

پیش‌بینی موقعیت رسوب‌گذاری در ناحیه سواش سواحل ماسه‌ای به روش سطح پاسخ

محمد رضا مطلبی زاده^۱، مهدی شفیع‌فر^{۲*}، مسعود قدسیان^۳

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

*shafieefar@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۳/۱۹

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۲۱

چکیده

ناحیه سواش، به‌عنوان محدوده انتهایی ناحیه داخلی شکست، مناطق و سازه‌های ساحلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. عملکرد سواش تحت تأثیر امواج ورودی از ناحیه شکست، هندسه بستر ساحلی و اندرکنش سفره زیرزمینی-دریا قرار می‌گیرد. در این پژوهش با انجام مدل‌سازی فیزیکی، تأثیر پارامترهای موج نامنظم، شیب، تراز آب سمت دریا و تراز سفره زیرزمینی؛ بر تغییر شکل ساحل بررسی شده است. در پژوهش‌های پیشین برای طراحی آزمایش‌ها از روش «هر بار یک عامل» استفاده شده است ولی در این پژوهش آزمایش‌ها، برای ساحل ماسه‌ای درشت از نوع انعکاسی، به روش «سطح پاسخ مرکزی» طراحی شده، و تأثیر کمی و متقابل پارامترهای ارتفاع و پریود موج نامنظم، ترازهای آب سمت دریا و پشت ساحل، و شیب ساحل؛ بر موقعیت شروع رسوب‌گذاری سواش بررسی شده است. نتایج حاصل از روش سطح پاسخ مرکزی نشان داد تراز آب زیرزمینی در ساحل، تأثیر معناداری بر موقعیت شروع رسوب‌گذاری سواش ندارد و افزایش ارتفاع موج منجر به جابه‌جایی سریع این موقعیت به بالای ساحل می‌شود. با افزایش پریود موج، نرخ تأثیر ارتفاع موج بر موقعیت شروع رسوب‌گذاری سواش افزایش می‌یابد و برعکس با افزایش تراز آب دریا، نرخ تأثیر ارتفاع موج کاهش می‌یابد. در شیب ساحل ۱۲/۵ درصد موقعیت شروع رسوب‌گذاری سواش از دریا دور و به ساحل نزدیک‌تر می‌شود.

واژگان کلیدی: ناحیه سواش، روش سطح پاسخ، مدل آزمایشگاهی، موقعیت رسوب‌گذاری سواش.

۱- مقدمه

که در این رابطه H_b ارتفاع موج در زمان شکست، T پریود موج

و ω_s سرعت سقوط رسوب است. برای ساحل انعکاسی $\Omega < 1$ ، ساحل استهلاکی $\Omega > 6$ و ساحل انتقالی $6 > \Omega > 1$ است. در سواحل انعکاسی امواج در حال شکست، پس از برخورد با مصالح بستر (ماسه درشت تا متوسط)، با انعکاس قابل توجهی از ساحل دور می‌شوند [۲].

در شکل (۱) ناحیه سواش در واقع بخشی از ساحل حداثه کمترین پایین‌روی و بیشترین بالاروی موج است. در این ناحیه انرژی باقی‌مانده امواج از ناحیه شکست منعکس یا مستهلک می‌شود

پدیده‌های ناحیه شکست و بالاروی موج تأثیر زیادی بر عملکرد مناطق ساحلی و طراحی سازه‌ها دارند. از این‌رو در چند دهه اخیر، به مطالعه انتقال رسوب در مناطق ساحلی سواحل ماسه‌ای توجه شده است [۱].

سواحل ماسه‌ای بر حسب مقدار سرعت بی‌بعد سقوط Ω عملکرد آنها به سواحل انعکاسی، انتقالی و استهلاکی تقسیم‌بندی می‌شود.

$$\Omega = \frac{H_b}{T\omega_s} \quad (1)$$

جرم مبادله شده در سیکل های بعدی در پایین سواش خارج شده بر دینامیک رسوب، وزن مؤثر و تنش برشی جریان اثر می گذارد [۹].
[۱۰].

شکل ۲. اندرکنش ناحیه آب زیرزمینی ساحلی و جریان بالاروی [۱۱]

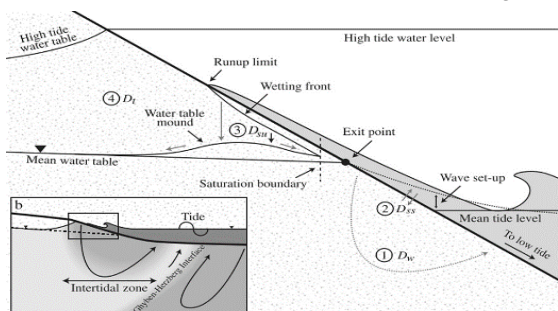


Fig. 2. Interaction of beach groundwater and swash flow [11]

معمولاً در حالت اندرکنش مخالف قوی، پرش هیدرولیکی و گردابه های قوی بازگشتی^۳ تشکیل می شود. این گردابه ها باعث ایجاد پله ساحلی در ابتدای ناحیه بالاروی و انتقال رسوب موضعی اضافی به سمت ساحل می شود [۱۲].

هیدرودینامیک ناحیه سواش تحت تأثیر مشخصات امواج ورودی از ناحیه شکست و هندسه بستر ساحل است. رسوبات معلق شده در ناحیه شکست می تواند به داخل سواش منتقل شده و نقش مهمی در توسعه مورفولوژی ساحل ایفا کند [۱۳]. پارامتر تشابه بستر^۴ ϵ_b میزان استهلاک و انعکاس امواج ورودی سواش را مشخص می کند. بر مبنای این پارامتر عملکرد سواش به استهلاکی، انتقالی و انعکاسی تقسیم بندی می شود.

$$\epsilon_b = \frac{2\pi^2 H_b}{gT^2 \tan^2 \beta} \quad (2)$$

که در آن H_b ارتفاع موج در زمان شکست، T پریود موج، g شتاب ثقل، β زاویه بستر ساحلی است. برای محدوده $\epsilon_b < 2/5$ ساحل انعکاسی، $2/5 < \epsilon_b < 20$ ساحل انتقالی و $\epsilon_b > 20$ ساحل از نوع انعکاسی منظور می شود [۱۴، ۱۵].

نوع شکست در ناحیه زوال موج، برحسب پارامتر شکست^۵ ξ_0 به شکست های ریزشی، شیرجه ای و لغزشی تقسیم می شود.

$$\xi_b = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_b/L_0}} \cdot L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3)$$

که در آن H_b ارتفاع موج در زمان شکست، T پریود موج، g شتاب

[۳، ۴]. به سطح کمی افقی سواش که از ته نشینی مواد ساحلی همراه با امواج و جزر و مد تشکیل می شود، در اصطلاح سکوی سواش^۱ گفته می شود.

شکل ۱. موقعیت نسبی نواحی شکست و سواش [۵]

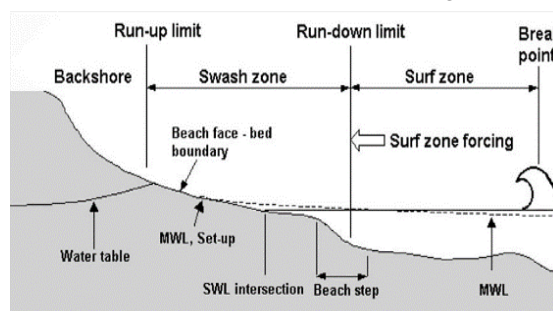


Fig. 1. Relative location of surf and swash zones

بعضی از پژوهشگران ناحیه سواش را به عنوان محدوده انتهایی ناحیه داخلی شکست^۲ تعریف می کنند که در آن مجموعه ای از جریان ها با مقیاس های متفاوت شامل امواج کوتاه و بلند، جریان های افقی، گردابه ها و آشفتگی ظاهر می شود [۶]. بیشتر جریان در سواحل انعکاسی با چشم پوشی از تیزه های سطحی ساحلی و جریان گردشی سواش، دوبعدی در نظر گرفته می شود [۲].

در ناحیه سواش پدیده های متعددی شامل نفوذ/ خروج آب روی زیرسطحی، پرش هیدرولیکی، آشفتگی توده/ جبهه موجک ها، آشفتگی ناشی از لایه مرزی بستر، اندرکنش فاز بالاروی و بازگشت، انتقال رسوب عرضی و طولی، غلظت بالای رسوبات در لایه سواش و جریان ورقه ای اتفاق می افتد و این فرآیندها باعث پیچیدگی هیدرودینامیکی این ناحیه می شوند [۴]. فشار القایی ناشی از تناوب و شکست موج و فشار آب منفذی سفرفه ساحلی، بر ضخامت لایه مرزی و توزیع آشفتگی سواش اثر می گذارد و باعث تغییرات قابل ملاحظه تنش برشی در طول این ناحیه می شود [۷]. سرعت بالای جریان در نزدیکی بستر و عمق کم ناحیه سواش منجر به انتقال رسوب با غلظت بالا به صورت جریان ورقه ای می شود؛ فلاکس بالای رسوبات در این جریان، نقش موثری در نرخ خالص انتقال رسوب در ناحیه نزدیک ساحل و سواش دارد [۸].

جریان بالاروی در شکل (۲) نشان می دهد که در حین حرکت به سمت بالای سواش به داخل ساحل غیراشباع نفوذ می کند و این

3 Return vortex
4 Surf scaling parameter
5 Surf similiary parameter

1 Swash berm
2 Inner surf zone

در ادامه مقاله، فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی، چگونگی طراحی و روش انجام آزمایش‌ها مطرح می‌شود و در بخش‌های چهارم و پنجم مقاله، مدل پیش‌بینی موقعیت شروع رسوب‌گذاری و نتایج حاصل بررسی می‌شود.

۲- فلوم و تجهیزات آزمایش

آزمایش‌ها در فلوم موج آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس به طول ۱۶ متر و عمق و عرض ۱ متر انجام شد. برای سفره ساحلی از ماسه شسته سلیسی با منحنی دانه‌بندی شکل ۳ و قطر متوسط ۰/۸ میلی‌متر استفاده شد.

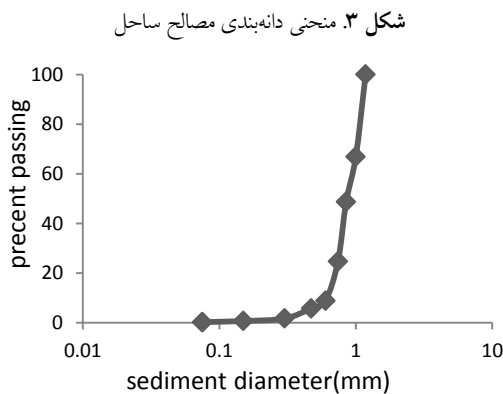


Fig. 3. Grain size distribution of sand

در این ماسه درشت، شاخص‌های خمیدگی (C_c) و یکنواختی (C_u) به ترتیب ۱/۰۱ و ۱/۳۸، و ضریب‌شکل (σ_g) ۱/۲ محاسبه و سرعت متوسط سقوط ذرات ماسه ۰/۱۲۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}} \quad C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4)$$

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{D_{85}}{D_{16}}}$$

که در این رابطه D_n قطر الک با درصد عبوری n از نمونه ماسه است.

تجهیزات آزمایش شکل ۴ شامل موج‌ساز پیستونی، مخزن بار استاتیکی، سرریز لبه تیز، پیژومترها، دبی‌سنج‌های روتامتر، ارابه متر لیزری و سیستم پمپاژ را نشان می‌دهد. موج‌ساز پیستونی توانایی تولید امواج منظم و نامنظم با بیشینه خطای جابه‌جایی ۱ میلی‌متر و امواج با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و پرپود کمینه یک ثانیه را دارد.

تقل، β زاویه بستر ساحلی و L_0 طول موج در آب عمیق است. در شکست ریزشی $0/4 < \xi_b < 2$ شکست شیرجه‌ای $2 < \xi_b < 0/4$ و شکست لغزشی $\xi_b > 2$ است.

مرور ادبیات فنی در ناحیه سواش نشان می‌دهد تعداد محدودی از پژوهش‌های آزمایشگاهی، اثر اندرکنش سفره زیرزمینی - سواش را بر تغییرشکل ساحل در نظر گرفته‌اند و برخی از این مطالعات در مقیاس بزرگ^۱ انجام شده‌است. در این مطالعات برای تعداد محدودی امواج منظم و نامنظم؛ تغییرات زمانی ساحل، غلظت و دبی رسوبات معلق اندازه‌گیری شده است [۱۶-۱۸].

انگ و همکاران در آزمایشگاه، ساحلی با ماسه به قطر متوسط ۰/۸۵ میلی‌متر و شیب ۱۳/۱ درصد ساختند و تأثیر تعداد محدودی امواج منظم بر فرسایش سواش و تراز پیژومتریک ساحل مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش‌ها عمق آب سمت دریا ثابت و عمق آب در سفره زیرزمینی تغییر می‌کرد [۱۹]. اریکسون و همکاران در کانالی به طول ۲۷ متر و عرض و عمق ۰/۹۱ متر، ساحل‌هایی با ماسه ریز (قطر متوسط ۰/۱۳ میلی‌متر) و شیب ۲۰٪ و ۶۷٪ ساختند. آن‌ها برای امواج نامنظم اندرکنش سواش - موج را بررسی کردند. در این پژوهش تغییرات زمانی بالاروی و عمق جریان در سواش اندازه‌گیری شد [۱۲]. هورن و همکاران در کانال آزمایشگاه انگ و همکاران ساحل‌هایی با ماسه ریز و درشت (۰/۱۹۷ و ۰/۸۸ میلی‌متر) ساختند. آن‌ها تأثیر امواج منظم و تراز سفره زیرزمینی بر فرسایش و فشار پیژومتریک محدوده سواش بررسی کردند [۲۰].

مرور پژوهش‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد پارامترهای هیدرولیکی موج (ارتفاع H_s و پرپود T)، شیب ساحل S_0 ، قطر و دانه‌بندی رسوبات، تراز آب سمت دریا h_s ، تراز سفره آب زیرزمینی در ساحل h_L و هدایت هیدرولیکی سفره بر تغییرشکل سواحل ماسه‌ای اثرگذار است و فقط تأثیر کیفی این پارامترها بر تغییرشکل سواش بررسی شده است [۲۱]. هدف این مقاله تعیین میزان تأثیر کمی و متقابل پارامترهای (H_s, T, S_0, h_s, h_L) بر موقعیت شروع رسوب‌گذاری ناحیه سواش انتقالی در سواحل ماسه‌ای انعکاسی است و به این دلیل آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ^۲ طراحی و تحلیل می‌شوند.

1 Large scale

2 Response surface methodology (RSM)

شکل ۴. فلوم و تجهیزات آزمایش

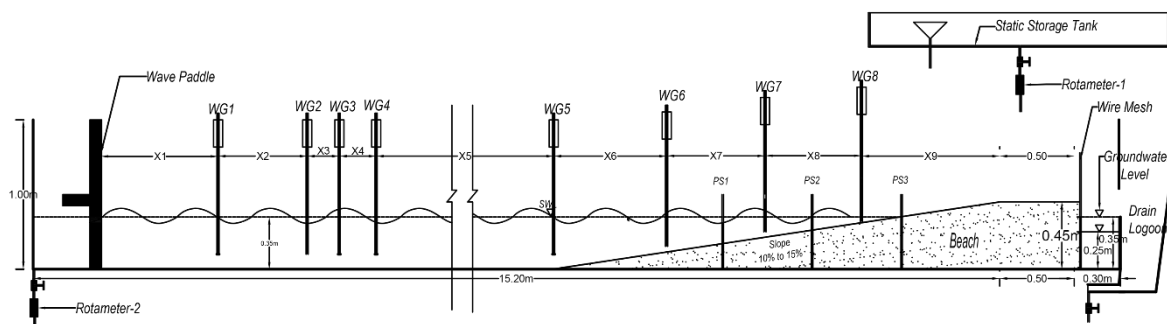


Fig. 4. Wave flume and laboratory instrumentation

طراحی می‌شوند که هر بار یک متغیر تغییر کرده و مابقی متغیرها ثابت می‌مانند. نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها در این روش به فضای گسسته نقاط آزمایش محدود می‌شود و اندرکنش بین متغیرها مشخص نمی‌شود.

در این پژوهش محدوده تغییر متغیرها (H_s, T, S_0, h_s, h_L) تحت تأثیر شرایط سواحل انعکاسی، فیزیک جریان انتقالی سواش، اندرکنش آب زیرزمینی-سواش، محدودیت‌های فلوم موج‌ساز، امکانات اجرایی و تیزی موج انتخاب شد. حدود بالا و پایین متغیرهای آزمایش در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱. محدوده متغیرهای طراحی و ضرایب همبستگی پیرسون

Design factor	S_0	h_s	h_L	T	H_s
	%	cm	cm	sec	cm
High level	15	35	35	1.7	8
Low level	10	25	25	1.2	4
PCC with SDL	0.134	-0.11	0.142	-0.153	0.821

Table 1. The limits of design factors and Pearson's correlation coefficients (PCC)

همچنین آزمایش‌ها بر اساس روش سطح پاسخ، نوع طرح مرکب مرکزی^۳ پنج سطحی طراحی شد. جدول (۲) آزمایش‌های طراحی شده و چگونگی ترکیب سطوح متغیرها را نشان می‌دهد. در روش سطح پاسخ مرکزی به تناسب تعداد متغیرها و حدود بالا و پایین آن‌ها، پنج سطح برای هر متغیر تعیین می‌شود. آزمایش‌ها از ترکیب مقادیر متغیرها در سطوح مختلف با رعایت اصول تعامد، چرخش و یکنواختی به دست می‌آید و همبستگی بین مقادیر

برای ایجاد اختلاف تراز در طرفین ساحل و تنظیم جریان لایه‌ای درون سفره زیرزمینی، از صفحه مشبک فلزی پشت ساحل، مخزن بار استاتیکی و دو عدد روماتر با دبی عملکردی ۲۰ تا ۱۵۰ لیتر در ساعت (دقت ۴٪ مقیاس) استفاده شد.

ارتفاع موج در طول فلوم به وسیله‌ی هشت ارتفاع‌سنج خازنی با فرکانس برداشت ۱۰ هرتز و دقت یک میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در آزمایش‌ها سه ارتفاع‌سنج در موقعیت مناسب وسط فلوم و مابقی به تناسب هیدرودینامیک ناحیه شکست و سواش قبل از تراز آرام آب قرار گرفتند. ارتفاع شکست موج از ارتفاع‌سنج‌های نزدیک تراز آرام آب استخراج شد. برای ارزیابی تراز استاتیکی سفره ساحلی سه عدد پیژومتر به فواصل ۴۵ سانتی‌متر در طول ساحل نصب شد. پروفیل ساحل با متر لیزری نصب شده روی اریبه فلوم و دقت یک میلی‌متر برداشت شد.

۳- طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش^۱ به ایجاد تغییرات هدفمند در یک یا چند متغیر آزمایش، گفته می‌شود. با طراحی آزمایش زمینه دستیابی به اهداف زیادی از جمله غربال‌گری متغیرها، مدل‌سازی، تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی پدیده فراهم می‌شود. برحسب نوع متغیرهای آزمایش، هدف طراحی و محدودیت‌های انجام آزمایش؛ روش‌های متنوعی برای طراحی آزمایش وجود دارد. مرور پژوهش‌های آزمایشگاهی سواش نشان می‌دهد؛ آزمایش‌ها به روش کلاسیک «هر بار یک عامل»^۲ طراحی شده‌اند و تنها تأثیر کیفی متغیرها بر رسوب‌گذاری سواش بررسی شده است. در این روش سنتی، آزمایش‌ها به گونه‌ای

1 Design Of Experiments

2 One Factor at A Time (OFAT)

برای تعیین هدایت هیدرولیکی سفره ساحلی، دبی ورودی به فلوم به شکلی تنظیم شد تا تراز آب در طرفین ساحل ثابت و جریان لایه‌ای داخلی ساحل ایجاد شود.

در این شرایط دبی خروجی از سرریز انتهایی فلوم و سطح ایستایی در طول ساحل به وسیله‌ی پیژومترها اندازه‌گیری شد. هدایت هیدرولیکی سفره زیرزمینی ساحل بر اساس رابطه داریسی $(\frac{v}{k})$ ۲/۶ میلی‌متر بر ثانیه محاسبه شد. در آزمایش‌هایی که تراز آب پشت ساحل h_L بالاتر از تراز آب در فلوم h_s است دبی معادل دبی زهکشی سفره زیرزمینی، به وسیله‌ی مخزن بار استاتیکی وارد سفره ساحلی می‌شود و هم‌زمان دبی وارد شده به فلوم با روتامتر انتهایی پشت پدل خارج می‌شود. با برخورد امواج به ساحل، آب به داخل سفره ساحلی نفوذ می‌کند و بخشی از آب نفوذی از سرریز انتهایی فلوم خارج می‌شود. این حجم برای حفظ تراز آب فلوم به وسیله‌ی پمپ به پشت پدل منتقل شد.

متغیرهای طراحی ناچیز است [۲۲]. داده‌های آزمایش‌ها به کمک تکنیک آنالیز واریانس تحلیل می‌شود. در استخراج مدل‌های خطی، درجه دو و درجه سه، ترکیبات معنادار^۱ متغیرها شناسایی می‌شود؛ سپس از بین مدل‌های معنادار، مدل با ضریب «تعیین پیش-بینی»^۲ بزرگتر و ضریب تعیین^۳ مناسب به عنوان مدل برگزیده انتخاب می‌شود. [۲۳]. در این پژوهش برای طراحی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها از نرم‌افزار تجاری DE^۴ استفاده شد.

۴- چگونگی انجام آزمایش‌ها

برای ساخت سفره ساحلی، جرم‌های معینی از ماسه در لایه‌های ۱۰ سانتی‌متر کوبیده شد تا سفره‌ای همگن با تراکم معین حاصل شود. تخلخل سفره ساحلی در آزمایش‌ها $(\frac{v}{k})$ ۴۴/۳ درصد محاسبه شد. برای کنترل شیب، شاخص‌هایی مناسبی در طول ساحل نصب شد تا وجه ساحل با دقت یک میلی‌متر حاصل شود.

جدول ۲. مقادیر متغیرهای طراحی، ارتفاع شکست موج و موقعیت شروع رسوب‌گذاری (x_d) در آزمایش‌ها

x_d	H_b	H_s	T	h_L	h_s	S_0	آزمایش	x_d	H_b	H_s	T	h_L	h_s	S_0	آزمایش
cm	cm	cm	sec	cm	cm	%		cm	cm	cm	sec	cm	cm	%	
0.21	7.29	6	1.45	30	30	12.50	26	0.29	7.67	6	1.45	30	30	15.00	1
0.23	7.05	6	1.45	30	30	12.50	27	-0.09	6.07	5.16	1.34	27.9	32.1	13.55	2
0.24	7.11	6	1.45	30	30	12.50	28	0.35	8.31	6.84	1.34	27.9	32.1	13.55	3
0.27	7.21	6	1.45	30	30	12.50	29	-0.23	6.91	5.16	1.56	27.9	32.1	13.55	4
0.13	6.82	6	1.2	30	30	12.50	30	0.39	8.77	6.84	1.56	27.9	32.1	13.55	5
0.31	5.14	4	1.45	30	30	12.50	31	-0.15	6.17	5.16	1.34	27.9	27.9	13.55	6
0.22	9.36	8	1.45	30	30	12.50	32	0.38	7.96	6.84	1.34	27.9	27.9	13.55	7
0.26	7.24	6	1.45	35	30	12.50	33	-0.32	6.85	5.16	1.56	27.9	27.9	13.55	8
-0.19	6.39	5.16	1.34	27.9	32.1	11.45	34	0.43	8.67	6.84	1.56	27.9	27.9	13.55	9
0.66	7.92	6.84	1.34	27.9	32.1	11.45	35	-0.16	6.69	5.16	1.34	32.1	32.1	13.55	10
0.18	6.43	5.16	1.56	27.9	32.1	11.45	36	0.40	7.45	6.84	1.34	32.1	32.1	13.55	11
-0.12	8.27	6.84	1.56	27.9	32.1	11.45	37	-0.26	6.07	5.16	1.56	32.1	32.1	13.55	12
0.18	5.87	5.16	1.34	27.9	27.9	11.45	38	0.44	8.73	6.84	1.56	32.1	32.1	13.55	13
-0.27	7.25	6.84	1.34	27.9	27.9	11.45	39	-0.10	6.52	5.16	1.34	32.1	27.9	13.55	14
0.24	6.66	5.16	1.56	27.9	27.9	11.45	40	0.42	7.75	6.84	1.34	32.1	27.9	13.55	15
-0.10	8.20	6.84	1.56	27.9	27.9	11.45	41	-0.33	6.63	5.16	1.56	32.1	27.9	13.55	16
0.33	6.22	5.16	1.34	32.1	32.1	11.45	42	0.48	8.13	6.84	1.56	32.1	27.9	13.55	17
-0.27	8.22	6.84	1.34	32.1	32.1	11.45	43	0.17	7.18	6	1.45	25	30	12.50	18
0.51	6.45	5.16	1.56	32.1	32.1	11.45	44	0.37	6.96	6	1.45	30	25	12.50	19
-0.14	8.58	6.84	1.56	32.1	32.1	11.45	45	-0.33	7.95	6	1.7	30	30	12.50	20
0.18	6.06	5.16	1.34	32.1	27.9	11.45	46	0.01	7.69	6	1.45	30	35	12.50	21
-0.27	8.07	6.84	1.34	32.1	27.9	11.45	47	0.17	7.31	6	1.45	30	30	12.50	22
0.40	6.43	5.16	1.56	32.1	27.9	11.45	48	0.27	7.36	6	1.45	30	30	12.50	23
-0.22	8.25	6.84	1.56	32.1	27.9	11.45	49	0.12	7.25	6	1.45	30	30	12.50	24
0.32	7.31	6	1.45	30	30	10.00	50	0.18	7.36	6	1.45	30	30	12.50	25

Table 2. Values of design factors, breaking wave height and sedimentation position of swash zone in experiments

3 Root Mean Square (RMS)

4 Design-Expert software

Significance model

2 Predicted Root Mean Square

بعد از ۲۰ دقیقه به شدت کاهش می‌یابد و موقعیت شروع و خاتمه رسوب‌گذاری سواش تغییر قابل‌توجهی ندارد. پس مدت زمان آزمایش‌ها ۲۰ دقیقه انتخاب شد.

۵- تحلیل داده‌ها

در مجموعه آزمایش‌ها، پارامتر سرعت بی‌بعد سقوط $0/56 < \Omega < 0/27$ و پارامتر تشابه بستر $0/07 < \varepsilon_b < 2/73$ تغییر می‌کند؛ بنابراین ساحل از نوع انعکاسی و عملکرد سواش در محدوده انتقالی است. مقادیر پارامتر شکست $0/67 < \xi_0 < 1/07$ ، گویای وقوع شکست شیرجه‌ای در ناحیه زوال موج است.

مقایسه پروفیل‌های برداشت ساحل در محورهای راست، وسط و چپ، **شکل ۴**، نشان می‌دهد این پروفیل‌ها تا حدی باهم تفاوت دارند و در محدوده سواش تغییرات عرضی کم و رسوب‌گذاری بیشتری در محور مرکزی ساحل اتفاق افتاده است. پدیده‌هایی مانند شکست موج، اندرکنش جریان-موج و اثر دیواره‌های فلوم عامل تغییرات عرضی پروفیل ساحل هستند.

برای تحلیل تغییرات طولی ساحل، پروفیل معرف ساحل Z_m از ترکیب وزنی پروفیل‌های عرضی ساحل به دست می‌آید.

$$Z_m = 0.25Z_l + 0.5Z_c + 0.25Z_r \quad (5)$$

در این رابطه Z_r, Z_c, Z_l به ترتیب تراز پروفیل‌های ساحل در محورهای چپ، وسط و راست است. برای ارزیابی بهتر تغییر شکل‌های ساحل، دستگاه مختصات مرجع موازی با وجه ساحل در محل تلاقی ساحل و تراز آرام آب مطابق **شکل ۵** در نظر گرفته شد. از مقایسه پروفیل‌های اولیه و معرف ساحل، مقدار تغییر شکل در طول ساحل به دست می‌آید.

چنانچه تراز آب پشت ساحل پایین‌تر از تراز آب فلوم باشد دبی معادل نفوذ به ساحل، به وسیله مخزن بار استاتیکی وارد آب فلوم می‌شود و پس از پایداری تراز آب در طرفین ساحل، این جریان متوقف می‌شود. در حین انجام آزمایش‌ها همواره آب عبوری از سرریز انتهایی با پمپ به پشت پدل منتقل می‌شود. به این ترتیب در طول مدت آزمایش تراز متوسط آب فلوم و سفره زیرزمینی در تراز مدنظر حفظ می‌شود و هم‌زمان ارتفاع سنج‌ها تراز لحظه‌ای موج را برداشت می‌کنند.

پس از خاتمه آزمایش امواج حاصل از ترکیب موج برخوردی و انعکاسی به روش منسارد تفکیک می‌شود [۲۴]. مشخصات موج برخوردی با ارتفاع و پرپود مدنظر آزمایش مقایسه می‌شود. در مجموعه آزمایش‌ها بیشینه خطای تولید موج ۲ درصد بود و برای تفکیک امواج از پکیج نرم‌افزار IWS دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد. این نرم‌افزاری در بخش اول داده‌های موردنیاز دستگاه‌های موج‌ساز را تولید می‌کند و در بخش دوم کار تجزیه و تحلیل داده‌های خروجی موج‌ساز، ارتفاع سنج‌های موج و تفکیک امواج را انجام دهد.

قبل از شروع هر آزمایش، پروفیل اولیه ساحل در محور مرکزی فلوم برداشت می‌شود و پس از خاتمه آزمایش و تخلیه کامل آب از سفره زیرزمینی، پروفیل تغییر شکل ساحل در سه محور طولی به فواصل ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر از دیواره فلوم برداشت می‌شود. برای تحلیل دقیق تغییر شکل ساحل، در همه محورها اندازه‌گیری‌های پروفیل در فواصل ۲ سانتی‌متر صورت گرفت.

با مقایسه آزمایش‌ها با مدت‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه مشخص شد حدود ۱۲۰۰ موج و ۸۰ درصد تغییر شکل نهایی ساحل در مدت ۲۰ دقیقه اتفاق افتاده است. همچنین سرعت تغییر شکل ساحل

شکل ۵. پروفیل‌های اولیه، ثانویه ساحل در آزمایش شماره یک

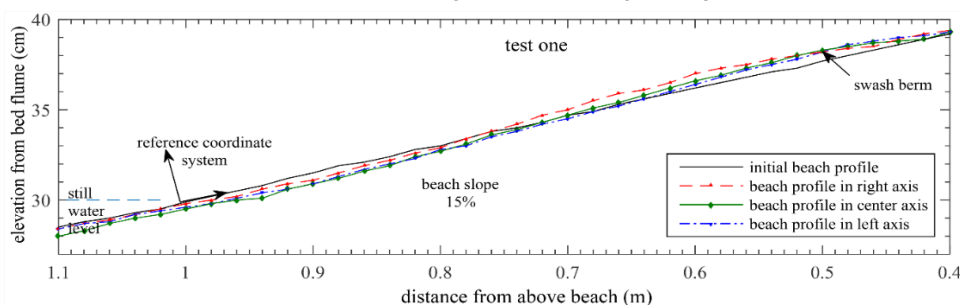


Fig. 5. Initial and secondary beach profiles in test one

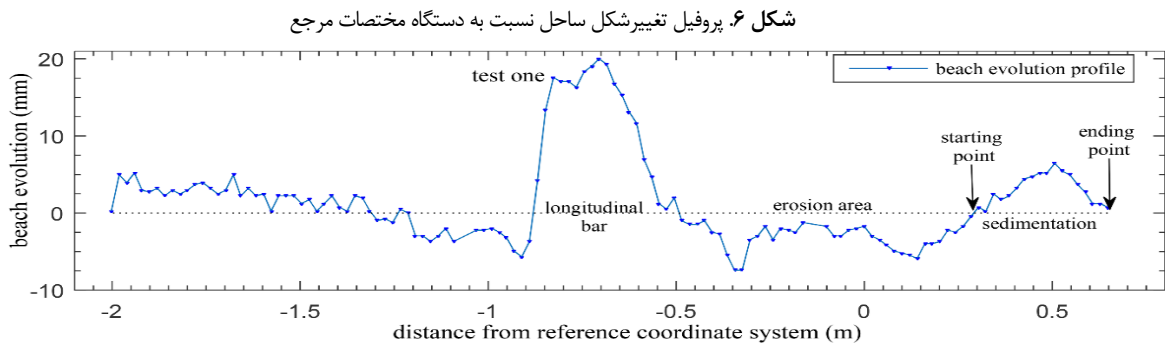


Fig. 6. Beach evolution profile relative to reference coordinate system

بررسی‌های آماری مدل دیده شد مانده‌های مدل، ویژگی توزیع نرمال و واریانس ثابت را دارند و با خود همبسته نیستند.

شکل ۷. مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی مدل سطح پاسخ مرکزی برای موقعیت

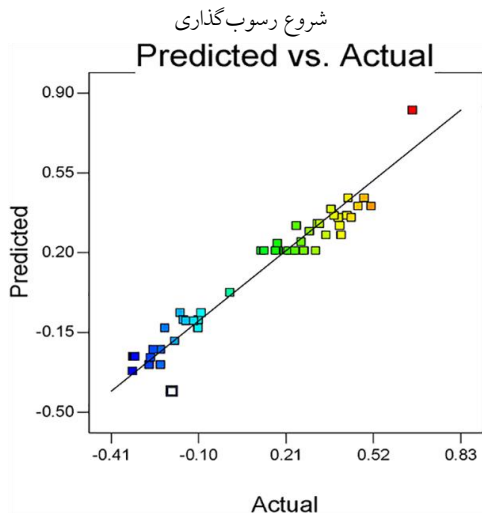


Fig. 7. Comparison of actual and predicted values for sedimentation position

برای تعیین همبستگی خطی بین متغیرهای وابسته و مستقل از

ضریب همبستگی پیرسون، (رابطه ۸)، استفاده می‌شود.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

که در آن r ضریب همبستگی پیرسون، \bar{x} و \bar{y} میانگین n زوج داده آماری (x_i, y_i) است.

در جدول (۱) میزان همبستگی موقعیت شروع رسوب گذاری با متغیرهای طراحی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود بین موقعیت شروع رسوب گذاری و ارتفاع موج ارتباط معناداری (۰/۸۲۹) وجود دارد و بقیه متغیرهای طراحی همبستگی ضعیفی با x_d دارند. لازم به گفتن است ضریب پیرسون فقط همبستگی خطی

شکل (۶) پروفیل تغییر شکل ساحل نسبت به دستگاه مختصات مرجع را نشان می‌دهد معمولاً این پروفیل شامل سه بخش عمده سکوی سواش، محدوده فرسایش و پشته رسوبی است و بیشتر محدوده فرسایش قبل از شروع رسوب گذاری سواش واقع می‌شود. با بررسی دقیق پروفیل تغییر شکل هر آزمایش، موقعیت شروع رسوب گذاری سواش x_d نسبت به دستگاه مختصات مرجع یا به عبارتی تراز آرام آب تعیین می‌شود. مقادیر x_d آزمایش‌ها در جدول (۲) درج شده است. این مقادیر برای مدل سازی به روش سطح پاسخ مرکزی در نرم افزار DE ثبت می‌شود و بر اساس تکنیک آنالیز واریانس، مدل معنادار برای پیش‌بینی مختصات شروع رسوب گذاری سواش، (رابطه ۶)، به دست می‌آید.

$$x_d = 0.21 + 0.26\bar{H}_s - 0.029\bar{h}_s \bar{H}_s + 0.06\bar{T} \bar{H}_s - 0.028\bar{S}_0^2 - 0.043\bar{T}^2 + 0.018\bar{S}_0^3 - 0.014\bar{h}_s^3 - 0.021\bar{T}^3 - 0.056\bar{S}_0^2 \bar{h}_s^2 \quad (6)$$

در این مدل \bar{H}_s ، \bar{h}_s ، \bar{S}_0 و \bar{T} به ترتیب مقادیر استاندارد شیب ساحل، عمق آب فلو، پرید و ارتفاع موج است. مقدار استاندارد هر متغیرهای مؤثر α با رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_{actual} - \alpha_{mean}}{(\alpha_{max} - \alpha_{min})/2} \quad (7)$$

که در آن α_{actual} ، α_{mean} ، α_{max} و α_{min} به ترتیب مقدار واقعی متغیر و مقادیر متوسط، بیشینه و کمینه مشاهدات متغیر است.

مدل موقعیت شروع رسوب گذاری سواش در محدوده تغییر متغیرها با سطح اطمینان ۹۵ درصد و ضریب تعیین ۰/۹۶ به دست آمده است و توانایی پیش‌بینی x_d با ضریب تعیین ۰/۸۶ را دارد. شکل (۷) عملکرد این مدل در پیش‌بینی موقعیت شروع رسوب گذاری و نسبت آن با مقادیر واقعی را نشان می‌دهد. در

شکل ۹. تأثیر ارتفاع و پریود موج بر موقعیت شروع رسوب‌گذاری سواش برای شیب ۱۱/۴۵ درصد و عمق آب ۳۰ سانتی‌متر

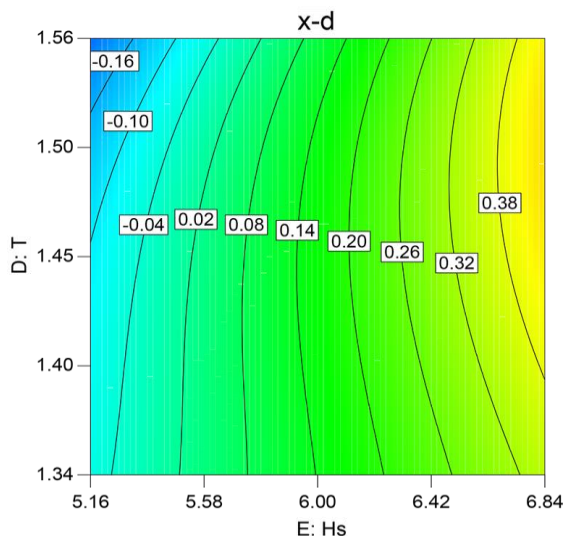


Fig. 9. The effect of height and period wave on sedimentation position in slope 11.45% and water depth 32.10 cm

اثر متقابل ارتفاع-پریود موج به‌خوبی در شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود. با افزایش پریود موج از ۱/۳۴ به ۱/۵۵ ثانیه برای $H_s < 6.30$ موقعیت شروع رسوب‌گذاری از ساحل دور می‌شود درحالی‌که برای $H_s > 6.30$ موقعیت شروع رسوب‌گذاری به ساحل نزدیک‌تر می‌شود. بنابراین با افزایش پریود موج، میزان تأثیر ارتفاع موج بر x_d (شیب‌خط) افزایش می‌یابد.

شکل ۱۰. اندرکنش ارتفاع و پریود موج برای شیب ۱۱/۴۵ درصد و عمق آب ۳۰ سانتی‌متر

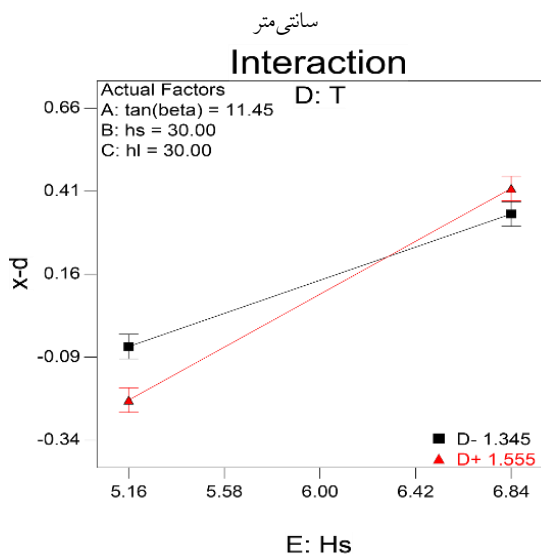


Fig. 10. Interaction effect of height and period wave on sedimentation position in slope 11.45% and water depth 30 cm

دو متغیر را نشان می‌دهد و در روش سطح پاسخ ارتباط تمامی متغیرها به‌صورت ترکیبات خطی و غیرخطی با موقعیت رسوب‌گذاری بررسی می‌شود.

۶- بحث و نتایج

عدم حضور پارامتر h_L در رابطه (۶)، مدل موقعیت شروع رسوب‌گذاری، نشان می‌دهد تراز آب در سفره زیرزمینی تأثیر معناداری بر این موقعیت ندارد. مقایسه میزان تأثیر مقادیر استاندارد پارامترهای طراحی شکل (۸) نشان می‌دهد ارتفاع موج (E) مؤثرترین (شیب تند) متغیر طراحی است و با افزایش ارتفاع موج، نقطه شروع رسوب‌گذاری از زیر تراز آرام آب به بالای ساحل منتقل می‌شود. همچنین پارامترهای پریود موج، عمق آب فلوم و شیب ساحل نسبت به ارتفاع موج تأثیر کمی (شیب ملایم) بر موقعیت شروع رسوب‌گذاری دارند.

اثر همزمان ارتفاع و پریود موج بر موقعیت رسوب‌گذاری سواش را شکل (۹) نشان می‌دهد. برای $T > 1/45$ با افزایش پریود موج، موقعیت شروع رسوب‌گذاری از ساحل دور می‌شود. درحالی‌که برای $T < 1/45$ ، اثر پریود موج با افزایش ارتفاع موج تغییر می‌کند. این تغییر رفتار پریود از جهاتی شبیه به پدیده اندرکنش سواش-سواش است که برای امواج با پریودهای بزرگ‌تر از پریود طبیعی سواش، باعث اندرکنش قوی در سواش می‌شود.

شکل ۸. تأثیر مقادیر استاندارد متغیرها بر موقعیت شروع رسوب‌گذاری سواش

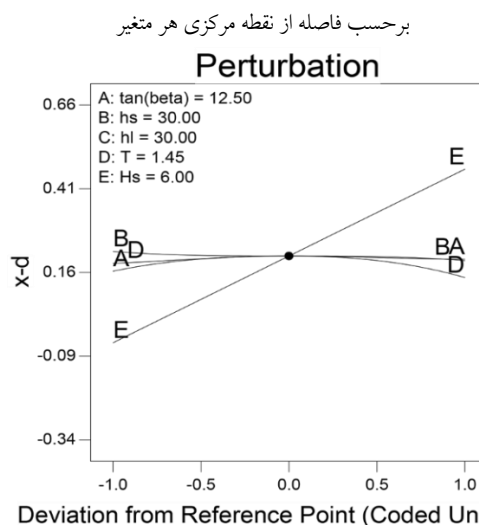


Fig. 8. The effect of factors coded value on sedimentation position

با افزایش ارتفاع موج به ۶/۸۴ سانتی متر، شکل (۱۳) نشان می‌دهد رسوب گذاری با فاصله زیادی از تراز آرام آب در بالای ساحل شروع می‌شود و با کاهش عمق آب در شیب ۱۲/۵ درصد موقعیت شروع رسوب گذاری به ساحل نزدیک تر می‌شود.

شکل ۱۳. اثر شیب ساحل و عمق آب فلوم بر موقعیت شروع رسوب گذاری برای

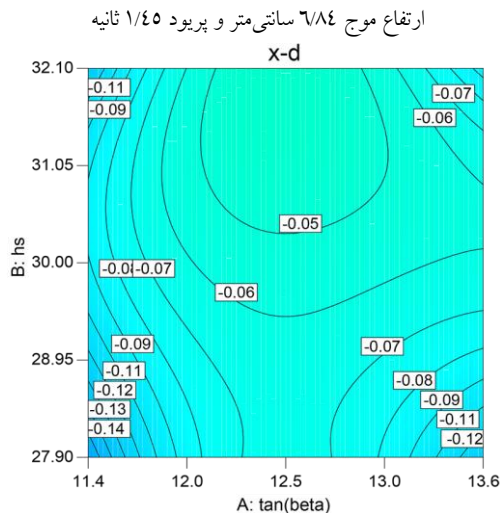


Fig. 13. The effect of slope and water depth on sedimentation position in wave height 6.84 cm and wave period 1.45 cm

۷- نتیجه گیری

در تعداد محدودی از پژوهش‌های آزمایشگاهی گذشته، اثر اندرکنش سفره زیرزمینی - سواش بر تغییر شکل ساحل در نظر گرفته شده است. در این مطالعات تأثیر کیفی تعداد محدودی ارتفاع و پریود موج نامنظم، تراز آب سمت دریا یا تراز آب سفره زیرزمینی، و شیب ساحل بر تغییر شکل سواش بررسی شده است و تاکنون موقعیت شروع رسوب گذاری سواش مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش تأثیر کمی و متقابل همه عوامل بالا بر موقعیت شروع رسوب گذاری سواش بررسی شد. بدین منظور آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ مرکزی از نوع پنج سطحی طراحی شد و مدل آزمایشگاهی جدیدی برای ایجاد تراز پایدار آب در سفره زیرزمینی و فلوم طراحی و ساخته شد. برای ساخت سفره ساحلی از ماسه درشت با قطر متوسط ۰/۸ میلی متر استفاده شد.

با تحلیل موقعیت شروع رسوب گذاری سواش در آزمایش‌ها، به روش سطح پاسخ مرکزی، مدلی با سطح اطمینان ۹۵ درصد و ضریب پیش‌بینی تعیین ۰/۸۶ به دست آمد. این مدل آماری نشان داد تراز آب در سفره زیرزمینی ساحل تأثیر معناداری بر موقعیت شروع رسوب گذاری سواش ندارد. در ضمن ارتفاع موج مؤثرترین عامل

اندرکنش ارتفاع موج - عمق آب فلوم را شکل (۱۱) نشان می‌دهد. با افزایش عمق آب از ۲۷/۹۰ به ۳۲/۱ سانتی متر برای $H_s < 5/60$ موقعیت شروع رسوب گذاری کمی به ساحل نزدیک می‌شود و برای $H_s > 5/60$ موقعیت رسوب گذاری از ساحل دور و به سمت تراز آرام آب نزدیک می‌شود به عبارتی با افزایش عمق آب، میزان تأثیر ارتفاع موج بر x_d (شیب خط) کاهش می‌یابد.

تأثیر شیب ساحل و عمق آب فلوم بر موقعیت شروع رسوب گذاری را شکل (۱۲) نشان می‌دهد. برای ارتفاع موج ۵/۱۶ سانتی متر رسوب گذاری سواش پایین تر از تراز آرام آب شروع می‌شود و در شیب ۱۲/۵ درصد با افزایش عمق آب، موقعیت شروع رسوب گذاری به تراز آرام آب نزدیک می‌شود.

شکل ۱۱. اندرکنش عمق آب فلوم و ارتفاع موج برای شیب ۱۱/۴۵ درصد و

پریود ۱/۴۵ ثانیه

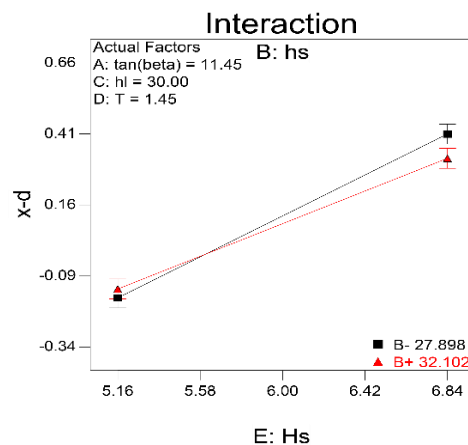


Fig. 11. Interaction effect of height and water depth on sedimentation position in slope 11.45% and water depth 30 cm

شکل ۱۲. اثر شیب ساحل و عمق آب فلوم بر موقعیت شروع رسوب گذاری برای

ارتفاع موج ۵/۱۶ سانتی متر و پریود ۱/۴۵ ثانیه

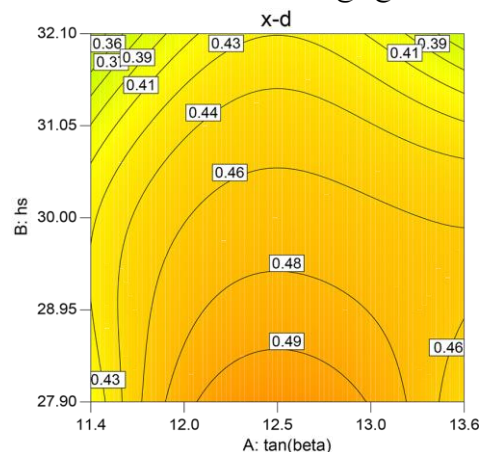


Fig. 12. The effect of slope and water depth on sedimentation position in wave height 5.16 cm and wave period 1.45 cm

7. Butt T., Russell P. & Turner I., 2001 *The influence of swash infiltration-exfiltration on beach face sediment transport: onshore or offshore?* Coastal Engineering, 42: p. 35-52.
8. van der Zanden J., et al., 2015 *Bed level motions and sheet flow processes in the swash zone: Observations with a new conductivity-based concentration measuring technique (CCM+)*. Coastal Engineering, 105: p. 47-65.
9. Masselink G. & Turner I. L., 2012 *Large-scale laboratory investigation into the effect of varying back-barrier lagoon water levels on gravel beach morphology and swash zone sediment transport*. Coastal Engineering, 63(0): p. 23-38.
10. Steenhauer K., Pokrajac D., O'Donoghue T. & Kikkert G. A., 2011 *Subsurface processes generated by bore-driven swash on coarse-grained beaches*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 116(C4).
11. Heiss J. W., Ullman W. J. & Michael H. A., 2014 *Swash zone moisture dynamics and unsaturated infiltration in two sandy beach aquifers*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 143(0): p. 20-31.
12. Erikson L., Larson M. & Hanson H., 2005 *Prediction of swash motion and run-up including the effects of swash interaction*. Coastal Engineering, 52: p. 285-302.
13. Masselink G. & Russell P., 2006 *Flow velocities, sediment transport and morphological change in the swash zone of two contrasting beaches*. Marine Geology, 227: p. 227-240.
14. Guza R. T. & Thornton E. B., 1982 *Swash oscillations on a natural beach*. Journal Of Geophysical Research, 87(C1): p. 483-491.
15. Miles J., Butt T. & Russell P., 2006 *Swash zone sediment dynamics: A comparison of a dissipative and an intermediate beach*. Marine Geology, 231(1-4): p. 181-200.
16. Baldock T. E., et al., 2011 *Large-scale experiments on beach profile evolution and surf and swash zone sediment transport induced by long waves, wave groups and random waves*. Coastal Engineering, 58: p. 214-227.
17. Alsina J. M., Cáceres I., Brocchini M. & Baldock T. E., 2012 *An experimental study on sediment transport and bed evolution under different swash zone morphological conditions*. Coastal Engineering, 68: p. 31-43.
18. Vicinanza D., et al., 2011 *Swash zone response under various wave regimes*. Journal of Hydraulic Research, 49(SUPPL.1): p. 55-63.
19. Ang L., et al., 2004, *Measurement and modelling of controlled beach groundwater levels under wave action*, in 15th Australasian Fluid Mechanics Conference. Sydney, Australia.: The University of Sydney. p. 17.
20. Horn D. P., Baldock T. E. & Li L. 2007. *The influence of groundwater on profile evolution of fine and coarse sand beaches*. in Proceedings of Coastal Sediments. New Orleans, LA.
21. Cartwright N., et al., 2006 *Swash-aquifer interaction in the vicinity of the water table exit point on a sandy beach*. Journal Of Geophysical Research, 111(C9): p. n/a-n/a.
22. Bezerra M. A., et al., 2008 *Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry*. Talanta, 76(5): p. 965-977.
23. Montgomery D. C., 2012, *Design and Analysis of Experiments*, 8th Edition. John Wiley & Sons, Incorporated.
24. Mansard E. P. D. & Funke E. R., 1980 *The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method*. Coastal Engineering Proceedings, 1(17).

اثرگذار بر موقعیت شروع رسوب‌گذاری سواش است و با افزایش ارتفاع موج به سرعت موقعیت شروع رسوب‌گذاری به بالای ساحل جابجا می‌شود.

با افزایش پریود موج موقعیت شروع رسوب‌گذاری در ارتفاع‌های کوچک موج از ساحل دور می‌شود و برعکس در ارتفاع بزرگ موج به ساحل نزدیک می‌شود که نشان‌دهنده اندرکنش قابل ملاحظه ارتفاع و پریود موج است.

با افزایش عمق آب فلوم، برای ارتفاع‌های کوچک موج موقعیت شروع رسوب‌گذاری به ساحل نزدیک می‌شود و برای ارتفاع‌های بزرگ موج، این موقعیت از ساحل دور و به سمت تراز آرام آب حرکت می‌کند. این پدیده اندرکنش تراز آب دریا و ارتفاع موج را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده، افزایش پریود موج و تراز آب دریا به ترتیب اثر افزایشی و کاهش بر نرخ تأثیر ارتفاع موج روی موقعیت شروع رسوب‌گذاری سواش دارد. در شیب ساحل ۱۲/۵ درصد موقعیت شروع رسوب‌گذاری از دریا دور و به ساحل نزدیک‌تر می‌شود.

۸- تشکر و قدردانی

از حمایت مالی سازمان بنادر و دریانوردی برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین لازم است از همراهی‌ها و زحمات جناب آقای مهندس مجتبی پوزش در تجهیز آزمایشگاه و انجام آزمایش‌ها سپاسگزاری شود.

References

۹-مراجع

1. Nel R., et al., 2014 *The status of sandy beach science: Past trends, progress, and possible futures*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 150(0): p. 1-10.
2. Steele J. H., Thorpe S. A. & Turekian K. K., 2008, *Encyclopedia of ocean sciences-volume 1: A - c*. Elsevier ScienceDirect: Amsterdam.
3. Larson M., Kubota S. & Erikson L., 2004 *Swash-zone sediment transport and foreshore evolution: Field experiments and mathematical modeling*. Marine Geology, 212(1-4): p. 61-79.
4. Bakhtyar R., et al., 2009 *Modeling sediment transport in the swash zone: A review*. Ocean Engineering, 36(9-10): p. 767-783.
5. Elfrink B. & Baldock T., 2002 *Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives*. Coastal Engineering, 45: p. 149-167.
6. Longo S., Petti M. & Losada I. J., 2002 *Turbulence in the swash and surf zones: A review*. Coastal Engineering, 45(3-4): p. 129-147.

Sedimentation Position Prediction in the Swash Zone of Sandy Beaches using Response Surface Method

M. Motalebizadeh¹, M. Shafieefar^{2*}, M.Ghodsian³

1- Ph.D. Student, Hydraulic, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Prof., Coastal Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

3- Prof., Hydraulic Structures, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

* shafieefar@modares.ac.ir

Abstract:

The Swash zone, as extreme area of inner surf zone, influences coastal area and coastal structures. It is defined as the part of the beach between the minimum wave run-down and maximum wave run-up. It constitutes a beach area where waves dissipate or reflect their remaining energy after traveling towards the shore. The role of Swash zone is influenced by incoming waves from surf zone, the geometry of beach face and the interaction between beach groundwater and surf zone. The review of Laboratory researches indicated that wave height and period, beach slope, grain size distribution of beach material, still water level (SWL), beach groundwater level, the hydraulic conductivity of beach influence on the evolution of sand beaches. In a few laboratory researches, experiments are designed with One Factor at a Time method (OFAT) and the qualitative effect of parameters of regular wave height and period, SWL and beach groundwater level, and beach slope are investigated on nearshore evolution.

In this research, experiments are designed using Central Composite Design (CCD) of Response Surface Method (RSM). CCD is a type of response surface design that present very good predictions in the middle of the design space. Important properties and features of CCD are orthogonality, rotatability and uniformity. The quantitative effects and interactions of irregular wave height and period, beach groundwater level and SWL, and beach slope on beach profile evolution is examined in a sandy beach by 50 experiments designed with CCD. The experiments were carried out in a wave flume with a length of 16 m and width of 1 m at Hydraulic laboratory of Tarbiat Modares University. The experimental setup is designed to simulate varying beach groundwater level and SWL, and course sand ($d_{50}=0.8\text{mm}$) is selected for beach material. Analysis of hydrodynamic data of the experiments indicated that the type of breaking waves is plunging wave and the hydrodynamic status of the swash zone is intermediate condition. The starting point of swash sedimentation (SWS) is extracted from the mean of the beach profiles evolution.

By analyzing experiments' SWS using CCD, a cubic model is suggested with 95% of confidence level and predicted R-squared of 0.86. The results of model revealed that groundwater level has no significant effect on SWS. Wave height is the most influential factor affecting SWS. Increasing wave height results in the rapid movement of this position to upper beach.

By increasing wave period, SWS got away from coastline in small wave heights, and conversely SWS came close to coastline in high wave heights. This indicates that there is a significant interaction between wave height and period. By increasing water depth flume, SWS came close to beach in small wave heights and it got away from beach in high wave heights, which indicates that there is a mild interaction between wave height and still water level. According to the results, increasing of wave period and still water level increase and decrease the rate of wave height effect, respectively. When the beach slope was 12.5%, SWS got away from the sea and came close to the coastline.

Keywords: Swash Zone, Response Surface Method, Laboratory Model, Sedimentation Position Of Swash