

## طراحی، ساخت و ارزیابی یک نمونه‌بردار ساده و دقیق بار بستر رودخانه

حسین خیرفام<sup>۱</sup> و سید حمیدرضا صادقی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس مازندران، نور و <sup>۲</sup> استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، مازندران، نور

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۱۸

### چکیده

اندازه‌گیری رسوبات رودخانه در شرایط مختلف زمانی و هیدرولوژیکی در علوم و مهندسی هیدرولیک، هیدرولوژی و حفاظت آب و خاک مهم است. بار بستر به دلیل سختی و کارایی کم نمونه‌بردارهای مرسوم به ندرت اندازه‌گیری می‌شود. لذا، در پژوهش حاضر سعی شد، نوعی نمونه‌بردار بار بستر بر اساس شرایط حاکم بر فلوم‌های دبی‌سنجی طراحی و ساخته شود. نمونه‌بردار یادشده به صورت مکعب مستطیل با جداره‌های با شبکه فلزی و با ابعاد ۱/۲ متر طول، ۶۰ سانتی‌متر ارتفاع و ۶۰ سانتی‌متر عرض، طراحی و ساخته شد. یک ورقه فلزی به صورت مژرس و موج با ارتفاع هفت سانتی‌متر نیز در کف آن تعبیه شد. دقت نمونه‌بردار یادشده با اندازه‌گیری بار بستر در فلوم خروجی حوزه آبخیز جنگلی آموزشی و پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس با استفاده از تانک آب بدون منفذ ۳۰۰ لیتری و استفاده از آزمون t جفتی و معیارهای آماری درصد خطای نسبی و انحراف نسبی مدل مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که میانگین مقادیر بار بستر اندازه‌گیری شده به وسیله تانک آب و نمونه‌بردار ساخته شده به ترتیب ۰/۰۰۶۴ و ۰/۰۰۶۳۵ گرم بر لیتر بود. همچنین، اختلاف معنی‌داری بین مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شده بار بستر با نمونه‌بردار یادشده وجود نداشت ( $p > 0/0793$ ). در مجموع نمونه‌بردار ساخته شده در مجموع با متوسط درصد خطای نسبی و انحراف نسبی به ترتیب ۸/۵ درصد و ۰/۱۰۷ از دقت بالایی در اندازه‌گیری بار بستر رودخانه‌ای برخوردار بود.

**واژه‌های کلیدی:** انتقال رسوب، بار رسوبی، تولید رسوب، رسوبات بستر، هیدرولیک رسوب

### مقدمه

آشفستگی جریان به حالت غوطه‌ور همراه با جریان آب حرکت می‌کند (Fredson و Deigaard, ۱۹۹۴). از آنجایی که حمل رسوبات به وسیله جریان رودخانه‌ای منجر به بروز مشکلاتی از قبیل رسوب‌گذاری در بستر رودخانه‌ها و در نتیجه ایجاد جزایر رسوبی و دلتاها و همچنین، کاهش ظرفیت مخازن سدها می‌شود (Raven و همکاران، ۲۰۱۰؛ Kheirfam و Sadeghi, ۲۰۱۴)، لذا علم و آگاهی از فرایندهای فرسایش، حمل و رسوب‌گذاری رسوبات

انتقال مواد حاصل از فرسایش آبی به دو شکل بار بستر<sup>۱</sup> و بار معلق<sup>۲</sup> در رودخانه صورت می‌گیرد. بار بستر قسمتی از رسوبات کل خروجی حوزه آبخیز بوده که در تماس با بستر حرکت می‌کند (Wilson, ۱۹۶۶) و بار معلق قسمتی از رسوبات است که به دلیل

\* مسئول مکاتبات: [sadeghi@modares.ac.ir](mailto:sadeghi@modares.ac.ir)

<sup>۱</sup> Bed Load

<sup>۲</sup> Suspended Load

شامل یک جعبه توری بوده که به‌صورت خوابیده در راستای جریان قرار می‌گیرد. به‌دلیل ایجاد انحراف در مسیر جریان این نمونه‌بردار دارای بیش از ۴۵ درصد خطا بوده، همچنین برای رودخانه‌های کوهستانی با شیب زیاد و بستر شنی و سنگی و میزان بالای بار بستر، به‌دلیل عدم تماس مناسب با کف بستر کارایی بسیار ضعیفی دارد (Mahdavi, ۲۰۰۷). نمونه‌بردار اختلاف فشاری نوعی دیگر از نمونه‌بردارهای بار بستر بوده که مرسوم‌ترین نوع آن Helly-Smith است. به‌دلیل کوچک بودن این نمونه‌بردارها، فضای موجود سریعاً از رسوب پر شده، بیشتر از چند دقیقه نمی‌توان نمونه‌برداری کرد. این نمونه‌بردار ۴۵ درصد بیش تخمینی دارد (Zirake Javanmard, ۱۹۹۵). نوعی دیگر از نمونه‌بردارهای بار بستر نمونه‌بردارهای سینی شکل بوده که نمونه‌بردار Polyacov از این دسته بوده که با دست‌کم ۳۸ درصد خطا فقط برای جریان‌های با سرعت کم مناسب است (Iranian Ministry of Energy, ۲۰۰۶). نمونه‌بردار چاله‌ای به‌دلیل احداث آن در کف آبراهه، محدودیت حجم و سرعت پرشدگی و ضرورت پمپاژ محتویات (Mahdavi, ۲۰۰۷) از کارایی بالایی برخوردار نیست. همچنین، رسوبات پمپاژ شده پره‌های پمپ را سریعاً مستهلک و تخریب کرده، از سویی برای هر بار اندازه‌گیری بار بستر، باید مسیر رودخانه منحرف شود. به‌همین دلیل این نمونه‌بردار بیشتر برای اندازه‌گیری بار بستر در بازه زمانی طولانی کاربرد دارد (Zirake Javanmard, ۱۹۹۵) و لذا برای بررسی تغییرات بار بستر با تغییرات دبی و بار معلق مناسب نیست.

جمع‌بندی پیشینه پژوهش گزارش‌های ارائه شده نشان می‌دهد که نمونه‌بردارهای بار بستر دقت، سرعت و کارایی لازم را ندارند. حال آن‌که ضرورت دستیابی به اطلاعات صحیح به مقدار بار بستر و اندازه‌گیری تغییرات زمانی و مکانی آن در مدیریت منابع آب‌و‌خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این‌رو، طراحی و ساخت نمونه‌بردارهای رسوب بستر ساده، کاربردی و دقیق ضروری است، به نحوی که علاوه بر دارا بودن مزایای نمونه‌بردارهای پیشین، مواردی از معایب این روش‌ها را نیز کاهش دهد و بتواند با کمترین میزان هزینه و نیرو بیشترین کارایی را داشته

حوضه‌ای برای دامنه وسیعی از شرایط هیدرولوژیکی از طریق اندازه‌گیری و به‌تبع آن پیش‌بینی حجم رسوبات حمل شده به‌وسیله جریان بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، در پروژه‌های مدیریت منابع آب، شناخت و تنظیم تغییرات بستر و کناره رودخانه‌ها، مدیریت تاسیسات پایین‌دست حوزه آبخیز، کاهش سیل و پایداری محیط‌زیست حائز اهمیت است (Lane و همکاران، ۲۰۰۷؛ Aytok و Kişi, ۲۰۰۸؛ Raven و همکاران، ۲۰۰۹؛ Hergault و همکاران، ۲۰۱۰). از این‌رو، اندازه‌گیری مستقیم میزان بار انتقالی به‌وسیله جریان امری لازم و ضروری است. این در حالی است که اندازه‌گیری بار معلق با نمونه‌برداری و روش‌های دیگر متداول بوده، در بسیاری از ایستگاه‌ها اندازه‌گیری می‌شود (Samadian Fard و همکاران، ۲۰۰۷). اندازه‌گیری مستقیم بار بستر تنها در کمتر از ۶۰ رودخانه کشور به‌سبب کارایی نامناسب نمونه‌بردارهای مرسوم بار بستر و نیز مشکل بودن کاربرد این نمونه‌بردارها صورت می‌گیرد (Iranian water resources research organization, ۲۰۰۹). به این دلیل روابط و روش‌های تجربی برای اندازه‌گیری بار بستر مورد‌استفاده قرار می‌گیرد که در این خصوص می‌توان به روابط Shields (۱۹۳۶)، Meyer-Peter و Müller (۱۹۴۸) و Einstein (۱۹۵۰) اشاره نمود. این روش‌ها نیز به‌دلیل تهیه در مناطقی با شرایط اقلیمی و فیزیوگرافی متفاوت، برآورد مناسبی از مقادیر بار بستر ندارند. طبیعتاً تخمین بار بستر انتقالی در رودخانه‌ها برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی برای ساخت و مدیریت تاسیسات در مسیر رودخانه‌ها از قبیل سدهای مخزنی، کانال‌های آبیاری و موارد مشابه بر اساس تخمین‌های به‌دست آمده از دقت کافی برخوردار نیست (Kheirfam و Sadeghi, ۲۰۱۵).

نمونه‌بردارهای متعددی برای اندازه‌گیری بار بستر پیشنهاد شده و یا به‌کار برده می‌شود که هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارد. از مرسوم‌ترین این نمونه‌بردارها با گستره کاربرد جهانی می‌توان به نمونه‌بردار جعبه‌ای، اختلاف فشاری<sup>۱</sup>، سینی شکل و چاله‌ای اشاره نمود. نمونه‌بردار جعبه‌ای

<sup>۱</sup> Pressure Differential Sampler

محکم با منافذ به قطر ۰/۵ میلی‌متر بر اساس مبانی حاکم بر تله‌های زنبیلی اندازه‌گیری رسوب بستر (Mahdavi, ۲۰۰۷) طراحی شد.

این نمونه‌بردار با شماره ثبت اختراعات ۸۰۰۳۳ مورخ ۱۳۹۲/۰۴/۲۵ و هزینه کل تقریبی ۲/۰۰۰/۰۰۰ ریال ساخته و در پایین‌دست فلوم به‌نحو تعبیه شد تا تمام جریان خروجی از فلوم به داخل نمونه‌بردار بریزد و توری‌های ۰/۵ میلی‌متری به‌عنوان فیلتر عمل کند و رسوبات بستر موجود در جریان را به تله بیندازد. اما با توجه به این امر که سقوط آزاد آب به کف نمونه‌بردار حالتی را ایجاد می‌کند که باعث برگشت پرش آب و بار بستر محتوای آن به بیرون از نمونه‌بردار می‌شود، به این منظور در کف نمونه‌بردار ورقه فلزی به‌صورت مژرس و مواج به ارتفاع موج هفت سانتی‌متر تعبیه شد. شکل ۱ طراحی اولیه نمونه‌بردار یادشده در محیط 3D MAX و شکل ۲ نحوه قرارگیری نمونه‌بردار یاد شده در پایین‌دست فلوم را نشان می‌دهد.

به سبب کفایت کمینه تعداد سه داده برای تحلیل‌های آماری در علوم طبیعی (Zare Chahouki, ۲۰۱۰)، پس از طی مراحل ساخت نمونه‌بردار یاد شده، به‌منظور سنجش میزان دقت و کارایی آن، تعداد چهار نمونه بار بستر در چهار شرایط مختلف هیدرولوژیکی و زمانی با استفاده از یک تانک پلاستیکی ۳۰۰ لیتری با هدف به تله‌اندازی کل بار بستر از محل پایین‌دست فلوم حوزه آبخیز مطالعاتی و همچنین، نمونه‌بردار بار بستر طراحی و ساخته شده، به‌صورت جداگانه و تقریباً هم‌زمان اندازه‌گیری شد. سپس، ارتفاع آب ثبت شده با شاخص در چاهک فلوم و بر اساس جدول استاندارد فلوم به دبی جریان تبدیل و مقادیر بار بستر به تله انداخته شده برحسب گرم بر لیتر محاسبه شد. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری نمونه‌بردار بار بستر با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده به‌وسیله تانک آب و سنجش کارایی آن با استفاده از درصد خطای نسبی<sup>۱</sup> (Sadeghi و همکاران، ۲۰۰۵)، و انحراف نسبی مدل<sup>۲</sup> (Tramblay و همکاران، ۲۰۱۰) و روابط (۱) و (۲) صورت گرفت.

باشد. از آنجایی که بیشترین مقادیر بار بستر در رودخانه‌های دائمی مناطق کوهستانی حمل شده (Yu و همکاران، ۲۰۰۹) و تأسیسات هیدرولیکی از قبیل سدهای مخزنی در مسیر و پایین‌دست آن‌ها ساخته می‌شود، لذا طراحی و ساخت نمونه‌بردار رسوب بستر قابل استفاده در ایستگاه‌های هیدرومتری و غالباً مجهز به فلوم‌ها از مهم‌ترین رسالت‌های متخصصین منابع آب‌و خاک است. این فلوم‌ها از بتن ساخته شده، اغلب دارای مقطعی دوزنقه‌ای بوده، دیواره‌های شیب‌داری دارند که مقطع بستری این فلوم‌ها بین یک تا دو متر عرض داشته، مقطع بالایی نیز برحسب شیب کناره‌ها دارای عرض‌های متغیر و البته بیشتر از عرض مقطع بستری است که جریان رودخانه را کانالیزه کرده، از خود عبور داده تا به‌وسیله چاهک و لیمنوگراف و شاخص نصب شده در فلوم مقادیر دبی جریان اندازه‌گیری شود. قسمت پایین‌دست فلوم‌های مناطق کوهستانی دارای اختلاف ارتفاعی نسبت به خود فلوم می‌باشند و شرایطی را ایجاد کرده که جریان آب به‌صورت سقوط آزاد به بستر رودخانه می‌ریزد. لذا، با توجه به شرایط و ساختار این نوع فلوم‌ها، در پژوهش حاضر سعی شده نمونه‌برداری مطابق با این شرایط طراحی شود.

## مواد و روش‌ها

برای طراحی و ارزیابی عملکرد نمونه‌بردار بر اساس شرایط و ابعاد فلوم خروجی حوزه آبخیز آموزشی - پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس واقع در شهرستان نوشهر و در ۳۰ کیلومتری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس (شهرستان نور) مدنظر قرار گرفت. نمونه‌بردار یاد شده به‌صورت مکعب مستطیل به ابعاد ۱/۲ متر طول، ۰/۶ متر ارتفاع و ۰/۶ متر عرض و متناسب با ابعاد فلوم استاندارد دوزنقه‌ای سانتاریتا و با عرض یک متر در کف و ۲/۲۰ متر در قسمت بالا و طول ۲/۵۰ متر و عرض آب ریزشی از فلوم و نیز لحاظ تغییرات دبی ثبت شده ۳۰ تا ۷۸۰ لیتر بر ثانیه (Sadeghi و Kheirfam, ۲۰۱۵) و با جداره‌های با شبکه فلزی با منافذ مربعی دو در دو سانتی‌متر و پوششی با قابلیت قرارگیری به‌صورت کشویی در داخل جداره‌های فلزی، از دو لایه توری از جنس آلومینیوم

<sup>1</sup> Relative Errorr (RE)

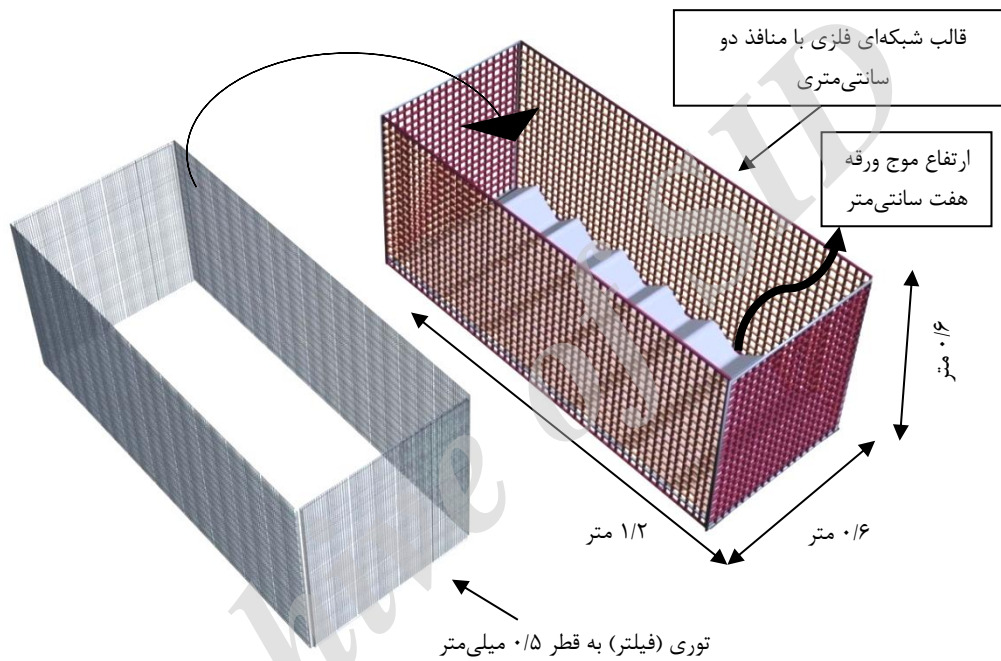
<sup>2</sup> Relative Bias (RBIAS)

نمونه‌بردار یاد شده خواهد بود. طبیعی است، مقدار خطای نسبی مطلق نشان‌گر توانایی کلی دستگاه در اندازه‌گیری بار بستر بوده حال آن‌که انحراف نسبی نشان‌گر میانگین گرایش کلی دستگاه در بیش برآوردی و یا کم‌برآوردی و بر اساس علامت نهایی مقدار آماره است. همچنین نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk و مقایسه میانگین‌ها با آزمون t جفتی یا دو نمونه‌ای (Zare Chahouki, 2010) انجام گرفت.

$$RE = \left| \frac{Y_o - Y_m}{Y_o} \right| \times 100 \quad (1)$$

$$RBIAS = \frac{1}{n} \left( \frac{Y_o - Y_m}{Y_o} \right) \quad (2)$$

که در آن‌ها،  $Y_o$  داده‌های اندازه‌گیری شده با تانک آب پلاستیکی،  $Y_m$  داده‌های اندازه‌گیری شده با نمونه‌بردار و  $n$  تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده (چهار نمونه) است. هر چه مقادیر معیارهای آماری  $RE$  و  $RBIAS$  کوچک‌تر باشد، نشان از کارایی بالای دستگاه



شکل ۱- تصویر نمونه‌بردار بار بستر طراحی شده



شکل ۲- نحوه استقرار نمونه‌بردار در پایین دست فلوم در حوزه آبخیز آموزشی-پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس

## نتایج و بحث

اندازه‌گیری شده با استفاده از تانک پلاستیکی و نمونه‌بردار بار بستر و همچنین نتایج مربوط به آماره و ارزیابی در جدول ۱ و نتایج مقایسه میانگین‌ها در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

دقت و کارایی نمونه‌بردار ساخته شده با استفاده از آزمون و معیارهای آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. بر همین اساس مقادیر و میزان دقت اندازه‌گیری بار بستر

جدول ۱- ارزیابی اندازه‌گیری بار بستر با استفاده از نمونه‌بردار تانک آب و دستگاه نمونه‌بردار بار بستر ساخته شده

| شماره نمونه | مقادیر اندازه‌گیری نمونه‌بردار (گرم بر لیتر) | مقادیر اندازه‌گیری تانک آب (گرم بر لیتر) | درصد خطای نسبی | ریشه نسبی میانگین مربعات خطا | انحراف نسبی |
|-------------|--|--|----------------|------------------------------|-------------|
| ۱           | ۰/۰۱   | ۰/۰۰۹۶                                   | ۴/۱۷           | ۰/۰۰۱۷                       | -۰/۰۴۲      |
| ۲           | ۰/۰۱۰۶                                       | ۰/۰۱۰۹                                   | ۲/۸۳           | ۰/۰۰۰۷                       | ۰/۰۲۸       |
| ۳           | ۰/۰۰۲۱                                       | ۰/۰۰۲۶                                   | ۱۹/۲۳          | ۰/۰۳۶                        | ۰/۱۹        |
| ۴           | ۰/۰۰۲۷                                       | ۰/۰۰۲۵                                   | ۸              | ۰/۰۰۶                        | -۰/۰۸       |
| میانگین     | ۰/۰۰۶۳۵                                      | ۰/۰۰۶۴                                   | ۸/۵۵           | ۰/۰۱۸۶                       |             |

جدول ۲- آزمون نرمال بودن مقادیر اندازه‌گیری بار بستر با استفاده از نمونه‌بردار تانک آب و دستگاه نمونه‌بردار ساخته شده

| مؤلفه مورد بررسی               | آماره | درجه آزادی | سطحی معنی‌داری |
|--------------------------------|-------|------------|----------------|
| بار بستر                       | ۰/۷۹۳ | ۴          | ۰/۰۹۱          |
| مقادیر اندازه‌گیری نمونه‌بردار | ۰/۸۰۰ | ۴          | ۰/۱۰۳          |

جدول ۳- نتایج آزمون t جفتی برای مقایسه میانگین مقادیر بار بستر اندازه‌گیری شده با تانک آب و دستگاه نمونه‌بردار ساخته شده

| مؤلفه مورد بررسی       | مقدار t | درجه آزادی | سطحی معنی‌داری |
|------------------------|---------|------------|----------------|
| بار بستر (گرم بر لیتر) | -۰/۰۱۶  | ۶          | ۰/۹۸۸          |

اندازه‌گیری شده بار بستر با استفاده از نمونه‌بردار ساخته شده با مقادیر واقعی بار بستر بین ۲/۸۳ تا ۱۹/۲۳ درصد متغیر بوده، همچنین، انحراف نسبی آن نیز بین -۰/۰۴۲ تا ۰/۱۹ متغیر بود. متوسط درصد خطای نسبی و انحراف نسبی نیز به ترتیب ۸/۵ و ۰/۱۰۷ درصد بود. لذا با توجه به مقدار متوسط ۰/۱۰۷ انحراف نسبی و اختلاف ۰/۰۰۰۵ میانگین مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شده می‌توان این‌گونه مطرح کرد که نمونه‌بردار ساخته شده مقادیر بار بستر را کمتر از مقدار واقعی اندازه‌گیری می‌کند (Kheirfam و Sadeghi، ۲۰۱۲). همچنین، تحلیل نتایج نشان داد که با کاهش میزان دبی جریان، میزان درصد خطای نسبی و انحراف نسبی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، دلیل این امر را این‌گونه می‌توان مطرح کرد که با کاهش دبی جریان قدرت حمل جریان کاهش یافته،

با توجه به نتایج جدول‌های ۱ و ۲، مقادیر اندازه‌گیری شده بار بستر با استفاده از نمونه‌بردار طراحی و ساخته شده بین ۰/۰۲۱ تا ۰/۰۱۰۶ گرم بر لیتر متغیر و نیز دارای توزیع نرمال بودند. مقادیر بار بستر به تله انداخته شده با استفاده از تانک آب نیز بین ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۱۰۹ متغیر بود. از سویی، مقادیر دبی نیز بین ۰/۳۸ تا ۰/۶۲ مترمکعب بر ثانیه متغیر بود. لذا، متوسط مقادیر میانگین، میانه، انحراف معیار و ضریب تغییرات بار بستر به تله انداخته شده با استفاده از نمونه‌بردار ساخته شده به ترتیب ۰/۰۰۶۳۵، ۰/۰۰۶۳۵، ۰/۰۰۴۵ و ۰/۰۰۴۴ گرم بر لیتر و ۷۲/۰۳ درصد و همین مقادیر برای تانک آب به ترتیب ۰/۰۰۶۴، ۰/۰۰۶۱، ۰/۰۰۴۴ و ۰/۰۰۴۴ گرم بر لیتر و ۶۹/۹۵ درصد و برای دبی جریان نیز ۰/۵، ۰/۵، ۰/۱۲ مترمکعب بر ثانیه و ۲۴/۴۹ درصد به دست آمد. خطای نسبی مقادیر

مقدار جریان، اندازه رسوبات، ساخت و استفاده آسان و همچنین با در نظر گرفتن توجیه‌پذیری اقتصادی و کارایی آن طراحی، ساخته، پس از نمونه‌برداری مورد ارزیابی صحرائی و آماری قرار گرفت. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که نمونه‌بردار یاد شده با عدم تغییر در شرایط جریان و رساندن میزان خطای اندازه‌گیری به کمینه ممکن، هزینه ساخت بسیار پایین و سادگی ساختار ولی در عین حال با کارایی و کاربرد بالا برای استفاده به‌وسیله سازمان‌های مربوطه و همچنین طرح‌های پژوهشی، حمل و نقل آسان و اندازه‌گیری آسان بار بستر با کمترین تخصص، قابل طراحی و ساخت برای انواع مختلف فلوم‌ها و در اندازه‌های متفاوت و دقت اندازه‌گیری بیش از ۹۱ درصد مبتنی بر میانگین درصد خطای نسبی (جدول ۱) می‌تواند نمونه‌برداری مناسب و کارا در اندازه‌گیری‌های بار بستر در محل فلوم‌های دبی‌سنجی کشور مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، نمونه‌بردار یاد شده با ایجاد امکان اندازه‌گیری میزان بار بستر در بازه‌های زمانی متفاوت و در تمام شرایط هیدرولوژیکی جریان تهیه منحنی سنجی بار بستر بر اساس دبی و حتی با اندازه‌گیری هم‌زمان بار معلق، بر اساس بار معلق را فراهم کند. به هر تقدیر، آزمون بیشتر دستگاه مزبور و حتی در ایستگاه هیدرومتری مورد استفاده در این پژوهش و سایر ایستگاه‌های اندازه‌گیری و ارزیابی کارایی آن در سایر شرایط هیدرولوژیکی و حتی دانه‌بندی متنوع تر رسوبات برای ارائه جمع‌بندی‌های لازم ضروری است.

جریان قادر به حمل رسوبات درشت‌دانه نشده و رسوبات دانه‌ریز را حمل می‌کند. از سویی، عدم مهار کامل رسوبات ریز (رسوبات با قطر ریزتر از ۰/۵ میلی‌متر) با استفاده از نمونه‌بردار بار بستر، اختلاف مقادیر بار بستر اندازه‌گیری شده به‌وسیله تانک آب و نمونه‌بردار بیشتر شده، در نهایت مقادیر درصد خطای نسبی و انحراف نسبی افزایش می‌یابد. دامنه خطای برآوردی در دستگاه طراحی و ساخته شده برای پژوهش فعلی به‌مراتب از حد بالای ۴۰ درصد به‌وسیله دستگاه‌های دیگر ساخته‌شده در جهان (Zirake Iranian Ministry of Energy, ۱۹۹۵, Javanmard ۲۰۰۶) کمتر بوده، طبعاً کارایی بالای آن را تأیید می‌کند. بر اساس نتایج جدول ۳، مقایسه میانگین‌ها نیز بر عدم وجود اختلاف معنی‌دار ( $p > ۰/۷۹۳$ ) بین مقادیر اندازه‌گیری شده به‌وسیله نمونه‌بردار و تانک آب پلاستیکی (مقادیر واقعی بار بستر) تأکید داشت. لذا، کارایی و دقت نمونه‌بردار طراحی شده برای اندازه‌گیری بار بستر از نظر آماری نیز تأیید شد.

### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف معرفی و ارائه دستگاه نمونه‌بردار بار بستر طراحی و ساخته شده برای استقرار در فلوم‌های دبی‌سنجی به‌منظور اندازه‌گیری بار بستر رودخانه‌ای صورت گرفت. برای این منظور، نمونه‌بردار یاد شده با در نظر گرفتن جمیع جهات شرایط هیدرولوژیکی، اندازه و محل قرارگیری فلوم، سرعت و

### منابع مورد استفاده

1. Aytek, A. and Ö. Kişi. 2008. A genetic programming approach to suspended sediment modeling. *Journal of Hydrology*, 351: 288-298.
2. Einstein, H. 1950. The bed-load functions for sediment transportation in open channel flow. United States Department of Agriculture, Washington, DC, Technical Bulletin No. 1026, 78 pages.
3. Fredson, J. and R. Deigaard. 1994. Mechanics of coastal sediment transport. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 3. World Scientific Publication, 392 pages.
4. Hergault, V., Ph. Frey and F. Ois Me'tivier. 2010. Image processing for the study of bedload transport of two-size spherical particles in a supercritical flow. *Experiments in Fluids*, 49: 1095-1107.
5. Iranian Ministry of Energy. 2006. Field operation guide for sediments sampling rivers and reservoirs. Management and Planning Organization Press, 102 pages (in Persian).
6. Iranian Water Resources Research Organization. 2009. The statistical report of summarized measurements results of national rivers bed load in 2006-2007. The Basic Studies Office of Water Resources, 63 pages (in Persian).
7. Kheirfam, H. and S.H.R. Sadeghi. 2014. Effect of sand and gravel mining on among of sediment load and bed load granulometry in Kojour River. *Iran-Watershed Management Science and Engineering*, 8(26): 27-34.

8. Kheirfam, H. and S.H.R. Sadeghi. 2012. Modelling of hydrometeorological behavior of Aq Qalawatershed. In: National Conference on Water Flow and Pollution, University of Tehran, 23-24 May 2012, Tehran, 8 pages (in Persian).
9. Mahdavi, M. 2007. Applied hydrology. The Tehran University Press, 424 pages (in Persian).
10. Meyer-Peter, E. and R. Muller. 1948. Formulas for bed-load transport. In: Report on the 2nd Meeting International Association Hydraulic Structure Research. Stockholm, Sweden, 39-64.
11. Lane, S.N., V. Tayefi, S.C. Reid, D. Yu and R.J. Hardy. 2007. Interactions between sediment delivery, channel change, climate change and flood risk in a temperate upland environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32: 429-446.
12. Raven, E.K., S.N. Lane and R.I. Ferguson. 2010. Using sediment impact sensors to improve the morphological sediment budget approach for estimating bed load transport rates. *Geomorphology*, 119: 125-134.
13. Raven, E.K., S.N. Lane, R.I. Ferguson and L.J. Bracken. 2009. The spatial and temporal patterns of aggradation in a temperate, upland, gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 1181-1197.
14. Sadeghi, S.H. and H. Kheirfam. 2015. Temporal variation of bed load to suspended load ratio in Kojour River, Iran. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 43(10): 1366-1374.
15. Sadeghi, S.H.R., H.R. Moradi, M. Mozayyan and M. Vafakhah. 2005. Comparison of different statistical analysis methods in rainfall-runoff modeling (case study: Kasilian watershed). *Journal of Agriculture Science and Natural Resources*, 12(3): 81-90 (in Persian).
16. Samadian Fard, S., M.A. Ghorbani, R. Hoseiniler, A. Hosein Zadehdelir and D. Farsadi zadeh. 2007. Selection of suitable method to estimate suspended load and bed load in Ahar Chai River (upstream of Sattarkhan dam). *Agriculture Research*, 7(3): 91-101 (in Persian).
17. Trambly, Y., T.B.M.J. Ouarda, A. St-Hilaire and J. Poulin. 2010. Regional estimation of extreme suspended sediment concentrations using watershed characteristics. *Journal of Hydrology*, 380: 305-317.
18. Shields, A. 1936. Applications of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Report No. 167, 43 pages.
19. Wilson, K. 1966. Bed-load transport at high shear stress. *Journal of Hydraulic Engineering*, 92(11): 49-59.
20. Yu, G., Zh.Y. Wang, K. Zhang, T.Ch. Chang and H. Liu. 2009. Effect of incoming sediment on the transport rate of bed load in mountain streams. *International Journal of Sediment Research*, 24: 260-273.
21. Zare Chahouki, M.A. 2010. Data analysis in natural resources research using SPSS software. Jahad Daneshgahi Press, Tehran, 310 pages (in Persian).
22. Zirake Javanmard, K. 1995. Assessment of bed load of Aland River using the pit sampler equipped with a evacuation system. In: *Soil Erosion and Sediment National*, Iran, Noor 1995, 209-238 (in Persian).