه‌سازی عددی یک-بعدی غیرخطی امواج در مناطق کم‌عمق ساحلی، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس.

Andrew, C.J.F., 1999. Bibliographic review of nearshore wave models. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, PO Box 4331, Melbourne Victoria 3001 Australia.

Dodd, N.X., 1988. Numerical model of wave run-up, overtopping and regeneration. *Journal of WaterWay, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 124(2): 73-81.

Hibberd, S.; Peregrine, D. H., 1979. Surf and run-up on a beach: a uniform bore. *Journal of Fluid Mechanics*, 95(2): 323-345.

Kobayashi, N.; Wurjanto, A., 1990. Numerical model for waves on rough permeable slopes. *Journal of Coastal Research*, SI7: 149-166.

Kobayashi, N.; Otta, A.K.; Roy, I., 1987. Wave reflection and runup on rough slopes. *Journal of WaterWay, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE*, 113(3): 282-298.

Lin, P.; Liu, P. L. F., 1998b. Turbulence transport, velocity dynamics and solute mixing under plunging breaking waves in surf zone. *Journal of Geophysical Research*, (103): 15677-15694.

Sydney, Australia, 190–202.

Coastal Engineering, 51:1 - 15

Van Gent, M.R.A., 1995. Wave interaction with permeable coastal structures. Delft, university press, 177p.

Sorensen, O.R.; Sorensen, L.S., 2000. Boussinesq type modeling using unstructured finite element technique, 27th International Conference, 16-21 July 2000,