

Development and field evaluation of a biphasic portable streamer trap (BPST) for phase-resolved measurement of bedload and suspended load on the Southern Caspian coast

Rasul Koohzad¹, Reza Dezvareh^{2*}

¹ M.Sc Student, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

² Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Extended Abstract

Introduction

Coastal sediment transport, particularly longshore sediment transport (LST), governs shoreline evolution and port sedimentation. Accurate prediction requires separate quantification of bedload and suspended load capability absent in traditional single-chamber streamer traps, which merge both phases into one sample. This technological gap prevents independent calibration of two-phase numerical models, introducing significant uncertainty into coastal management decisions. This study addresses the gap by developing and field-testing a novel Biphasic Portable Streamer Trap (BPST) equipped with an internal horizontal baffle that physically separates bedload from suspended load at the point of capture. The BPST provides, for the first time, phase-resolved field data essential for advancing sediment transport modeling and enabling evidence-based Integrated Coastal Zone Management (ICZM).

Materials and Methods

The BPST was developed by modifying the full-depth streamer trap design with a stainless-steel horizontal baffle installed 150 mm above the base plate, creating independent lower (bedload) and upper (suspended load) compartments. The 150-mm height was determined from bedload layer thickness theory. A 100- μ m polyester mesh covers the frame. An extended-handle configuration with a boat-based mooring system was developed for deployments deeper than 1.0 m. Field tests were conducted over one year (December 2022–December 2023) on the sandy southern Caspian coast near Nowshahr Port, Iran. The bimodal wave climate comprises calm conditions ($H_s < 0.5$ m, 85% of the year) and storm events ($H_s > 0.5$ m, 15%). Twenty tests were performed at depths of 0.3–1.3 m. Samples from both compartments were separately collected, desalinated, oven-dried, and weighed to 0.1 g precision. Wave, current, and wind data were obtained from a nearshore ADCP and ERA5 reanalysis.

Results and Discussion

The BPST successfully separated the two transport phases across all 20 field tests. The mean total captured sediment was 1665 g per deployment, comprising 1543 g bedload (92.7%) and 122 g suspended load (7.3%). Decisive proof of selective performance was the simultaneous recording of substantial bedload (up to 4890 g) with zero suspended load during calm conditions, confirming complete physical separation. During storm events, suspended load increased significantly, reaching up to 560 g, demonstrating that high-energy waves drive sediment suspension. The extended-handle configuration performed stably in water depths up to 1.3 m, overcoming traditional depth limitations. Analysis of phase-resolved data against synchronous wave measurements confirmed that suspended sediment mobilization occurs primarily during storms, while bedload dominates the annual transport budget. These phase-resolved datasets provide the missing empirical foundation for independently calibrating bedload and suspended load components in two-phase sediment transport models.

Conclusion

This study successfully developed and validated the Biphasic Portable Streamer Trap as a reliable instrument for phase-resolved measurement of coastal sediment transport. The internal baffle design proved effective in

physically separating bedload and suspended load, verified by the selective capture of bedload during calm conditions. On the coast studied, bedload accounts for approximately 93% of total annual LST, with suspended load mobilized primarily during storm events. The BPST bridges the critical gap between two-phase numerical models and field observations by delivering the first phase-resolved datasets for this environment. Minor limitations include the fixed 150-mm baffle height, which may be exceeded by saltating grains in extreme plunging breakers. The BPST offers a robust, cost-effective monitoring platform for Iranian coastal waters and supports evidence-based ICZM. Future work should deploy BPST arrays across broader spatiotemporal scales to construct regional phase-resolved sediment transport atlases and systematically integrate these data into numerical model calibration routines.

Keywords: Sediment Sampler, Surf Zone, Wave-Current Sediment Transport, Two-Phase Model Validation, Coastal Morphodynamic Monitoring

Article Type: Research Article

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available at a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Rasul Koohzad: Writing - original draft preparation, Formal analysis and investigation; **Reza Dezvareh:** Resources, Software, Manuscript editing, Visualization, Supervision, Conceptualization

*Corresponding Author, E-mail: rdezvareh@nit.ac.ir

Citation: Koohzad, R. & Dezvareh, R. (2026). Development and field evaluation of a biphasic portable streamer trap (BPST) for phase-resolved measurement of bedload and suspended load on the Southern Caspian coast, *Water and Soil Management and Modeling*, 6(3), 294-311.

doi: 10.22098/mmws.2026.19665.1808

Received: 02 May 2026, Received in revised form: 15 May 2026, Accepted: 17 June 2026, Published online: 27 August 2026. *Water and Soil Management and Modeling*, Year 2026, Vol. 6, No. 3, pp. 294- 311.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





توسعه و ارزیابی میدانی تله رسوب گیر دوفازی برای اندازه گیری تفکیکی بار بستر و بار معلق در سواحل جنوب خزر

رسول کوهزاد^۱، رضا دزواره رسانی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

شکاف عمیقی میان مدل های عددی دوفازی و داده های میدانی وجود دارد که ریشه آن نه در ضعف مدل ها، بلکه در نبود فناوری های اندازه گیری تفکیک گر برای ثبت همزمان بار بستر و بار معلق در نقطه نمونه برداری است. تله های جریان نسل های پیشین مجموع بار را جمع آوری می کردند و از ارائه داده های تفکیکی ضروری برای کالیبراسیون مستقل مدل های دوفازی عاجز بودند. هدف این مطالعه، پر کردن این خلأ از طریق طراحی، ساخت و ارزیابی یک سامانه بومی نوآورانه تحت عنوان تله رسوب گیر دوفازی قابل حمل است. نوآوری اصلی این سامانه، الحاق یک صفحه جداکننده افقی داخلی در ارتفاع ۱۵۰ میلی متری از کف محفظه است که جریان ورودی را به طور فیزیکی به محفظه بار بستر (تحتانی) و بار معلق (فوقانی) تفکیک می کند. همچنین، جهت غلبه بر محدودیت سنتی تله های جریان به آب های کم عمق، پیکربندی ارتقایافته ای با دسته های طویل شده و سیستم مهار شناور برای عملیات در اعماق بیش از ۱ متر توسعه یافت. این سامانه طی یک کمپین میدانی یک ساله در سواحل ماسه ای جنوب خزر (نوشهر) تحت شرایط آرام و طوفانی در اعماق ۰/۳ تا ۱/۳ متر آزمون شد. نتایج ۲۰ آزمون میدانی، موفقیت کامل طراحی در تفکیک فازها را اثبات کرد. میانگین وزن کل رسوب ۱۶۶۵ گرم (دامنه ۱۵۰ تا ۵۴۵۰ گرم) بود که ۱۵۴۳ گرم (۹۲/۷٪) در محفظه بار بستر و ۱۲۲ گرم (۷/۳٪) در محفظه بار معلق جمع آوری شد. شاهد قطعی دقت تشخیصی سامانه، ثبت وزن های بار بستر قابل توجه (تا ۴۸۹۰ گرم) همراه با وزن صفر در محفظه بار معلق در شرایط آرام بود، در حالی که در طوفان ها وزن بار معلق تا ۵۶۰ گرم افزایش می یافت. تحلیل همبستگی نشان داد که شرایط طوفانی محرک اصلی تحرک بار معلق است. این پژوهش با معرفی تله گیر دوفازی به عنوان یک سکوی مشاهداتی بومی و استاندارد، علاوه بر رفع یک خلأ سخت افزاری دیرینه، داده های تفکیکی ضروری برای کالیبراسیون مؤلفه محور مدل های دوفازی را فراهم کرده و گامی اساسی در جهت مدیریت یکپارچه و مبتنی بر شواهد سواحل شمال ایران است.

واژه های کلیدی: نمونه بردار رسوب، ناحیه شکست امواج، حمل رسوب موج-جریان، صحت سنجی مدل های دوفازی، پایش مورفودینامیک ساحلی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: rdezvareh@nit.ac.ir

استناد: رسول، کوهزاد، رضا، دزواره رسانی (۱۴۰۵). توسعه و ارزیابی میدانی تله رسوب گیر دوفازی برای اندازه گیری تفکیکی بار بستر و بار معلق در سواحل جنوب خزر. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۶(۳)، ۲۹۴-۳۱۱.

doi: 10.22098/mmws.2026.19665.1808

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۲۹۴ تا ۳۱۱

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

همچنان باقی ماند. در سال های اخیر، پایو و همکاران (Payo et al., 2020) ارتقای این طراحی به یک تله تمام عمق (Full depth) برای سواحل مخلوط ماسه و شن، گام مهمی در بهبود کارایی این ابزار برداشتند. با این حال، نقطه ضعف مشترک تمامی این طرح ها، تک بخشی بودن محفظه تله و در نتیجه ادغام کامل بار بستر و بار معلق در یک نمونه واحد بود. این محدودیت، شکافی جدی میان مشاهدات میدانی و نیازهای مدل های دوفازی انتقال رسوب ایجاد کرده است. مدل های پیشرفته ای مانند روش بایکر، نرخ بار بستر و بار معلق را به طور جداگانه محاسبه می کنند (Bijker, 1971; van Rijn, 2007a)، اما در غیاب داده های تفکیکی میدانی، صحت سنجی آن ها صرفاً بر اساس مجموع بار انجام شده است، شرایطی که می تواند خطاهای هر بخش را پنهان کند (Buttò et al., 2025). مطالعات بسیار جدیدتر نیز بر ضرورت توسعه ابزارهای تفکیک گر برای پیشبرد مدل سازی رسوب تأکید دارند (Lim, 2025; van Rijn et al., 2025). ضرورت این پژوهش برای سواحل جنوبی دریای خزر، که میزبان بنادر استراتژیک، تأسیسات گردشگری و اکوسیستم های حساس است، ابعاد مضاعفی می یابد (Aladin & Plotnikov, 2004). نوسانات شدید تراز آب خزر، همراه با رژیم دומدل امواج (شرایط آرام با ارتفاع موج کمتر از ۰/۵ متر در ۸۵٪ ایام سال و شرایط طوفانی در ۱۵٪ باقی مانده)، بودجه رسوبی این سواحل را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد (Leroy et al., 2020). فرسایش و رسوب گذاری در مجاورت سازه های حیاتی مانند بندر نوشهر، مستقیماً به تعادل میان بار بستر و بار معلق وابسته است. فقدان داده های میدانی تفکیکی، اتکای بیش از حد به مدل های کالیبره نشده را به دنبال داشته و ریسک تصمیم گیری های مدیریتی پرهزینه را افزایش می دهد. بنابراین، توسعه یک فناوری بومی برای پایش تفکیکی رسوب، نه تنها یک ضرورت علمی، بلکه الزامی مدیریتی و ملی برای حفاظت از زیرساخت های ساحلی کشور به شمار می رود. هدف اصلی این مطالعه، پر کردن شکاف فناورانه موجود از طریق طراحی، ساخت و ارزیابی میدانی یک تله رسوب گیر دوفازی قابل حمل (Biphasic Portable Streamer Trap; BPST) با قابلیت تفکیک هم زمان بار بستر و بار معلق در ناحیه شکست امواج است. نوآوری اصلی این سامانه، الحاق یک صفحه جداکننده افقی (Baffle) در ارتفاع ۱۵۰ میلی متری از کف محفظه است که بر اساس هیدرولیک لایه بار بستر طراحی شده و جریان رسوبی ورودی را به طور فیزیکی به دو بخش مجزا تفکیک می کند. این مطالعه به دنبال پاسخ به سه پرسش کلیدی است: (۱) آیا طراحی مهندسی BPST قابلیت فنی و پایداری لازم برای عملکرد در شرایط مختلف ناحیه شکست را دارد؟ (۲) این سامانه تا چه میزان در جداسازی فیزیکی دو فاز رسوبی موفق عمل می کند؟ و (۳)

مناطق ساحلی به عنوان نوار مرزی میان خشکی و دریا، تحت تأثیر اندرکنش پیوسته امواج، جریان ها و فرآیندهای انتقال رسوب، همواره در حال تغییر و تحول هستند. در این میان، انتقال رسوب در امتداد ساحل (Longshore Sediment Transport; LST) به عنوان فرآیند غالب مورفودینامیکی، نقشی تعیین کننده در شکل دهی خطوط ساحلی، فرسایش و رسوب گذاری در مجاورت سازه های بندری، و پایداری بلندمدت پروژه های حفاظت ساحلی ایفا می کند (Fredsoe & Deigaard, 1992; Dean & Dalrymple, 2002). برآورد دقیق نرخ و جهت این انتقال، پیش نیاز هرگونه تصمیم گیری آگاهانه در چارچوب مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی (ICZM) است. با این حال، ماهیت چندعاملی فرآیندهای ناحیه شکست امواج، اندازه گیری و پیش بینی قابل اعتماد LST را به یکی از چالش های دیرینه در مهندسی سواحل و مدیریت منابع آب و خاک تبدیل کرده است (Svendsen, 2006). ذرات رسوب در این ناحیه در دو فاز کاملاً متمایز جابه جا می شوند: بار بستر (Bedload) که شامل ذرات درشت تر در حال غلتش و جهش در نزدیکی کف است، و بار معلق (Suspended Load) که ذرات ریزدانه تری را شامل می شود که توسط آشفتگی جریان در ستون آب به حالت تعلیق درآمده اند (van Rijn, 1993). سهم هر یک از این دو فاز در بودجه رسوبی کلی، بسته به شرایط هیدرودینامیکی و مشخصات رسوب، متغیر است و عدم تفکیک آن ها می تواند به خطاهای جبران کننده پنهان در مدل های پیش بینی منجر شود (Soulisby, 1997; Aagaard & Hughes, 2017). مرور نظام مند پژوهش های پیشین نشان می دهد که تلاش ها برای اندازه گیری میدانی LST عمدتاً حول دو رویکرد کلی متمرکز بوده است: روش های غیرمستقیم ردیابی (مانند ردیاب های فلورسنت و رادیواکتیو) و روش های مستقیم تله گذاری فیزیکی (Muhammad et al., 2019) و (White, 1998). نسل اول تله های رسوب گیر قابل حمل توسط کراس (Kraus, 1987; Rosati & Kraus, 1989) معرفی شد که با استفاده از یک کیسه توری پلی استری نصب شده بر روی قاب فلزی، امکان اندازه گیری مجموع بار رسوبی در منطقه شکست را فراهم می کرد. این ابزار به سرعت به یکی از پرکاربردترین روش های سنجش LST در سواحل ماسه ای تبدیل شد و مطالعات متعددی از آن برای صحت سنجی فرمول های تجربی بهره بردند (Wang et al., 1998; Bayram et al., 2001). پیشتر، چادویک (Chadwick, 1989) و بری و همکاران (Bray et al., 1996) نیز تلاش هایی برای بهبود طراحی تله ها انجام داده بودند، اما مشکل عملکرد در بسترهای سخت و عدم تفکیک فازها

متنوع هیدرودینامیکی، نماینده خوبی از سواحل هدف (سواحل ماسه‌ای با انرژی متوسط) نیز باشد. سواحل جنوبی دریای خزر، به‌ویژه ناحیه اطراف بندر نوشهر در استان مازندران، ایران، چنین شرایطی را فراهم می‌آورد. سواحل ایرانی خزر در جنوب این دریا، عمدتاً از نوع ماسه‌ای با شیب ملایم هستند و تحت تأثیر امواج ناشی از بادهای محلی (Sea) و گاهی امواج دورپیوند (Swell) که عمدتاً از سمت شمال و شمال غرب می‌وزند، قرار دارند (Dezvareh et al., 2012). مشخصات اقلیم موج این ناحیه، یک رژیم دومدال را نشان می‌دهد: در حدود ۸۵ درصد از اوقات سال، ارتفاع موج مشخصه (H_s) کمتر از ۰/۵ متر است که نشان‌دهنده یک رژیم کم‌انرژی است، و ۱۵ درصد باقی‌مانده، تحت سلطه رویدادهای طوفانی با ارتفاع موج بین ۰/۵ تا ۱ متر قرار دارد. وجود هر دو شرایط آرام و طوفانی در یک بازه سالانه، این امکان را فراهم می‌کند که عملکرد ابزار در طیف کاملی از نرخ‌های انتقال رسوب (از کم تا شدید) ارزیابی شود.

محل دقیق انجام آزمون‌های میدانی، در فاصله تقریبی ۱ تا ۲ کیلومتری غرب موج‌شکن اصلی بندر نوشهر انتخاب شد (شکل ۱).

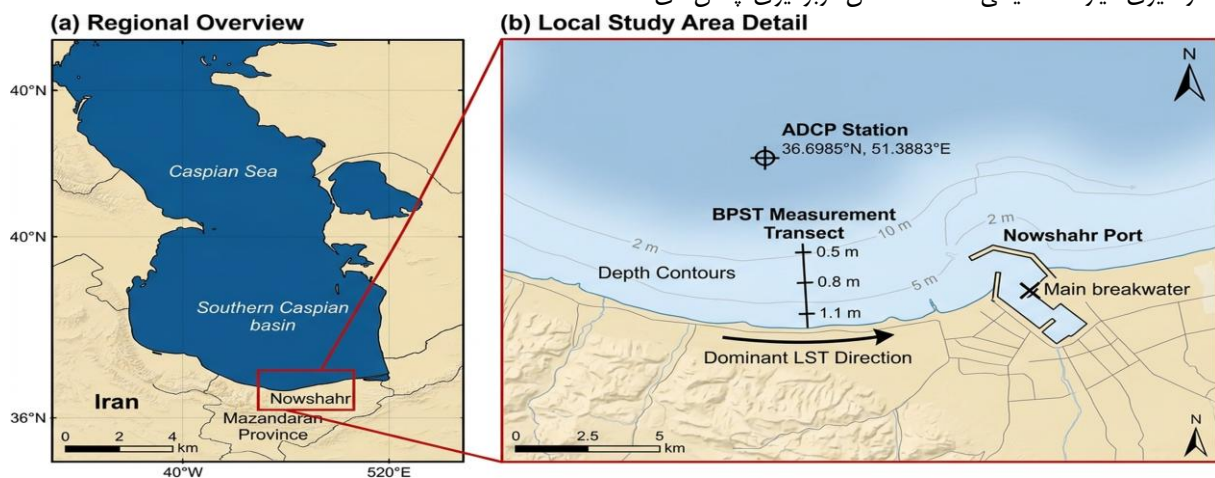
داده‌های تفکیکی به‌دست‌آمده چه تصویری از سهم نسبی بار بستر و بار معلق در یک ساحل ماسه‌ای با انرژی متوسط ارائه می‌دهند؟ نوآوری‌های این پژوهش شامل معرفی بفل جداکننده به‌عنوان یک ابتکار طراحی ساده و مؤثر، توسعه پروتکل عملیاتی برای استقرار تله در اعماق بیش از یک متر، و تولید مجموعه داده‌های فاز-تفکیکی (Phase-resolved Data) برای کالیبراسیون اختصاصی مدل‌های دوفازی است.

۲- مواد و روش‌ها

روش‌شناسی این پژوهش به‌گونه‌ای طراحی شده است که یک مسیر کامل از شناسایی نیاز میدانی تا توسعه یک راه‌حل سخت‌افزاری نوآورانه و آزمون آن در شرایط واقعی دریا را پوشش دهد. فرآیند کار شامل سه مرحله اصلی است: نخست، تحلیل شرایط محیطی منطقه مطالعه برای تعیین الزامات طراحی ابزار؛ دوم، فرآیند طراحی، ساخت و بهینه‌سازی سامانه تله دوفازی قابل حمل؛ و سوم، تدوین و اجرای یک پروتکل عملیاتی استاندارد برای نمونه‌برداری میدانی و آنالیز آزمایشگاهی نمونه‌ها.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه: سواحل جنوبی خزر، بندر نوشهر

انتخاب یک منطقه مطالعاتی مناسب برای آزمون یک فناوری جدید اندازه‌گیری، نیازمند محیطی است که ضمن دربرگیری چالش‌های



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه: بندر نوشهر در دریای کاسپین (الف) نمای کلی منطقه، (ب) جزئیات منطقه مورد مطالعه
Figure 1. Study area: Nowshahr Port on the Caspian Sea. (a) Regional overview, (b) Detailed map of the study area

این نوع رسوبات غیرچسبنده، پتانسیل جابه‌جایی هم در قالب بار بستر و هم به‌صورت بار معلق تحت انرژی امواج را دارا هستند و بنابراین، منطقه‌ای ایده‌آل برای آزمون توانایی ابزار در تفکیک این دو فاز محسوب می‌شود. نهایتاً، دسترسی آسان از ساحل و امکان استقرار شناور در نزدیکی ساحل، لجستیک عملیات‌های پرتکرار میدانی را تسهیل می‌کند. پایش کامل شرایط هیدرودینامیکی در طول کمپین‌های اندازه‌گیری برای تفسیر عملکرد ابزار ضروری بود. به همین منظور، داده‌های موج و جریان از نزدیک‌ترین ایستگاه

این انتخاب چندین مزیت عملیاتی و علمی داشت. اولاً، وجود موج‌شکن بندر نوشهر به‌عنوان یک مانع بزرگ در برابر امواج، منجر به ایجاد یک الگوی پایدار و قابل پیش‌بینی از جریان‌های موازی ساحل (Longshore Current) در غرب آن می‌شود که عمدتاً از غرب به شرق جریان دارد و آن را به آزمایشگاهی طبیعی برای مطالعه LST تبدیل کرده است (Afandizadeh and Lashaki, 2017). ثانیاً، رسوبات این ناحیه عمدتاً از ماسه ریز تا متوسط با قطر میانه (D50) در حدود ۰/۲ میلی‌متر تشکیل شده‌اند.

اپراتور فراهم می کند تا از فرو رفتن پای او در بستر نرم جلوگیری شود و دوم، وزن اپراتور از طریق این صفحه، پایداری کل سازه را در برابر نیروی امواج و جریان ها تأمین می کند.

۲. قاب ورودی: یک قاب مستطیلی عمودی به ارتفاع ۱۰۰۰ میلی متر و عرض ۲۵۰ میلی متر که از پروفیل های فولادی ۴۰ × ۴۰ میلی متر ساخته شده است. این دهانه، مساحت نمونه برداری را تعریف می کند و امکان ورود جریان رسوبی را فراهم می سازد. انتخاب ارتفاع یک متری، تضمین می کند که در اعماق هدف (کمتر از ۱/۵ متر)، نمونه برداری از کف بستر تا نزدیک سطح آب انجام شود و بخش عمده ای از ستون آب حامل رسوب پوشش داده شود.

۳. اعضای مهاربندی: دو پایه مورب که از بخش بالایی قاب ورودی به گوشه های عقب صفحه پایه متصل شده اند. این اعضا، صلبیت جانبی سازه را در برابر نیروی دینامیکی امواج تأمین کرده و از تغییر شکل یا واژگونی قاب جلوگیری می کنند.

۴. دسته های عملیاتی: دو دسته در بخش فوقانی قاب برای حمل و کنترل موقعیت دقیق تله توسط اپراتور نصب شده است.

لازم به ذکر است که در این پژوهش، تحلیل حساسیت تجربی سیستماتیک با ارتفاع های مختلف بفل انجام نشده و انتخاب ارتفاع ۱۵۰ میلی متری صرفاً بر مبنای تئوری ضخامت لایه بار بستر و با هدف پوشش جهش ذرات در شرایط هیدرودینامیکی متداول صورت گرفته است. با این حال، داده های میدانی حاصل از آزمون های شرایط آرام (وزن صفر بار معلق در حضور بار بستر قابل توجه) صحت عملکرد این ارتفاع را به طور تجربی تأیید می کنند. بررسی عملکرد ابزار با ارتفاع های مختلف بفل می تواند موضوع مطالعات آتی باشد.

پایش سازمان بنادر و دریانوردی واقع در عمق ۱۰ متری (مختصات: $N, 51.3883^{\circ}E 36/6985^{\circ}$) که به یک دستگاه ADCP مجهز بود، استخراج شد. گلباد منطقه نیز با استفاده از داده های بازتحلیل ERA5 تولید شد تا تصویر کاملی از شرایط واداشت جوی حاکم در طول دوره های نمونه برداری وجود داشته باشد.

۲-۲- فرآیند طراحی و ساخت سامانه تله رسوب گیر دوفازی

هدف اصلی در طراحی BPST، حفظ مزایای اثبات شده تله های جریان (قابلیت حمل، استقرار سریع، و نمونه برداری حجمی) و در عین حال، افزودن قابلیت بنیادین و جدید تفکیک فیزیکی و هم زمان بار بستر و بار معلق در مبدأ بود. برای رسیدن به این هدف، فرآیند طراحی در یک چرخه تکاملی شامل یک پیش نمونه اولیه، یک آزمون شکست خورده، بازطراحی اساسی و در نهایت، توسعه یک نسخه ارتقاء یافته برای آب های عمیق دنبال شد.

۲-۲-۱- معماری پایه و اجزای سازه ای

سکوی پایه برای توسعه BPST، طراحی مستحکم ارائه شده توسط پایو و همکاران (Payo et al., 2020) انتخاب شد که برای نمونه برداری در تمام عمق آب در سواحل مخلوط شن و ماسه بهینه سازی شده است (شکل ۲). این طراحی به دلیل استحکام سازه ای و قابلیت کار در شرایط پرانرژی، نقطه شروع ایده آلی بود. سازه اصلی BPST از جنس فولاد ضد زنگ برای مقاومت در برابر خوردگی در محیط دریایی ساخته شد. کل سامانه شامل اجزای اصلی زیر است:

۱. صفحه پایه: یک ورق مربعی شکل به ابعاد ۱۰۰۰ × ۱۰۰۰ میلی متر و ضخامت ۵ میلی متر که به عنوان شالوده دستگاه عمل می کند. این صفحه دو وظیفه حیاتی دارد: نخست، سکوی پایداری برای ایستادن



شکل ۲- جزئیات سازه تله رسوب گیر دوفازی

Figure 2. Structural details of the Biphase Portable Streamer Trap (BPST)

۲-۲-۲- تکامل سیستم توری و چالش تفکیک

پس از بررسی گزینه های مختلف، توری پلی استر مونوفیلament با اندازه چشمه ۱۰۰ میکرومتر برای پوشش محفظه تله انتخاب شد. این جنس که استاندارد تله های جریانی است (Kraus, 1987) اجازه عبور آب را برای کاهش فشار هیدرودینامیکی می دهد اما ذرات ماسه ریز را کاملاً به دام می اندازد. برای افزودن قابلیت تفکیک فازهای رسوبی (هدف اصلی این پژوهش) یک صفحه جداکننده افقی (Baffle) از جنس فولاد ضدزنگ در داخل محفظه و در ارتفاع ۱۵۰ میلی متری از کف نصب شد (شکل ۳). این ارتفاع بر اساس تئوری ضخامت لایه بار بستر (van Rijn, 1984; Soulsby, 1997) به گونه ای انتخاب شد که جهش ذرات بار بستر حتی در شرایط نسبتاً طوفانی در محفظه تحتانی به دام افتد، در حالی که ذرات معلق از طریق محفظه فوقانی جمع آوری شوند. بدین ترتیب، محفظه تله به دو بخش مجزا تقسیم شد. بخش پایینی (محفظه بار بستر) به ارتفاع ۱۵۰ میلی متر برای ذرات در حال غلتش و جهش، و بخش فوقانی (محفظه بار معلق) برای ذرات معلق در ستون آب. این طراحی برای نخستین بار یک تله

دوفازی واقعی را ایجاد می کند که می تواند داده های تفکیکی ضروری برای صحت سنجی مدل های دوفازی را فراهم سازد.

۲-۲-۳- توسعه و ارتقای سامانه برای عملیات در آب های عمیق

برای غلبه بر محدودیت سنتی تله های جریانی به مناطق کم عمق (کمتر از ۱ متر)، اصلاحات زیر بر روی طراحی پایه BPST اعمال شد: (۱) دسته های عملیاتی با لوله های فولادی ضدزنگ تا ارتفاع حدود ۲ متر افزایش یافتند تا کنترل تله از درون قایق امکان پذیر شود، و (۲) یک سیستم مهار سه نقطه ای طراحی شد که در آن طناب های مهار از دو سمت صفحه پایه و یک نقطه مرکزی در قاب فوقانی به قایق متصل می شدند. این پیکربندی به خدمه قایق امکان می داد تله را در عمق مورد نظر با زاویه صحیح نسبت به جریان طولی مستقر کرده و پایداری آن را در برابر نیروی امواج حفظ کنند (شکل ۳). توالی عملیاتی به گونه ای تنظیم شد که ابتدا تله به آرامی از قایق به آب فرستاده شده و پس از استقرار روی بستر، موقعیت آن از طریق رگلاژ طناب های مهار تثبیت می شد.



شکل ۳- افزایش ارتفاع دسته رسوب گیر برای نمونه برداری از آب های عمیق تر و استقرار میدانی آن در عمق آب بیش از ۲ متر
Figure 3. Extension of the trap handle for deeper water sampling and its field deployment at a water depth exceeding 2 m

۲-۲-۴- مبانی هیدرولیک رسوب و منطق طراحی بفل جداکننده

طراحی صفحه جداکننده در BPST صرفاً یک راه حل مکانیکی ساده نبود، بلکه بر اساس مفاهیم بنیادین هیدرولیک انتقال رسوب و آستانه های تمایز مدهای حرکتی ذرات بنا شده است. در این بخش، روابط حاکم که منطق طراحی و ارتفاع بهینه بفل را توجیه می کنند، به اختصار ارائه می شوند:

۱. آستانه حرکت و مدهای انتقال رسوب

نخستین گام در طراحی هر ابزار تفکیک گر، درک معیارهای آغاز حرکت ذرات رسوبی است. منحنی شیلدز (Shields, 1936) به عنوان سنگ بنای مهندسی رسوب، تنش برشی بی بعد بحرانی

(θ_{cr}) لازم برای آغاز حرکت دانه های غیرچسبنده را به صورت تابعی از عدد رینولدز مرزی (Re^*) ارائه می دهد (رابطه ۱):

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{(\rho_s - \rho_w)gD_{50}} = f(Re^*) \quad (1)$$

که در آن τ_{cr} تنش برشی بحرانی بستر (N/m^2)، ρ_s چگالی رسوب (حدود 2650 kg/m^3 برای ماسه کوارتزی)، ρ_w چگالی آب دریا (حدود 1025 kg/m^3)، g گشتاب گرانشی (9.81 m/s^2)، و D_{50} قطر میانه ذرات (حدود 0.2 میلی متر در سواحل نوشهر) است. برای ذرات ماسه ای در این ابعاد، مقدار بحرانی θ_{cr} تقریباً $0.06-0.08$ تخمین زده می شود (Soulsby, 1997). هنگامی که تنش برشی بستر ناشی از ترکیب امواج و جریان ها از این آستانه فراتر رود، ذرات ابتدا به صورت بار بستر (غلتش، لغزش و جهش های کوتاه در نزدیکی بستر) شروع به حرکت می کنند. با افزایش بیشتر تنش

بر اساس این تحلیل، ارتفاع ۱۵۰ میلی متری برای نصب بفل در BPST به عنوان یک حد میانه مهندسی انتخاب شد. این ارتفاع:

- به اندازه کافی از بستر فاصله دارد تا بخش عمده جهش ذرات بار بستر را حتی در شرایط نسبتاً طوفانی پوشش دهد.
- به اندازه کافی پایین تعبیه شده تا از نشت بار معلق واقعی که در ارتفاعات بالاتر توزیع شده، به بخش بار بستر جلوگیری کند.
- یک حاشیه اطمینان عملی را فراهم می کند و تضمین می نماید که ذراتی که صرفاً توسط تلاطم موضعی تا این ارتفاع پرتاب شده اند اما ماهیت بار بستر جهشی دارند، در بخش درست خود ثبت شوند.

۲-۳-۲ پروتکل عملیاتی و روش شناسی اجرای کمپین های میدانی

برای اطمینان از تکرارپذیری، دقت و قابلیت مقایسه داده ها، یک پروتکل عملیاتی دقیق برای کلیه مراحل استقرار، نمونه برداری، بازیابی و پردازش آزمایشگاهی نمونه های رسوب تدوین و به طور سخت گیرانه ای در تمام طول کمپین میدانی اجرا شد.

۲-۳-۱- راهبرد نمونه برداری و برنامه ریزی کمپین

هدف، نمونه برداری از رژیم های هیدرودینامیکی کاملاً متفاوت برای ثبت عملکرد BPST در یک طیف گسترده از انرژی های محیطی بود. کمپین اصلی اندازه گیری به مدت یک سال، از دسامبر ۲۰۲۲ تا دسامبر ۲۰۲۳، به طول انجامید. راهبرد نمونه برداری بر اساس یک برنامه ماهانه منعطف طراحی شد، به گونه ای که در هر ماه، حداقل یک یا دو سری کامل اندازه گیری انجام شود. هر سری اندازه گیری روزانه، شامل سه ایستگاه نمونه برداری در اعماق مختلف (در محدوده ۰/۳ تا ۱/۳ متر) بود تا هم تغییرات عرضی نرخ حمل رسوب ثبت شود و هم عملکرد BPST در اعماق مختلف بررسی شود.

شایان ذکر است که به دلیل محدودیت های لجستیکی کار در ناحیه شکست امواج (وزن قابل توجه دستگاه، خستگی اپراتور، و تغییرپذیری طبیعی شرایط هیدرودینامیکی در مقیاس نیم ساعته)، تکرارهای هم زمان در یک نقطه ثابت انجام نشد و هر آزمون یک اندازه گیری منفرد است. با این حال، تکرار غیرهم زمان شرایط آرام در ۶ روز مختلف، نتایج هم سازی (وزن صفر بار معلق) به دست داد که بر پایایی داده ها دلالت دارد.

برشی و آشفستگی، آستانه تعلیق نیز فرا می رسد. معیار کلاسیک برای آغاز بار معلق، زمانی محقق می شود که نسبت سرعت سقوط ذره (w_s) به سرعت برشی (u^*) از یک مقدار بحرانی کمتر شود. رابطه رایج برای این شرط به صورت زیر بیان می شود: (رابطه ۲) (van Rijn, 1993)

$$\frac{u_*}{w_s} > \frac{1}{K} \approx 0.4 \quad u_* > 2.5w_s \quad (2)$$

که در آن u^* سرعت برشی بستر و K ثابت فون کارمن (≈ 0.4) است. برای ماسه ریز با $D_{50} = 0.2 \text{ mm}$ ، سرعت سقوط (w_s) طبق فرمول استوکس یا تجربی وان راین حدود $0.002 - 0.025 \text{ m/s}$ است. بنابراین، سرعت برشی بحرانی برای تعلیق حدود $0.006 - 0.05 \text{ m/s}$ خواهد بود که تنها در شرایط امواج بلند و طوفانی در منطقه شکست حاصل می شود. این وابستگی شدید آستانه تعلیق به انرژی موج (که متناسب با توان دوم ارتفاع موج است)، مبنای فیزیکی مشاهدات میدانی ما را فراهم می کند که در بخش نتایج بحث خواهد شد.

۲. ضخامت لایه بار بستر و ارتفاع بهینه بفل

پارامتر کلیدی در طراحی BPST، تعیین ارتفاع بهینه برای نصب صفحه جداکننده افقی بود. این ارتفاع می بایست به گونه ای انتخاب می شد که بخش اعظم ذرات در حال انتقال به صورت بار بستر را از بار معلق جدا کند. ضخامت لایه بار بستر (δ_b) که معرف حداکثر ارتفاع جهش ذرات از بستر است، تابعی از تنش برشی اضافی و اندازه ذره است. یک رابطه پر کاربرد برای تخمین δ_b به صورت زیر ارائه شده است (رابطه ۳) (van Rijn, 1984; Soulsby, 1997):

$$\delta_b = 0.3D_{50}D_*^{0.7} \left[\frac{\tau_b - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \right]^{0.5} \quad (3)$$

که در آن D^* قطر بی بعد ذره است (رابطه ۴):

$$D_* = D_{50} \left[\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (4)$$

در این رابطه، s چگالی نسبی ($\rho_s/\rho_w \approx 2.58$) و ν لزجت سینماتیک آب است. برای ماسه ریز با $D_{50} = 0.2 \text{ mm}$ ، مقدار D^* حدود ۵ محاسبه می شود. تحت شرایط آرام (امواج کوتاه با تنش برشی نزدیک به آستانه حرکت)، δ_b بسیار کوچک و در حد چند برابر قطر ذره (چند میلی متر) خواهد بود. اما در شرایط طوفانی که تنش برشی بستر به مقادیری بسیار فراتر از τ_{cr} می رسد، ضخامت لایه بار بستر به طور قابل توجهی افزایش می یابد. مطالعات میدانی و آزمایشگاهی (Soulsby & Damgaard, 2005) نشان داده اند که برای ماسه های ریز تحت امواج بلند در منطقه شکست، جهش ذرات می تواند تا ارتفاع ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی متری از بستر نیز برسد.

۲-۳-۲- فرایند استاندارد استقرار و نمونه برداری

پیش از هر آزمون، یکپارچگی سازه، سلامت توری های پلی استر و تمیزی محفظه های بار بستر و بار معلق بازبینی می شد BPST. در نقطه مورد نظر با استفاده از قطب نما به گونه ای مستقر می شد که دهانه ورودی آن دقیقاً عمود بر خط ساحلی و رو به جریان طولی غالب (غرب به شرق) قرار گیرد. زمان نمونه برداری بسته به شرایط محیطی بین ۵ تا ۱۰ دقیقه (۳۰۰ تا ۶۰۰ ثانیه) متغیر بود تا ضمن جمع آوری حجم کافی رسوب، از انسداد یا پارگی کیسه های تله جلوگیری شود. در این مدت، اپراتور(ها) با تکیه بر وزن خود و صفحه پایه، پایداری دستگاه را در برابر ضربات امواج حفظ می کردند. در پایان، تله با احتیاط به ساحل (یا به درون قایق) بازگردانده شده و پس از خروج آب اضافی، محفظه فوقانی (بار معلق) و سپس محفظه تحتانی (بار بستر) با دقت باز و رسوبات در کیسه های پلاستیکی مجزای از پیش وزن شده با برچسب مشخصات آزمون تخلیه می شد.

۲-۳-۳- پردازش آزمایشگاهی و کنترل کیفی داده ها

نمونه های جمع آوری شده ابتدا با آب مقطر شستشو داده شده تا املاح نمکی حذف شوند، سپس در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شده و وزن خشک هر یک از دو بخش بار بستر و بار معلق با ترازوی دیجیتال با دقت ۰.۱ گرم اندازه گیری شد. این مقادیر، مبنای محاسبه نرخ های انتقال رسوب و تحلیل عملکرد تفکیکی BPST را تشکیل می دهند.

تحلیل های آماری، محاسبات نرخ انتقال رسوب، و ترسیم نمودارهای این پژوهش با استفاده از نرم افزار Python (کتابخانه های Matplotlib نسخه ۳/۷ و Seaborn نسخه ۰/۱۲) انجام شده است.

با توجه به آنچه بیان شد، ستون فقرات ارزیابی عملکرد BPST، داده های وزن خشک جمع آوری شده از ۲۰ آزمون میدانی است که در یک بازه یک ساله و تحت شرایط هیدرودینامیکی گوناگون اجرا شدند. این داده ها که به طور کامل در جدول ۱ ارائه شده اند، وزن های مجزای رسوبات به دام افتاده در محفظه بار بستر و محفظه بار معلق را برای هر آزمون مشخص می کنند.

شایان ذکر است که در این پژوهش، ضریب جذب اختصاصی تله برای هر یک از دو فاز بار بستر و بار معلق از طریق آزمایش های کنترل شده فلوم یا مقایسه با یک روش مرجع (مانند پمپ مکش) اندازه گیری نشده است. نتایج بر این فرض استوار است که طراحی تمام عمق (ارتفاع دهانه ۱۰۰۰ میلی متر) همراه با توری ۱۰۰ میکرونی، ضرایب جذب نزدیک به هم برای هر دو فاز فراهم می کند. وزن صفر مطلق بار معلق در ۵ آزمون آرام و همخوانی نسبت های گزارش شده با ادبیات، از این فرض حمایت می کنند. با این حال، اعتبارسنجی کمی با روش مرجع برای تعیین ضرایب جذب دقیق و تبدیل BPST به یک ابزار اندازه گیر مطلق، گام ضروری بعدی است.

جدول ۱- داده های وزن خشک جمع آوری شده از ۲۰ آزمون میدانی

Table 1. Dry sediment weights collected during 20 BPST field tests

Test No.	Date	Water Depth (m)	Hs (m)	Duration (s)	Bedload (gr)	Suspended Load (gr)	Total (gr)	Sea State
1	15-Dec-22	0.5	0.9	600	1750	260	2010	Storm
2	15-Dec-22	0.8	0.9	600	2150	320	2470	Storm
3	15-Dec-22	1.2	0.9	600	2400	400	2800	Storm
4	27-Jan-23	0.4	0.8	550	1300	170	1470	Storm
5	27-Jan-23	0.7	0.8	550	1860	290	2150	Storm
6	27-Jan-23	1.1	0.8	600	2500	360	2860	Storm
7	15-Mar-23	0.6	1.1	550	4500	460	4960	Storm
8	15-Mar-23	1.3	1.1	600	4890	560	5450	Storm
9	15-Apr-23	1.0	1.0	600	2800	120	2920	Storm

Test No.	Date	Water Depth (m)	Hs (m)	Duration (s)	Bedload (gr)	Suspended Load (gr)	Total (gr)	Sea State
10	15-Apr-23	0.5	0.3	600	280	15	295	Calm
11	10-May-23	1.1	0.6	600	650	20	670	Moderate
12	10-May-23	0.5	0.3	600	210	0	210	Calm
13	25-Jun-23	0.8	0.4	550	530	0	530	Calm
14	25-Jun-23	0.5	0.4	550	450	0	450	Calm
15	25-Jul-23	1.2	0.4	600	375	0	375	Calm
16	25-Jul-23	0.9	0.4	600	340	0	340	Calm
17	10-Oct-23	0.6	0.5	550	410	20	430	Moderate
18	10-Oct-23	1.1	0.5	600	500	35	535	Moderate
19	22-Nov-23	0.9	1.0	600	2100	110	2210	Storm
20	22-Nov-23	1.3	1.0	600	2600	150	2750	Storm

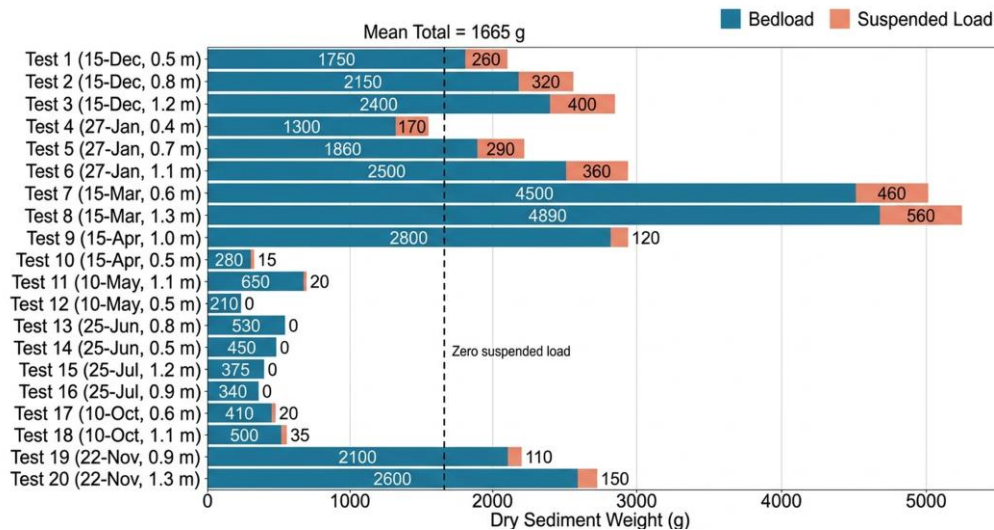
۳- نتایج و بحث

این بخش به ارزیابی سیستماتیک عملکرد تله رسوب گیر دوفازی (BPST) بر اساس کمپین میدانی یک ساله در سواحل جنوبی خزر می پردازد. تحلیل ها در چهار محور مکمل سازمان دهی شده اند: (۱) اثبات کمی قابلیت تفکیک فازها، (۲) پاسخ هیدرودینامیکی و فصلی ابزار، (۳) پایداری عملکرد در اعماق مختلف، و (۴) مقایسه انتقادی یافته ها با مطالعات پیشین در زمینه تفکیک انتقال رسوب ساحلی.

۳-۱- اثبات عملکرد تفکیکی BPST: دقت تشخیصی

در جداسازی فازها

نوآوری بنیادین BPST در صفحه جداکننده افقی داخلی (بفل) آن نهفته است که جریان رسوبی ورودی را به طور فیزیکی به دو محفظه بار بستر (تحتانی) و بار معلق (فوقانی) تفکیک می کند. مجموعه کامل داده های وزن خشک برای تمام ۲۰ آزمون میدانی، که تحت شرایط هیدرودینامیکی گوناگون اجرا شده اند، در جدول ۱ (بخش مواد و روش ها) ارائه شده است. برای نمایش بصری عملکرد تفکیکی، شکل ۴ یک نمودار میله ای انباشته از وزن های بار بستر و بار معلق برای هر یک از ۲۰ آزمون را نشان می دهد.



شکل ۴- نمودار میله‌ای انباشته از وزن خشک بار بستر و بار معلق برای ۲۰ آزمون میدانی

Figure 3. Stacked bar chart of dry bedload and suspended load weights captured by the BPST during 20 field tests

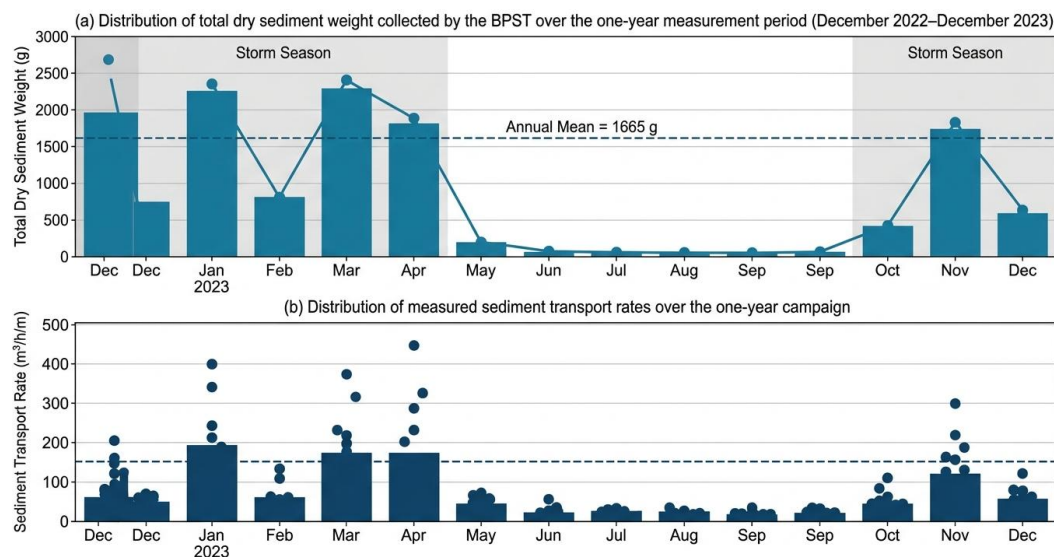
۳۷۵ و ۳۴۰ گرم را به ترتیب به دام انداخت. این واگرایی آشکار- انتقال قابل توجه بار بستر همراه با محفظه فوقانی کاملاً خالی- یک اثبات تجربی قطعی است که ارتفاع بفل ۱۵۰ میلی‌متری به‌درستی منطقه جهش نزدیک بستر را از منطقه رسوبات معلق در بالا تفکیک می‌کند. اگر هرگونه آلودگی متقاطع رخ می‌داد (مثلاً جهش ذرات بار بستر به بالای بفل یا ته‌نشینی رسوبات معلق به درون محفظه تحتانی)، چنین جداسازی مطلقی غیرممکن بود. این عملکرد انتخابی، که پیش از این توسط هیچ‌یک از طراحی‌های قبلی تله‌های جریانی (Kraus, 1987; Payo et al., 2020) نشان داده نشده بود، تأیید می‌کند که BPST با موفقیت شکاف فناورانه دیرینه در اندازه‌گیری تفکیکی رسوب ساحلی را پر کرده است.

۲-۳- پاسخ هیدرودینامیکی و فصلی BPST

یک ابزار میدانی موفق باید نه‌تنها در شرایط ایده‌آل، بلکه به‌طور دینامیکی و قابل پیش‌بینی به طیف کامل واداشتهای محیطی پاسخ دهد. برای ارزیابی این جنبه، اندازه‌گیری‌های BPST در برابر داده‌های هم‌زمان موج، باد و جریان تحلیل شدند.

تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده، شواهد قطعی برای عملکرد انتخابی BPST فراهم می‌کند. میانگین وزن خشک کل رسوبات به دام افتاده در هر نمونه‌برداری ۱۶۶۵ گرم بود، با دامنه‌ای از ۱۵۰ گرم (در شرایط بسیار آرام) تا ۵۴۵۰ گرم (در یک رویداد طوفانی شدید در ۱۵ مارس ۲۰۲۳). نکته کلیدی، تجزیه تفکیکی این ارقام است: میانگین وزن بار بستر ۱۵۴۳ گرم (۹۲٪ از کل) و میانگین وزن بار معلق تنها ۱۲۲ گرم (۷٪) بود. این غلبه چشم‌گیر بار بستر با درک تثبیت‌شده از سواحل ماسه‌ای ریز تا متوسط ($D_{50} \approx 0.2$ میلی‌متر) همخوانی کامل دارد، جایی که تنش برشی آستانه تعلیق نسبتاً بالاست و انرژی آشفتگی در شرایط موج معمولی برای به تعلیق درآوردن مقادیر قابل توجه ماسه به درون ستون آب ناکافی است (van Rijn, 1993; Soulsby, 1997).

متقاعدکننده‌ترین شاهد برای عملکرد موفق بفل داخلی در داده‌های آزمون‌های ۱۲ تا ۱۶ (اجرا شده در ماه‌های مه تا ژوئیه ۲۰۲۳ تحت شرایط آرام) یافت می‌شود. در این پنج آزمون، محفظه بار معلق وزن صفر یا نزدیک به صفر ثبت کرد، درحالی‌که محفظه بار بستر به‌طور هم‌زمان وزن‌های قابل توجه ۲۱۰، ۵۳۰، ۴۵۰،



شکل ۵- توزیع زمانی (الف) وزن های خشک رسوب جمع آوری شده و (ب) نرخ های انتقال رسوب محاسبه شده در طول کمپین یک ساله
Figure 5. Temporal distribution of (a) collected dry sediment weights and (b) calculated sediment transport rates during the one-year campaign.

توانایی ابزار در ثبت تغییرپذیری زمانی طبیعی انتقال رسوب طولی است.

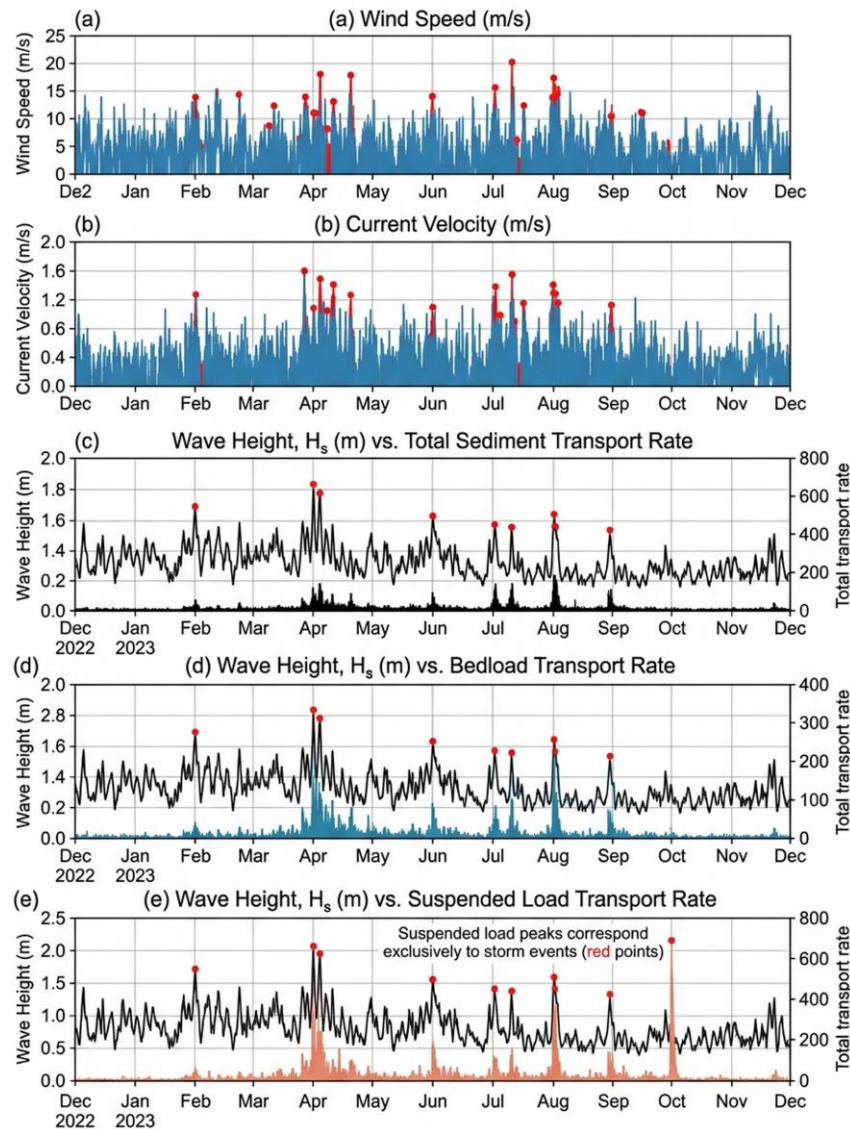
برای سنجش کمی معنی داری روابط مشاهده شده در شکل ۵، تحلیل همبستگی با استفاده از ضریب اسپیرمن (با توجه به غیرنرمال بودن توزیع برخی داده ها) بر روی ۲۰ جفت داده انجام شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که ارتفاع موج شاخص (H_s) قوی ترین و معنی دارترین همبستگی را با هر سه نرخ رسوب دارد. همبستگی بالاتر H_s با بار معلق نسبت به بار بستر نشان دهنده حساسیت بیشتر فاز معلق به انرژی موج است که با فیزیک آستانه تعلیق سازگار است.

شکل ۵ توزیع زمانی وزن های کل رسوبات به دام افتاده (پنل الف) و نرخ های انتقال رسوب استخراج شده (پنل ب) را در سراسر کمپین یک ساله نشان می دهد. داده ها یک چرخه فصلی برجسته را آشکار می کنند، با وزن ها و نرخ های انتقال بالاتر که در ماه های پاییز و زمستان (اکتبر تا مارس) متمرکز شده اند و مقادیر به طور قابل توجه پایین تر در اواخر بهار و تابستان (مه تا اوت). این الگوی فصلی، بازتابی از اقلیم موج شناخته شده جنوب دریای خزر است، جایی که بادهای طوفانی شمالی و شمال غربی شرایط موج پرانرژی را در ماه های سرد ایجاد می کنند (Leroy et al., 2020). این حقیقت که داده های BPST به وضوح این ریتم اقلیمی تثبیت شده را منعکس می کنند، یک اعتبارسنجی کیفی قوی از

جدول ۲- تحلیل همبستگی آماری بین پارامترهای هیدرودینامیکی و نرخ های انتقال رسوب بر اساس ۲۰ اندازه گیری میدانی BPST.

Table 2. Statistical correlation analysis between hydrodynamic parameters and sediment transport rates based on 20 BPST field measurements

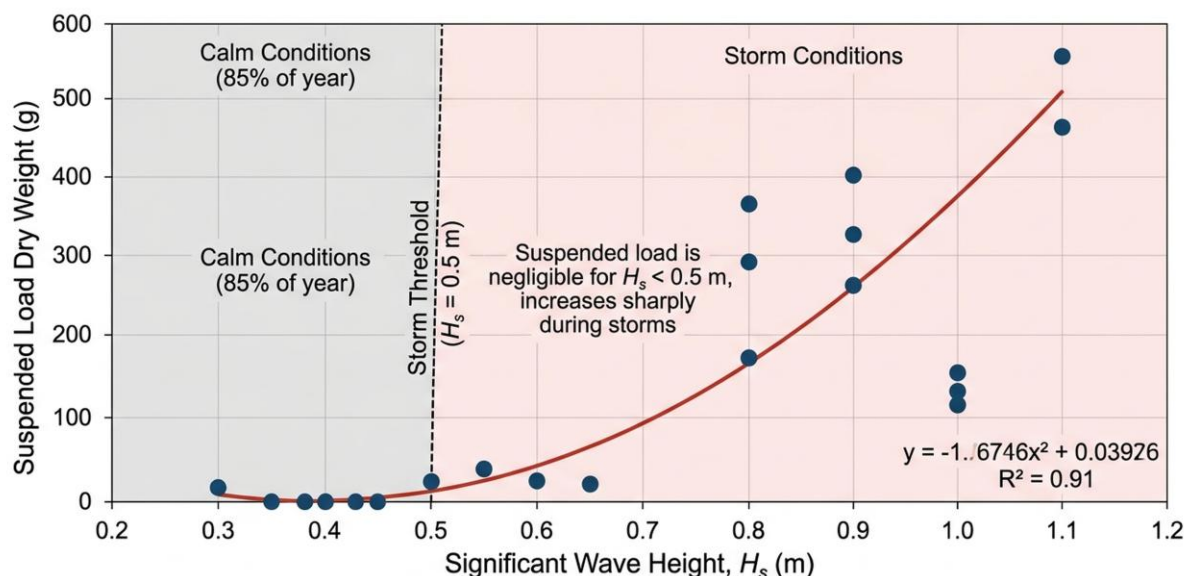
Relationship	Test	Coefficient	p-value	Significance
H_s vs. Total Load	Spearman	$\rho = 0.78$	< 0.001	99%
H_s vs. Bedload	Spearman	$\rho = 0.72$	< 0.001	99%
H_s vs. Suspended Load	Spearman	$\rho = 0.81$	< 0.001	99%
Wind Speed vs. Total Load	Pearson	$r = 0.65$	0.002	99%
Current Velocity vs. Total Load	Pearson	$r = 0.59$	0.006	99%



شکل ۶- تغییرات شرایط دریایی در برابر نرخ های انتقال رسوب اندازه گیری شده توسط BPST در طول دوره یک ساله. (الف) سرعت باد؛ (ب) سرعت جریان؛ (ج-ه) ارتفاع موج در برابر نرخ های انتقال کل، بار بستر، و بار معلق (نقاط قرمز شرایط طوفانی را نشان می دهند).
Figure 6. Variations in marine conditions against BPST-measured sediment transport rates during the one-year period. (a) Wind speed; (b) Current velocity; (c-e) Wave height versus total, bedload, and suspended load transport rates (red points indicate storm conditions)

می سازد: رویدادهای طوفانی، که تنها حدود ۱۵ درصد از ساعات سال را اشغال می کنند، مسئول بخش عمده ای از شار رسوبی کل سالانه هستند. این مشاهده با پارادایم تثبیت شده مورفودینامیک که رویدادهای نادر با بزرگی بالا، بودجه رسوبی سواحل موج محور را غالب می کنند، همخوانی دارد (Dean & Dalrymple, 2002).

شکل ۶ یک تحلیل پنج پنلی دقیق تر از رابطه بین واداشت محیطی و اندازه گیری های تفکیکی BPST ارائه می دهد. پنل های (الف) و (ب) نشان می دهند که دوره های با سرعت باد و سرعت جریان بالا مستقیماً با قله های انتقال کل رسوب مشاهده شده در پنل های (ج) و (د) همزمان هستند. استفاده از نقاط قرمز برای برجسته سازی شرایط طوفانی این ارتباط را از نظر بصری فوری



شکل ۷- نمودار پراکندگی نشان دهنده رابطه بین ارتفاع موج شاخص (H_s) و بار معلق به دام افتاده توسط BPST
Figure 7. Scatter plot showing the relationship between significant wave height (H_s) and suspended load captured by the BPST

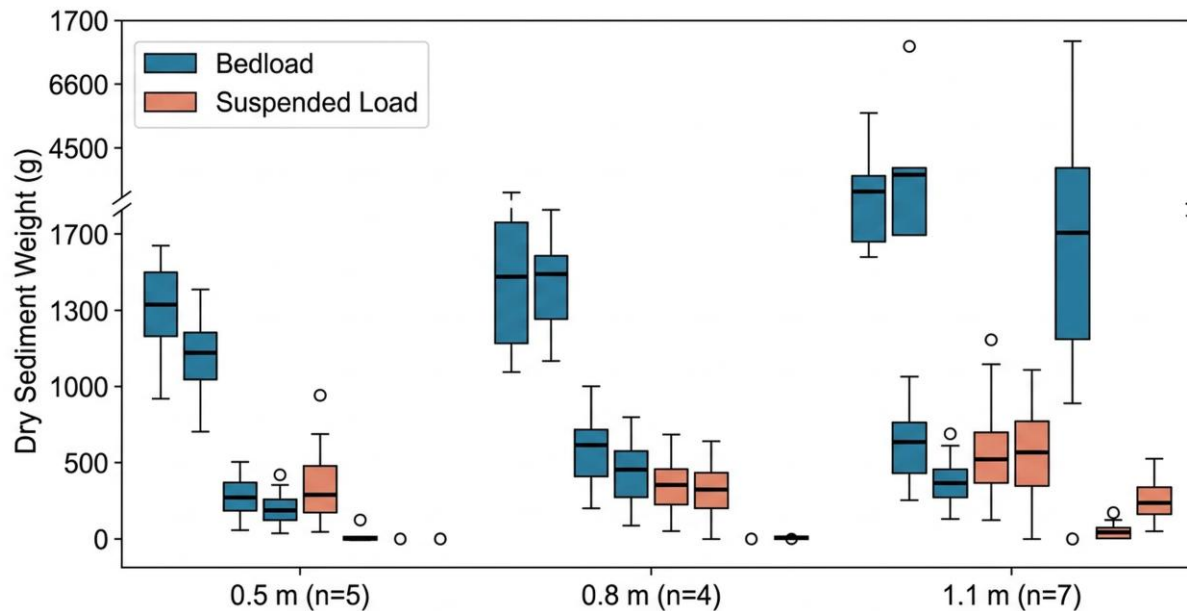
(عمق متوسط $\approx 1/1$ متر، تعداد ۷). توزیع وزن های بار بستر و بار معلق در این کلاس های عمقی در شکل ۸ ارائه شده است.

نمودارهای جعبه ای چندین ویژگی مهم را آشکار می کنند. نخست، میانه وزن های بار بستر به طور تصاعدی از کم عمق ترین به عمیق ترین کلاس افزایش می یابد، از حدود ۴۵۰ گرم در عمق ۰/۵ متری به بیش از ۲۰۰۰ گرم در عمق ۱/۱ متری. این روند با توزیع عرضی مورد انتظار انتقال رسوب طولی هم خوانی دارد، که معمولاً در داخل ناحیه شکست داخلی به اوج می رسد، جایی که شکست موج شدیدترین و سرعت جریان طولی بالاترین است (Bayram et al., 2001). دوم، علی رغم این تغییرات در بزرگی مطلق، الگوی اساسی تفکیک فاز بار بستر غالب با بار معلق کم به طور پایدار در تمام سه کلاس عمقی حفظ می شود. سوم، آزمون های اجرا شده در کلاس آب عمیق تر (۱/۳-۱/۰ متر) با استفاده از پیکربندی ارتقایافته دسته های بلند و قایق (آزمون های ۳، ۶، ۸، ۱۱، ۱۵، ۱۸، ۲۰) وزن ها و نسبت های بار بستر به بار معلق هم سازی با آزمون های کم عمق تر با انرژی موج قابل مقایسه تولید کردند. این سازگاری درونی، پایداری سازه ای و قابلیت اطمینان عملیاتی پیکربندی اصلاح شده BPST در آب عمیق تر را تأیید می کند و محدودیت عمقی سنتی تله های جریانی قابل حمل را برطرف می سازد (Payo et al., 2020).

پنل (ه) از شکل ۶، هنگامی که در کنار نمودار پراکندگی اختصاصی در شکل ۷ بررسی می شود، پاسخ بار معلق را ایزوله کرده و یکی از یافته های مهم فیزیکی این مطالعه را فراهم می کند. داده ها به روشنی یک رفتار آستانه ای را نشان می دهند: برای شرایط آرام، ۸۵٪ از سال، بار معلق به دام افتاده در محفظه فوقانی BPST ناچیز است (معمولاً ۳۵- گرم). اما به محض این که ارتفاع موج شاخص از حدود ۰/۵ متر فراتر می رود، بار معلق به طور چشم گیری افزایش می یابد و به مقادیر تا ۵۶۰ گرم در شدیدترین طوفان می رسد. این پاسخ آستانه ای غیرخطی با معیار راس برای تعلیق رسوب سازگاری فیزیکی دارد، که لازم می داند سرعت برشی آشفته (u^*) از حدود ۲/۵ برابر سرعت سقوط ذره (w_s) برای تعلیق قابل توجه فراتر رود (van Rijn, 1993). برای ماسه ریز سایت نوشهر، این سرعت برشی بحرانی تنها در شرایط شکست موج پرانرژی که مشخصه رویدادهای طوفانی است، حاصل می شود. توانایی BPST در ثبت این رفتار آستانه ای دقیق و معنادار فیزیکی به طور جداگانه برای فازهای بار بستر و بار معلق یک پیشرفت قابل توجه فراتر از اندازه گیری های مجموع بار تله های سنتی است که این دینامیک فاز ویژه را کاملاً پنهان می کردند.

۳-۳- پایداری عملکرد در اعماق مختلف آب

برای ارزیابی اینکه آیا BPST عملکرد پایداری در سراسر نیمرخ عرضی ساحل دارد، آزمون های میدانی به سه کلاس عمقی طبقه بندی شدند: کم عمق (عمق متوسط $\approx 0/5$ متر، تعداد ۵)، عمق متوسط (عمق متوسط $\approx 0/8$ متر، تعداد ۴)، و عمق بیشتر



شکل ۸- نمودارهای جعبه‌ای مقایسه توزیع وزن‌های بار بستر و بار معلق در سه کلاس عمقی

Figure 8. Box plots comparing the distribution of bedload and suspended load weights across three water depth classes

فراهم کند. تانک و ماسلینک (Tonk & Masselink, 2005)، با ترکیب حسگرهای پراکنش نوری با تله‌های جریانی در یک ساحل دارای سد ماسه‌ای در هلند، به‌طور مشابه گزارش کردند که بار بستر انتقال را تحت شرایط موج کم تا متوسط غالب می‌کند و بار معلق تنها زمانی قابل توجه می‌شود که H_s از حدود $0.6-0.8$ متر فراتر می‌رود، آستانه‌ای که به‌طرز قابل توجهی مشابه با 0.5 متر شناسایی شده در این مطالعه است. اخیراً، ون‌راین و همکاران (van Rijn et al., 2025)، با استفاده از یک مدل عددی فرآیندمحور که در برابر اندازه‌گیری‌های میدانی در سواحل جنوب شرقی فلوریدا صحت‌سنجی شده، محاسبه کردند که بار بستر تقریباً $85-90\%$ از LST سالانه در سواحل ماسه ریز را تشکیل می‌دهد و سهم بار معلق در طول طوفان‌ها افزایش می‌یابد. کسر بار بستر اندکی بالاتر مشاهده شده در نوشهر ($92/7\%$ در مقابل تقریباً 85%) احتمالاً به اقلیم موج مالیم‌تر دریای خزر در مقایسه با سواحل اقیانوسی باز نسبت داده می‌شود، جایی که رویدادهای طوفانی مکرر یا شدیدتر می‌توانند غلظت زمینه بالاتری از رسوب معلق را حفظ کنند. تأکید بر یک تمایز روش‌شناختی بنیادین مهم است: تمام مطالعات فوق‌الذکر، اگرچه ارزشمند هستند، نمی‌توانستند تفکیک فازی خود را با اندازه‌گیری‌های میدانی هم‌زمان و جداگانه بار بستر و بار معلق در یک نقطه واحد مستقیماً صحت‌سنجی کنند. تخمین‌های آن‌ها از نسبت بار بستر به بار معلق یا به‌طور غیرمستقیم استنباط می‌شد (با کسر بار معلق محاسبه شده توسط مدل از بار کل اندازه‌گیری شده) یا

شایان ذکر است اگرچه انسداد توری و اشباع محفظه از چالش‌های بالقوه در تله‌های رسوب‌گیر هستند، اما در این مطالعه شواهدی دال بر وقوع آن‌ها مشاهده نشد. زمان کوتاه نمونه‌برداری (حداکثر 10 دقیقه)، مساحت بزرگ توری (حدود 3 مترمربع)، و ظرفیت بالای محفظه‌ها نسبت به حداکثر حجم رسوبات جمع‌آوری شده (کمتر از 10% ظرفیت)، احتمال وقوع این پدیده‌ها را به حداقل رسانده است. با این حال، تحلیل کمی نفوذپذیری توری قبل و بعد از آزمون‌های طوفانی و تعیین دقیق آستانه اشباع، برای کاربرد BPST در شرایط حدی توصیه می‌شود.

۳-۴- مقایسه با مطالعات پیشین در زمینه تفکیک انتقال رسوب

برای قرار دادن یافته‌های این مطالعه در بستر ادبیات گسترده‌تر، مقایسه نسبت بار بستر به بار معلق به‌دست‌آمده از BPST با آن‌هایی که از سایر محیط‌های ساحلی گزارش شده‌اند، آموزنده است. غلبه چشم‌گیر بار بستر ($92/7\%$ از بار کل سالانه) مشاهده شده در سایت نوشهر با اندازه‌گیری‌های گزارش شده از سایر سواحل ماسه‌ای موج‌محور هم‌خوانی دارد. وانگ و همکاران (Wang et al., 1998)، با استفاده از تله‌های جریانی تک‌بخشی سنتی در چندین ساحل ماسه‌ای در سواحل فلوریدا، تخمین زدند که بار بستر حدود $80-90\%$ از انتقال طولی کل را تشکیل می‌دهد، هرچند روش آن‌ها نمی‌توانست تفکیک مستقیم فاز را که توسط BPST حاصل شده،

از فرمول بندی های تعبیه شده در مدل های عددی فرض می شود. مجموعه داده BPST ارائه شده در این مطالعه، در حد دانش نویسندگان، نخستین مجموعه ای است که اندازه گیری های مستقیم، هم زمان و فیزیکی جدا شده از دو فاز انتقال را در ناحیه شکست فراهم می کند. این شواهد تجربی مستقیم نه تنها نتایج کیفی مطالعات قبلی در مورد غلبه بار بستر در سواحل ماسه ای را تأیید می کند، بلکه نسبت های دقیق و مخصوص سایت را فراهم می کند که می توانند به عنوان اهداف کالیبراسیون برای مدل های عددی دوفازی مانند بایکر خدمت کنند. بیش تخمین سیستماتیک کسر بار معلق توسط چنین مدل هایی، که اشاره شده اما هرگز به طور قطعی کمی سازی نشده است (Buttò et al., 2025)، اکنون می تواند با استفاده از داده های تفکیکی BPST تصحیح شود.

۴- نتیجه گیری

این مطالعه با هدف پر کردن یک خلأ فناورانه دیرینه در اندازه گیری میدانی انتقال رسوب ساحلی؛ یعنی نبود ابزاری برای تفکیک هم زمان بار بستر و بار معلق به طراحی، توسعه و ارزیابی میدانی تله رسوب گیر دوفازی قابل حمل (BPST) پرداخت. فراتر از معرفی یک ابزار جدید، این پژوهش به دنبال پاسخ به یک پرسش بنیادین بود: آیا می توان با یک نوآوری مهندسی هدفمند، شکاف تاریخی میان مدل های دوفازی انتقال رسوب و مشاهدات میدانی را پر کرد؟

یافته های این پژوهش نشان می دهد که پاسخ به این پرسش مثبت است. الحاق یک صفحه جداکننده افقی ساده اما مهندسی شده در طراحی تله جریانی، برای نخستین بار امکان نمونه برداری هم زمان و مجزای دو فاز انتقال رسوب را در نقطه اندازه گیری فراهم ساخته است. موفقیت این طراحی نه در پیچیدگی آن، بلکه در انطباق دقیق آن با فیزیک حاکم بر لایه بار بستر نهفته است: ارتفاع ۱۵۰ میلی متری بفل، که بر اساس تئوری ضخامت لایه بار بستر تعیین شده، به طور مؤثری مرز میان جهش ذرات نزدیک بستر و تعلیق در ستون آب را مشخص می کند. دلالت علمی اصلی این پژوهش، اثبات امکان پذیری اعتبارسنجی فاز-تفکیکی مدل های انتقال رسوب است. پیش از این، مدل های دوفازی مانند روش بایکر ناگزیر بودند صرفاً بر اساس مجموع بار اندازه گیری شده صحت سنجی شوند، شرایطی که می توانست خطاهای جبرانی میان مؤلفه های بار بستر و بار معلق را پنهان کند. داده های تولید شده توسط BPST اکنون این امکان را فراهم می سازند که هر یک از دو مؤلفه مدل های عددی و فرمول های تجربی به طور مستقل کالیبره و صحت سنجی شوند. این گذار از اعتبارسنجی تک بعدی (کل بار) به اعتبارسنجی

دو بعدی (بار بستر + بار معلق)، گامی اساسی در جهت کاهش عدم قطعیت های پنهان در پیش بینی های مورفودینامیکی است. از منظر مدیریت ساحلی، این مطالعه یک سکوی مشاهداتی بومی و استاندارد برای پایش بلندمدت رژیم انتقال رسوب در سواحل شمال ایران فراهم می کند. تأیید غلبه بار بستر (بیش از ۹۰٪ از بودجه رسوبی سالانه) و شناسایی آستانه طوفانی برای تحرک بار معلق، پیامدهای مستقیمی برای طراحی پروژه های حفاظت ساحلی، مدیریت رسوب گذاری در بنادر، و برنامه ریزی عملیات لایروبی در منطقه نوشهر و سایر بنادر جنوب خزر دارد. با این حال، این پژوهش دارای محدودیت هایی است که مسیر تحقیقات آینده را مشخص می کند. ارتفاع ثابت ۱۵۰ میلی متری بفل، اگرچه برای شرایط غالب منطقه بهینه است، ممکن است در رویدادهای طوفانی با شکست موج از نوع فروجهنده که تلاطم شدیدتری ایجاد می کنند، اجازه عبور موقت برخی ذرات درشت جهشی به محفظه فوقانی را بدهد. مطالعات آتی می توانند طراحی های تطبیقی با ارتفاع بفل قابل تنظیم برای شرایط مختلف هیدرودینامیکی را بررسی کنند. همچنین، استقرار آرایه ای از دستگاه های BPST در مقیاس های زمانی و مکانی گسترده تر، امکان تهیه اطلس های ملی انتقال رسوب تفکیکی برای سواحل ایران را فراهم خواهد ساخت. نهایتاً، ادغام سیستماتیک داده های BPST با روندهای کالیبراسیون مدل های عددی سه بعدی، نویدبخش نسل جدیدی از مدل های مورفودینامیک ساحلی با عدم قطعیت به طور قابل اثبات کاهش یافته است. همچنین، از آنجا که در این مطالعه آنالیز دانه بندی تفکیکی برای نمونه های جمع آوری شده از دو محفظه انجام نشده است، بررسی توزیع اندازه ذرات (D_{10} , D_{50} , D_{90}) در هر یک از دو فاز می تواند درک دقیق تری از مکانیزم تفکیک بفل اینکه آیا جداسازی عمدتاً بر اساس مد انتقال است یا اندازه ذرات، فراهم کند و به عنوان گام بعدی این تحقیق پیشنهاد می شود. علاوه بر این، تحلیل عدم قطعیت کمی رسمی (شامل محاسبه عدم قطعیت گسترده با سطح اطمینان ۹۵٪) برای داده های وزن خشک انجام نشده است. گرچه دقت ذاتی ترازو (± 0.1 گرم) و سازگاری درونی و فیزیکی داده ها بر قابلیت اطمینان آن ها دلالت دارد، لیکن انجام یک تحلیل عدم قطعیت سیستماتیک با در نظر گرفتن تمام منابع بالقوه خطا (نشت ذرات ریز، شستشوی نمک، تغییرپذیری مکانی-زمانی) برای مطالعات آتی توصیه می شود. به عنوان پیشنهادی دیگر از آنجا که تحلیل دقیق هیدرودینامیک داخلی تله شامل بررسی الگوی جریان در اطراف بفل، شناسایی مناطق چرخشی یا راکد، و کمی سازی احتمال رسوب گذاری ثانویه از طریق شبیه سازی عددی (CFD) یا مطالعات آزمایشگاهی در فلوم

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

رسول کوهزاد: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **رضا دزواره رسنانی:** راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج، مشاوره، بازبینی متن مقاله،

موج در این پژوهش انجام نشده است و علیرغم اینکه شواهد تجربی (ثبت وزن صفر بار معلق در شرایط آرام) نشان می‌دهد که اثرات هیدرودینامیکی بفل احتمالاً عملکرد تفکیکی را مخدوش نکرده، تحلیل CFD برای بهینه‌سازی نهایی طراحی بفل و تأیید قطعی صحت هیدرودینامیکی آن می‌تواند در تحقیقات آتی در نظر گرفته شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

References

- Aagaard, T., & Hughes, M. G. (2017). Equilibrium shoreface profiles: A sediment transport approach. *Marine Geology*, 390, 321-330. doi: 10.1016/j.margeo.2016.12.013
- Afandizadeh, S., & Lashaki, S. A. (2017). Technical and economic analysis and evaluation of multimodal terminals with a focus on performance of port (Case Study of Noshahr Port). *Helix*, 7, 1438-1444. 32_Helix_1438-1444.pdf
- Aladin, N., & Plotnikov, I. (2004). The Caspian Sea. Lake Basin Management Initiative Thematic Paper, 1-29. <https://www.vliz.be/imisdocs/publications/ocrd/133415.pdf>
- Bayram, A., Larson, M., Miller, H. C., & Kraus, N. C. (2001). Cross-shore distribution of longshore sediment transport: comparison between predictive formulas and field measurements. *Coastal Engineering*, 44(2), 79-99. doi:10.1016/S0378-3839(01)00023-0
- Bijker, E. W. (1971). Longshore transport computations. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 97(4), 687-701. doi:10.1061/AWHCAR.0000122
- Bray, M. J., Workman, M., Smith, J., & Pope, D. (1996, July). Field measurements of shingle transport using electronic tracers. In *Proceedings of the 31st MAFF Conference of River and Coastal Engineers*, Loughborough, UK (Vol. 10, pp. 1-10). https://www.researchgate.net/publication/269393656_Field_measurements_of_shingle_transport_using_electronic_tracers
- Butto, S., Faraci, C. L., Corradino, M., Iuppa, C., Colica, E., & Pepe, F. (2025). Evaluating longshore sediment transport: A comparison between empirical formulas and XBeach 2DH numerical model. *Marine Geology*, 480, 107471. doi: 10.1016/j.margeo.2024.107471
- Chadwick, A. J. (1989). Field measurements and numerical model verification of coastal shingle transport. *Advances in water modelling and measurement*, 381-402.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2002). *Coastal processes with engineering applications*. Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511754500
- Dezvareh, R., Bargi, K., & Moradi, Y. (2012). Assessment of Wave Diffraction behind the Breakwater Using Mild Slope and Boussinesq Theories. *International Journal of Computer Applications in Engineering Sciences*, 2(2).
- Fredsoe, J., & Deigaard, R. (1992). *Mechanics of coastal sediment transport* (Vol. 3). World scientific publishing company. doi:10.1142/1546
- Jackson, D. W., & Short, A. D. (2020). Introduction to beach morpho dynamics. In *Sandy beach morpho dynamics* (pp. 1-14). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-08-102927-5.00001-1
- Kraus, N. C. (1987). Application of portable traps for obtaining point measurements of sediment transport rates in the surf zone. *Journal of coastal Research*, 139-152. www.jstor.org/stable/4297270
- Leroy, S. A., Lahijani, H. A., Crétaux, J. F., Aladin, N. V., & Plotnikov, I. S. (2020). Past and current changes in the largest lake in the world: The Caspian Sea. In *Large asian lakes in a changing*

- world: Natural state and human impact (pp. 65-107). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-42254-7_3
- Lim, C. (2025). Peak longshore sediment transport for storm waves. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 321, 109347. doi: 10.1016/j.ecss.2025.109347
- Muhammad, N., Adnan, M. S., Mohd Yosuff, M. A., & Ahmad, K. A. (2019). A review of field methods for suspended and bedload sediment measurement. *World Journal of Engineering*, 16(1), 147-165. doi:10.1108/WJE-07-2018-0226
- Payo, A., Wallis, H., Ellis, M. A., Barkwith, A., & Poate, T. (2020). Application of portable streamer traps for obtaining point measurements of total longshore sediment transport rates in mixed sand and gravel beaches. *Coastal Engineering*, 156, 103580. doi: 10.1016/j.coastaleng.2019.103580
- Rosati, J. D., & Kraus, N. C. (1989). Development of a portable sand trap for use in the nearshore. US Army Engineer Waterways Experiment Station. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA213534.pdf>
- Soulsby, R. (1997). Dynamics of marine sands. <http://www.icevirtuallibrary.com/content/book/1003..>
- Soulsby, R. L., & Damgaard, J. S. (2005). Bedload sediment transport in coastal waters. *Coastal Engineering*, 52(8), 673-689. doi: 10.1016/j.coastaleng.2005.04.003
- Svendsen, I. A. (2006). Introduction to nearshore hydrodynamics (Vol. 24). World Scientific. doi:10.1142/5740
- Tonk, A., & Masselink, G. (2005). Evaluation of long-shore transport equations with OBS sensors, streamer traps, and fluorescent tracers. *Journal of Coastal Research*, 21(5), 915-931. doi:10.2112/04-0209.1
- Van Rijn, L. C. (1984). Sediment Transport, part I: bed load transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110(10), 1431-1456. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(143)
- Van Rijn, L. C. (1993). Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. <https://ihedelftrepository.contentdm.oclc.org/digital/api/collection/phd1/id/34828/download>
- Van Rijn, L. C. (2007). Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. *Journal of Hydraulic engineering*, 133(6), 649-667. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:6(649)
- van Rijn, L. C., Geleynse, N., Perk, L., & Condon, D. (2025). Longshore Sediment Transport and Sediment Budgets, Southeast Florida Coast, USA. *Journal of Coastal Research*, 41(4), 623-639. doi:10.2112/JCOASTRES-D-24-00070.1
- Wang, P., Kraus, N. C., & Davis Jr, R. A. (1998). Total longshore sediment transport rate in the surf zone: field measurements and empirical predictions. *Journal of Coastal research*, 269-282. <https://www.jstor.org/stable/4298775>
- White, T. E. (1998). Status of measurement techniques for coastal sediment transport. *Coastal Engineering*, 35(1-2), 17-45. doi:10.1016/S0378-3839(98)00033-7