

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1399.6.2.5.1

درصد همانندی: ۵٪

## محاسبه نرخ انتقال رسوبات هم‌اندازه کرانه‌راستا در مناطق ساحلی با استفاده از نظریه نیمه‌خودسانی

زهرا غلامی<sup>۱</sup>، کامران لاری<sup>۲\*</sup>، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی<sup>۳</sup>، امیرحسین جاوید<sup>۴</sup>

- <sup>۱</sup> دانشجوی دکتری فیزیک دریا، گروه فیزیک دریا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران [zahra-gholami@srbiau.ac.ir](mailto:zahra-gholami@srbiau.ac.ir)
- <sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران [k\\_lari@iau-tnb.ac.ir](mailto:k_lari@iau-tnb.ac.ir)
- <sup>۳</sup> استاد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران [bidokhti@ut.ac.ir](mailto:bidokhti@ut.ac.ir)
- <sup>۴</sup> استاد، گروه مهندسی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران [a.javid@srbiau.ac.ir](mailto:a.javid@srbiau.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۸

### چکیده

نیاز روزافزون مهندسان به برآورد دقیق نرخ رسوب‌گذاری برای انجام طراحی بنادر و سازه‌های ساحلی، تعیین میزان لایروبی و هزینه‌های آن، شناسایی واکنش‌های بلندمدت تغییرات رسوب در خط ساحل، استفاده از فرمول جامعی برای محاسبه و پیش‌بینی نرخ انتقال رسوب کرانه‌راستا (LSTR) اهمیت ویژه‌ای برای شروع و ادامه طرح‌های مهندسی دارد. تاکنون فقط تعدادی از پارامترهای مؤثر در هر منطقه برای محاسبات LSTR در نظر گرفته شده که در شرایط پیچیدگی انتقال رسوب در ساحل برآورد دقیقی از نرخ انتقال رسوب کرانه‌راستا را ارائه نمی‌دهند. با توجه به پیچیدگی جریان و رسوب در شرایط مختلف پویایی ساحل، مهندسان نیاز به انتخاب روابطی دارند که علاوه بر پاسخگویی نیاز آن‌ها در شرایط مختلف، پیش‌بینی نسبتاً دقیقی از نرخ انتقال رسوب کرانه‌راستا (LSTR) را نیز ارائه دهد. در این پژوهش ابتدا همه پارامترهای مؤثر بر LSTR بررسی شد، سپس با استفاده از تحلیل ابعادی پارامترهای بی‌بعد و دارای بعد را به یکدیگر مرتبط نموده و برای هر یک از پارامترهای مرتبط معادله‌ای محاسبه شد؛ سپس با استفاده از نظریه نیمه‌خودسانی (ISST)، رابطه انعطاف‌پذیری که در شرایط مختلف پویایی ساحل برای محاسبه LSTR پاسخگو است به دست آمد، در نهایت با استفاده از ۱۰۹۶۷ داده در دوره زمانی ۵۱ ساله معادله‌های مختلف LSTR با معادلات سرک و کامفز و بایرام (CKB) و نظریه نیمه‌خودسانی (ISST) مقایسه شد؛ کمترین خطا مربوط به رابطه ISST و پس از آن CKB است.

**واژه‌های کلیدی:** نرخ انتقال رسوب کرانه‌راستا (LSTR)، فراکتال، آنالیز ابعادی، نظریه نیمه‌خودسانی (ISST)، فرمول‌های سرک و کامفز و بایرام (CKB)

## ۱. مقدمه

از مهم ترین موضوعات مورفودینامیک ساحل و مطالعات مهندسی سواحل در فرایندهای مختلف پویایی حرکت در امتداد ساحل، انتقال رسوب کرانه راستا<sup>۱</sup> است. بررسی و درک و ارزیابی رابطه‌های مربوط به پیش‌بینی انتقال رسوب کرانه راستا به دلیل ارتباط بین پیش‌بینی شرایط هیدرودینامیکی و جابه‌جایی رسوب و فرسایش و تأثیر آن بر سازه‌های ساحلی امری ضروری است.

برای محاسبه نرخ انتقال رسوب کرانه راستا<sup>۲</sup> رابطه‌های متعددی توسط محققان با استفاده از رابطه‌های سرک<sup>۳</sup> و کامفر<sup>۴</sup> بسط داده شده‌اند [۱] و شامل چند فرایند فیزیکی از جمله (تنش برشی، سرعت گرفتن<sup>۵</sup>، تعلیق<sup>۶</sup>، اثرات متقابل موج و جریان و...) هستند. مشکل این رابطه‌ها، پارامترها و ضرایبی هستند که فقط متناسب با شرایط منطقه ابداع کننده فرمول در نظر گرفته شده‌اند. برای استفاده از آن‌ها در سایر مناطق باید بررسی‌های مضاعفی انجام شود که اولاً پارامترهای در نظر گرفته شده در منطقه مبدأ با شرایط مناطق دیگر متناسب باشد، ثانیاً ضرایب و میزان تأثیر هر کدام از عوامل فوق در منطقه مورد استفاده به همان میزانی باشد که در منطقه مبدأ در نظر گرفته شده است.

تاکنون در محاسبات مربوط به روابط و معادلاتی که به بررسی و برآورد نرخ انتقال رسوب کرانه راستا (LSTR) پرداخته‌اند، ساده‌سازی‌هایی صورت گرفته است. به این مفهوم که از برخی پارامترهای مؤثر بر محاسبه نرخ انتقال رسوب صرف نظر شده و باعث شده که اغلب رابطه‌های مورد ارائه فقط محدود به منطقه مورد بررسی و فقط در همان منطقه محقق شوند و نتایج حاصل از روابط ارائه شده غالباً با هم متفاوت شوند یا با آنچه در واقعیت وجود دارد تفاوت‌های چشمگیری داشته باشند (برای مثال ۱۰ برابر).

بنابراین؛ از آن جا که تاکنون هیچ‌یک از معادله‌های انتقال رسوب ارائه شده نتوانسته‌اند به‌طور کامل مورد قبول جامعه مهندسی قرار گیرند، ضروری است محققان رابطه‌ای برای محاسبه LSTR با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای فیزیکی مؤثر بر آن و شرایط و پیچیدگی‌هایی که در پویایی ساحل

ایجاد می‌شود و در زمان‌های مختلف با شرایط جریان و رسوب مختلف پاسخگو است، ارائه دهند. بر اساس آن سایر پژوهشگران می‌توانند با اطمینان و بدون بررسی مجدد ضرایب به راحتی از آن استفاده نمایند.

تا به امروز در کنار مدل‌های عددی از جمله Mike21 و CCHE 2D و ...، روابط ساده و مختلف دیگری نیز برای پیش‌بینی نرخ انتقال رسوبات کرانه راستا ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به رابطه سرک در سال ۱۹۸۴ و کامفر در سال ۱۹۹۱ اشاره کرد. با استفاده از تعداد محدودی از ورودی‌ها، از جمله پارامترهای اصلی حاکم بر انتقال رسوب کرانه راستا، برآورد سریعی از نرخ انتقال رسوب کرانه راستا و فرایندهای فیزیکی مربوط به آن را ارائه می‌دهند. همچنین از سایر شرایط از جمله باد و جریان‌های جزرومدی که می‌توانند بر LSTR تأثیرگذار باشند، صرف نظر می‌کنند [۲، ۳ و ۴].

بایرام<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۷ با استفاده از اصول فیزیکی شکست موج در امتداد ساحل و انتقال رسوب با جریان‌ها، رابطه انتقال رسوب متفاوتی را ارائه کردند [۵].

میل هومنز و استیو در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی به بررسی معادله‌های بالک انتقال رسوب و صحت سنجی با تأثیر پارامترهای مختلف و داده‌های وسیعی پرداختند؛ در نهایت آن‌ها مدلی را برای LST ارائه کردند [۶، ۷ و ۸].

شکریان و بجستان در سال ۱۳۹۳، با استفاده از نظریه باکینگهام و نظریه خودتشابهی ناقص رابطه‌ای کلی برای برآورد نسبت عمق‌های مزدوج روی بستر زیر به دست آوردند [۹]. برنبلت در سال ۱۹۷۶ از نظریه انتقال فاز و نیمه خودسان به‌طور گسترده‌ای استفاده نمود [۱۰].

چنگ و همکاران در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۱۰ با استفاده از نظریه نیمه خودسانی به بررسی بار بستر پرداختند [۱۱].

LST در بیشتر موارد انتقال در محدوده ساحل مؤثر است، همچنین فرایند تغییرات خط ساحل ناشی از اجرای طرح‌ها در محدوده ساحلی به میزان LST بستگی دارد؛ بنابراین، در تعیین مشخصات کلی طرح‌های مهندسی در محدوده ساحل با اهمیت است.

$$S = CV \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{t'} \int_{z=0}^{h+\eta} \int_{t=0}^{t'} C(z, t) V(z, t) dt dz \quad (2)$$

که در آن:

$t'$  زمان کل برحسب ثانیه

$\eta$  افزایش ارتفاع سطح آب برحسب متر

$V(z, t)$  سرعت لحظه‌ای در ارتفاع  $z$  در جهت  $x$  برحسب  $\frac{m}{s}$

$h$  میانگین عمق آب برحسب متر

$C(z, t)$  غلظت لحظه‌ای ستون آب در ارتفاع  $z$  برحسب  $\frac{m^3}{m^3}$

تغییرات محلی سرعت و غلظت در نتیجه تغییرات حرکت نوسانی امواج و همچنین جریان است.

## ۲-۱. مفهوم خودسان کامل، نیمه خودسان و خودسان آماری در ریاضیات

با توجه به نظریه خودسانی، برای یک پدیده فیزیکی پس از مشخص شدن  $n$  گروه بی‌بعد رابطه ۳ را به صورت زیر خواهیم داشت:

$$\Pi = f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n) \quad (3)$$

یک پدیده فیزیکی برای یک گروه بی‌بعد مشخص و معین  $\Pi_n$  دارای شرایط خودسان کامل است اگر  $\Pi_1$  مستقل از  $\Pi_n$  شد.

وقتی  $\Pi_n$  به سمت صفر یا بینهایت میل کند، اگر تابع  $\Pi$  مخالف صفر یا بینهایت شود  $\Pi_n$  دارای شرایط خودسان کامل است و اگر تابع  $\Pi$  به سمت صفر یا بینهایت میل کند،  $\Pi_n$  دارای شرایط نیمه خودسان است.

خودسان کامل قوی‌ترین نوع خودسانی است، فراکتال‌ها در مقیاس‌های مختلف یکسان ظاهر می‌شوند، فراکتال‌های تعریف شده به وسیله سیستم توابع تکراری، اغلب خودسانی دقیقی را نشان می‌دهند.

نیمه خودسانی یک حالت ناکامل از خودسان کامل است، در این حالت فراکتال‌ها در مقیاس‌های مختلف تقریباً و نه دقیقاً یکسان ظاهر می‌شوند. (شکل ۱)

خودسانی آماری ضعیف‌ترین نوع خودسانی است، چون

هدف اصلی این پژوهش محاسبه و ارائه یک رابطه جدید برای محاسبه LSTR با استفاده از تحلیل ابعادی و نظریه نیمه خودسان (نیمه خودسانی) <sup>۸</sup> براساس داده‌های آزمایشگاهی و میدانی (حدود ۲۷۰ نقطه) از نرخ انتقال رسوب ایستگاه‌های مختلف سراسر دنیاست.

محاسبه نرخ انتقال رسوب کرانه‌راستا و برآورد آن در هر یک از سواحل با توجه به پیچیدگی‌های دینامیکی آن با دقت مناسب و تا حد امکان نزدیک به واقعیت، اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش با استفاده از نظریه نیمه خودتشابهی همه پارامترهای مرتبط با انتقال رسوب در نظر گرفته شده و در نهایت با توجه به منطقه مورد مطالعه و تأثیر بیشترین پارامترها بر روی نرخ انتقال رسوب کرانه راستا مقدار آن محاسبه شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

میانگین جریان‌ها بر فرایند شکست امواج مورب ورودی در حال حرکت به سمت ساحل تأثیر می‌گذارد. باعث به همزدن ذرات رسوبی و هدایت آن‌ها از لایه‌های زیرین به سمت ساحل می‌شوند و انتقال رسوب در امتداد ساحل یا همان انتقال رسوب کرانه‌راستا را به وجود می‌آورند [۲، ۱۲].

سرعت و غلظت پارامترهای اصلی مؤثر بر انتقال رسوب هستند؛ هر دوی این پارامترها به پارامترهای مختلف دیگری از جمله تأثیر سرعت امواج و جریان‌ها در مکان‌ها و زمان‌های مختلف بر آن‌ها در منطقه مورد نظر بستگی دارند [۱۳].

وجود امواج و جریان‌ها به دلیل سرعتی که ایجاد می‌کنند و تغییرات غلظت رسوبی که به وجود می‌آورند، عامل اصلی مؤثر بر نرخ انتقال رسوب در ساحل است. سایر پارامترهایی که پژوهشگران مختلف از آن‌ها نام برده‌اند، همه زیرمجموعه‌های از همین عوامل اند [۸].

سرعت و غلظت رسوبات با گذشت زمان در دوره‌ای از یک موج تغییر نموده [۱۴] و طبعاً بر نرخ LST نیز تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین رابطه ۱ که رابطه پایه مربوط به محاسبات انتقال رسوب است را می‌توان به صورت رابطه ۱ بسط داد:

مرتبط و وابسته شدند. رابطه کلی با در نظر گرفتن پارامترهای مرتبط با پدیده مورد نظر مطابق رابطه ۴ در نظر گرفته شد:

$$a = f(a_1 \dots a_k, b_1, b_2) \quad (4)$$

$a_1$  تا  $a_k$  دارای دیمانسیونهای مستقلی هستند، به این مفهوم که انتخاب دلخواه از دیمانسیون آنها می تواند به تغییر مقادیر  $a_1$  تا  $a_k$  منجر شود، به طوری که:

$$a'_k = A_1 a_1 \dots a'_k = A_k a_k \quad (5)$$

در اینجا  $A_1$  تا  $A_k$  اعداد مثبت دلخواهی هستند، به همین روش ابعاد  $a$  و  $b_1$  و  $b_2$  به عنوان تک جمله ای توانی با ابعاد  $a_1$  تا  $a_k$  طبق رابطه ۵ قرار می گیرد:

$$[b_1] = [a_1]^{p_1} \dots [a_k]^{r_1} \quad (6 \text{ الف})$$

$$[b_2] = [a_1]^{p_2} \dots [a_k]^{r_2}$$

$$[a] = [a_1]^p \dots [a_k]^r$$

$$b'_1 = A_1^{p_1} \dots A_k^{r_1} b_1 \quad (6 \text{ ب})$$

$$b'_2 = A_1^{p_2} \dots A_k^{r_2} b_2$$

$$a' = A_1^p \dots A_k^r a$$

رابطه ۴ را می توان به عنوان یک رابطه از پارامترهای رابطه های ۵ و ۶ به صورت رابطه ۷ در نظر گرفت:

$$\Pi = \emptyset(\Pi_1, \Pi_2) \quad (7)$$

که در آن  $\Pi$  و  $\Pi_1$  و  $\Pi_2$  پارامترهای بدون بعد هستند.

$$\Pi_1 = \frac{b_1}{a_1^{p_1} \dots a_k^{p_1}}$$

$$\Pi_2 = \frac{b_2}{a_1^{p_2} \dots a_k^{p_2}} \quad (8)$$

$$\Pi = \frac{a}{a_1^p \dots a_k^r}$$

با توجه به رابطه ۷ و ۸ می توان متغیرهای بعدی را برای تابع  $f$  رابطه ۴ به صورت رابطه ۹ است:

$$F = a_1^p \dots a_k^r \emptyset \left( \frac{b_1}{a_1^{p_1} \dots a_k^{p_1}}, \frac{b_2}{a_1^{p_2} \dots a_k^{p_2}} \right) \quad (9)$$

به طور کلی سه حالت وجود دارد:

۱.  $\Pi_2$  به سمت صفر میل کند، در این حالت  $\emptyset = 0$
۲.  $\Pi_2$  به سمت صفر میل کند، اگر مقدار غیر صفری برای تابع  $\emptyset$  وجود نداشته باشد، در این حالت تابع  $\emptyset$  دارای یک تقریبی طبق رابطه ۱۰ خواهد بود:

$$\emptyset = \Pi_2^{\alpha_1} \emptyset_1 \left( \frac{\Pi_1}{\Pi_2^{\alpha_2}} \right) \quad (10)$$

فراکتالها اندازه های عددی یا آماری دارند که در سرتاسر مقیاسها حفظ می شوند [۹]، بیشتر تعاریف متعارف فراکتالها بر شکل های خودسان آماری دلالت دارند. خودسانی آماری یکی از ویژگی های اساسی فراکتالها و پایه و اساس تجزیه و تحلیل های فراکتالی است [۵].

اشیاء فراکتالی اغلب خودسان یا خودمشابه اند؛ بنابراین الگویی مشابه در اجزاء مختلف این اشیاء به چشم می خورد. بر اساس میزان تشابه موجود در بین اجزا گوناگون می توانند از صد در صد خودمشابه بودن (خودسان کامل) <sup>۹</sup> آغاز و به درجه های کوچک تری از تشابه تصادفی یا آماری <sup>۱۰</sup> ختم شود [۵].



شکل ۱. نمونه ای از فراکتال های خودسان و نیمه خودسان در طبیعت که با فرایندهای ساحلی ساخته شده

### ۳. تئوری و محاسبات

#### ۳-۱. تحلیل ابعادی پارامترهای مؤثر بر LST با استفاده از روش نیمه خودسانی

عبارت ها و متغیرهای خودسان ابتدا از تحلیل ابعادی و روابط ریاضی شروع می شوند [۱۵].

کامفز در رابطه های قبلی LST، مجموعه ای از پارامترهای بدون بعد ارائه کرده است [۱۶]. اگر از تحلیل ابعادی کامفز استفاده شود، باید به طور دائم ضرایب موجود در رابطه کامفز با داده های جدید و گسترده تر کالیبره شود، به همین دلیل روش استفاده شده برای تحلیل ابعادی در این پژوهش مطابق روش کامفز نیست. برای محاسبه رابطه جدید LST با استفاده از نظریه نیمه خودسانی، ابتدا همه پارامترهای مؤثر بر نرخ انتقال رسوب کرانه راستا بررسی و لحاظ شد، سپس پارامترهایی که به هم وابسته بودند با استفاده از تحلیل ابعادی به صورت واحد با توانها و ضرایب به یکدیگر

وقتی در رابطه ۱۴،  $x$  خیلی کوچک باشد یا در این رابطه  $x$  خیلی بزرگ باشد؛ در حالت خودسانی کامل نیز  $f(x) \neq 0$  است.

در صورتی که محدودیت مخالف صفری برای مقادیر بسیار کوچک یا بسیار بزرگ برای پارامتر  $x$  در نظر گرفته نشود؛ تابع را می‌توان به صورت توانی و به صورت رابطه ۱۵ نوشت:

$$Z_1 = Cx^\alpha \quad (15)$$

رابطه شماره ۱۵ رابطه نیمه‌خودسانی اولیه برای انتقال رسوب با ضریب ثابت  $C$  و متغیر  $x$  است؛ با در نظر گرفتن دو یا چند متغیر مستقل به صورت زیر رابطه ۱۵ بسط می‌دهیم:

$$Z_2 = f(x, y) \quad (16)$$

که در آن  $Z_2$  و  $x$  و  $y$  پارامترهای بدون بعد هستند.

اگر حالت نیمه‌خودسانی برای  $x$  وجود داشته باشد؛ مقدار تقریبی تابع خطی و توانی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Z_2 = Y_1(y)x^{Y_2(y)} \quad (17)$$

که در آن هم  $Y_1$  و هم  $Y_2$  وابسته به  $y$  هستند. (به  $y$  بستگی دارند). اگر نیمه‌خودسانی را برای  $y$  هم نوشته می‌شود:

$$Z_2 = X_1(x)y^{X_2(x)} \quad (18)$$

که در این جا هم  $X_1$  و  $X_2$  به  $x$  بستگی دارند.

رابطه‌های ۱۷ و ۱۸ یک نوع از آنالیز ساختاری بسیار ساده از رابطه انتقال رسوب LST هستند؛ با اعمال تغییر بر رابطه ۱۷ داریم:

$$\frac{\partial \ln z_2}{\partial y} = \frac{1}{Y_1} \frac{dY_1}{dy} + \frac{dY_2}{dy} \ln x \quad (19)$$

$$\frac{\partial \ln z_2}{\partial x} = \frac{Y_2}{x} \quad (20)$$

برای رابطه ۱۸ هم می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial \ln z_2}{\partial x} = \frac{1}{X_1} \frac{dX_1}{dx} + \frac{dX_2}{dx} \ln y \quad (21)$$

$$\frac{\partial \ln z_2}{\partial Y} = \frac{X_2}{y} \quad (22)$$

با مقایسه معادله‌های ۲۰ و ۲۲ داریم:

$$Y_2 = \frac{x}{X_1} \frac{dX_1}{dx} + x \frac{dX_2}{dx} \ln \ln y \quad (23)$$

۳. مانند حالت ۱ و ۲ نباشد که در آن‌ها  $\Pi_2$  به سمت صفر میل کند، تابع  $\emptyset$  هیچ نوع محدودیتی از لحاظ تقریب توانی و مقدار صفر نخواهد داشت؛ این حالت را خودسان کامل یا خودسان پارامتری نوع اول  $\Pi_2$  می‌نامند.

قسمت دوم رابطه ۱۰ را می‌توان با استفاده از رابطه ۹ به صورت رابطه ۱۱ به دست آورد:

$$\Pi^* = \frac{\emptyset_1(\Pi_1^*)}{\Pi} = \frac{a}{\Pi_2^{\alpha_1} = a_1^{p-\alpha_1 p_1} \dots a_k^{r-\alpha_1 r_1} b_2^{\alpha_2}} \quad (11)$$

$\Pi_1^* = \frac{\Pi}{\Pi_2^{\alpha_2}} = \frac{b_1}{a_1^{p_1-\alpha_2 p_2} \dots a_k^{r-\alpha_2 r_2} b_2^{\alpha_2}}$   
خودسان کامل در پارامتر  $\Pi_2$  به این مفهوم است که علاوه بر رابطه ۷، که اساس آنالیز ابعادی را تشکیل می‌دهند، برای  $\Pi_2$ ‌های کوچک به صورت رابطه ۱۲ است:

$$\begin{aligned} a_1' &= a_1 \\ &\vdots \\ a_k' &= a_k \\ b_1' &= b_1 \\ b_2' &= B b_2 \\ a' &= a \end{aligned} \quad (12)$$

و در آن  $0 < \beta < 10$  است.

با توجه به نظریه نیمه خودسان برای  $\Pi_2$ ‌های کوچک، مدل‌های ریاضی دارای ثابت‌های اضافه‌تر با توجه به گروه‌های پیچیده‌تر، وجود دارد [۱۸].

$$\begin{aligned} a_1' &= a_1 \\ &\vdots \\ a_k' &= a_k \\ b_1' &= B^{\alpha_2} b_1 \\ b_2' &= B b_2 \\ a' &= B^{\alpha_1} a \end{aligned} \quad (13)$$

### ۲-۳. محاسبه رابطه جدید LSTR با استفاده از نظریه نیمه‌خودسانی

ابتدا از رابطه ۱۴ برای مفهوم نیمه‌خودسانی استفاده [۱۰] و به ترتیب معادله‌های LSTR آغاز می‌شوند:

$$Z_1 = f(x) \quad (14)$$

در رابطه ۱۴،  $x$  و  $Z_1$  پارامترهای بدون بعد هستند.

در این حالت نیز دو نوع از خودسانی را می‌توان در نظر گرفت.

$$\begin{aligned}\alpha_{10} &= C_2 \\ n_1 &= 1 \\ n_2 &= 0\end{aligned}$$

و

$$\begin{aligned}\alpha_{01} &= C_4 \\ n_1 &= 0 \\ n_2 &= 1\end{aligned}$$

و

$$\begin{aligned}\alpha_{11} &= C_3 \\ n_1 &= 1 \\ n_2 &= 1\end{aligned}$$

بنابراین تابع خطی رابطه ۳۱ به صورت ترم لگاریتمی نوشته می شود؛ حال تابع جدید  $Z_3$  که وابسته به  $Z_2$  و  $t$  است در نظر گرفته می شود:

$$Z_3 = f(Z_2, t) \quad (32)$$

که در آن  $Z_2$  تابعی از  $x$  و  $y$  است.

اگر  $Z_3$  محدودیت مخالف صفر نداشته باشد و  $Z_2$  و  $t$  به اندازه کافی کوچک یا بزرگ باشند، می توان فرض کرد که نیمه خودسانی برای  $Z_2$  و  $t$  وجود دارد [۱۱].

برای رابطه ۳۲ نیز داریم:

$$Z_3 = C_9 Z_2^{C_{10}} \ln \ln Z_2 + C_{12} \quad (33)$$

که در آن  $C_9$  و  $C_{10}$  و  $C_{11}$  و  $C_{12}$  مقادیر ثابتند.

با جایگذاری رابطه ۲۹ در رابطه ۳۳ و خطی سازی نتیجه می شود:

$$\begin{aligned}\ln \ln Z_3 &= \ln \ln a_1 + a_2 \ln \ln x + a_3 \ln \ln y \\ &+ a_4 \ln \ln t + a_5 \ln \ln x \ln \ln y \\ &+ a_6 y + a_7 \ln \ln y \ln \ln t \\ &+ a_8 \ln \ln x \ln y \ln \ln t\end{aligned} \quad (34)$$

یا همانند رابطه ۲۹ می توان نوشت:

$$\begin{aligned}Z_3 &= a_1 x^{a_2} y^{a_3 + a_5 \ln \ln x} t^{a_4 + a_6 \ln \ln x + \ln \ln y} + a_8 \ln \ln x \ln y \\ &\quad (35)\end{aligned}$$

که در آن  $a_1$  تا  $a_8$  ثابت اند.

با توجه به رابطه ۳۵ در صورتی که برای سه متغیر  $x$  و  $y$  و  $t$  نیمه خودسانی وجود داشته باشد،  $\ln Z$  می تواند به صورت

$$\ln \ln (x) \ln \ln (y) \ln \ln (t)$$

آن به صورت زیر استخراج می شود:

از آن جا که  $Y_2$  فقط تابعی از  $y$  است و  $X_1$  و  $X_2$  فقط به  $x$  بستگی دارند، می توان برای  $\frac{x}{x_1} \frac{dX_1}{dx}$  و  $x \frac{dX_2}{dx}$  در رابطه ۲۳ نوشت:

$$\begin{aligned}x \frac{dX_2}{dx} &= \text{cte} \\ \frac{x}{x_1} \frac{dX_1}{dx} &= \text{cte}\end{aligned} \quad (24)$$

با انتگرال گیری از رابطه بالا داریم:

$$X_1 = C_1 X^{c_2} \quad (25)$$

$$X_2 = C_3 \ln \ln x + C_4 \quad (26)$$

که در آن  $C_1$  و  $C_2$  و  $C_3$  و  $C_4$  ثابت هستند.

برای معادله های ۱۹ و ۲۲ نیز به صورت نمایی داریم:

$$Y_1 = C_5 y^{c_6} \quad (27)$$

$$Y_2 = C_7 \ln y + C_8 \quad (28)$$

با جایگذاری رابطه ۲۵ و ۲۶ در رابطه ۱۸ و جایگذاری رابطه ۲۷ و ۲۸ در رابطه ۱۷ خواهیم داشت:

$$Z_2 = C_1 x^{c_2} y^{c_3 \ln x + c_4} = c_5 y^{c_6} x^{c_7 \ln y + c_8} \quad (30)$$

با لگاریتم گیری از رابطه ۲۹ داریم:

$$\begin{aligned}\ln \ln Z_2 &= \ln \ln C_1 + C_2 \ln \ln x + C_4 \ln \ln y + C_3 \\ &\quad \ln \ln x \ln \ln y \\ &= \ln \ln C_5 + C_6 \ln \ln y + C_8 \ln \ln x + C_7 \\ &\quad \ln \ln x \ln \ln y\end{aligned} \quad (30)$$

در رابطه ۳۰:

$$C_1 = C_5, \quad C_2 = C_8, \quad C_3 = C_3, \quad C_4 = C_6$$

$\ln \ln Z_2$  هم می تواند به صورت یک تابع خطی از  $\ln \ln(x)$

$\ln \ln(y)$  باشد یا به صورت ضربی از  $\ln \ln(x) \ln \ln(y)$

باشد، برای مثال:

$$\ln Z_2 = \sum_{n_1=0}^1 \sum_{n_2=0}^1 a n_1 n_2 (\ln \ln x)^{n_1} (\ln \ln y)^{n_2} \quad (31)$$

که  $n_1 n_2 a$  نشان دهنده چهار ضریب است.

$$\alpha_{00} = \ln \ln C_1$$

بنابراین از آن جا که  $n$  فقط و فقط می تواند صفر و یک

باشد باید:

$$\begin{aligned}n_1 &= 0 \\ n_2 &= 0\end{aligned}$$

و

چگالی سایر مایعات موجود در آن  $\rho$  و افزایش یا کاهش تراکم در آن، گرادیان انتقال رسوب یا به عبارتی انتقال هندسی استاندارد آن  $\sigma_g$ ، غلظت رسوب  $C$  و سرعت جریان در فاصله  $z$  از منطقه خیزاب ساحلی بر انتقال رسوب تأثیر گذارند.

متوسط وابسته به زبری است،  $V$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V = f(S, h, v, D_{50}, \sigma_g, g, \rho_s, \rho, C) \quad (39)$$

رابطه ۳۹ حاکی از آن است که غلظت رسوب و میزان انتقال رسوب در طول واحد  $q_v$  به صورت حجمی به ۹ متغیر به شرح زیر بستگی دارد:

$$q_v = f(S, h, v, D_{50}, \sigma_g, g, \rho_s, \rho, V) \quad (40)$$

$C$  و  $q_v$  نیز با رابطه زیر به هم مرتبط هستند:

$$q_v = \frac{C Q}{10^6 - C B \rho_s} \quad (41)$$

که در آن

$C$  به‌عنوان نسبت جرم رسوب در حجم آبی است که در واحد زمان از یک مقطع از آن می‌گذرد.  
 $Q$ : دبی (تخلیه<sup>(۱)</sup>) جریان و  $B$  عرض جریان است<sup>(۱)</sup>.

با استفاده از آنالیز ابعادی و با انتخاب  $g$ ،  $\rho$  و  $D_{50}$  به‌عنوان متغیرهای تکراری، در ابتدا  $q_v$  به صورت زیر استخراج شد:

$$\frac{q_v}{\sqrt{g} D_{50}^3} = f \left[ S, \frac{V}{\sqrt{g} D_{50}}, \frac{h}{D_{50}}, \left( \frac{g}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}} D_{50}, \sigma_g, \frac{\rho_s}{\rho} \right] \quad (42)$$

با ترکیب برخی از پارامترهای بدون بعد، رابطه ۴۲ را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\frac{q_v}{\sqrt{\Delta g} D_{50}^3} = f \left[ \frac{h S}{\Delta D_{50}}, \frac{V}{\sqrt{g} D_{50}}, \frac{h}{D_{50}}, \left( \frac{\Delta g}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}} D_{50}, \sigma_g, \Delta \right] \quad (43)$$

$$\phi = f \left( \theta, F_g, \frac{h}{D_{50}}, D_*, \sigma_g, \Delta \right) \quad (44)$$

#### ۴. یافته‌ها

از لحاظ نظری رابطه‌ای که هم در شرایط دوبعدی جریان و هم با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر انتقال رسوب کرانه راستا قابل استفاده باشد، باید محاسبه شود و برای مهندسان

$$\ln z_2 = \sum_{n_1=0}^1 \sum_{n_2=0}^1 \sum_{n_3=0}^1 \alpha_{n_1 n_2 n_3} (\ln \ln x)^{n_1} (\ln \ln y)^{n_2} (\ln \ln t)^{n_3} \quad (36)$$

که در آن  $n_1 n_2 \propto n_3$  دلالت بر  $2^3$  یا ۸ ثابتی است که در رابطه ۳۵ ارائه شد.

بنابراین به طور کلی با توجه به تجزیه و تحلیلی که ارائه شد می‌توان تابع  $Z_N$  که در آن  $N$  به متغیر  $x_N, \dots, x_2, x_1$  بستگی دارد، با استفاده از نظریه نیمه‌خودسانی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\ln \ln Z_n = \sum_{n_1=0}^1 \sum_{n_2=0}^1 \dots \sum_{n_N=0}^1 \alpha_{n_1 n_2 \dots n_N} (\ln \ln x_1)^{n_1} (\ln \ln x_2)^{n_2} \dots (\ln \ln x_N)^{n_N} \quad (37)$$

سمت راست رابطه ۳۷ مجموع  $2^N$  ترم است.  $(k2^N)$  با ضریب کالیبره؛ بنابراین  $2^N$  ضریب کالیبره دلخواه شامل پارامترهای مؤثر بر نرخ انتقال رسوب در ساحل محاسبه می‌شود.

### ۳-۳. آنالیز ابعادی پارامترهای مختلف مرتبط با انتقال رسوبات

برای انجام راه‌حل‌های بسیار پیچیده خودسان ابتدا باید ساده‌سازی‌هایی را در نظر گرفت، از این رو فرض می‌شود: جریان ثابت و یکنواخت است، دانه‌بندی ساحل یکنواخت و رسوبات هم‌اندازه‌اند، انتقال رسوب به صورت تعادلی وجود دارد و انتقال رسوب فقط به موازات ساحل رخ می‌دهد [۱۳ و ۱۴].

سرعت جریان متوسط مؤثر بر نرخ انتقال رسوب کرانه راستا در یک محدوده وسیع وابسته به پنج پارامتر اصلی زیر است:

$$V = f(S, h, \theta, k_s, g) \quad (38)$$

که در آن  $S$  شیب ساحل،  $h$  عمق جریان،  $\theta$  ویسکوزیته حرکتی سیال،  $k_s$  زبری و  $g$  شتاب گرانش است.

در حضور رسوبات، سرعت جریان می‌تواند متأثر از خواص رسوب باشد، برای مثال دانه‌بندی  $D_{50}$ ، چگالی رسوب  $\rho_s$  یا



در این پژوهش از شش داده معتبر شش ایستگاه در آمریکا مطابق جدول‌های ۱ و ۲ برای تجزیه و تحلیل فرایند انتقال رسوب استفاده و تمام داده‌ها در محدوده دانه‌بندی ۰/۱۵ تا ۰/۴۵ میلی‌متر است که از گزارش‌ها و مقاله‌ها و سایر دانشگاه‌های معتبر استخراج شدند. مجموعه داده‌ها در شرایط موج ملایم<sup>۱۴</sup> با ارتفاع کمتر از ۲ متر و ذرات بستر در محدوده ۰/۲ تا ۰/۶ میلی‌متر قرار دارند؛ برای اطمینان نیز با نرم‌افزار یونی بست<sup>۱۵</sup> بررسی و صحت‌سنجی انجام شد. همه داده‌ها شرایط موج (ارتفاع، پرید و زاویه) برای نرخ انتقال رسوب در ساحل با اندازه دانه‌بندی هم‌اندازه برآورده می‌سازند.

بیشتر داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش با استفاده از اندازه‌گیری کوتاه‌مدت و روش نمونه‌برداری مستقیم یا تغییرات حجم کوتاه‌مدت در ایستگاه‌های کشور آمریکا مطابق جدول‌های ۱ و ۲ به دست آمده است [۸،۷].

تجزیه و تحلیل عملکرد مدل‌های مختلف رابطه ۴۵ و ارزیابی آن مبتنی بر داده‌های میدانی (جدول ۱ و ۲)، با استفاده از اندازه‌گیری خطا در مجموع ۱۰۹۶۷ داده با دوره زمانی ۵۱ ساله (۱۹۵۳-۲۰۰۴) در شرایط مختلف و اندازه‌گیری‌هایی با فریم‌های مختلف از چند دقیقه تا چند ماه انجام شده است [۷، ۸].

با وجود این که مدت زمان مربوط به این داده‌ها کم است، ولی از لحاظ کیفی مناسب و برای ایجاد رابطه بین ارتفاع موج، زاویه موج شاخص و انتقال رسوبات کرانه‌راستا قابل قبول هستند [۸].

برای محاسبه خطای مقادیر میدانی و محاسبه‌شده با استفاده از نظریه نیمه خودتشابهی ابتدا بایاس و میانگین مربعات محاسبه [۱۵]، سپس با رابطه CKB و سایر معادله‌ها مقایسه شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log \log(Qp.i) - \log(Qm.i))^2}{n}} \quad (46)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (\log \log(Qp.i) - \log \log(Qm.i))}{n} \quad (47)$$

قابل استفاده و در دسترس باشد؛ به دلیل درک محدود از کلیه شرایط مؤثر بر انتقال رسوب و پویایی ساحل هنوز چنین رابطه‌ای در منابع موجود قابل دسترس نیست. به لحاظ نظری می‌توانیم با کاهش پارامترهای رابطه ۴۴ با فرض اینکه انتقال رسوب در حالت تعادلی شامل  $h$  و  $V$  و  $S$  است، برای محاسبه LSTR یا برآورد غلظت رسوب و با بی‌بعد سازی دیمانسیون‌های غیر مرتبط با شرایط منطقه، پارامترهای  $Fg$  و  $\theta$  و  $h/D_{50}$  را حذف نماییم.

در مرحله بعد با استفاده از مفهوم نیمه خودسانی  $\phi$  می‌تواند با یک توان مشابه به سادگی مانند رابطه ۱۵ شود.

وقتی  $V$  بسیار بزرگ شود یا زمانی که  $D$  یا  $\Delta$  بسیار کوچک باشند منطقی است که  $\phi$  بی‌نهایت باشد. همچنین وقتی  $h$  بسیار کوچک است، مقادیر بزرگی از  $V$  را برای جریان خواهیم داشت؛ برای  $D$  های بسیار کوچک نیز  $\sigma_g$  بسیار بزرگ ظاهر می‌شود. فرض می‌شود که  $ISSST^*$  برای  $\phi$  و سایر پارامترهای مرتبط از جمله  $\Delta$ ،  $\sigma_g$ ،  $D^*$  و  $Fg \frac{h}{D_{50}}$  صحیح است و با ویژگی  $\phi$  رابطه ۴۴ به صورت زیر خواهد شد:

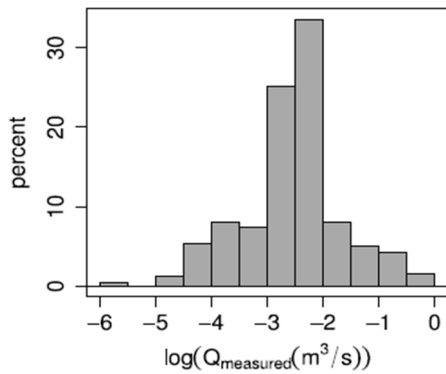
$$\ln \phi = \sum_{n_1=0}^1 \sum_{n_2=0}^1 \dots \sum_{n_6=0}^1 \alpha_{n_1.n_2.n_3.n_4.n_5.n_6} (\ln \theta)^{n_1} (\ln Fg)^{n_2} \left( \ln \frac{h}{D_{50}} \right)^{n_3} (\ln D^*)^{n_4} (\ln \sigma_g)^{n_5} (\ln \Delta)^{n_6} \quad (45)$$

رابطه ۴۵ ساختار کلی را برای محاسبه LSTR در مقایسه با مطالعات قبلی ارائه می‌دهد. این ساختار با توجه به توان‌های موجود در آن که با استفاده از رابطه ۱۵ ساخته شده، می‌تواند انعطاف پذیر باشد و انتخاب پارامترهای آن با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه دلخواه باشد. از طرفی همان‌طور که مشاهده می‌شود وقتی از پارامترهای مختلف برهم کنش در رابطه ۴۵، صرف نظر شود، شبیه رابطه ریاضی تحلیل رگرسیون منظم خواهد شد؛ این تشابه مقایسه رابطه ۴۵ را با سایر معادله‌ها آسان‌تر می‌نماید. اگر تمام پارامترهای مؤثر بر انتقال رسوبات در سمت راست رابطه ۴۵، در نظر گرفته شود، در مجموع ۲۶ یا ۶۴ ترم وجود دارد.

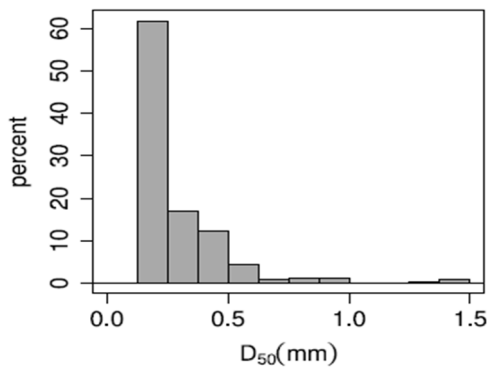


جدول ۲. داده‌های میدانی سواحل شنی، کشور آمریکا [۱۳، ۷]

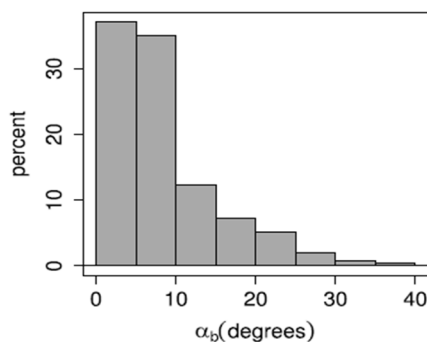
ایستگاه	$d_{50}$ mm	$\tan\beta$ (-)	$H_{s,br}$ (m)	$\theta_{br}$ (m)	$T_p$ (m)	$Q_{t,mass}$ $\frac{kg}{s}$
شورهام ۱۹۸۹	۲۰	۰/۱	۰/۳	۱۵	۳	۰/۰۵
	۲۰	۰/۱	۰/۳۵	۱۵	۳	۰/۱۶۷
	۲۰	۰/۱	۰/۴	۱۵	۳	۰/۳
هارست ۱۹۹۱	۳۲	۰/۱	۰/۷۵	۱۵	۶	۰/۵
	۳۲	۰/۱	۰/۱	۱۵	۶	۱/۵



شکل ۲. نرخ انتقال رسوب با استفاده از محاسبات میدانی



شکل ۳. دانه‌بندی رسوبات با استفاده از محاسبات میدانی

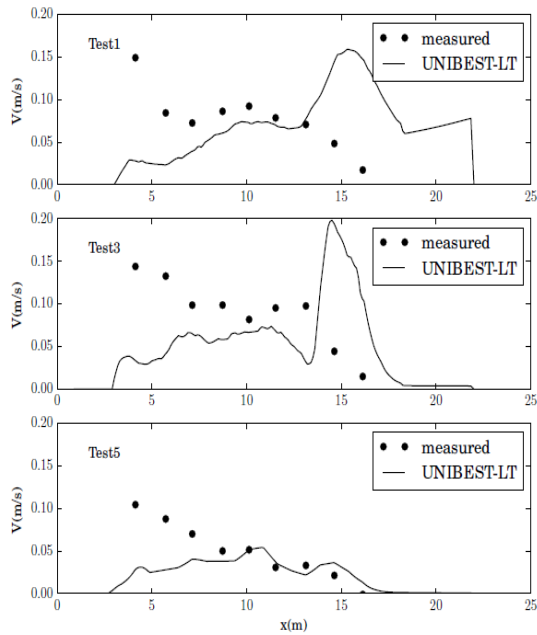


شکل ۴. زاویه موج شاخص در نقطه شکست با استفاده از محاسبات میدانی

جدول ۱. داده‌های میدانی ایستگاه‌های مختلف برای LT، پس از انجام

آنالیز حساسیت [۱۵، ۱۴، ۱۳، ۸]

ایستگاه	$d_{50}$ mm	$\tan\beta$ (-)	$H_{s,br}$ (m)	$\theta_{br}$ (m)	$T_p$ (m)	$Q_{t,mass}$ $\frac{kg}{s}$
دریاچه ورث ۱۹۵۲	۰/۴۲	۰/۳۰	۰/۵۵	۱۷	۷	۵
دریاچه میشیگان ۱۹۸۷	۰/۲۵	۰/۸۰	۰/۶۵	۲۵	۴	۴/۳
لیدبت ۱۷، ۱۹۸۱	۰/۲۲	۰/۰۴۶	۰/۸۵۵	۶	۱۱	۱۳/۵
لیدبت ۳۲، ۱۹۸۱	۰/۲۲	۰/۰۱۹	۱/۷۷	۸	۱۱/۹	۱۹۷
شاخه پرایس ۲، ۱۹۷۷	۰/۲۲	۰/۰۱۸	۰/۷۷	۹	۹/۵	۷/۴
شاخه پرایس ۱، ۱۹۷۷	۰/۲۲	۰/۰۲۷	۰/۸	۹	۹/۲	۱۶/۴
داک ۱۴، نوامبر ۱۹۹۵	-۰/۱۵	۰/۲۵	۱/۷۰	۱۰	۸	۱۴۴
داک ۱۱، مارچ ۱۹۹۶	-۰/۱۵	۰/۲۵	۲/۴۰	۱۰	۷	۴۸۳
داک ۲۷، مارچ ۱۹۹۶	-۰/۱۵	۰/۲۵	۱/۸۵	۱۹	۷	۱۵۲
داک ۲، آوریل ۱۹۹۶	-۰/۱۵	۰/۲۵	۱/۷۵	۱۹	۷	۱۸۰
داک ۱، آوریل ۱۹۹۷	-۰/۱۵	۰/۰۲۵	۲/۸۵	۱۶	۹	۳۹۵
داک ۱۹، اکتبر ۱۹۹۷	-۰/۱۵	۰/۰۲۵	۳/۲۰	۱۸	۱۰	۷۳۰
داک ۴، فوریه ۱۹۹۸	-۰/۱۵	۰/۰۲۵	۳/۱۰	۱۹	۱۱	۹۲۰
داک ۵-۷، سپتامبر ۱۹۸۵	۰/۲	۰/۰۲۵	۱/۰۵	۳	۵/۹	۴
ایندین راک ۱۹۹۹، ۴	۰/۳۵	۰/۰۹	۰/۲۹	۴/۱۳	۶/۳	۰/۳۳
ایندین راک ۱۹۹۹، ۵	۰/۳۵	۰/۱۳	۰/۴۰	۷/۱۹	۳	۰/۹۵



شکل ۹. سرعت جریان محاسبه شده با استفاده از یونی بست در امتداد ساحل ( $m^3/yr$ )

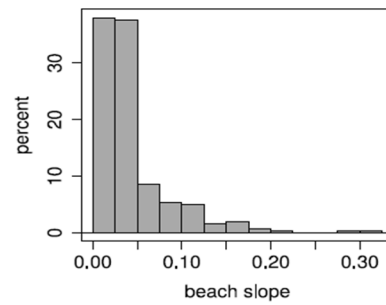
مجموع مربعات، برای مقادیر خطا و همچنین واریانس بیشتر وزن بیشتری را می‌دهد. بایاس<sup>۱۶</sup> نیز فهم جامع از جابه‌جایی (انحراف) اطلاعات را فراهم می‌نماید.

از آن جا که مقادیر لگاریتمی (بر پایه ۱۰) در هر دو اندازه‌گیری آماری در نظر گرفته می‌شوند، مقادیر خطا نشان‌دهنده ضریب بزرگی است. برای مثال مقدار RMSE، به این معنی است که مقادیر پیش‌بینی شده تقریباً به‌طور متوسط ۱۰ برابر بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده هستند [۸، ۱۷].

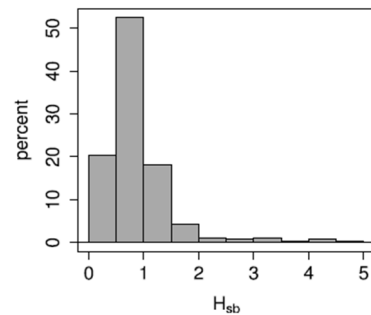
## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

با محاسبات انجام شده بر روی رابطه ۴۵ و بایاس به دست آمده نشان می‌دهد که این رابطه همانند رابطه بایرام تقریباً نزدیک به صفر، فرمول سرک بایاس تقریباً کوچک ولی سایر فرمول‌ها نسبتاً بایاس قابل توجهی دارند.

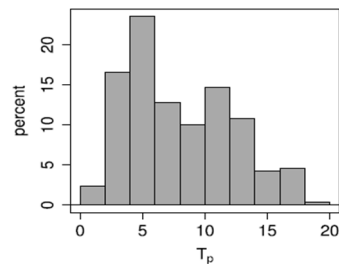
داده‌های شامل LST تحت تأثیر جریان‌هایی است که توسط فرایندهایی غیر از شکست موج (مانند باد و جزرومد) ایجاد یکی دیگر از تردیدها در خصوص استفاده از شرایط موج نماینده<sup>۱۷</sup> و تأثیر اقلیم موج در یک دوره زمانی است [۷، ۸].



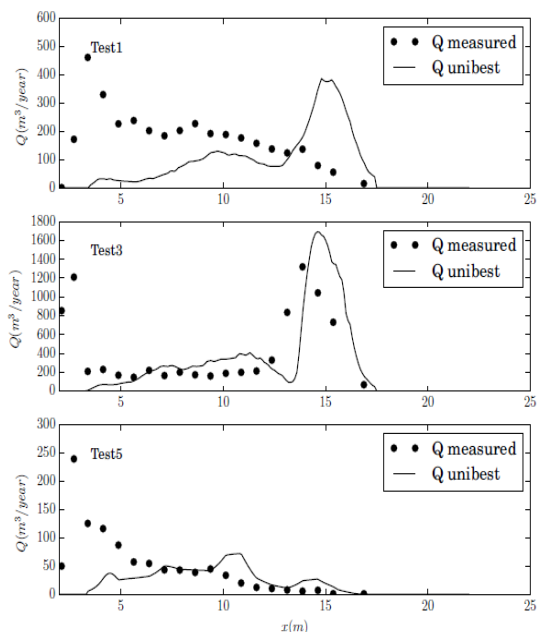
شکل ۵. بیشینه پریود موج با استفاده از محاسبات میدانی (برحسب ثانیه)



شکل ۶. نمودار شیب ساحل با استفاده از محاسبات میدانی



شکل ۷. نمودار ارتفاع موج شاخص در نقطه شکست با استفاده از محاسبات (برحسب متر)



شکل ۸. نرخ انتقال رسوب محاسبه شده با استفاده از یونی بست در امتداد ساحل ( $m^3/yr$ )

جدول ۳. مقایسه خطای فرمول‌های پیشین و جدید LSTF

میانگین مربعات	بایاس	رابطه
۰/۱۷	۰/۵۳۴	سرک با $k = 0.39$
۰/۵۱۸	۰/۱۹۲	سرک با ضریب $K$ کامفز و ردشاو ۱۹۸۷
۰/۶۱۹	۰/۳۴۴	سرک با ضریب $k$ بیلارد ۱۹۸۴
۰/۶۸۱	۰/۳۸۷	سرک با ضریب $k$ دل واله ۱۹۹۳
۰/۶۰۹	-۰/۴۱۷	رابطه اصلی کامفز
۰/۵۵۴	-۰/۳۳۱	کامفز با ضریب $k$ اسکونز و ترون ۱۹۹۶
۰/۰۲۰	۰/۵۷۰	بایرام، ۲۰۰۷
۰/۰۲۰	۰/۴۱۳	رابطه $CKB$
۰/۰۱	۰/۳۰۲	رابطه $LSTF$ با استفاده از $ISST$

پس از بررسی داده‌های میدانی با محاسبات به دست آمده از رابطه انتقال رسوب نیمه‌خودسان مشخص شد:

- نتایج را می‌توان با توجه به تعداد متغیرهای مستقل مورد بررسی در هر منطقه فرمول‌بندی نمود.
- در صورت نادیده گرفتن اثرات متقابل، محاسبات به دست آمده همانند معادلات ریاضی خواهند شد که در تحلیل رگرسیون منظم از آن‌ها استفاده می‌شود.
- به‌طور کلی این روابط برای شرایط خاص و ارزیابی جریان‌های بحرانی در حرکت‌های اولیه رسوبات را شامل نمی‌شوند و برای شرایط انتقال رسوب کمتر قابل قبول‌تر خواهند بود، لذا در این زمینه نیازمند مطالعه بیشتر می‌باشد.
- هر چه بیشتر به بررسی و تحلیل این معادلات پرداخته شود، مشخص می‌شود که حتی نمی‌توان یک دانه‌بندی ثابت با قطر متوسط برای کل یک پهنه ساحلی در نظر گرفت، با توجه به اینکه می‌دانیم دانه‌بندی رسوبات بر میزان برآورد نرخ انتقال آن‌ها بسیار مؤثرند.
- از طرفی میزان تعامل متغیرهای مستقل در یک پهنه برای انجام تحلیل‌های رگرسیونی از اهمیت زیادی برخوردار است.
- با استفاده از مدل‌های موجود و با داده‌های منحصربه‌فرد در مناطقی که تحت تأثیر شرایط جوی قابل توجه می‌باشند، می‌توان رابطه مذکور را کالیبره نمود.

## مراجع

- [۱] افشار کاوه نغمه، سلطانیور محسن. صحت سنجی روابط نرخ انتقال رسوب موازی ساحل در تعدادی از سواحل جنوب ایران. نشریه مهندسی عمران و نقشه‌برداری. ۱۳۸۹؛ ۴۴ (۳): ۳۱۷-۳۲۶.
- [2] Battjes JA, Stive MJ. Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1985 Sep 20;90(C5):9159-67.
- [3] Kamphuis JW. Alongshore sediment transport rate. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 1991 Nov;117(6):624-40.
- [4] Kamphuis JW. Alongshore transport rate of sand. In: Smith JM, editor. *Proceedings of 28th International Conference of Coastal Engineering*; 2002 Jul 7 – 12; Cardiff, Wales; Scientific World Publishing, 2003. p. 2478-90.
- [5] Bayram A, Larson M, Hanson H. A new formula for the total longshore sediment transport rate. *Coastal Engineering*. 2007 Sep 1;54(9):700-10.
- [6] Mil Homens J. Bulk Formulas and Process Based Models [dissertation]. *Civil Engineering and Geosciences*; 2016.
- [7] Mil Homens JP, Ranasinghe RW, Van Thiel de Vries JS, Stive MJ. Influence of profile features on longshore sediment transport. In: *Coastal Dynamics 2013: 7th International Conference on Coastal Dynamics*; 24-28 June 2013; Arcachon, France. Bordeaux University; 2013b.
- [8] Mil Homens J, Ranasinghe R, de Vries JV, Stive MJ. Re-evaluation and improvement of three commonly used bulk longshore sediment transport formulas. *Coastal Engineering*. 2013 May 1;75:29-39.
- [۹] شکران منوچهر، شفاعی بجستان محمود. اثر ارتفاع زبری بستر تندآب بر خصوصیات پرش نوع B. نشریه دانش آب و خاک. ۱۳۹۳؛ ۲۴ (۲): ۲۱۵-۲۲۶.
- [10] Barenblatt GI, Barenblatt GI, Isaakovich BG. Scaling, self-similarity, and intermediate asymptotics: dimensional analysis and intermediate asymptotics. *Cambridge University Press*; 1996 Dec 12.
- [11] Cheng NS. Application of incomplete self-similarity argument for predicting bed-material load discharge. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2011 Sep 1;137(9):921-31.
- [12] Bosboom J, Stive MJ. Coastal dynamics I: lectures notes CIE4305. 2012.

[۱۳] چه تد یانگ، کوچک زاده صلاح، یوسفی کامران. تئوری و کاربرد انتقال رسوب. انتشارات دانشگاه تهران؛ ۱۳۹۱. ص. ۴۶-۴۸، ۵۵-۵۶، ۷۳-۷۵، ۱۲۲-۱۲۹. ۲۰۳-۲۲۶، ۱۴۲-۱۳۴، ۱۲۹

[۱۴] شفافی بجستان محمود. هیدرولیک انتقال رسوب. اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز؛ ۱۳۹۲. ص. ۱۷، ۳۱، ۸۵، ۲۲۲، ۳۰۳-۳۱۵، ۳۹۵

[15] Fernández-Fernández S, Baptista P, Martins VA, Silva PA, Abreu T, Pais-Barbosa J, Bernardes C, Miranda P, Rocha MV, Santos F, Bernabeu A. Longshore transport estimation on Ofir Beach in northwest Portugal: Sand-tracer experiment. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2016 Mar 1;142(2):04015017.

[16] Cheng NS. Application of incomplete self-similarity argument for predicting bed-material load discharge. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2011 Sep 1;137(9):921-31.

[17] Carr KJ, Ercan A, Kavvas ML. Scaling and Self-Similarity of One-Dimensional Suspended Sediment Transport Equations. In: *World Environmental and Water Resources Congress; 2014 Jun 1-5; Portland, Oregon. American Society of Civil Engineers; 2014. p. 1199-1206.*

### پی نوشت

1. Longshore Sediment Transport (LST)
2. Longshore sediment transport Rate (LSTR)
3. CERC
4. Kamphuis
5. Pickup
6. Suspension
7. Bayram, 2007
8. Incomplete Self Similarity (ISS)
9. Deterministic self-similarity
10. Statistical Self Similarity
11. discharge
12. flow width
13. Incomplete Self Similarity Theory
14. Mild wave
15. UNIBEST-LT
16. Bias
17. representative wave