



## Investigation of Cross Shore Sediment Transport Using Physical and Numerical Methods

M. A. Lashteh Neshaei<sup>1</sup>, A. Matin Seresht<sup>2</sup>,  
M. Monshizadeh<sup>3</sup> and F. Hatami<sup>4</sup>

### Abstract

Efforts have been made to estimate the sediment transport and beach profile evolution during storm conditions based on surf zone hydrodynamics. This study compensates, to some extent, for the lack of information describing the coastal processes, particularly cross shore sediment transport and short term beach profile evolution in response to storm events. In this regard, following extensive series of experiments, the Litpack model is used to predict the beach profile evolution in an artificial beach. The profile evolution results predicted by the model compared to those found in the experimental measurements are illustrated clearly. The accuracy of the model is still to be improved; nevertheless, the results illustrate the feasibility of the Litpack model to predict the beach profile evolution in coastal regions. The main objectives of these experiments were to undertake a quantitative comparison of cross shore sediment transport and beach profile evolution with different sizes of sand. Increasing the size of beach material results in reduction in cross shore sediment transport and beach profile evolution for coarse beaches. The results obtained from the model compared to the experimental results are promising and encouraging for further modeling developments. Comparison of the results obtained from experiments and numerical models show that the Litpack program can predict the full scale behavior of beaches with reasonable accuracy, however, due to the scale effects its prediction for the laboratory conditions is not very decisive.

**Keywords:** Wave, Current, Shoreline, Coastal Sediment Transport, Winter profile, Summer profile.

## مطالعه پدیده انتقال رسوب ساحلی در جهت عمود بر ساحل با استفاده از مدل فیزیکی و ریاضی

میر احمد لشته نشایی<sup>۱</sup>، ایوب متین سرشت<sup>۲</sup>،  
مرتضی منشی زاده<sup>۳</sup> و فرید حاتمی<sup>۴</sup>

### چکیده

در این مقاله پدیده انتقال رسوب ساحلی در جهت عمود بر ساحل و تغییرات بستر سواحل در اثر تکرار این پدیده با استفاده از دو روش مدل فیزیکی و ریاضی بررسی شده است. نتایج آزمایش با استفاده از مدل فیزیکی ساخته شده نشان داد که در دانه‌بندی مصالح رسوبی، با افزایش  $D_{50}$  مصالح مورد استفاده از شدت تخریب ساحل کاسته شده و پشته ایجاد شده به سمت ساحل متمایل گردیده و ارتفاع آن نیز کاهش یافته است. همچنین با افزایش شیب ساحل شبیه‌سازی شده، شدت تخریب ساحل شدیدتر و پشته ایجاد شده به سمت دریا متمایل گردیده و ارتفاع آن نیز کاهش یافته است. در بررسی دانه‌بندی مصالح و شیب ساحل نیمرخ‌های ساحلی زمستانه تشکیل گردید در حالیکه در تأثیر ارتفاع موج، نیمرخ تابستانه نیز تشکیل گردید. آزمایشها برگشت‌پذیری پدیده انتقال رسوب عمود بر ساحل را نیز تأیید کردند. در مدل ریاضی از برنامه Litpack (Littoral Processes and Coastline Kinetics) موسسه DHI دانمارک استفاده شد که مقایسه نتایج آن با مدل فیزیکی نشان داد که این مدل شرایط واقعی را پیش‌بینی می‌نماید و دقت آن در شرایط مدل فیزیکی به دلیل تأثیرات ناشی از مقیاس بسیار کم است.

**کلمات کلیدی:** موج، جریان ساحلی، رسوب ساحلی، نیمرخ زمستانه، نیمرخ تابستانه

1. Assistant Professor, Dept. of Civil Eng. Guilan University, Rasht, Iran.  
2. Instructor, Dept. of Architectural Eng. Guilan University, Rasht, Iran.  
3. Researcher, Water Resource Center, Tehran, Iran.  
4. MSc. Student, Dept. of Civil Eng. Guilan University, Rasht, Iran.

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی دانشگاه گیلان  
۲- مربی گروه معماری، دانشکده معماری دانشگاه گیلان  
۳- کارشناس مرکز تحقیقات آب وابسته به وزارت نیرو  
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی دانشگاه گیلان

۱- مقدمه

در این رابطه  $W$  سرعت سقوط ذرات بستر و تابعی از قطر متوسط ذرات یعنی  $D_{50}$  بوده و از روابط زیر محاسبه می شود:

$$0.001^{mm} < D_{50} < 0.1^{mm} \quad W = \frac{(s-1)gD_{50}^2}{18\nu} \quad (3)$$

$$0.1^{mm} < D_{50} < 1^{mm} \quad (4)$$

$$W = \frac{10\nu}{D_{50}} \left[ \left( 1 + \frac{0.01(s-1)gD_{50}^3}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right]$$

$$D_{50} > 1^{mm} \quad W = 1.1[(s-1)gD_{50}]^{0.5} \quad (5)$$

در معادلات فوق  $g$  شتاب ثقل،  $s$  چگالی رسوبات ساحلی و  $\nu$  لزجت سینماتیکی آب دریا می باشند.

مطالعات محققین (Dean (1991) و Lashteh Neshaei (1997)، (Hogue et al. (2001)، Lashteh Neshaei & Asano (2000) نشان می دهد که نیمرخ سواحل در فصول مختلف سال به صورت زیر تغییر می نماید:

در فصل زمستان که ساحل در معرض امواج طوفانی با ارتفاع نسبتاً زیاد قرار دارد در اثر شکست امواج در ناحیه ساحلی و آشفستگی ناشی از آن رسوبات ساحلی در نزدیکی ساحل دچار فرسایش شدید گشته و در اثر جریان برگشتی ناشی از موج به سمت دریا حرکت می نمایند. این رسوبات در محدوده ای در حوالی ناحیه شکست موج با رسوب منتقل شده به سمت ساحل در جهت عکس ( به علت حرکت موج به سمت ساحل) برخورد نموده و از تداخل آنها و ته نشینی این رسوبات یک برآمدگی یا پشته تقریباً به موازات خط ساحلی و در حوالی محدوده شکست موج ایجاد می شود.

در فصل تابستان که امواج نسبتاً ملایم هستند، عکس حالت نیمرخ زمستانی رخ خواهد داد. بدین معنی که به دلیل کوچک بودن ارتفاع امواج ورودی به ساحل و کمبود انرژی ناشی از شکست امواج بزرگ، جهت حرکت رسوبات ساحلی عموماً به طرف ساحل بوده و رسوبات ته نشین شده در حوالی منطقه شکست موج به طور تدریجی به سمت ساحل پیشروی می نمایند و لذا تشکیل یک شیب نسبتاً تند در مجاورت خط ساحلی محتمل می باشد. لذا مشخص است که هرچه ارتفاع موج بیشتر باشد احتمال وقوع پروفیل زمستانی بیشتر خواهد بود.

سواحل دائماً در معرض هجوم امواج قرار داشته و لذا نیمرخ طولی آنان به طور متناوب در حال تغییر می باشد. این تغییرات عمدتاً در مجاورت ناحیه ساحلی که در آن اثرات ناشی از شکست امواج مشهودتر است رخ می دهد. منظور از ناحیه ساحلی ناحیه ای است که از آن به بعد موج پیش رونده ایجاد شده در آب عمیق وارد منطقه کم عمق ساحلی شده و اثرات کف بستر بر روی موج محسوس می باشد. عرض ناحیه ساحلی که در آن پدیده شکست امواج صورت می گیرد تابعی از ارتفاع موج و وضعیت ناهمواری های بستر دریا می باشد.

با توجه به اینکه نیمرخ سواحل ماسه ای دائماً در اثر هجوم امواج در حال تغییر و تحول می باشد، لذا دست یافتن به یک نیمرخ تعادلی در حالت پایدار برای این گونه سواحل امری ناممکن می باشد. با این وجود مطالعات (Dean (1991) نشان می دهد که همواره می توان یک نیمرخ تعادلی برای سواحل ماسه ای تعریف کرد که نوسانات بستر دریا حول آن صورت می گیرد. بدیهی است که چنین نیمرخ در واقعیت هرگز وجود خارجی نداشته و تنها معرف وضعیت متوسط رفتار بستر سواحل در اثر هجوم امواج است. در تعیین معادلات شکل نیمرخ سواحل ماسه ای شرایط زیر لحاظ می شود:

- ساحل از نوع ماسه ای بوده به قسمی که سرعت ته نشینی (سقوط) متوسط ذرات بین دو حد ۱ تا ۱۰ سانتیمتر بر ثانیه باشد.
- شکل تعادلی ناحیه ساحلی متناسب با افت انرژی ناشی از شکست امواج فرض شود.
- ارتفاع موج در ناحیه ساحلی پس از شکست ضریبی ثابت از عمق آب باشد.

با استفاده از فرضیات فوق نهایتاً معادله سهمی شکل زیر که شکل نیمرخ سواحل ماسه ای را تعریف می کند بدست می آید:

$$h = Ax^{2/3} \quad (1)$$

که در آن  $h$  عمق آب در هر نقطه به فاصله  $x$  از خط ساحلی بوده و پارامتر  $A$  ضریبی است که از رابطه زیر پیروی می نماید:

$$A = 2.5 \left( \frac{W^2}{g} \right)^{1/3} \quad (2)$$

در مدل سازی اخیر نیز با احتساب مجموع مولفه‌های موجود، مقطع ساحل شبیه سازی شده است. مهمترین متغیرهای فیزیکی در نظر گرفته شده در مسأله انتقال رسوب ساحلی در چهار دسته متغیرهای سیال، جریان، هندسی و رسوب، مطابق با جدول (۱) می‌باشد.

اساس شبیه سازی فیزیکی نسبت‌های بدون بعد از متغیرهای ذکر شده در جدول (۱) می‌باشد. در این میان انتخاب ترکیب مناسب از این نسبت‌های بدون بعد مهم است. در ساخت مدل از ترکیب زیر استفاده شده است (Kamphuis 1991):

$$\Pi_H = f\left(\frac{H}{L}, \frac{h}{L}, \frac{x}{L}, \frac{y}{L}, \frac{z}{L}, \frac{n}{L}, t\sqrt{\frac{g}{L}}, \frac{v}{L\sqrt{gL}}\right) \quad (6)$$

در مقیاس گذاری مشخصه‌های فیزیکی از معیار فرود و در شبیه سازی ابعادی محدوده مطالعه از مدل هندسی مستقیم استفاده شده است. بر این اساس خصوصیات ابعادی مدل ساخته شده به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

۱- مقطع طراحی شده ترکیبی از دو بخش ثابت و شکل پذیر می‌باشد، که قسمت ثابت حجم خاکریزی مدل را کاهش داده و در عین حال مراحل بازسازی ساحل و اجرای مجدد آزمایش‌ها را تسهیل می‌کند. ابعاد این بخش از مدل بر اساس تأمین ضخامت بستر در قسمت فرسایش پذیر مقطع تعیین و انتخاب گردیده است. بخشی از بستر ثابت نیز به صورت شیب مصنوعی، مرز ابتدایی بستر شکل پذیر را از محدوده فلوم جدا می‌سازد، شکل (۱).

کشور ایران دارای سواحل طولانی و پر اهمیت در مرزهای شمالی و جنوبی است، از این رو شناخت دقیق رفتار سواحل، تغییرات فصلی و اندر کنش آنها با سازه‌های ساحلی، در طراحی سازه‌های دریایی؛ نظیر اسکله‌ها، دیوارهای ساحلی، موج‌شکن‌ها؛ از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. همچنین جهت تخمین میزان دقیق نقل و انتقالات ساحل و تعادل رسوبی در سواحل، نیاز مبرم به شناخت دقیق مکانیسم پدیده انتقال رسوب عمود بر ساحل می‌باشد. با توجه به کمبود اطلاعات لازم و مدون در این زمینه در کشور و اهمیت این پدیده، هدف اصلی مطالعات حاضر بر شناخت دقیق آن استوار است. بدین منظور با بهره گرفتن از یکی از مدل‌های ریاضی معروف در این زمینه (مدل Litpack) و مقایسه نتایج حاصل از آن در پیش بینی تغییر شکل بستر سواحل پس از وقوع طوفان و نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده سعی بر این بوده شناخت بهتری از رفتار ساحل در این خصوص صورت پذیرد.

## ۲- طراحی و شرح آزمایش‌های مدل فیزیکی

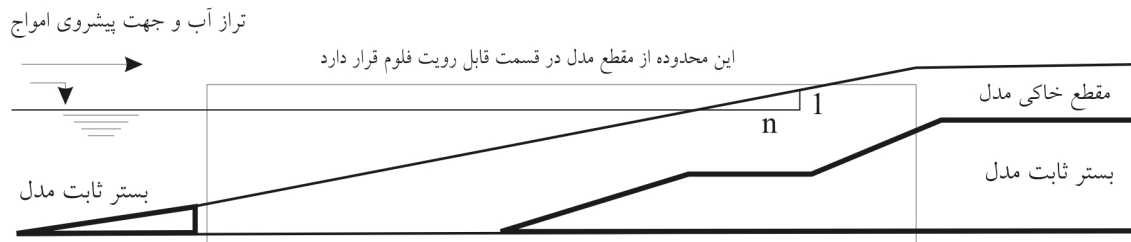
### ۲-۱- طرح مقطع مدل فیزیکی

وجود محدودیت‌های آزمایشگاهی، اثرات حدی و خطاهای مقیاسی، نتایج حاصل از ساخت نمونه‌های مقیاسی از سواحل و شرایط سیالاتی آن را با شاخص‌هایی همراه می‌سازد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- محدودیت در شبیه سازی کامل پدیده
- ۲- تقریب فیزیکی و جایگزینی اثر نیروهای غالب
- ۳- محدودیت در ایجاد کامل شرایط محیطی و سیالاتی نظیر دمای آب و هوا، غلظت آب، شرایط بستر و ...

جدول ۱- مهمترین متغیرهای فیزیکی در مسأله انتقال رسوب

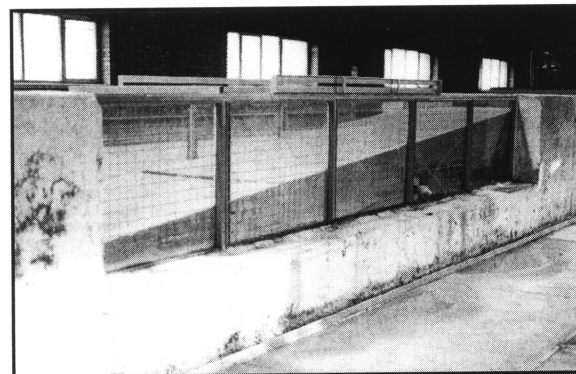
متغیرهای هندسی		متغیرهای سیال		متغیرهای جریان		متغیرهای رسوب	
h	عمق آب	$\rho$	چگالی سیال	n	زبری سطحی بستر	d	قطر ذرات رسوب
$\lambda$	مشخصه طول خطی	$\nu$	لزجت سینماتیکی سیال	g	شتاب ثقل	$\rho_s$	چگالی ذرات رسوب
x, y	محورهای مختصات در سطح			t	مشخصه زمان	$\tau_b$	تنش برشی بستر
z	مختصه در امتداد عمق			T	زمان تناوب موج	$W_s$	سرعت سقوط ذرات رسوب دانه
				H	ارتفاع موج		
				L	طول موج		



شکل ۱- نمایی از هندسه مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه

۲- بیشترین طول مقطع مدل (در راستای محور فلوم) ۸ متر می‌باشد که از این مقدار ۵ متر از محدوده شکل پذیر بستر در قسمت قابل رویت فلوم قرار دارد، شکل (۲).

۳- اثر کیفی شیب ساحل از طریق شبیه‌سازی مقاطعی با سه شیب مختلف بررسی شده است. به دلیل محدودیت طول قسمت قابل رویت فلوم و نیز تعدیل حجم عملیات ساحل‌سازی، شیب‌های ۱:۸، ۱:۱۰ و ۱:۱۲ انتخاب گردیده است.



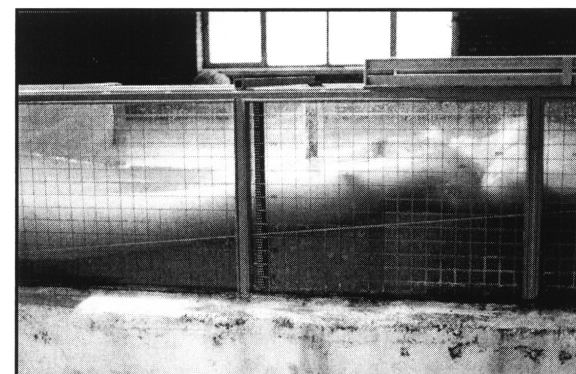
شکل ۱-۲- مقطع ساحل آزمایشی قبل از قرار گیری در معرض امواج

#### ۲-۲- دانه بندی مصالح رسوبی

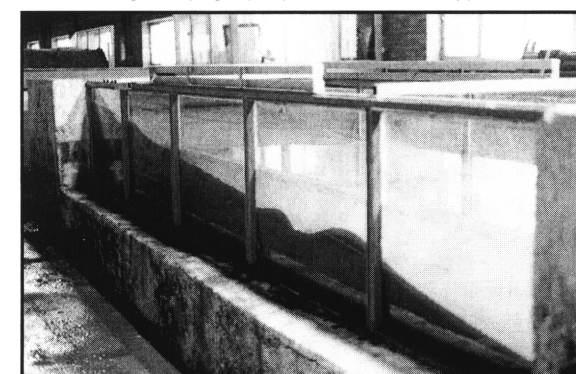
با ملحوظ نمودن هدف انطباق نسبی شرایط آزمایشگاهی با وضعیت عمومی سواحل شمالی کشور، لشته نشایی (۱۳۸۰)، ابعاد طبیعی رسوب دانه‌ها دارای حالتی ریز دانه خواهد بود. در این حالت اعمال مقیاس گذاری مستقیم بر روی قطر متوسط ذرات ریز رسوبی، علاوه بر مشکلات اجرایی و محدودیتی که تهیه حجم رسوبات مورد نیاز به همراه خواهد داشت، منجر به تشدید اثر خطای مقیاسی ناشی از افزایش اثر لزجت در رسوب دانه‌های مدل نیز خواهد شد. به منظور اجتناب از این دو مشکل، ابعاد رسوب دانه‌های مدل از طریق مدل‌سازی سرعت سقوط ذرات بین مدل و طرح اصلی تعیین می‌گردد. در این حالت بر اساس معیار تشابه فرود، رابطه زیر بین مقادیر اصلی و آزمایشگاهی سرعت سقوط برقرار خواهد بود با، Andrew(1999):

$$(W_s)_r = \sqrt{\lambda_r} \quad (7)$$

در جدول (۲) قطر متوسط رسوب دانه‌های مدل به ازای مقادیری از ابعاد رسوب طبیعی که بر اساس روش فوق بدست آمده؛ نشان داده شده است. شکل (۳) نیز منحنی دانه‌بندی مصالح رسوبی مورد استفاده را نشان می‌دهد.



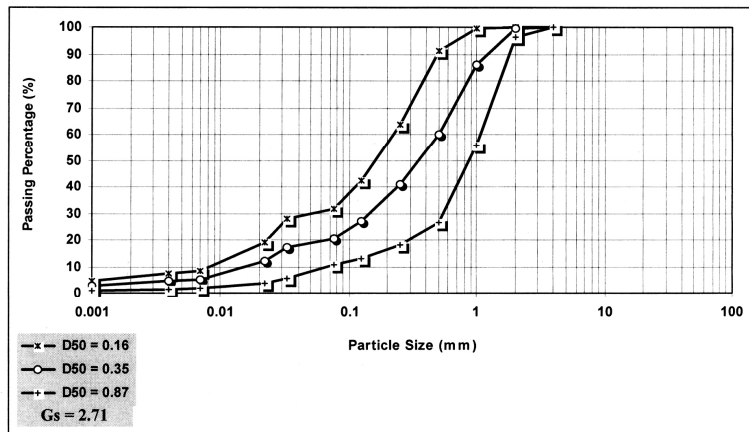
شکل ۲-۲- حالت اندرکنش موج با بستر و نوع شکست موج روی شیب ساحل در جریان آزمایش



شکل ۲-۳- حالت تغییر شکل یافته ساحل شبیه سازی شده پس از پایان مدت آزمایش

جدول ۲- قطر متوسط مصالح استفاده شده در آزمایشگاه

۵/۵	۱/۴۱	۰/۴۷	قطر متوسط مصالح رسوبی در طبیعت (mm)
$۳۷/۵ * ۱۰^{-۲}$	$۱/۳۳ * ۱۰^{-۲}$	$۵/۶۹ * ۱۰^{-۲}$	مقدار سرعت سقوط رسوب دانه‌ها در طبیعت (m/s)
$۸/۷۰ * ۱۰^{-۲}$	$۴/۲۰ * ۱۰^{-۲}$	$۱/۸۰ * ۱۰^{-۲}$	سرعت متوسط معادل ذره بر اساس مقیاس مدل (mm/s)
۰/۸۷	۰/۳۵	۰/۱۶	قطر متوسط مصالح رسوبی در آزمایشگاه (mm)



شکل ۳- منحنی دانه بندی مصالح رسوبی استفاده شده در آزمایشگاه

۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتیمتر و پرپود ۲ ثانیه و توالی ۰/۵، ۱/۵ و ۳ ساعت شبیه سازی شده اند.

### ۳-۲- شبیه سازی حالت امواج

در امواج دو بعدی پیشرونده، مشخصه‌های متغیره (پارامتریک) در کامل‌ترین حالت به شکل  $x(x, z, t)$  می‌باشند، (Sorensen 1993). شبیه‌سازی امواج مزبور در محیط‌هایی با عمق ثابت نیازمند اطلاعاتی نظیر ارتفاع، زمان تناوب، طول موج، عدد موج، شتاب ثقل و سرعت موج خواهد بود. از این مجموعه چهار مشخصه مستقل جهت شبیه سازی نحوه حرکت موج کافی است. سه کمیت ارتفاع موج، عمق آب و شتاب ثقل به همراه یکی از سه مشخصه وابسته به زمان طول موج، عدد موج و یا زمان تناوب، عمومی‌ترین چهار عضو انتخابی از مجموعه مشخصه‌های فوق را تشکیل می‌دهند.

### ۲-۴- امکانات آزمایشگاهی و تجهیزات اندازه گیری

۱- بر اساس نوع مطالعه و با توجه به امکانات موجود از فلوم امواجی به ابعاد  $۱ \times ۱ \times ۳۵$  متر مجهز به موج ساز منظم استفاده گردیده است. فلوم در نظر گرفته شده دارای عامل موج ساز پارویی نوع پیستونی است که با حداکثر شعاع جابجایی ۰/۴۵ متر، ظرفیت تولید امواجی تا ارتفاع ۰/۳۵ متر را در عمق آب حداکثر ۰/۷۵ متر داراست. همچنین بسامد امواج تولیدی از طریق موتور الکتریکی فرعی تعبیه شده بر روی الکترو موتور اصلی قابل تنظیم بوده به گونه ای که بازه‌ای از امواج آزمایشگاهی با مقادیر (H, T) مختلف توسط موج ساز مزبور قابل بازسازی می‌باشد.

لذا شکل متغیره نیروی موج  $F = F(\rho, g, H, L, h, D)$  را می‌توان با استفاده از تحلیل ابعادی به صورت زیر باز نویسی نمود:

$$\frac{F}{\rho g H D^2} = F\left(\frac{h}{L}, \frac{H}{L}, \frac{D}{L}\right) \quad (۸)$$

۲- در انجام آزمایش‌ها به منظور کمی‌سازی نتایج مشاهده‌ای هر مرحله در مجموع سه متغیر مختلف به شرح ذیل مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است:

با توجه به ابعاد فلوم و نیز ظرفیت موج سازی دستگاه مولد موج، مقیاس انتخاب شده جهت تبدیل مشخصات ساحلی به شرایط آزمایشگاهی ۱:۱۰ بوده است. بر این اساس رشته امواجی با ارتفاع

۱-۲- اندازه گیری مشخصات موج با استفاده از تجهیزات موج نگار با قابلیت داده‌برداری لحظه‌ای و حسگرهای نوع مقاومتی. این

۳- شیب ساحل  
با متغیر قرار دادن هر یک از ۳ مورد فوق، آزمایش‌های مدل فیزیکی این پدیده جمعاً به ۳ مرحله تقسیم گردید که در جدول‌های (۳) تا (۵) آورده شده است.

### ۲-۶- دستورالعمل آزمایش‌های مدل ریاضی

در مرحله مدل سازی ریاضی نیز، همانند آزمایش‌های مدل فیزیکی، ارتفاع موج، دانه بندی مصالح رسوبی و شیب ساحل به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شده است. مشخصات آزمایش‌ها در جدول (۳) تا (۵) آورده شده است. از نرم افزار Litpack و زیر برنامه Litprof در مدل ریاضی استفاده شده است. غالب برنامه‌های ریاضی موجود و از جمله بسته نرم افزاری Litprof که با هدف پیش بینی تغییرات عرضی بسترهای ساحلی تحت تاثیر پدیده انتقال رسوب عمود بر ساحل توسعه یافته‌اند دارای ساختار برنامه ای زیر می‌باشند:

اندازه‌گیری از طریق ۲ مسیر ورودی (بر اساس نیاز)، مشخصات لحظه ای سطح آب را در دو نقطه از طول کانال امواج ثبت و تعیین می نماید. دقت اندازه گیری این تجهیزات  $\pm 1mm$  می باشد.

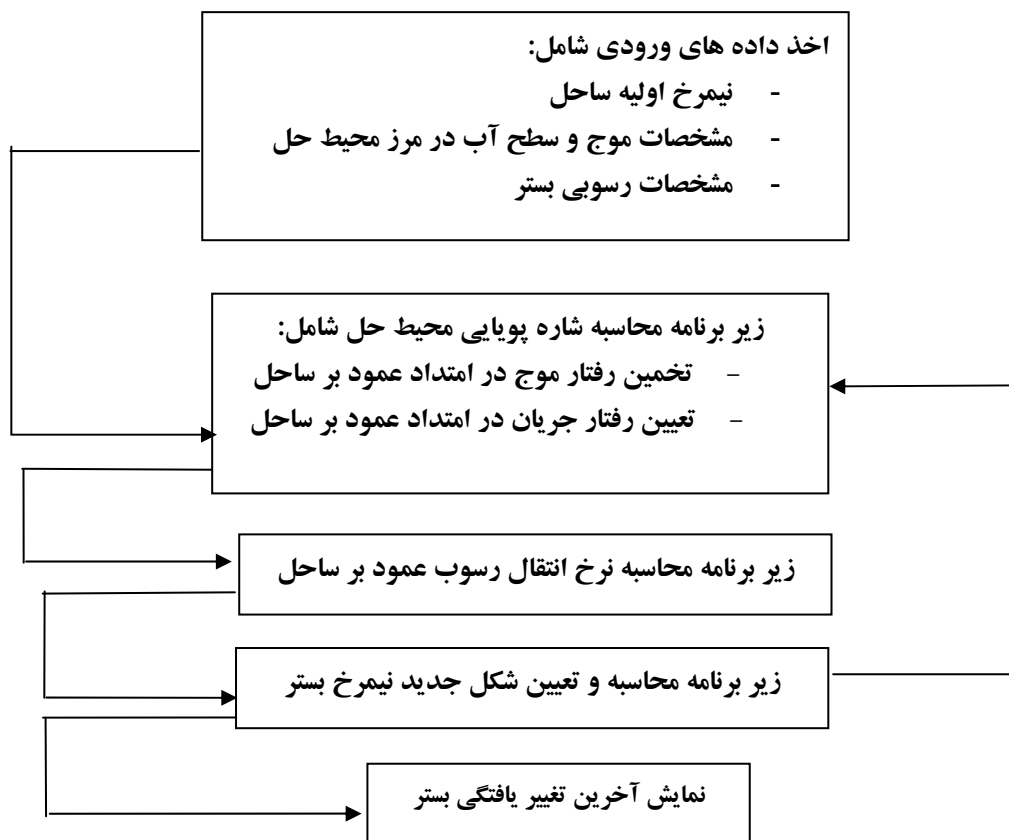
۲-۲- اندازه‌گیری مدت زمان تابش امواج در آزمایشگاه با استفاده از زمان سنج

۲-۳- برداشت نیمرخ طولی خط ساحلی در هر مرحله با استفاده از نیمرخ دیجیتالی

### ۲-۵- دستورالعمل آزمایش‌های مدل فیزیکی

در مرحله مدل‌سازی فیزیکی، پارامترهای متغیری که مورد بررسی پدیده انتقال رسوب ساحلی در جهت عمود بر ساحل قرار گرفته شد عبارتند از:

- ۱- ارتفاع موج
- ۲- دانه بندی مصالح رسوبی



شکل ۴- ساختار برنامه Litprof

جدول ۳- مشخصات آزمایش‌های مدل فیزیکی و ریاضی با متغیر قرار دادن دانه بندی مصالح رسوبی

Test Duration(h)	TS(s)	HS(m)	Slope	D50(mm)	Test Number
0.5	2.0	0.25	1:12	0.16	D1S1H4-1
1.5					D1S1H4-2
3.0					D1S1H4-3
0.5	2.0	0.25	1:12	0.35	D2S1H4-1
1.5					D2S1H4-2
3.0					D2S1H4-3
0.5	2.0	0.25	1:12	0.87	D3S1H4-1
1.5					D3S1H4-2
3.0					D3S1H4-3

جدول ۴- مشخصات آزمایش‌های مدل فیزیکی و ریاضی با متغیر قرار دادن شیب ساحل

Test Duration(h)	TS(s)	HS(m)	Slope	D50(mm)	Test Number
0.5	2.0	0.25	1:12	0.35	D2S1H4-1
1.5					D2S1H4-2
3.0					D2S1H4-3
0.5	2.0	0.25	1:10	0.35	D2S2H4-1
1.5					D2S2H4-2
3.0					D2S2H4-3
0.5	2.0	0.25	1:8	0.35	D2S3H4-1
1.5					D2S3H4-2
3.0					D2S3H4-3

جدول ۵- مشخصات آزمایش‌های مدل فیزیکی و ریاضی با متغیر قرار دادن ارتفاع موج

Test Duration(h)	TS(s)	HS(m)	Slope	D50(mm)	Test Number
0.5	2.0	0.1	1:12	0.87	D3S1H1-1
1.5					D3S1H1-2
3.0					D3S1H1-3
0.5	2.0	0.15	1:12	0.87	D3S2H2-1
1.5					D3S2H2-2
3.0					D3S2H2-3
0.5	2.0	0.2	1:12	0.87	D3S3H3-1
1.5					D3S3H3-2
3.0					D3S3H3-3
0.5	2.0	0.25	1:12	0.87	D3S3H4-1
1.5					D3S3H4-2
3.0					D3S3H4-3
0.5	2.0	0.3	1:12	0.87	D3S3H5-1
1.5					D3S3H5-2
3.0					D3S3H5-3

از آنجا که نرخ انتقال رسوب در عمل متناسب با فاصله نقطه از ساحل تغییر می نماید، تفاوت حجم فرسایش و ترسیب در نقاط عرضی مختلف موجب تغییر شکل نیمرخ بستر خواهد شد. بر این اساس برنامه Litprof مجری مدلی زمانی است که طی آن اثرات تغییرات ریختی بستر بر اقلیم امواج ساحلی (تغییر نقطه شکست موج) و نیز الگوی رسوبگذاری نهایی به صورتی گام به گام محاسبه می گردد. محدودیت این برنامه عدم تمیز رفتار بسترهای رسوبی با بیش از یک نوع اندازه رسوب دانه است. به عبارتی برنامه فاقد قابلیت طبقه بندی قطری و رسوب دانه‌ها در یک ساحل مرکب می‌باشد. برخی از کاربردهای خاص زیر برنامه Litprof عبارتند از:

برنامه Litprof توصیفگر تغییرات نیمرخ عرضی بستر تحت اثر فرایند انتقال رسوب عمود بر ساحل (ناشی از تاثیر میدان امواج ساحلی) است. فرضیات اصلی برنامه عبارتند از:

- ۱- محدوده حل برنامه مقطعی از حریم ساحلی است که در امتداد موازی ساحل فاقد مولفه جریانی است (فرض عدم وجود جریان ساحلی در عرض محیط حل)
- ۲- خطوط هم تراز بستر در هر حالت موازی خط ساحل می باشد. در نتیجه ریخت بندی (ریخت شناسی) ساحل در هر لحظه منطبق بر نیمرخ عرضی بستر خواهد بود.

در مدل سازی اخیر نیز با احتساب مجموع مولفه های موجود، مقطع ساحل شبیه سازی مربوطه مورد ساخت و آزمایش قرار گرفت و نتایج مدل فیزیکی با نتایج مدل ریاضی مقایسه شد که به شرح زیر می باشد:

### ۳-۱- تأثیر دانه بندی مصالح رسوبی در پدیده انتقال رسوب عمود بر ساحل

نیمرخ های منتج شده از آزمایش های مندرج در جدول (۳) از نوع نیمرخ های زمستانه حاصل شده اند. این در حالی است که طیف ایجاد شده در آزمایشگاه، بار تخریبی نسبتاً بیشتری را بر ساحل شبیه سازی شده اعمال نمود و موجب تشکیل پشته گردید و با تداوم امواج در آزمایشگاه، پشته ایجاد شده به سمت دریا کشیده شده و از ساحل دور گردید.

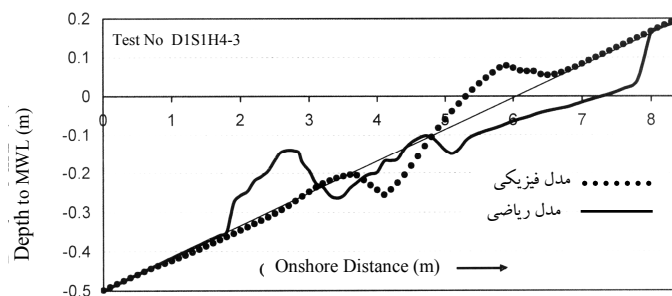
با افزایش  $D_{50}$  مصالح مورد استفاده در آزمایش های مدل فیزیکی، از شدت تخریب ساحل کاسته شده و در نتیجه علاوه بر اینکه پشته ایجاد شده به سمت ساحل متمایل گردید، ارتفاع پشته نیز کاهش یافت. در این مرحله حداکثر ارتفاع پشته ایجاد شده حدود ۱۲/۵ سانتیمتر و حداقل ارتفاع پشته ایجاد شده حدود ۸ سانتیمتر بود. شکل (۵) چگونگی تغییرات بستر ساحل را با دانه بندی مصالح بستر نشان می دهد.

- ارزیابی و پیش بینی پاسخ نیمرخ های ساحلی نسبت به شرایط مختلف سیالاتی
  - عواقب پوددهی سواحل (نتیجه فرآیندهای تغذیه ساحلی)
  - تعیین نقاط صفر موقعیتی در سازه های ساحلی
- این برنامه همچنین بستری است جهت درک بهتر سازوکار فرآیند انتقال رسوب عمود بر ساحل و نیز ابزاری است جهت تخمین مقادیر انتقال رسوب پسرو و پیشرو در موقعیت های مختلف ساحلی.

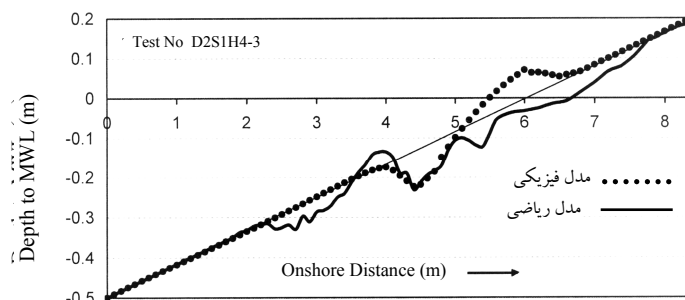
### ۳-۲- مقایسه و تحلیل نتایج بدست آمده از مدل فیزیکی و ریاضی

بررسی عینی پدیده های رسوبی نظیر انتقال رسوب ساحلی در جهت عمود بر ساحل، تحت اثر جریان های موجی غالباً نیازمند ساخت نمونه های مقیاسی از ساحل و شرایط سیالاتی مزبور می باشد. این در حالی است که وجود محدودیت های آزمایشگاهی، اثرات حدی و خطاهای مقیاسی، نتایج حاصل از این نمونه بندی را با شاخصه هایی همراه می سازد که از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- محدودیت در شبیه سازی کامل پدیده
- تقریب فیزیکی و جایگزینی اثر نیروهای غالب
- محدودیت در ایجاد کامل شرایط محیطی و سیالاتی (نظیر دمای آب و هوا، غلظت آب، شرایط بستر و ...)



شکل ۵-۱- مقایسه نتایج آزمایش های مدل فیزیکی و ریاضی با متغیر قرار دادن دانه بندی مصالح رسوبی (D1S1H4-3)



شکل ۵-۲- مقایسه نتایج آزمایش های مدل فیزیکی و ریاضی با متغیر قرار دادن دانه بندی مصالح رسوبی (D2S1H4-3)



شده، اندرکنشی است که طیف امواج با مصالح ساحل دارد، لذا برای مصالح با مشخصات مختلف، شرط وقوع هر یک از دو نیمرخ محتمل است. برای آزمایش‌های موردنظر در این مرحله به ازای  $D_{50} = 0/87$  سانتیمتر امواج بزرگتر از ۲۵ سانتیمتر سبب تشکیل نیمرخ زمستانه گردیده و امواج کوچکتر از آن نیمرخ تابستانه را سبب می‌گردد.

در آزمایش‌های D3S1H4 و D3S1H5 نیمرخ زمستانه به وجود آمد و ارتفاع پشته در آنها به ترتیب برابر ۸ و ۱۰ سانتیمتر اندازه‌گیری شده است. بنابراین هرچه ارتفاع امواج بزرگتر گردد بار تخریبی به ساحل نیز بیشتر می‌شود.

در آزمایش‌های D3S1H3 ، D3S1H2 و D3S1H1 نیمرخ تابستانه به وجود آمد و ارتفاع پشته در آنها به ترتیب برابر ۹ ، ۵/۵ و ۴/۵ سانتیمتر اندازه‌گیری شد. بنابراین با افزایش ارتفاع موج در محدوده نیمرخ تابستانه از ارتفاع پشته کاسته خواهد شد. شکل (۷) چگونگی تغییرات بستر ساحل را با تغییر در ارتفاع موج نشان می‌دهد.

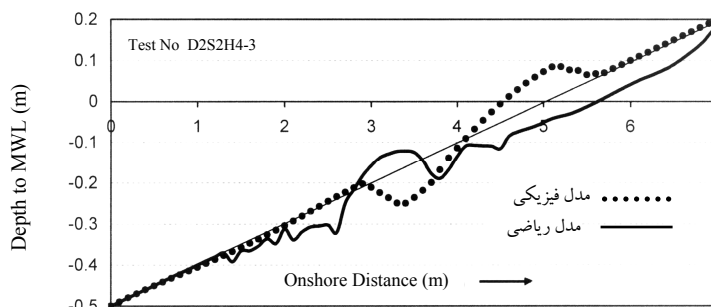
### ۲-۳- تأثیر شیب ساحل در پدیده انتقال رسوب عمود بر ساحل

در این مرحله نیز نیمرخ زمستانه بدست آمد و با تداوم امواج در آزمایشگاه پشته ایجاد شده به سمت دریا کشیده شد.

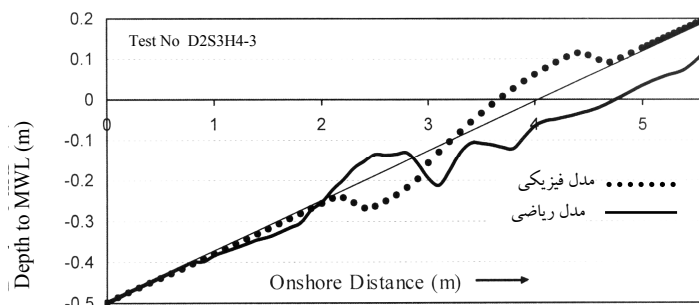
با افزایش شیب ساحل شبیه سازی شده، شدت تخریب ساحل، به علت جریان برگشتی ناشی از شکست امواج شدیدتر گردید. به همین علت آب بسیار گل آلود شده، باعث پسروی رسوبات به سمت دریا گردید در این صورت پشته ایجاد شده به سمت دریا متمایل گردیده و ارتفاع آن کاهش می‌یابد به طوریکه حداکثر ارتفاع پشته ایجاد شده در حدود ۱۰ سانتیمتر و حداقل آن در حدود ۷/۵ سانتیمتر می‌باشد. شکل (۶) چگونگی تغییرات ایجاد شده در بستر ساحل با تغییر شیب ساحل را نشان می‌دهد.

### ۳-۳- تأثیر ارتفاع موج در پدیده انتقال رسوب عمود بر ساحل

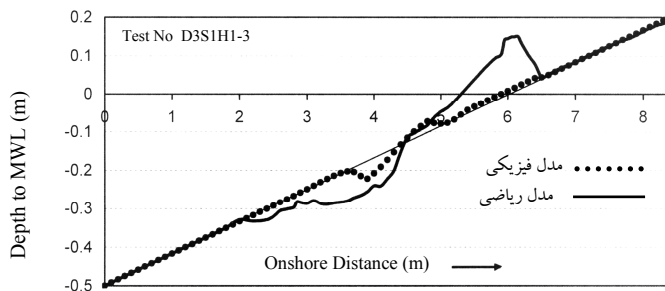
در این مرحله علاوه بر نیمرخ ساحلی زمستانه، نیمرخ ساحلی تابستانه نیز بدست آمد. از آنجا که شرط وقوع هر یک از دو نوع نیمرخ ذکر



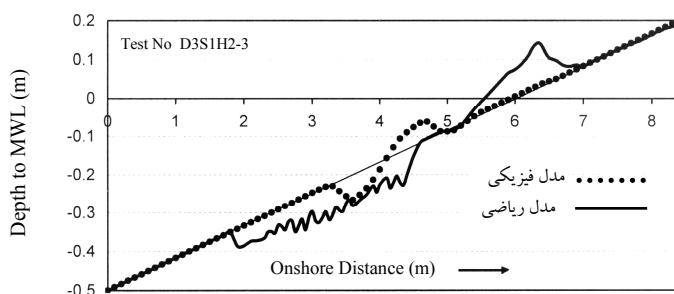
شکل ۶-۱- مقایسه نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی و ریاضی با متغیر قرار دادن شیب ساحل (D2S2H4-3)



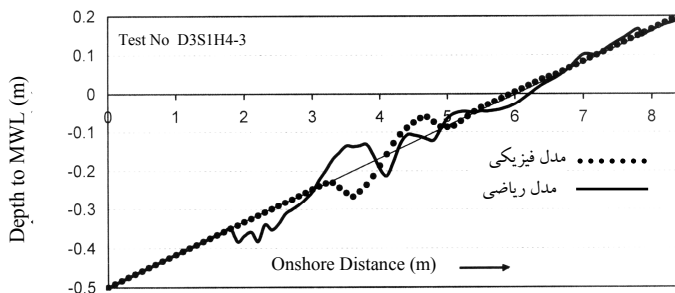
شکل ۶-۲- مقایسه نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی و ریاضی با متغیر قرار دادن شیب ساحل (D2S3H4-3)



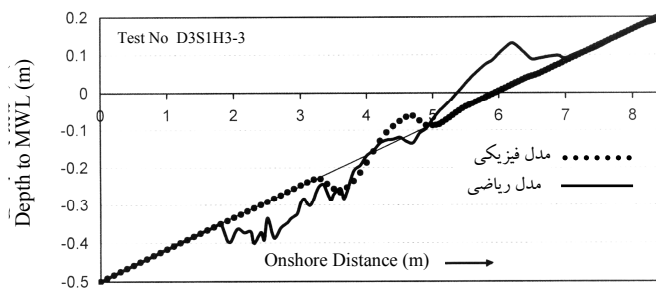
شکل ۷-۱- مقایسه نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی و ریاضی با متغیر قرار دادن ارتفاع موج (D3S1H1-3)



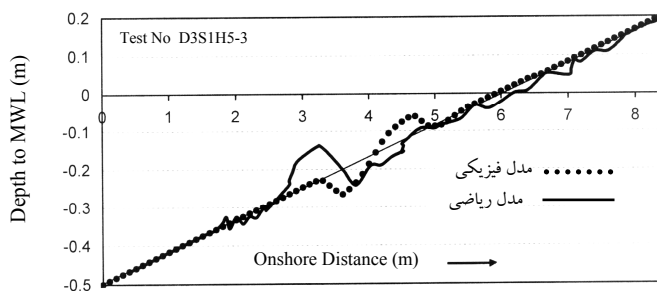
شکل ۷-۲- مقایسه نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی و ریاضی با متغیر قرار دادن ارتفاع موج (D3S1H2-3)



شکل ۷-۳- مقایسه نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی و ریاضی با متغیر قرار دادن ارتفاع موج (D3S1H4-3)



شکل ۷-۴- مقایسه نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی و ریاضی با متغیر قرار دادن ارتفاع موج (D3S1H3-3)



شکل ۷-۵- مقایسه نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی و ریاضی با متغیر قرار دادن ارتفاع موج (D3S1H5-3)

کننده خود برای ساحل با مصالح ۰/۱۶، ۰/۳۵ و ۰/۸۷  $D_{50}$  سانتیمتر کلیه امواج ۳۰، ۲۵، ۲۰، ۱۵ و ۱۰ سانتیمتر را به عنوان امواج تابستانه می‌شناسد. البته زیر برنامه Litprof برای امواج نسبتاً بزرگتر که در حدود امواج طبیعت باشد نیمرخ زمستانه را نیز نتیجه داده است. در این صورت به نظر می‌رسد زیر برنامه مذکور برای امواج استفاده شده در آزمایشگاه کالیبره نشده است.

#### ۴- جمع بندی و پیشنهادات

مدل ریاضی Litpack تنها قادر است شرایط واقعی را پیش بینی نماید و دقت آن در شرایط مدل فیزیکی به دلیل تأثیرات ناشی از مقیاس، بسیار کم است. بنابراین امکان عملی انطباق سازی این مدل با شرایط آزمایشگاهی میسر نبوده و بدین منظور باید از مدل‌های ریاضی دیگر استفاده نمود. به نظر می‌رسد که با اعمال ضرایبی برای انطباق سازی در مدل، شرایط آزمایشگاهی را نیز پوشش داد که این امر مطالعات جامع‌تری را می‌طلبد که هدف اصلی پژوهش حاضر نبوده است.

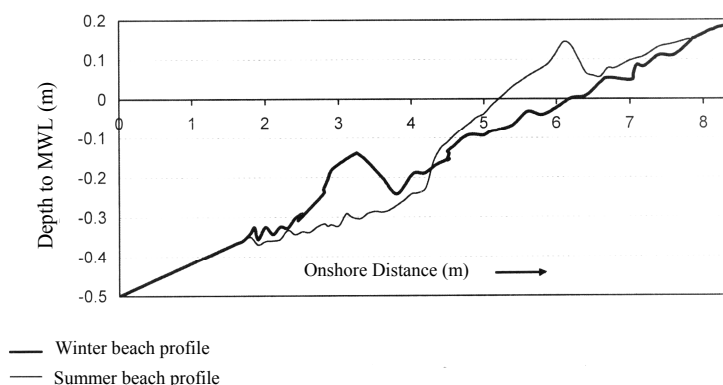
جهت ادامه مطالعات پیشنهاد می‌گردد که در شرایط آزمایشگاهی وسیع‌تری با تولید امواج بزرگتر، شرایط نیمرخ زمستانی را مدل نموده و یا با تعیین نیمرخ‌های بستر در مقابل سازه‌های حفاظتی نظیر دیواره‌های ساحلی یا موج‌شکن‌ها دقت و کارایی مدل‌های ریاضی را در پیش بینی تغییر شکل بستر سواحل در این حالت بررسی نمود که این امر خود می‌تواند نقطه شروعی در مطالعات پدیده انتقال رسوب ساحلی در جهت عمود بر ساحل تلقی گردد.

۳-۴- برگشت پذیری پدیده انتقال رسوب عمود بر ساحل  
پدیده انتقال رسوب ساحلی در جهت عمود بر ساحل، پدیده ای کاملاً برگشت پذیر بوده و سواحل دائماً در معرض این پدیده انتقال دارند. به عبارت دیگر نیمرخ خط ساحل از نیمرخ زمستانه به تابستانه و بالعکس تبدیل می‌گردند. در بررسی این موضوع، ساحل شبیه‌سازی شده با مصالح  $D_{50} = 0/87$  سانتیمتر و شیب ۱:۱۲ در معرض امواج با ارتفاع ۳۰ سانتیمتر و پرپود ۲ ثانیه و توالی ۳ ساعت قرار گرفت (آزمایش D3S1H5). نیمرخ منتج شده از نوع نیمرخ زمستانه بدست آمد و منجر به تشکیل پشته گردید.

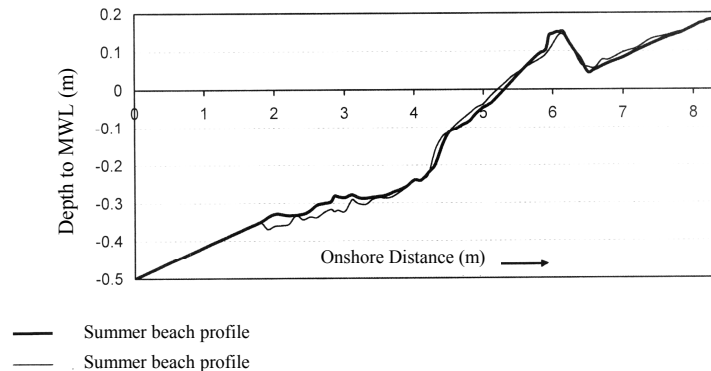
در مرحله بعد نیمرخ بدست آمده در آزمایش D3S1H5-3 در معرض امواج با ارتفاع ۱۰ سانتیمتر، پرپود ۲ ثانیه و توالی ۳ ساعت قرار گرفت که با توجه به طبیعت آرام این موج پشته حاصل از آزمایش قبل شسته شده و پشته در قسمت ساحل تشکیل گردید و یا به عبارتی نیمرخ زمستانه ساحل به نیمرخ تابستانه تبدیل گردید، شکل‌های (۸) و (۹). اختلاف جزئی که در شکل (۹) وجود دارد به این علت است که در سواحل همواره در اثر تکرار پدیده انتقال رسوب عمود بر ساحل غلظت بار معلق افزایش یافته و باعث فرسایش بیشتر در سواحل می‌گردد.

#### ۳-۵- مقیاسه نتایج مدل فیزیکی و ریاضی

نتایج مقایسه دو روش مدل فیزیکی و ریاضی نشان دهنده پدیده انتقال رسوب ساحلی در جهت عمود بر ساحل در شکل‌های (۶) و (۷) و (۸) آمده است. کلیه آزمایش‌های مدل ریاضی، نیمرخ تابستانه را نتیجه داده‌اند یا به عبارتی زیر برنامه Litprof با فرض‌های ساده



شکل ۸- برگشت پذیری پدیده انتقال رسوب عمود بر ساحل



شکل ۹- مقایسه دو نیمرخ تابستانه (اثبات برگشت پذیری پدیده انتقال رسوب عمود بر ساحل)

Kamphuis, J.W. (1991) "Alongshore Sediment Transport Rate", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering Div. ASCE*, 701 117, No.6, pp. 624-640

Lashteh Neshaei. M.A. (1997) "Beach profile Evolution in Front of Partially Reflective Structure". PH.D. thesis, Imperial College, University of London

Lashteh Neshaei, M.A & Asano, T (2000) "The Effect of Reflective Structures on the Distribution of Undertow in the Surfzone", *Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Civil Engineering*, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, Vol. 4, pp. 54-63

Litpack, "Litpack Manual Set", (1996)

Shore Protection Manual (1984) "Coastal Engineering Research Center", Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, USA

Sorensen R.M. (1993) "Basic Wave Mechanics for Coastal and Ocean Engineers", John Wiley, F. sonsns, INC.USA

## ۵- تشکر

بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی مولفین مقاله از مسؤلین محترم مرکز تحقیقات آب و وزارت نیرو که در انجام آزمایشات و سایر مراحل پروژه نهایت همکاری را داشته‌اند ابراز می‌گردد.

## ۶- مراجع

لشته نشایی، میر احمد و پاشازاده، علی، (۱۳۸۰)، " بررسی پتانسیل آب شستگی در سواحل دریای خزر". مجموعه مقالات کنفرانس بین المللی سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران، جلد اول، صفحه ۵۶۱ الی ۵۷۰

Andrew D. Short. (1999) "*HandBook of Beach and shore face Morphodynamics*", John Wiley.

Dean. R.G. (1991) "Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications" *Journal of Coastal Research, CERF*, Vol.7, No.1, pp.53-83

Hoque, M.A. & Asano, T. & Lashteh Neshaei, M.A. (2001) "Effect of Reflective Structures on Undertow Distribution", *Proceedings of the Fourth International Symposium Waves*, California, USA, Vol.2, PP. 1042-1051

تاریخ دریافت مقاله: ۱ آذر ۱۳۸۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۹ اسفند ۱۳۸۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۲۶ مهر ۱۳۸۵