

## Beach Profile Formation in The Vicinity of Seawalls Under the Impacts of Breaking Waves

M. Riahy<sup>1</sup>, H. Khaleghi<sup>2</sup>, M. Mosadegh Jamali<sup>3</sup>  
A. Hasanzadeh Doloui<sup>4</sup>, A. Salehi Neishaboori<sup>5</sup>

### Abstract

Wave induced hydrodynamics within the near shore region, sediment transport and the subsequent evolution of beaches under wave attack are important elements governing the stability of the coastal structures. Based on surf zone hydrodynamics, several efforts have been made to estimate the sediment transport and beach profile formation during storm conditions. Although there are advanced models of surf zone hydrodynamics for natural beaches, the behavior of the beaches in front of reflective structures (i.e. seawalls) under breaking waves still suffers from the lack of appropriate theoretical models and measured data. In order to consider the effect of reflective structures on beach profile evolution, experiments have been performed at laboratory model scale on a reflective seawall located in the surf zone. In this paper, the measurement data has been analyzed with Buckingham theory and certain equations have been derived. The results obtained from utilising the equations have been compared with the experimental data. For the cases simulated, the reflected waves have been found to have a great effect on the beach profile development. The results obtained from the experiments show a strong dependency of the surf zone hydrodynamics and beach profile formation on the location of the structure and the breaking point near the shoreline.

**Keywords:** Profile, Seawall, Sediment Transport, Coastal Morphology, Breaking Waves

## تغییر شکل نیمرخ بستر دریا در مقابل دیواره ساحلی تحت اثر برخورد امواج شکنا

محمد ریاحی<sup>۱</sup>، حسن خالقی<sup>۲</sup>، میر مصدق جمالی<sup>۳</sup>، علی حسن زاده دلویی<sup>۴</sup>، علی اکبر صالحی نیشابوری<sup>۵</sup>

### چکیده

برخورد امواج با بدنه دیواره‌های احداث شده در سواحل، تغییر شرایط هیدرودینامیکی حاکم در ناحیه مجاور دیواره را به همراه داشته و موجب جابجایی لته‌های رسوب در پای سازه می‌شود. این امر در بررسی پایداری دیواره‌های ساحلی از اهمیت خاصی برخوردار بوده و همواره بعنوان عامل اصلی تخریب این نوع از سازه‌ها معرفی شده است. در مقاله حاضر که حاصل انجام یک پروژه تحقیقاتی در این زمینه است به ارائه و تحلیل نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی آزمایشگاهی از این پدیده در فلوام امواج با اعمال امواج شکنا پرداخته شده و ضمن بررسی چگونگی تغییر شکل بستر دریا در حالت‌های گوناگون هندسی محیط ساحلی و شرایط مختلف هیدرولیکی، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و به کمک روش آنالیز ابعادی برخی از روابط حاکم بین متغیرهای موثر استخراج شده است. نتایج حاصل از این تحقیق حاکی از تاثیر قابل ملاحظه وجود دیوار ساحلی بر شرایط هیدرودینامیکی در این ناحیه و به دنبال آن تغییر در شکل پروفیل متعادل شده بستر دریا در ناحیه ساحلی بوده که علت اصلی این امر انعکاس موج از بدنه سازه است. از طرفی موقعیت قرارگیری دیواره انعکاسی نسبت به خط ساحل، عامل مهمی در چگونگی تغییر شکل بستر دریا است. پایداری نسبی نیمرخ ساحلی پس از برخورد ده هزار موج اولیه، افزایش عمق فرسایش با نزدیک شدن محل شکست موج به دیواره، عدم ایجاد یک الگوی متناوب منظم در تغییر شکل بستر ساحلی در اثر برخورد امواج شکنا و چگونگی رده‌بندی دانه‌های رسوبی در پای دیواره ساحلی از نتایج این تحقیق به شمار می‌رود.

**واژه‌های کلیدی:** موج، دیوار ساحلی، نیمرخ ساحل، انتقال رسوب، شبیه‌سازی فیزیکی، تغییر شکل بستر

<sup>1</sup>PhD.Candidate, Tarbiat Modarres University Tehran, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, Tarbiat Modarres University Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Sharif University of Technology, Tehran Iran

<sup>5</sup>Assistant Professor, Tarbiat Modarres University Tehran, Iran

<sup>1</sup>دانشجوی دکتری هیدرولیک، دانشگاه تربیت مدرس

<sup>2</sup>استادیار، دانشگاه تربیت مدرس

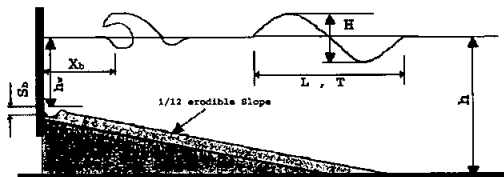
<sup>3</sup>استادیار، دانشگاه صنعتی شریف

<sup>4</sup>کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی شریف

<sup>5</sup>استادیار، دانشگاه تربیت مدرس

هیدرودینامیکی توازن موجود بین نیروها برهم خورده و این عامل، تغییر شکل بستر را موجب می‌شود. تغییر شکل پروفیل ساحل با افزایش تنش برشی بستر ناشی از فزونی مقدار سرعت جریان و در اثر جابجایی دانه‌های رسوبی در دو حالت انتقال رسوب در بستر (بار کف) و انتقال رسوب بصورت معلق در عمق جریان (بار معلق) صورت می‌پذیرد [Srinivas(1996)]. مواردی نظیر تنش برشی بستر، نیروی ثقل، مومنتوم ناشی از شکست امواج، جریان‌های دریایی بسمت ساحل، جریان‌های بازگشتی، جریان‌های لایه مرزی و آشفستگی بعنوان عوامل ثانویه، نقش عمده را در میزان و چگونگی انتقال رسوب عمود بر ساحل ایفاء می‌کند [Neshaei(1997)]. از طرفی پارامترهای اصلی و برخی ابعاد تعیین کننده را می‌توان بشرح زیر نام برد:

ارتفاع موج پیش رونده در آب عمیق ( $H$ )، عمق آب در ناحیه دور از ساحل ( $d$ )، پریود موج ( $T$ )، عمق آب در نقطه مورد نظر ( $h$ )، طول موج پیش رونده ( $L$ )، عمق آب در پای دیواره ( $h_w$ )، سرعت ماکزیمم جریان در بستر ( $V$ )، میزان آب‌شستگی در پای دیواره ( $S$ ) و فاصله محل شکست موج تا دیواره ( $X_b$ ). این متغیرها در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱ نمایش شماتیک متغیرهای اصلی

شیوه‌هایی که عموماً جهت بررسی میزان نقش و چگونگی تاثیر عوامل فوق در پدیده مورد نظر بکار گرفته شده است، بطور کلی در سه قالب شبیه‌سازی آزمایشگاهی، مدلسازی عددی و نیز انجام مطالعات و اندازه‌گیریهای محلی دسته‌بندی می‌شوند. در تحقیق حاضر شبیه‌سازی آزمایشگاهی از پدیده انجام پذیرفته است. بکارگیری روش فوق با توجه به مشابهت محیط آزمایشگاهی با شرایط طبیعی، ضمن فراهم کردن امکان کمی کردن اطلاعات، آشنایی بهتر با فیزیک پدیده را به همراه خواهد داشت [Kamphuis(2000)]. پدیده انتقال رسوب عمود بر ساحل و تغییرات مرفولوژی بستر از جمله موضوعاتی است که با فرض داشتن ساحلی طولانی و بدون انحنا، امکان مدلسازی فیزیکی از آن به صورت دو بعدی (فلوم امواج)، با دقت کافی در نتایج حاصل امکانپذیر بوده و می‌توان از نقش عوامل موثر در امتداد خط ساحلی (بعلمت امکان فرض تساوی میزان ورود و خروج عامل تغییرهای پروفیل بستر، از مرزهای طرفین محدوده مورد نظر) در چگونگی وقوع این پدیده صرف‌نظر کرد. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه با انجام آزمایش در مدل فیزیکی صورت گرفته است.

احداث سازه‌های گوناگون در نواحی ساحلی در راستای توسعه بهره‌برداری از ظرفیتهای موجود در این نقاط و نیز ساخت دیواره‌های قائم در امتداد خط سواحل به منظور جلوگیری از هجوم امواج دریا بسمت خشکی بعنوان روشی بسیار متداول در حفاظت از سواحل، در اغلب کشورهایی که دارای مرز آبی هستند به وفور قابل مشاهده است. استفاده از این سازه‌ها به جهت اثر متقابل برخورد امواج با سازه دیوار ساحلی و تغییر شرایط هیدرودینامیکی در مجاورت ساحل و به تبع آن تغییر شکل پروفیل بستر دریا در این ناحیه، مسائل و مشکلاتی را نیز به همراه داشته و همواره ضرورت توجه به آن از جنبه‌های گوناگون مورد تاکید قرار گرفته است. بطوریکه به واسطه اهمیت موضوع و به منظور شناخت عوامل موثر، برآورد مسائل و نیز چاره‌اندیشی‌های لازم، تاکنون مطالعات و تحقیقات فراوانی در این زمینه صورت پذیرفته و همچنان نیز بعنوان یکی از موضوع‌های بحث برانگیز و مورد توجه متخصصان ذربط در سطح جهان مطرح است. [Rakha(1997)]. اگر چه تغییر در نیمرخ بستر ساحل دریا در اثر جریان‌ها و جابجایی دانه‌های رسوبی در دو شکل کلی عمود بر ساحل و موازی با خط ساحلی انجام می‌پذیرد، لیکن در اکثر مواردی که سازه بصورت موازی و در محل خط ساحلی واقع شده باشد، به منظور سله‌سزی مسئله مورد بررسی و کاربردی کردن آن، عامل انتقال در جهت عمود بر ساحل مد نظر قرار داشته است [Coastal (1998)]. در تحقیق حاضر نیز پدیده مورد نظر در جهت عمود بر ساحل مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- نیروهای موثر و روش بررسی مسئله

بطور کلی می‌توان عمده عوامل تاثیرگذار بر روی فرآیند انتقال رسوب در جهت عمود بر ساحل و تغییرات بستر دریا در مجاورت ساحل را به سه دسته ذیل تقسیم بندی کرد (Nairn 1990):

- ۱- انتقال رسوب ساحلی (onshore transport) ناشی از سرعت‌های اوربیتالی (مداری) ایجاد شده در بستر (orbital Velocities)
- ۲- انتقال رسوب دور از ساحل (offshore transport) ناشی از جریان عمومی بازگشتی بسمت دریا (mean return flow or undertow)
- ۳- انتقال رسوب عمود بر ساحل ناشی از پدیده ثقل و مؤلفه آن در جهت انتقال به سمت پایین دست شیب در داخل دریا (down slope sediment transport).

مقادیر نیروهای مؤثر و نحوه عملکرد آنها در داخل و یا خارج از ناحیه شکست متفاوت بوده و در حالت به تعادل رسیدن پروفیل ساحلی در واقع این نیروها به حالت توازن رسیده‌اند. اگر چه همواره وجود امواج کوتاه با تغییر سرعت و جهت جریان توأم بوده و با این وجود انتقال دانه‌های رسوبی انجام می‌پذیرد، اما در شرایط تعادل، شکل بستر کم و بیش حالتی پایدار را حفظ خواهد کرد [Coasta(1998)]. با تغییر شرایط

جدول ۱: بخشی از مهمترین تحقیقات قبلی

سال	ساحل		محقق / محققین
	طبیعی	دیواره	
۱۹۸۴	-	x	Irie & Nadaoka
۱۹۸۵	-	x	Xie
۱۹۹۰	x	-	Kraus and Larson
۱۹۹۰	x	-	Henk J. Steetzel
۱۹۹۱	x	-	Dally et al
۱۹۹۲	-	x	Fowler
۱۹۹۲	x	-	Zhiwen Chen
۱۹۹۳	-	x	Oumeraci
۱۹۹۴	x	-	Wu, Y. et al
۱۹۹۵	x	-	Katopodi and N. Kitou
۱۹۹۶	-	x	Dougal et al.
۱۹۹۶	x	-	Srinivas and R. G. Dean
۱۹۹۷	-	x	Rakha and Kamphuis
۱۹۹۷	x	-	Madsen et al
۱۹۹۷	x	-	Zheng et al
۱۹۹۷	x	-	Holmes et al
۱۹۹۹	x	-	S. Mai et al
۲۰۰۰	-	x	Fredsoe & Sumer
۲۰۰۱	x	-	Penchev et al
۲۰۰۳	x	-	Ping Wang

جدول ۲: حالت‌های مختلف آزمایش

شرایط بستر	نصب دیواره انعکاسی (قائم)	ساحل طبیعی (بدون سازه)	شرایط آزمایش	
			حالت	آزمایش
متحرک	صلب			
-	x	-	x	اول
-	x	x	-	دوم
x	-	-	x	سوم
x	-	x	-	چهارم

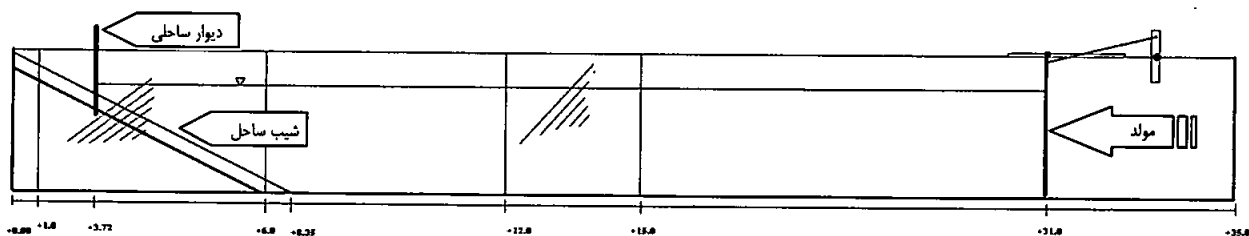
جدول ۳: مقادیر متغیرها

عمق آب (سانتیمتر)	موج		متغیرها
	پریود (ثانیه)	ارتفاع (سانتیمتر)	
۴۵		۸/۵	مقادیر
۵۲	۱/۴	۱۵/۵	
۶۲	۲/۳	۱۸/۵	
۷۲			
۴	۲	۳	تعداد حالتها

بررسی‌های انجام شده در دو حالت ساحل طبیعی و وجود دیواره انعکاسی است. در این تحقیقات سایر شرایط در نظر گرفته شده از قبیل برخورد موج منظم و یا طیف امواج، وجود ساحل افقی و یا شیب دار، اجرای دیواره قائم و یا موج شکن سنگی با شیبهای مختلف در خط ساحلی و نتایج نسبتاً متنوعی را بدنبال داشته و روابطی نیز در این زمینه ارائه شده است. در جدول شماره (۱) مهمترین تحقیقات انجام شده طی سالهای اخیر در این زمینه معرفی شده است.

مجموعه تحقیقات معرفی شده اغلب با آزمایش در فلوم بصورت دوبعدی، همراه با تابش امواج منظم و نامنظم انجام و مشاهده شده است. در حال حاضر با وجود دسترسی به اطلاعات آزمایشگاهی و نیز مدل‌های عددی که جهت تخمین مشخصات جریانهای ساحلی و پیش بینی شرایط بستر دریا در مقابل سازه‌های احداثی در این ناحیه توسعه یافته‌اند، در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده و بعضاً عدم جامعیت اطلاعات آزمایشگاهی نتایج حاصل از روابط تجربی (بدلیل تنوع پارامترهای مؤثر و حث‌های مورد نظر) و مدل‌های عددی را به طور تقریبی در اختیار قرار داده و انجام تحقیقات تکمیلی در این زمینه را همچنان ضروری می‌سازد [Holmes(1996)].

یکی از موضوعات فراموش شده در مطالعات گذشته، بررسی پدیده آبستگي دریای دیواره قائم واقع شده بر روی ساحل شیب‌دار و در شرایط شکست امواج نزدیک شونده به ساحل است. Wang et al (2003) در مطالعات آزمایشگاهی اخیر خود در مرکز توسعه و تحقیقات ارتش آمریکا، تغییر شکل نیمرخ بستر ساحل طبیعی دریا را در شرایط نزدیک شدن امواج شکنا از نوع شیرجه‌ای و ریزشی مورد بررسی قرار دادند [Wang(2003)]. اما وجود اثر دیواره بر تغییر شکل بستر در زمان شکست امواج نزدیک شونده در تحقیق حاضر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق طی انجام آزمایش‌هایی شرایط هیدرودینامیکی وانتقال رسوب در مجاورت سازه ساحلی با اعمال امواج شکنا اندازه‌گیری و ثبت شده و در مرحله تحلیل کمی نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها جهت تشخیص نقش و چگونگی تاثیر هر یک از عوامل مؤثر در پدیده مورد بررسی و نیز بدست آوردن رابطه بین این اجزاء نسبت به استخراج روابط حاکم با بکارگیری اعداد بی بعد اقدام شده است. در این مطالعات با انجام آزمایش بر روی شرایط مختلف ساحل از جنبه وجود و عدم وجود سازه ساحلی، سعی شده است تا با شناخت نیروها، پارامترها و عوامل تاثیرگذار در بروز این پدیده بتوان بگونه‌ای مناسب و با دقتی بیشتر نسبت به پیش‌بینی وضعیت پروفیل بستر دریا در مقابل سازه ساحلی اقدام کرد. در ادامه به تشریح شرایط انجام آزمایش‌ها خواهیم پرداخت.



شکل ۲: نمای شماتیک و ابعاد فلوم امواج، مولد موج و موقعیت ساحل و سازه احداث شده  
(بدون مقیاس)

موتور دستگاه بترتیب ارتفاع و پریرود موج در فلوم تغییر می کند. بنابراین به منظور انجام آزمایش ها بر روی ساحل دارای سازه انعکاسی قائم، در ابتدا با وجود ساحل طبیعی مولد موج برای شرایط گوناگون طول بازو، دور موتور و عمق آب مورد آزمایش و واسنجی قرار گرفته و با اندازه گیری مشخصات موج در نواحی مختلف فلوم منحنی های مربوطه ترسیم شده است.

تجهیزات اندازه گیری مورد استفاده در این آزمایش ها عبارتند از دو دستگاه سنسور اندازه گیری مشخصات موج<sup>۱</sup> و ملزومات لازم جهت اتصال به رایانه با قابلیت اندازه گیری و ثبت اطلاعات امواج با ارتفاع حداکثر ۵۰ سانتیمتر و با دقت یک میلیمتر و فرکانس برداشت ۱۰ هرتز که این دستگاهها در دو نقطه در طول فلوم نصب شد.

یکدستگاه لیمینیمتر دیجیتالی<sup>۲</sup> جهت برداشت تغییر شکل بستر با دقت ۰،۰۱ میلیمتر مورد استفاده قرار گرفت، بطوریکه در پایان هر آزمایش (تابش ۲۰۰۰۰ موج) شکل پروفیل بستر در محور مرکزی فلوم به کمک لیمینیمتر دیجیتالی اندازه گیری شده است. دو دستگاه سنسور اندازه گیری سرعت سه بعدی جریان از نوع سرعت سنج داپلر<sup>۳</sup> با دقت یک میلیمتر بر ثانیه که در اینجا جهت اندازه گیری سرعت از فرکانس ده هرتز استفاده شده است (شکل ۴).

با توجه به شکل و عملکرد دستگاه به منظور برداشت میزان سرعت در نقاط مختلف لازم است نوک سنسور در محل های خاصی تنظیم شود سپس دستگاههای مذکور برای اندازه گیری در یک شبکه نقاط بر روی ریل های قابل تنظیم نصب و به سیستم ثبت ضبط اطلاعات متصل شد (شکل ۵).

پس از انجام آزمایش های مقدماتی با تابش ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ۷۵۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ موج به ساحل متحرک و ثبت حداکثر تغییر شکل بستر، مشاهده شد که برای امواج مختلف بطور متوسط ۹۵ درصد از تغییر شکل پروفیل ساحل پس از برخورد ۱۰۰۰۰ موج رخ داده و کمتر از ۵ درصد از تغییرات داده موج بین ۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ رخ خواهد داد.

### شرایط آزمایشگاهی و اندازه گیریها

برای انجام این تحقیق چهار حالت مختلف از جنبه شرایط فیزیکی ساحل در نظر گرفته شد. این چهار حالت در شرایط وجود سازه و یا ساحل طبیعی، دارای بستر ثابت (صلب) و یا بستر متحرک بصورت جدول (۲) تقسیم بندی شده است. همچنین با ثابت نگه داشتن موقعیت سازه، دانه بندی رسوب و نیز نصب بصورت قائم، سایر متغیرهای هیدرولیکی مطابق با مقادیر مندرج در جدول (۳) در نظر گرفته شده اند.

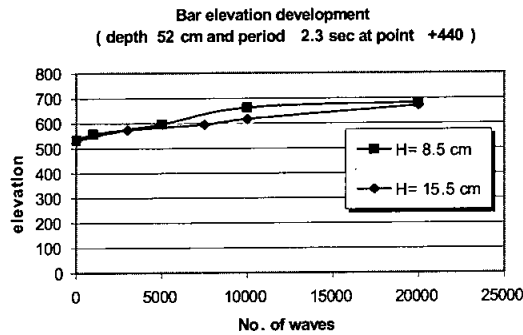
آزمایش های حاضر در یک فلوم امواج ساخته شده از مصالح بنایی دارای طول ۳۵ متر و ابعاد مقطع ۱۰۰×۹۵ سانتیمتر در محل مرکز تحقیقات آب وزارت نیرو انجام شده است (شکل ۲). جداره فلوم مزبور از جنس سیمان پوشیده و سپس صیقلی شده است. در انتهای بالادست فلوم یک مولد موج منظم از نوع پیستونی با ابعاد مقطع فلوم نصب و در انتهای دیگر ساحل آزمایش موردنظر اجرا شده است. دیواره طرفین این قسمت از فلوم به منظور ایجاد امکان مشاهده پدیده های گوناگون بطول پنج متر از جنس شیشه ساخته شده و امکانات لازم جهت تمیبه و نصب تجهیزات اندازه گیری پارامترهای مختلف بر روی فلوم (نظیر پایه و ریل) در نظر گرفته شده است.

جدول ۴ مشخصات رسوبات بستر

Soil Name	D <sub>50</sub> (mm)	Cu	Cc	S <sub>t</sub>
MIX 1C-1E	0.35	5.5	2.41	2.625

پروفیل طبیعی بستر دریا در مجاورت ساحل بصورت شیب ثابت دارای نسبت قائم به افق ۱:۱۲ و از جنس ملات سیمان احداث و در شرایط وجود بستر متحرک، لایه های از رسوب به ضخامت ۲۰ سانتیمتر بر روی آن اجرا شده است. به منظور جلوگیری از تجمع و بهم پیوستگی دانه ها، رسوبات مورد استفاده از نوع سفال پخته شده دارای مشخصات جدول (۴) انتخاب شد.

مکانیزم عملکرد مولد موج بگونه ای است که با تغییر طول بازو و دور

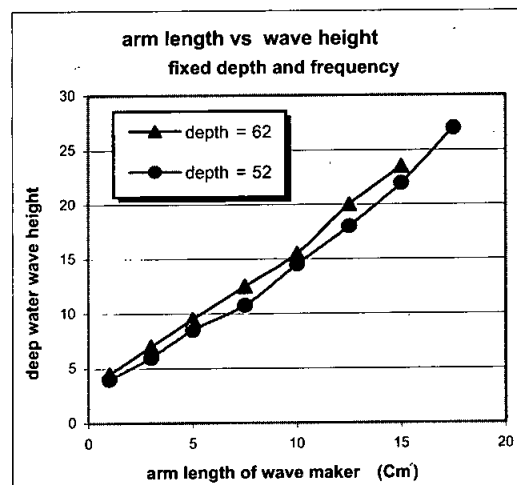
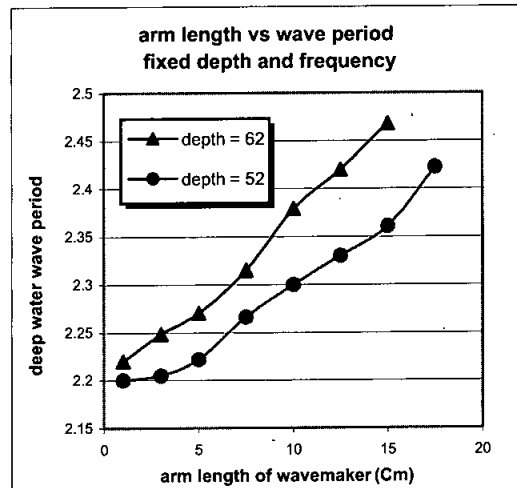


شکل ۶ منحنی تغییر تراز یک نقطه شاهد در بستر طی اعمال تعداد امواج مختلف با دو ارتفاع موج

با توجه به تغییرهای میدان سرعت بر روی شیب بستر دریا در مجاورت خط ساحلی، یکی از پدیده‌های قابل مشاهده در جابجایی رسوبات بستر در این ناحیه، تغییر ترکیب دانه‌بندی رسوب‌ها از حالت یکنواخت به حالت طبقه‌بندی شده است. به منظور بررسی چگونگی این تغییرها ضمن نمونه برداری از رسوب‌های کف و آنالیز نمونه‌ها مشاهده گردید رسوب‌های درشت دانه بسمت دیواره و ذرات ریزدانه در جهت مخالف حرکت کرده و ته نشین شده‌اند. همچنین تعلیق رسوب‌های نرم بواسطه اغتشاش جریان، توام با جریانات زیر کشند، حرکت آنها بسمت پاروی مولد موج را موجب گردیده که این امر تا زمان آرامش کامل محیط آبی (توقف مولد موج) ادامه می‌یابد.

بر اثر این پدیده از ته نشینی رسوبات ریزدانه در ناحیه ساحلی کاسته شده و عمدتاً وجود این ذرات را در نواحی آرامتر با عمق بیشتر شاهد هستیم. در این آزمایش‌ها ضخامت لایه رسوبی بسیار ریزدانه‌ها در سمت آب عمیق فلوم به حدود یک میلیمتر رسیده است. بروز فرسایش بستر در نقاط شکم (در حالت ایجاد امواج ایستا) و رسوبگذاری در گره‌ها، ایجاد چینه‌هایی در بستر را به همراه داشته که به مرور بسمت ناحیه دور از ساحل حرکت کرده تا جایی که اثر موج بر بستر به حداقل می‌رسد (خارج از محل شکست موج، به سمت مولد موج). تصویری از نحوه جابجایی و ته نشینی رسوب‌های بستر در شکل (۷) ارائه شده است.

جهت تشخیص نوع و حالت انتقال رسوب‌های ریزدانه‌ها و درشت دانه معیارهای IRIE و XIE مورد بررسی و مقایسه با شرایط موجود قرار گرفته‌اند [Shileng(1985)]. براساس مشاهدات انجام شده در آزمایش‌های حاضر، دانه‌های رسوب از نقاط ضد گرهی (شکم) به سمت نقاط گرهی انتقال یافته و در آنجا ته‌نشین می‌شوند، در نتیجه شاهد ایجاد پشته‌ها در زیر نقاط گرهی و حفره‌های آبستگي در محدوده مابین نقاط گرهی و شکم هستیم که یافته‌های قبلی نیز موید این رفتار است.

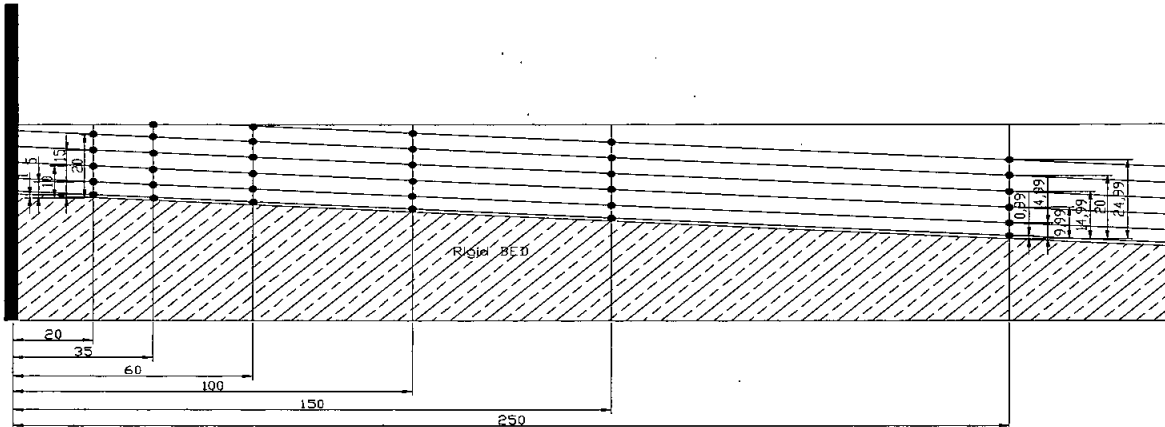
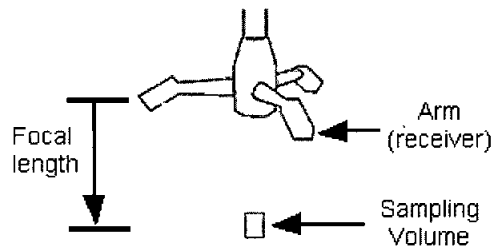


شکل ۴ نمونه منحنیهای کالیبراسیون مولد موج

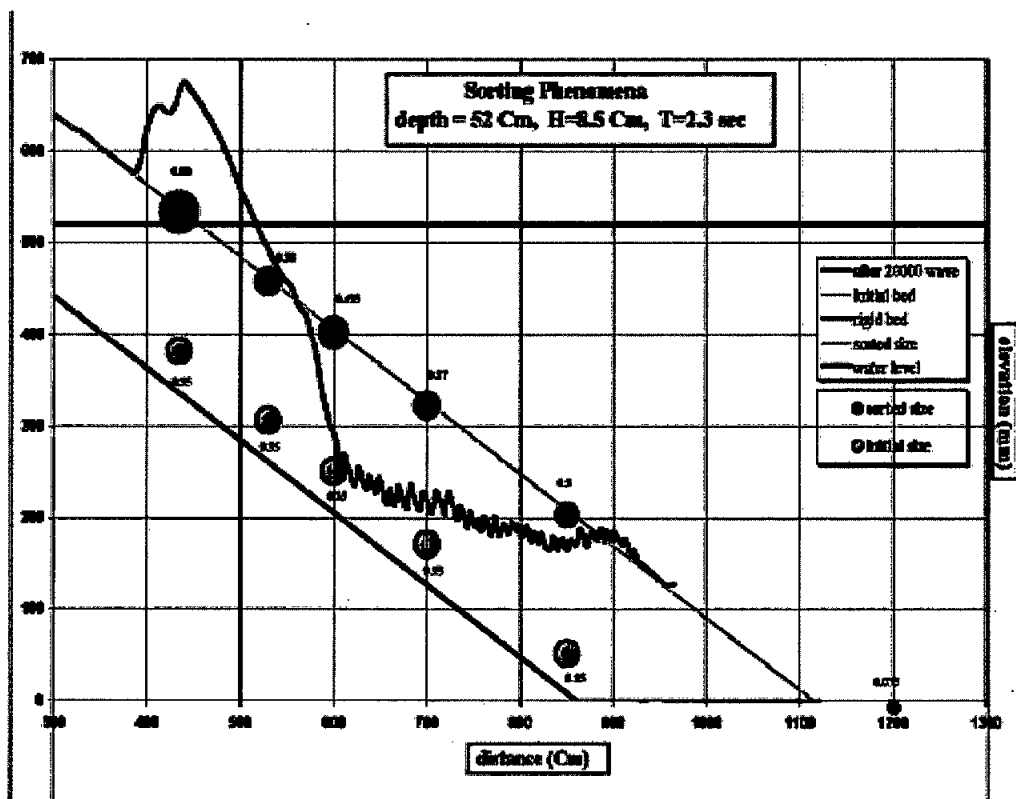
به منظور نمایش این موضوع نمونه‌ای از تغییرهای تراز بستر پس از اعمال تعداد مختلف امواج، برای نقطه شاهدی دارای بیشترین تغییر در منحنی شکل (۶) ترسیم شده است. پس از انجام هر آزمایش بلعت وقوع پدیده رده‌بندی<sup>۴</sup> (با حرکت دانه‌های درشت بسمت ساحل و ریزدانه‌ها بسمت آب عمیق، لکه‌بندی رسوبات ادرشت بسمت ساحل و ریزدانه‌ها بسمت آب عمیق، لکه‌بندی رسوبات از یکنواختی اولیه خود خارج می‌شود) با خشک کردن و اختلاط مجدد رسوبات شرایط برای انجام آزمایشهای بعدی مهیا شده است.

### ۳- تحلیل نتایج

در ابتدا ضمن تشریح پدیده‌های رخ داده در حین انجام آزمایش‌ها، به تحلیل کیفی مشاهدات پرداخته، سپس ضمن معرفی اعداد بی بعد اصلی، تحلیل کمی بر روی نتایج صورت پذیرفته است.



شکل ۵: موقعیت نقاط برداشت سری زمانی سرعت در هر آزمایش (ابعاد به سانتی متر)



شکل ۷: تغییرهای دانه بندی رسوب های بستر پس از تابش ۲۰۰۰۰ موج (پدیده sorting)

#### ۴-۱- تغییر شکل نیمرخ بستر در ناحیه ساحلی

چنانکه ذکر شد در مجموعه آزمایش های حاضر، اثر برخورد امواج شکنا به دیواره و تغییر شکل بستر مورد بررسی قرار گرفته است. نوع شکست مورد نظر از نوع شیرجه‌ای<sup>۵</sup> در نظر گرفته شده است. جهت اعمال موج با شکست شیرجه‌ای از تعریف Iribarren & Nogales بر اساس معیار شکست  $\xi$  که طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود استفاده شده است [Sorensen(1997)].

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}} \quad (1)$$

در جایی که  $\alpha$  عبارت است از شیب ساحل و  $L_0$  نیز طول موج در آب عمیق را نمایش می‌دهد. بر اساس معیار فوق در صورتی که  $\xi$  در محدوده نامساوی ذیل قرار گیرد، شکست موج از نوع شیرجه‌ای خواهد بود.

$$0.4 \leq \xi \leq 2.0$$

ضمن آنکه چگونگی شکست موج از طریق مشاهده در فلوم نیز مورد کنترل قرار گرفته است. با اعمال امواج شکنا در نمونه آزمایشگاهی، تغییرهای نیمرخ ساحل برداشت شده است. بعنوان نمونه از نتایج مجموعه آزمایش های حاضر نیمرخ ساحل در دو مورد از حالت های ساحل طبیعی و با وجود دیواره قائم در شکل شماره (۸) ترسیم شده است.

چنانکه در این شکل مشاهده می‌شود در حالت وجود ساحل طبیعی رسوب‌ها از نقطه خاصی برداشته شده و در نقطه‌ای دیگر ته نشین می‌شوند. در واقع در این حالت عمدتاً یک نقطه فرسایش و یک نقطه رسوب گذاری داریم. در حالی که با وجود دیواره شاهد رسوب گذاری و فرسایش متناوب در مقابل سازه خواهیم بود. این امر بدلیل ایجاد امواج ایستا در مقابل دیواره قائم بوده و مشاهده مشخصات موج و اندازه‌گیری مقادیر سرعت این موضوع را تایید می‌کند. منحنی‌های ترسیم شده در شکل (۹) مقادیر

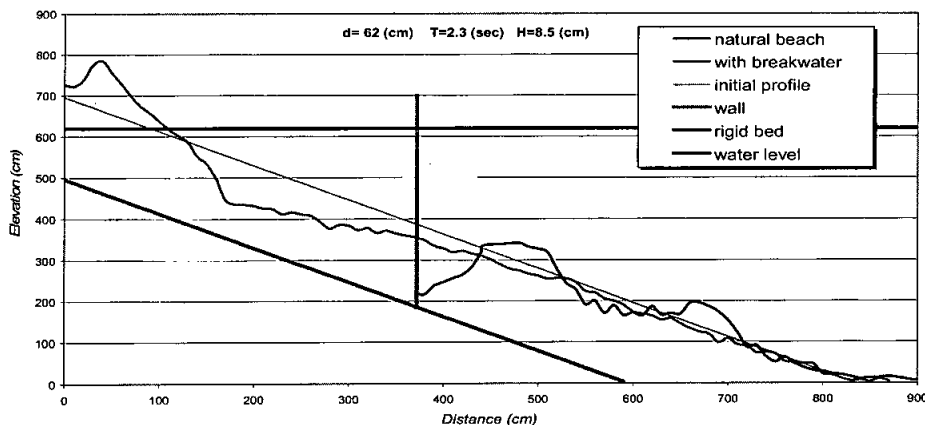
حداکثر سرعت افقی و قائم جریان در بستر را در فاصله‌های مختلف برای حالت های ساحل طبیعی و با وجود دیواره به نمایش گذاشته است. در این منحنی‌ها افزایش سرعت نسبی جریان در بستر پس از نصب دیواره قائم در محل ایجاد شکم موج و کاهش سرعت در نقاط گریه را شاهد هستیم که این امر بترتیب فرسایش و رسوب گذاری در مجاورت دیواره را به دنبال داشته است.

منحنی‌های شکل (۹) حکایت از تغییر قابل ملاحظه در بزرگی بردارهای سرعت افقی با نصب دیواره قائم دارد در حالی که میزان تغییرهای سرعت قائم قبل و بعد از نصب دیواره به نسبت کمتر بوده و در فواصل دورتر از محل قرارگیری دیواره، به شرایط طبیعی نزدیک می‌شود. در مرحله تحلیل کمی نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها، جهت تشخیص نقش و چگونگی تاثیر هر یک از عوامل دخیل در پدیده مورد بررسی و نیز بدست آوردن رابطه بین این اجزاء، در ابتدا نسبت به بی بعد کردن پارامترهای اصلی اقدام شده است [Daloui A.H.(2003)]. با عنایت به اینکه عمق آبستگی تابعی از پارامترهای ذیل است، لذا داریم:

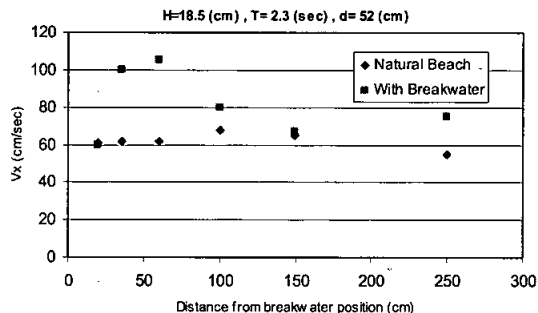
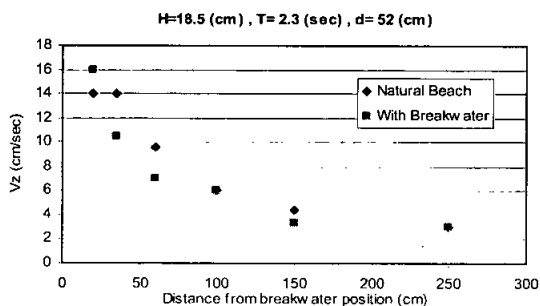
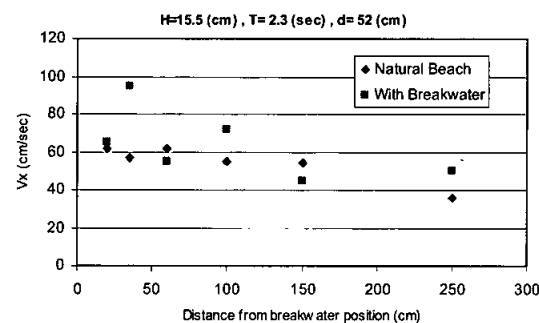
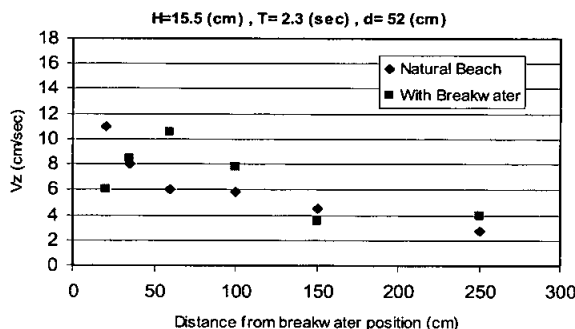
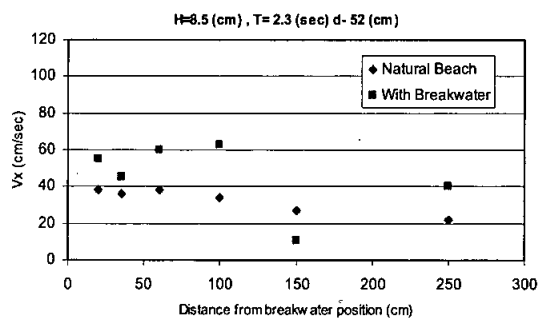
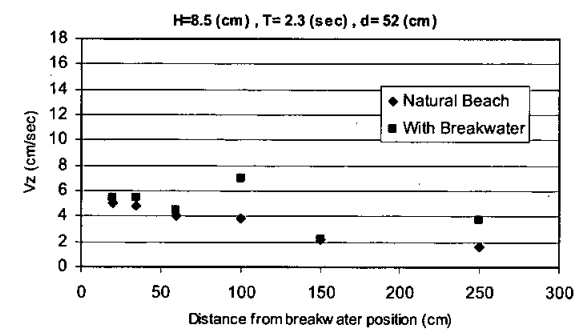
$$S = f(H, X_b, h_w, L_0, g, \rho)$$

در فرآیند استخراج پارامترهای بی بعد دو پارامتر  $\rho$  و  $g$  حذف شده و سایر ترمها به جهت دارا بودن دیمانسیون مشابه بصورت نسبت‌های دو به دو بی بعد شده‌اند. بر اساس قوانین حاکم بر پارامترهای بی بعد امکان ترکیب این پارامترها با یکدیگر وجود داشته که بر این اساس بخشی از این پارامترهای بی بعد شده برای میزان عمق آبستگی در مقابل سازه ساحلی بشرح ذیل استخراج شده اند:

$$S/h_w, H/L_0, h_w/H, X_b/L_0$$



شکل ۸ نمونه تغییر شکل نیمرخ بستر در دو حالت ساحل طبیعی و شرایط وجود دیواره



شکل ۹: نمودار نمایش مقادیر سرعت‌های افقی و قائم در شرایط ساحل طبیعی و وجود دیواره قائم

موج نیز در روابط مدنظر بوده است). در ابتدا وابستگی پارامترهای  $S/h_w$  و  $X_b/L_0$  به کمک نتایج آزمایشگاهی در شکل (۱۰) ترسیم شده است. رابطه منحنی مزبور بصورت زیر است.

$$\frac{S}{h_w} = 0.2417 \exp\left(2.8784 \frac{X_b}{L_0}\right) \quad (2)$$

در این شکل مشاهده می شود که با ثابت بودن طول موج (و یا پریود موج)، در صورت افزایش ارتفاع موج، نتیجتاً تیزی موج ( $H/L_0$ ) افزایش یافته و فاصله محل شکست تا دیواره ( $X_b$ ) و در نتیجه نسبت  $X_b/L_0$  افزایش می‌یابد. طبق منحنی شکل (۱۰) در این حالت نسبت  $S/h_w$  نیز افزایش یافته و با ثابت بودن مقدار عمق آب در پای دیوار ( $h_w$ ) در واقع

در اینجا تغییرهای نسبت‌های فوق در شرایط مختلف آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و با رسم منحنی‌های مربوطه چگونگی تغییرهای مقدار حداکثر عمق آبستگي در مقابل دیواره قائم در اثر تغییر مشخصات محیطی تشریح شده است. در این مقاله به جهت اختصار نمونه‌هایی از منحنی‌های تهیه شده ترسیم و روابط استخراج شده ارائه شده است.

#### ۴-۲- عمق آبستگي در پای دیواره قائم

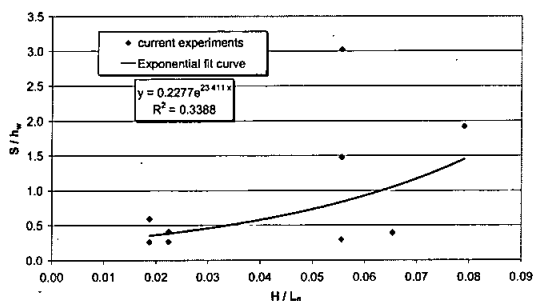
با عنایت به وجود سطح شیبدار در این مجموعه آزمایش‌ها، پارامتری بعد  $S/h_w$  جهت ارزیابی در مقابل تغییر پارامترهای  $H/L_0$  و  $X_b/L_0, h_w/H$  انتخاب و با ترسیم منحنی‌های مربوطه رفتار بستر در شرایط گوناگون بررسی شده است (با در نظر گرفتن پارامتر  $L_0$  در واقع تاثیر تغییرهای پریود



در حالت برخورد امواج منظم حدوداً ۲۰ درصد بیشتر از شرایط مشابه در زمان وجود طیف امواج است.

این موضوع در تحقیقات انجام شده توسط Sumer and Fredsoe (2000) نیز مورد بررسی قرار گرفته و برای شرایط وجود موج شکنهای سنگی عمق آبستگی برای زمان برخورد طیف امواج نصف و یا کمتر از نصف زمان برخورد موج منظم پیش بینی شده است. رابطه منحنی شکل شماره ۱۲ نیز به صورت زیر است.

$$\frac{S}{h_w} = 0.2277 \exp\left(23.411 \frac{H_0}{L_0}\right) \quad (4)$$



شکل ۱۲: منحنی نمایش وابستگی پارامترهای  $S/h_w$  و  $H/L_0$

در این مرحله با بدست آوردن رابطه بین نسبتهای بی بعد فوق الذکر، تابع مفروض برای منحنیهای ترسیم شده جهت محاسبه عمق آبستگی به صورت کلی ذیل تعریف شده و با در نظر گرفتن حالتیهای گوناگون ترکیب روابط و مقایسه نتایج محاسبات تئوریک و اندازه گیریها، مناسبترین ترکیب بصورت حاصل جمع در نظر گرفته شده است.

$$\frac{S}{h_w} = f\left(\frac{x_b}{L_0}, \frac{h_w}{H}, \frac{H}{L_0}\right) \quad (5)$$

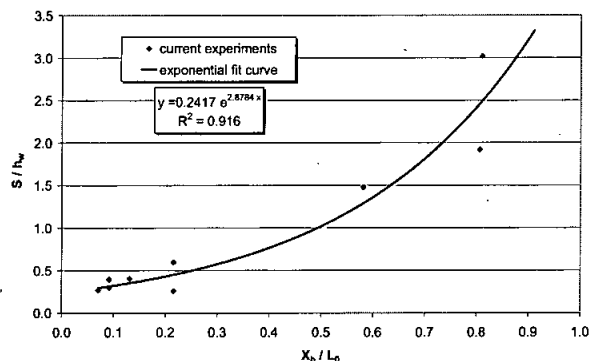
بنابراین با در نظر گرفتن رابطه (۶) میبایست ضرایب را با دقت مناسب بدست آوریم.

$$\frac{S}{h_w} = a * \exp\left(2.8784 \frac{x_b}{L_0}\right) + b * \exp\left(-1.9048 \frac{h_w}{H}\right) + c * \exp\left(23.411 \frac{H}{L_0}\right) \quad (6)$$

با محاسبه ضرایب a, b, c برای بهترین حالت برازش، رابطه (۷) به شکل ذیل استخراج می شود.

$$\frac{S}{h_w} = 0.26 * \exp\left(2.8784 \frac{x_b}{L_0}\right) + 0.2 * \exp\left(-1.9048 \frac{h_w}{H}\right) - 0.038 * \exp\left(23.411 \frac{H}{L_0}\right) \quad (7)$$

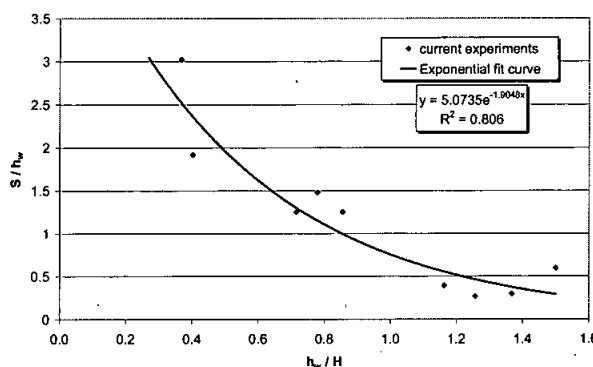
مقدار S که همان عمق آبستگی است افزایش خواهد یافت. از طرفی با ثابت بودن ارتفاع موج چنانچه افزایش طول موج داشته باشیم تیزی موج کاهش یافته و شکست موج در فاصله کمتری از دیوار رخ می دهد. در نتیجه با کاهش نسبت  $x_b/L_0$ ، طبق منحنی شکل (۱۰) نسبت  $S/h_w$  نیز کاهش می یابد. پس با افزایش طول موج (و یا پرود موج) و عدم تغییر عمق آب، عمق آبستگی کاهش خواهد یافت.



شکل ۱۰: نمایش وابستگی پارامترهای  $S/h_w$  و  $x_b/L_0$

رابطه منحنی شکل (۱۱) نیز به صورت زیر است.

$$\frac{S}{h_w} = 5.0735 \exp\left(-1.9048 \frac{h_w}{H}\right) \quad (3)$$



شکل ۱۱: نمایش وابستگی پارامترهای  $S/h_w$  و  $h_w/H$

از منحنی شکل (۱۱) نیز چنین استنباط می شود که با ثابت بودن عمق آب در پای دیواره، در صورت افزایش ارتفاع موج نسبت  $h_w/H_0$  کاهش و نسبت  $S/h_w$  افزایش خواهد یافت که این امر حکایت از بیشتر شدن عمق آبستگی دارد. طبیعاً عکس این موضوع نیز صادق بوده بطوریکه با کاهش ارتفاع موج عمق آبستگی نیز کمتر می شود. از طرفی با مقایسه نتایج حاصل از اعمال موج منظم با شرایط نسبتاً مشابه در حالت وجود طیف امواج در تحقیقات انجام شده توسط Fowler (1992) و در نظر گرفتن ارتفاع مشخصه موج بعنوان موج آب عمیق، مشخص شد عمق آبستگی

تغییر در نوع و محل شکست موج در سواحل طبیعی به تغییر نقطه رسوب گذاری و فرسایش منجر شده و در سواحل دارای دیواره با تغییر در میزان فرسایش در پای سازه همراه است، بطوریکه با نزدیک شدن محل شکست موج به دیواره، عمق حفره فرسایشی افزایش خواهد یافت. افزایش ارتفاع موج و متناسب با آن افزایش تیزی موج موجب افزایش عمق حفره آبستگي شده و از سوی دیگر افزایش طول موج کاهش عمق آبستگي را بدنبال دارد.

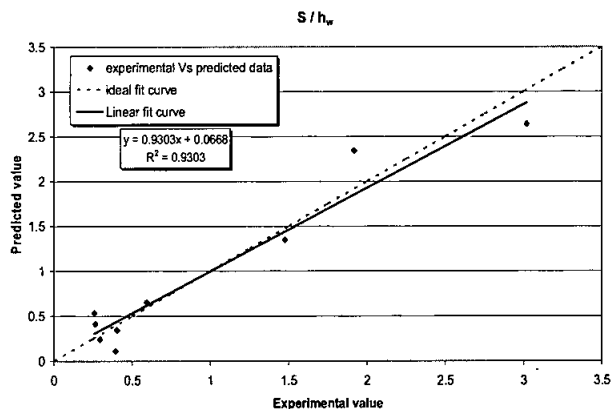
در زمان وقوع توفان، مقدار تغییر شکل بستر دریا در مقابل سازه های ساحلی سیر نزولی داشته و به مرور زمان از نرخ تغییرات کاسته خواهد شد. براساس نتایج آزمایشات حاضر مشخص شد که حدود ۹۵ درصد از تغییر شکل ساحل در برخورد ۱۰۰۰۰ موج اول رخ داده و پس از آن پروفیل ساحلی به حالت تعادل نسبی می رسد.

مقایسه نتایج آزمایش های انجام شده با اعمال امواج نامنظم در تحقیقات قبلی و مقایسه آن با اطلاعات برداشتی از شرایط وجود امواج منظم حاکی از بروز عمق آبستگي کمتر در حالت برخورد موج نامنظم بوده که علت اصلی این امر را می توان در وقوع پدیده شکست موج در نقاط متفاوت و توزیع یکنواخت تر جابجایی رسوب ها در طول شیب ساحلی برای امواج نامنظم دانست. در کارهای قبلی با انجام آزمایش بر روی ساحل افقی، فاصله بین پشته ها در حدود نصف طول موج بدست آمده است، بروز این پدیده در امواج ایستا با دقت بیشتری صورت پذیرفته که علت آن صفر شدن مقدار تنش برشی در بستر در فاصله های نصف طول موج (0.5L) عنوان شده است [Lin et al. (2002)]. این در حالی است که در آزمایش های حاضر بدلیل وجود سطح شیبدار این فاصله کمتر شده و پشته های تشکیل شده در بستر به یکدیگر نزدیکتر شده اند (به منظور ارزیابی میزان تغییرهای این فاصله، لازم است تا موضوع در قالب تحقیقات جداگانه ای با در نظر گرفتن شیبه های متفاوت ساحلی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد).

زمانی که موج در مسیر نزدیک شدن به ساحل می شکند، پدیده رده بندی رسوب کرد بیشتر خود را نشان داده و با حرکت رسوب های درشت دانه به سمت ساحل، دانه بندی رسوب ها در سمت دریا ریزتر خواهد شد.

با عنایت به اینکه در اینجا بدلیل محدودیت در تعداد آزمایشها از اثر دانه بندی رسوب های بستر در عمق حفره ایجاد شده صرف نظر شده است، در نتیجه کاربرد فرمول شماره (۷) به شرایط مشابه محیطی از این جنبه محدود می شود. بنابراین بررسی بیشتر موضوع برای حالت های گوناگون دانه بندی در انجام تحقیقات تکمیلی توصیه می شود.

در اینجا نیز به منظور سنجش میزان همخوانی نتایج حاصل از رابطه فوق با ارقام آزمایشگاهی، با ترسیم منحنی مربوطه، تعیین نقاط متناظر و برآزش منحنی بر آنها در شکل (۱۳) به بررسی موضوع پرداخته ایم. ترسیم نتایج آزمایشگاهی به همراه منحنی حاصل ازحل معادله استخراج شده، در شکل (۱۳) نشان دهنده همپوشانی دو دسته اطلاعات بوده و مقدار واریانس محاسبه شده نیز موید این موضوع است. بنابراین برای شرایط مشابه آزمایشگاهی و محیطی کاربرد رابطه مزبور تخمین مناسبی از وضعیت آبستگي در پای دیواره قائم ساحلی در شرایط نزدیک شدن امواج شکنا (از نوع شیرجه ای) بدست خواهد داد.



شکل ۱۳ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی مربوط به محاسبه عمق آبستگي در بستر

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج و روابط حاصل از انجام مجموعه آزمایش ها در تحقیق حاضر می توانند در محدوده اندازه گیری متغیرها، طبق موارد تشریح شده در متن مقاله حاضر مورد استفاده قرار گیرند.

در حالت نزدیک شدن امواج غیر شکنا، الگوی متناوب آبستگي و رسوبگذاری در مقابل دیواره خطوطی موازی با دیواره را ایجاد می کند [Ruessink (2000)] در صورتی که این موضوع با وجود شکست موج از نظم قبلی برخوردار نیست. اما در هر دو حالت براساس اندازه گیریهای انجام شده از مقادیر سرعت جریان در بستر و نیز نیمرخ بستر دریا مشخص شد که پس از اجرای دیواره ساحلی سرعت جریان بصورت تناوبی کم و زیاد شده و این تغییر در بردارهای سرعت شکل نوسانی بستر را به همراه داشته است. در بازه های در نظر گرفته شده برای متغیرهای اصلی در مجموعه آزمایش های حاضر، اثر وجود دیواره و نیز موقعیت قرار گیری آن (متناظر با تغییر عمق آب در پای دیواره) در چگونگی شکل گیری پروفیل بستر و ایجاد حفره های فرسایشی کاملاً مشهود است. این موضوع در مجموعه آزمایشهای انجام شده توسط (Neshaei (1997 نیز مورد تایید قرار گرفته است.

## ۵- تشکر

Lin , C., D.S. Jeng , C.N. Jeng (2002), "An experimental study on the flow characteristics of a standing wave: application of FLDV measurements". *Ocean Engineering*, Vol. 29, pp.1265-1282.

Neshaei, M. A. L. (1997), "Beach Profile Evolution in Front of a Partially Reflective Structure". Ph.D. Thesis, Imperial College, University of London.

Rakha, K. A. , Deigaard, R. and Broker, I. (1997), "A Phase-Resolving Cross-Shore Sediment Transport Model for Beach Profile Evolution". *Coastal Engineering*, Vol. 31, pp. 231-261.

Ruessink, B. G., I.M.J. van Enckevort, K.S. Kingston, M.A. Davidson (2000). "Analysis of observed two- and three-dimensional nearshore bar behavior". *Marine Geology*, Vol 169, pp. 161-183.

Shileng X. (1985). "Scouring patterns in front of vertical breakwaters". Institute of Navigation Eng, Tianjin , ACTA OCEANOLOGICA SINICA, Vol4. No 1, January 1985, pp: 153-164

Sorensen M. (1997), "Basic Coastal Engineering". Text book. Kluwer Academic Publishers Group.

Srinivas, R. , Dean R. G. (1996), "Cross-shore hydrodynamics and profile response modeling". *Coastal Engineering*, Vol. 27, pp. 195-221.

Sumer, B.M., and Fredsoe, J., (2000), " Experimental study of 2D Scour and it's protection at a rubble- mound break-water", *J. of Coastal Engineering* , V.40, pp: 59-87.

Wang P. , Ebersole B. A. , and Smith E. R. (2003), "Beach-Profile Evolution under Spilling and Plunging Breakers" . *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering/ Jan.-Feb.*, pp. 41-46.

در اینجا ضمن اشاره به حمایت‌های مالی سازمان مدیریت منابع آب ایران جهت انجام پروژه حاضر، جا دارد از مسئولین مرکز تحقیقات آب وزارت نیرو بواسطه در اختیار قراردادن فضا و سایر امکانات آزمایشگاهی مورد نیاز تقدیر و تشکر بعمل آید.

## پی نوشت ها :

1. Wave Height Meter
2. Digital Point Gauge
3. Acoustic Doppler Velocity meter (ADV)
4. Sorting
5. Planging

## ۶- مراجع

Coastal Engineering Manual (1998), Part III, Chapter 3. "Cross-Shore Sediment Transport Processes". U.S. Army Corps of Engineers.

Daloui A.h.(2003), "Experimental study of scouz at the tae of vertical well breakwaters", Msc theris, sharif university of technology.

Fowler, J. E., (1992), "Scour problems and methods for prediction of maximum scour at vertical seawalls", Technical report CERC-92-16, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Miss.

Holmes, P. and Neshaei, M.A.L. (1996), "The Effect of Seawalls on Coastal Morphology". Proceeding of the Second IAHR Symposium on Habitats Hydraulics, Ecohydraulics 2000. Vol. A, pp. 525- 530.

Kamphuis, J.W. (2000), "Coastal Modelling Into the Next Millennium" *Coastal Engineering* , Vol. 30, pp. 23-52.