

# معرفی و بررسی کارایی الگوریتم‌های مختلف پردازش تصویر در تعیین زبری هیدرولیکی به کمک منحنی دانه‌بندی در رودخانه‌های بستر شنی

مهدیس زارعی<sup>1</sup>، امیر صمدی<sup>2\*</sup> و سیدحسین مهاجری<sup>3</sup>

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

2- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

2- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

\*amsamadi@gmail.com

(دریافت مقاله: 97/8/4؛ پذیرش مقاله: 97/9/9)

**چکیده** - اهمیت و نقش زبری بستر در مدل‌های شبیه‌سازی رودخانه بر هیچ یک از متخصصان این حوزه پوشیده نیست. براین اساس، محققان برای تعیین اندازه زبری ذرات بستر، از روش‌های ساده‌ای چون اندازه‌گیری مستقیم یا خط‌کش یا کولیس یا دانه‌بندی با الک تا سالیان متمادی استفاده می‌کردند. در سالیان اخیر با پیشرفت تکنولوژی و ترویج دوربین‌های عکاسی دیجیتال، الگوریتم‌ها و نرم‌افزارهای مختلفی برای تجزیه و تحلیل خودکار اطلاعات بستر با استفاده از تصاویر دیجیتالی اخذ شده از بستر آبراهه‌ها ارائه شده‌اند، لکن تاکنون در خصوص مقایسه نتایج روش‌های مختلف و صحت‌سنجی آنها به صورت تطبیقی مطالعه‌ای صورت نگرفته و صرفاً محققان مختلف بر روی شکل ظاهری منحنی دانه‌بندی و نیز قطرهای شاخص ذرات ارزیابی و اظهارنظر کرده‌اند. در این مطالعه، به منظور بررسی قابلیت روش فتوگرامتری در تعیین منحنی دانه‌بندی و زبری بستر، تصویربرداری از بازه‌ای یک کیلومتری از بستر رودخانه کردان استان البرز صورت گرفت و منحنی دانه‌بندی به کمک روش پردازش تصویر با 3 الگوریتم پردازش تصویر مختلف استخراج گردید. در ادامه منحنی دانه‌بندی حاصله، با منحنی دانه‌بندی حاصل از آزمایش الک مصالح جمع‌آوری شده از محل بازدید و منحنی دانه‌بندی حاصله از ذرات جمع‌آوری شده از بستر در داخل آزمایشگاه مقایسه گردیده شد. بر اساس نتایج حاصله می‌توان گفت که ارائه منحنی دانه‌بندی قابل قبول، به معنی دقت خوب روش‌های تصویری نیست و این روش‌ها بعضاً در شمارش ذرات دارای خطای فاحشی هستند که با کوچک شدن میدان تصویر یا افزایش تعداد ذرات ریزدانه داخل تصویر یا وجود ذرات دارای کشیدگی طولی، این خطا محسوس و غیرقابل اغماض خواهد بود. همچنین آنالیز حساسیت روی ضریب زبری، نشان داد که خطا در برآورد منحنی دانه‌بندی می‌تواند موجب خطای غیرقابل اغماض روی ضریب زبری گردد. لذا استفاده از این روش‌ها در تخمین زبری هیدرولیکی بایستی با دقت کافی صورت گیرد.

**کلیدواژگان:** زبری بستر، رودخانه شنی، منحنی دانه‌بندی، آنالیز خطا، نرم‌افزارهای پردازش تصویر.

**1- مقدمه**

روخانه‌های بستر شنی از جمله آبراه‌های طبیعی هستند که در مناطق کوهستانی و دره‌های با شیب زیاد گسترده شده‌اند. در این دسته از آبراه‌ها تعیین منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های شنی تشکیل دهنده بستر که در اغلب موارد ناهمگن و غیریکنواخت می‌باشند و در قسمت‌های مختلف پراکنده شده‌اند، از اهمیت اساسی در هیدرولیک جریان رودخانه‌ها و ژئومورفولوژی رودخانه‌های رسوبی برخوردار می‌باشد. اطلاعات حاصل از و منحنی دانه‌بندی، در زمینه مهندسی رودخانه نیز کاربردهای فراوان دارد، به‌طور مثال می‌توان از کاربرد مشخصات توزیع اندازه ذرات رسوبی جهت مدل‌سازی جریان و انتقال رسوب نام برد (Parker, 1991؛ Rice, 1999؛ صمدی و عزیزیان، 1394). این اهمیت به این علت است که بسیاری از خصوصیات جریان مانند سرعت متوسط، انتقال رسوب و خصوصیات آشفتنی از ساختار و شکل بستر رودخانه‌ها تأثیر می‌پذیرد (Mohajeri et al., Buffin-Bélanger and Roy, 1998). به علاوه ساختار و شکل بستر در تنوع زیستی ارگانیسم‌های زنده‌ای که در بستر رودخانه‌ها زندگی می‌کنند (ارگانیسم‌های بنتوز<sup>1</sup>) مهم می‌باشد (Webb and Leake, 2006).

منحنی دانه بندی به طور فراگیری جهت تعیین زبری بستر به کار گرفته می‌شود. بسیاری روابط تجربی و در برخی موارد براساس اصول تئوری، روابطی به این منظور ارائه شده است. در مطالعه و تعیین زبری باید به تفاوت مفهوم زبری، ضریب زبری و روش تعیین زبری توجه داشت. زبری عبارت از خصوصیات کلی بستر زبر می‌باشد (Nikora, 1998). این خصوصیات می‌تواند طیف وسیعی از اطلاعات مانند قطر سنگ‌دانه‌ها تا خصوصیات آماری بستر زبر را شامل شود. در علم هیدرولیک این خصوصیات به صورت یک ضریب کلی تحت عنوان ضریب زبری<sup>2</sup> مانند ضریب زبری مانینگ یا شزی ارائه می‌شود (Graf and Altinakar, 1998). از طرف دیگر در بسیاری از معادلات

مانند مقیاس زبری هیدرودینامیکی<sup>3</sup> در معادله لگاریتمی سرعت، زبری به صورت ضریبی ظاهر می‌شود که با شرایط هیدرولیکی جریان تغییر می‌کند (Graf and Altinakar, 1998). این ضریب نیز مشهور به ضریب زبری معادل می‌باشد. در این بین جهت تعیین زبری توسط ضریب زبری نیاز به خصوصیات از بستر می‌باشد که بتواند هندسه ذرات تشکیل دهنده بستر را به صورت مطلوب توصیف نماید. از این مورد تحت عنوان روش تعیین زبری نام برده می‌شود که منحنی دانه‌بندی از جمله این روش‌ها می‌باشد.

رویکرد سنتی در تعیین زبری بستر بر اساس منحنی توزیع اندازه سنگدانه‌ها استوار است. برای استخراج توزیع اندازه ذرات (منحنی دانه‌بندی) روش‌های گوناگونی وجود دارد که رایج‌ترین آن آزمایش الک می‌باشد (American Society for Testing and Materials, 2006). این در حالی است که اندازه‌گیری و بدست آوردن مشخصات ذرات بستر به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی، کار مشکل و پیچیده‌ای است و نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی می‌باشد (Sadeghi et al., 2007). برای تعیین اندازه توزیع ذرات بستر رودخانه یا آبراه‌ها، نمونه‌های مصالح جمع‌آوری شده و به آزمایشگاه منتقل می‌شوند تا آزمون دانه‌بندی بر روی آن‌ها انجام گیرد که این کار برای ذرات بسیار درشت در بستر رودخانه‌ها به دلیل مشکلات نمونه‌برداری و انتقال به آزمایشگاه عملی نمی‌باشد. ضمن آنکه انجام این بررسی بر روی کل مسیر امکان‌پذیر نیست و علاوه بر آن، در پی جریان‌های سیلابی، الگوی دانه‌بندی و توزیع اندازه ذرات بستر دستخوش تغییراتی می‌شود که نیازمند بررسی مجدد خواهد بود.

در سالیان اخیر، روش‌هایی برای تجزیه و تحلیل خودکار اطلاعات بستر آبراه‌ها با استفاده از تصاویر دیجیتالی ارائه شده‌اند. این روش‌ها را می‌توان به دو گروه مجزا تقسیم نمود. گروه اول صرفاً بر بدست آوردن یک مشخصه بعنوان پارامتر اندازه ذرات متمرکز می‌باشند. از این دسته می‌توان به تجزیه و تحلیل بافت تصاویر هوایی (Carboneau et

<sup>1</sup> Benthos Organism<sup>2</sup> Roughness Coefficient<sup>3</sup> Hydrodynamics Roughness Length Scale

گرفته است (صمدی و عزیزیان، 1394). هرچند تاکنون بررسی جامعی بر روی نتایج الگوریتم‌ها و نرم‌افزارهای مختلف که بدین منظور بکار گرفته شده‌اند انجام نشده و محققان مختلف صرفاً نتایج دانه‌بندی با الک را با منحنی حاصل از روش پردازش خود مقایسه کرده‌اند. محققینی که از نرم‌افزارهای پردازش تصویر استفاده کرده‌اند، نتایج رضایت‌بخشی را گزارش داده‌اند و همچنین اعلام کرده‌اند بدلیل عدم وجود مطالعات ژئوتکنیکی و مکانیک خاک در مطالعات مهندسی رودخانه، استفاده از این نرم‌افزارها روشی مناسب برای استخراج منحنی دانه‌بندی و سایر مشخصات ذرات بستر (به‌عنوان مثال  $d_{50}$ ،  $d_{84}$  یا  $d_{90}$ ) می‌باشد (عزیزیان و همکاران، 1391؛ صادقی و قره‌محمودلی، 1392). در یک دهه گذشته مطالعات بسیاری با استفاده از نرم‌افزارهای پردازش تصویر صورت گرفته است، به طور مثال عبد شریف اصفهانی و همکاران از روش عکسبرداری شبکه‌ای در بستر رودخانه کرج جهت تعیین دانه‌بندی لایه محافظ بستر درشت‌دانه استفاده کرده‌اند (عبدشریف اصفهانی و همکاران، 1384). صادقی و قره‌محمودلی (1392) دقت دانه‌بندی رسوبات بستر ریز و درشت‌دانه ساحل بازسازی شده دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس در شهرستان نور را با استفاده از دوربین‌هایی با قدرت تفکیک متفاوت تحلیل کرده‌اند. (Beggan and Hamilton (2010) نیز به معرفی و توسعه نرم‌افزار پردازش تصویر GIAS به‌منظور تجزیه و تحلیل توزیع فراوانی اندازه، هندسه، جهت‌گیری و توزیع مکانی ذرات پرداختند. (Chang and Chung (2012) برآورد توزیع اندازه ذرات بستر در رودخانه جینگ-می را بر مبنای استفاده از یک روش پردازش تصویر موسوم به I-FM مورد بررسی قرار دادند و نتایج آن را با نتایج روش دستی الک و روش‌های قدیمی‌تر پردازش تصویر مقایسه کردند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که روش I-FM نتایج بسیار رضایت‌بخش‌تری را نسبت به سایر روش‌ها در تخمین مقدار ذرات و نیز اندازه‌های مختلف ذرات در منحنی دانه‌بندی نشان می‌دهد. (Chung and Chang (2013) روشی اصلاح‌شده را جهت اندازه‌گیری ذرات به‌صورت خودکار به‌کمک یک شبکه فازی عصبی و

(al., 2004)، تجزیه و تحلیل بافت اسکن‌های لیزری زمینی (Heritage and Milan 2009) و تجزیه و تحلیل فرکانس تصاویر دیجیتالی میکرو (Buscombe et al., 2010) اشاره نمود. اما گروه دوم از تکنیک‌های پردازش تصویر برای تشخیص و اندازه‌گیری سطح ذرات و ویژگی‌های آن از طریق تصاویر دیجیتال اخذ شده از بالا استفاده می‌کند. این دسته روش‌ها برای تعیین دانه‌بندی ذرات سطحی بستر آبراهه‌های شنی کاربرد دارد. از این گروه می‌توان روش آستانه ساده خاکستری (Weichert et al., 2004)، رویکرد ترکیبی با آستانه خاکستری و فیلتر کلاه پایین<sup>1</sup> همراه با الگوریتم واترشد<sup>2</sup> (Graham et al., 2005a) و روشی مشابه نگرش گراهام (Strom et al., 2010) را نام برد. گراهام و همکاران (Graham et al., 2005b) نشان دادند که محور کوچک یک بیضی منطبق با سطح ذره است، یعنی محور کوچک ظاهری، نماینده مناسبی برای قطر مشخصه ذره که با الک اندازه‌گیری شده می‌باشد.

با توسعه علم پردازش تصویر، الگوریتم‌های مختلفی در نرم‌افزارهایی چون GIAS و ImageJ ارائه شدند که شناسایی، اندازه‌گیری، تحلیل و تعیین توزیع مکانی ذرات را تسهیل می‌کنند (عزیزیان و همکاران، 1391؛ صادقی و قره‌محمودلی، 1392). استفاده از این نرم‌افزارها نیازمند تصویربرداری در محل مورد مطالعه است و نرم‌افزار اطلاعات مورد نیاز خود را از طریق تصاویر دیجیتالی بستر رودخانه یا فلوم آزمایشگاهی استخراج می‌کند (Strom et al., 2010). مقایسه نتایج حاصل از روش‌های تصویربرداری با منحنی دانه‌بندی حاصل از الک نشان می‌دهد که روش‌های نوین به‌دلیل داشتن مزایایی از جمله کاهش در هزینه و زمان، عدم نیاز به انتقال رسوبات، تعمیم اطلاعات نمونه‌ها به مناطق بزرگ‌تر جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی هستند (Penders, 2010). این روش‌ها در برخی کشورها که به دلیل عدم وجود تجهیزات پیشرفته، نتایج حاصل از آزمایشگاه مکانیک خاک با خطا مواجه می‌شوند و یا با مشکلات و هزینه‌های جمع‌آوری و انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه مواجه هستند، مورد استقبال قرار

<sup>1</sup> Bottom-hot filtering

<sup>2</sup> Watershed Algorithm

به منظور برآورد توزیع اندازه ذرات در تصاویر دیجیتالی گرفته شده از رسوبات (16 تا 512 میلی‌متر) بستر رودخانه لن‌ینگ، تحت عنوان R-AGS معرفی کردند و ادعا کردند که روش پیشنهادی آن‌ها می‌تواند جایگزین روش‌های قدیمی‌تر در این زمینه گردد. حسن‌نژاد شریفی و همکاران (1395a) عملکرد روش پردازش تصویر در تخمین ضریب زبری مانینگ در لایه سطحی بستر رودخانه‌ها را در بازه‌ای 7/5 کیلومتری از رودخانه شلمان رود گیلان با استفاده از نرم‌افزار FHWA Hydraulic Toolbox و با دو دوربین مختلف بررسی کردند. ایشان گزارش کردند که دوربین با وضوح تصویر بیشتر در برآورد قطرهای مختلف مورد نیاز برای روش‌های تخمین زبری دارای دقت بهتری است. همچنین با اجرای مدل هیدرولیکی Hec-Ras، نشان دادند که استفاده از رابطه تجربی Bray-D90 به منظور برآورد دقیق‌تر ضرایب زبری مانینگ ذرات رسوبی سطحی در بستر رودخانه شلمان رود مناسب‌تر است. علاوه بر این، در مطالعه دیگری به منظور سنجش حساسیت روش پردازش تصویر به اندازه سطح رسوبی مورد پردازش و با کمک نرم‌افزار FHWA Hydraulic Toolbox، تحلیل‌های آماری صورت گرفته بین منحنی‌های حاصل از دو روش (آزمایشگاهی و نرم‌افزاری) نشان داد که نتایج حاصله در حالتی که سطح مورد پردازش در تصاویر ورودی به نرم‌افزار، کوچکتر انتخاب می‌گردد و ذرات به مرکز تصویر نزدیک‌ترند، از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد (حسن‌نژاد شریفی و همکاران، 1395b).

نظر به اهمیت اطلاعات دانه‌بندی مصالح بستر در انجام مطالعات در محیط‌های رودخانه‌ای، تحقیقات قبلی عمدتاً بر استفاده از روش‌های مختلف پردازش تصاویر به منظور دست‌یابی به منحنی دانه‌بندی و نحوه توزیع اندازه ذرات تمرکز نموده‌اند. هدف از انجام این پژوهش‌ها، اغلب معرفی روش پردازش تصویر به‌عنوان یک روش جایگزین به‌جای شیوه‌های سنتی برآورد اندازه ذرات (مانند دانه‌بندی با الک، روش‌های نمونه‌برداری با شمارش ذرات و غیره) به منظور صرفه‌جویی در نیروی کار، زمان و هزینه می‌باشد. با توجه به پیشرفت علم پردازش تصویر در طی سالیان گذشته همراه با توسعه الگوریتم‌ها و نرم‌افزارهای مختلف

برای کاربرد در مطالعات مهندسی رودخانه، محققان مختلف صرفاً به تهیه منحنی دانه‌بندی و توزیع اندازه ذرات با کمک روش‌های مختلف اقدام کرده و کاربرد آنرا به شدت توصیه نموده‌اند، اما هیچکدام به مقایسه دو به دو و دانه به دانه ذرات موجود در تصاویر و نمونه‌های آزمایشگاهی به منظور صحت‌سنجی روش‌ها روی نیاورده‌اند. در مطالعات انجام شده قبلی هیچ‌کدام به دقت نرم‌افزارها از نظر شمارش تعداد سنگ‌دانه‌ها یا مقایسه تطبیقی اندازه ذرات حاصل از دو روش پردازش تصویر و دانه‌بندی با الک بصورت مقایسه تطبیقی نمونه‌ها اشاره‌ای نشده است و بعضاً محققان مختلف نتایج پردازش بدست آمده از نرم‌افزارها را بدون ارزیابی مقایسه‌ای با ذرات واقعی موجود در نمونه‌ها با دقت قابل قبولی توصیف و مورد پذیرش قرار داده‌اند که این خطا باعث ابعاد نمونه‌ها (تعداد ذرات) تا حدود زیادی ملموس نیست. اما نتایج بررسی پژوهش پیش‌رو حاکی از آن است که در صورت کاهش ابعاد تصویر یا تعداد سنگ‌دانه‌های داخل نمونه، دقت روش به شدت کاهش یافته و در نرم‌افزارهای مختلف نتایج متفاوتی حاصل می‌شود که به عوامل متعددی بستگی دارند و این مقاله نسبت به معرفی این خطاها و تفاوت عملکرد نرم‌افزارهای مختلف اقدام نموده است. در این مطالعه به مقایسه عملکرد چند نمونه از نرم‌افزارهای پردازش تصویر (ImageJ، FHWA Hydraulic Toolbox و BaseGrain) با نتایج آزمون الک در شرایط مختلف چینش سنگ‌دانه‌ها پرداخته شده است و در نهایت نتایج حاصل از آنها با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

## 2- مواد و روش‌ها

در این تحقیق ضمن انتخاب بازه‌ای از رودخانه کردان و اخذ تصاویر دیجیتالی از بستر رودخانه نسبت به کاربرد الگوریتم‌های پردازش تصویری موجود در سه نرم‌افزار ImageJ، FHWA Hydraulic Toolbox و BaseGrain برای تجزیه و تحلیل تصاویر و استخراج منحنی دانه‌بندی ذرات بستر رودخانه اقدام شده است.

### 2-1- منطقه مورد مطالعه

رودخانه کردان از دو بخش کوهستانی و دشتی تشکیل

پلاتفرم جاوا ساخته شده است و برای کاربردهای تشخیصی در فیزیک پزشکی ساخته شده و در علوم مختلف نیز کاربرد فراوان دارد (Rasband, 2012). این نرم‌افزار به کمک افزونه‌هایی که برایش ساخته شده در بسیاری از مسائل پردازش و تحلیل تصاویر به کار می‌رود، از جمله در تصویربرداری سه‌بعدی از سلول‌های زنده، پردازش تصویر در پرتوشناسی پزشکی، پردازش خودکار تصاویر در خون‌شناسی و پردازش تصویر سنگ‌دانه‌ها.

ساختار گسترش‌پذیر ImageJ و امکاناتی که برای افزودن ویژگی‌های تازه در اختیار کاربران می‌گذارد، این برنامه را به گزینه محبوبی برای آموزش پردازش تصویر تبدیل کرده است. این نرم‌افزار نیز با استفاده از الگوریتم‌هایی که در آن تعبیه شده و با دریافت تصویر دیجیتالی از بستر آبراهه، مشخصاتی همچون تعداد سنگ‌دانه‌های تشکیل‌دهنده، محیط هر سنگ‌دانه، مساحت هر سنگ‌دانه، قطر و... را به کاربر می‌دهد که می‌توان آن را در صفحات گسترده اکسل ذخیره نمود (Ferreira and Rasband, 2012).

**ج - BaseGrain:** نرم‌افزار رایگان BG برای تشخیص رسوبات و تجزیه و تحلیل هندسه ذرات است و بر پایه متلب استوار است و همچون نرم‌افزارهای فوق با دریافت تصویر دیجیتالی از بستر و با استفاده از برنامه‌های خود قادر به استخراج منحنی دانه‌بندی می‌باشد و اطلاعات حاصل از آن به صورت فایل اکسل و متلب ذخیره می‌شود. فرآیند جداسازی ذرات متشکل از 5 مرحله است. در 3 مرحله اول، شکاف‌ها توسط روش‌های مختلفی شناسایی می‌شوند. در مرحله 4 الگوریتم حوضه اعمال می‌شود و به جداسازی مناطق از یکدیگر پرداخته می‌شود. در مرحله آخر مشخصات هر منطقه از ذرات در نمایی از بالا به دست می‌آید (Stähly et al., 2017).

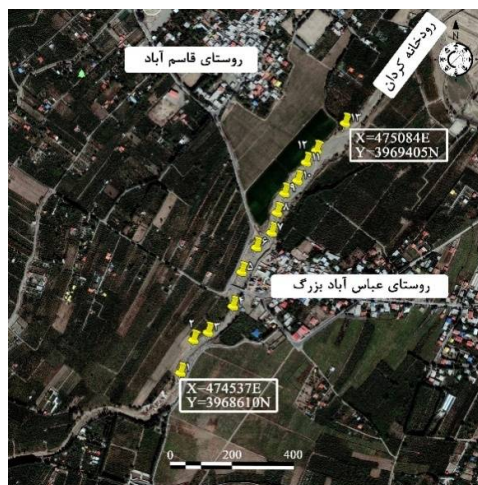
Detert and Weitbrecht (2013) با الهام از دستگاه گراولومتر دیجیتال، روشی برای تشخیص بهینه اشیاء در قالب این نرم‌افزار توسعه دادند که مراحل کار آن عبارت است از: (1) در مرحله پیش پردازش، فیلترهای تصویر خام برای حفظ اطلاعات دقیق در مورد تقاطع‌های احتمالی حذف می‌شوند؛ (2) تشخیص مرزها با کاربرد فیلترهای تشخیص لبه گسترش یافته انجام می‌شود؛

شده که بخش دشتی آن از جمله خشکه‌رودهای کشورمان می‌باشد که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. این رودخانه یکی از شاخه‌های مهم رودخانه شور می‌باشد که در منطقه کرج جریان داشته و حوضه آبریز آن در شمال شرقی حوضه رودخانه شور واقع است. در این مطالعه تصویربرداری از بازه‌ای یک کیلومتری حداثی موقعت جغرافیایی (474537 m E, 3968610 m N) و (475084 m E, 3969405 m N) از محدوده رودخانه کردان واقع در غرب استان البرز (پایین دست خط آهن سراسری تهران - تبریز) صورت گرفته است که دانه‌بندی ذرات با دو روش الک و پردازش تصویر استخراج شده‌اند (شکل 1).

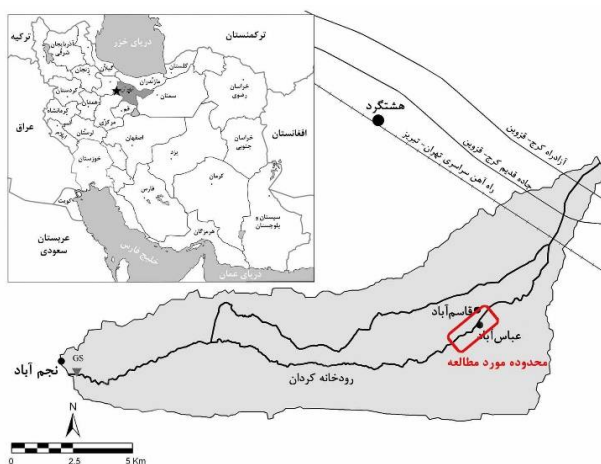
## 2-2- معرفی نرم‌افزارها (الگوریتم‌های) پردازش تصویر

**الف - FHWA Hydraulic Toolbox:** مجموعه‌ای مستقل از ابزارهای محاسباتی است که نسخه 4.20 آن در سال 2014 توسط شرکت Aquaveo به سفارش اداره بزرگراه‌های فدرال وزارت راه و ترابری آمریکا توسعه یافته است. با کمک این برنامه، کاربر قادر به اجرا و ذخیره محاسبات هیدرولیکی در قالب یک فایل پروژه، تحلیل سناریوهای چندگانه و ایجاد نمودارها و گزارش‌های مربوط به این تجزیه و تحلیل‌ها می‌باشد. 12 ابزار محاسباتی در این نرم‌افزار برای انجام پروژه‌های مرتبط با طراحی و تحلیل کانال، سرریز، آبرو، ریپرپ و ... در دسترس هستند. در این نرم‌افزار، الگوریتمی برای تعیین دانه‌بندی موردنیاز در طراحی ریپرپ توسعه داده شده است که با استفاده از الگوریتم‌ها و برنامه‌های خود و با دریافت تصویر دیجیتالی از بستر رودخانه‌ها قادر به تهیه سریع منحنی دانه‌بندی و هم‌چنین قطرهای  $d_5$ ،  $d_{15}$ ،  $d_{50}$ ، ...،  $d_{100}$  ذرات تشکیل دهنده بستر می‌باشد (Aquaveo, Adams, 2013; Bergendahl and Arneson, 2014). اطلاعات حاصل را می‌توان در صفحات گسترده اکسل ذخیره و بهره‌برداری نمود.

**ب - ImageJ:** نرم‌افزاری قدرتمند برای آنالیز تصویر می‌باشد که در مؤسسه ملی بهداشت آمریکا و بر روی



(ب)



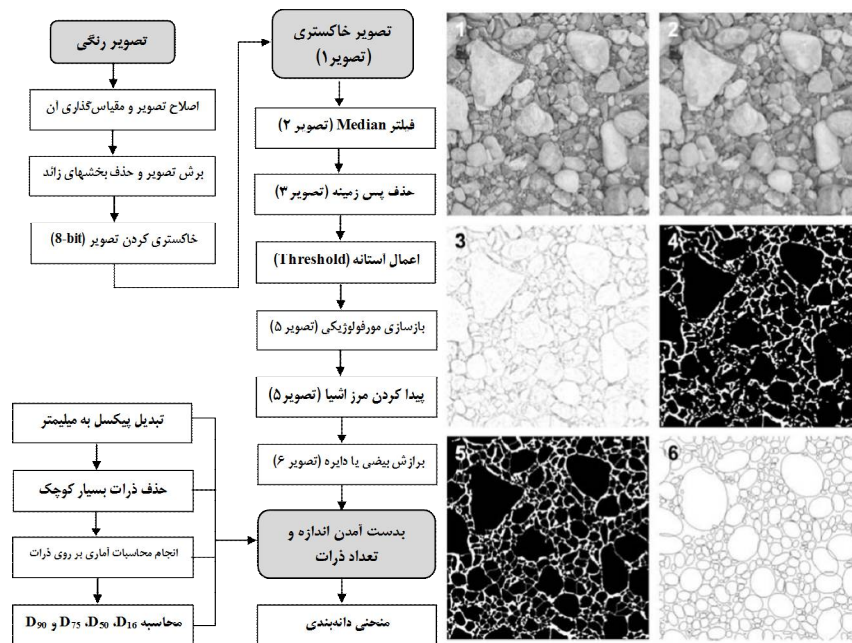
(الف)

شکل 1 (الف) نمایی از موقعیت حوضه آبریز رودخانه کردان، (ب) موقعیت مورد بررسی و محل‌های برداشت در تصویر ماهواره‌ای

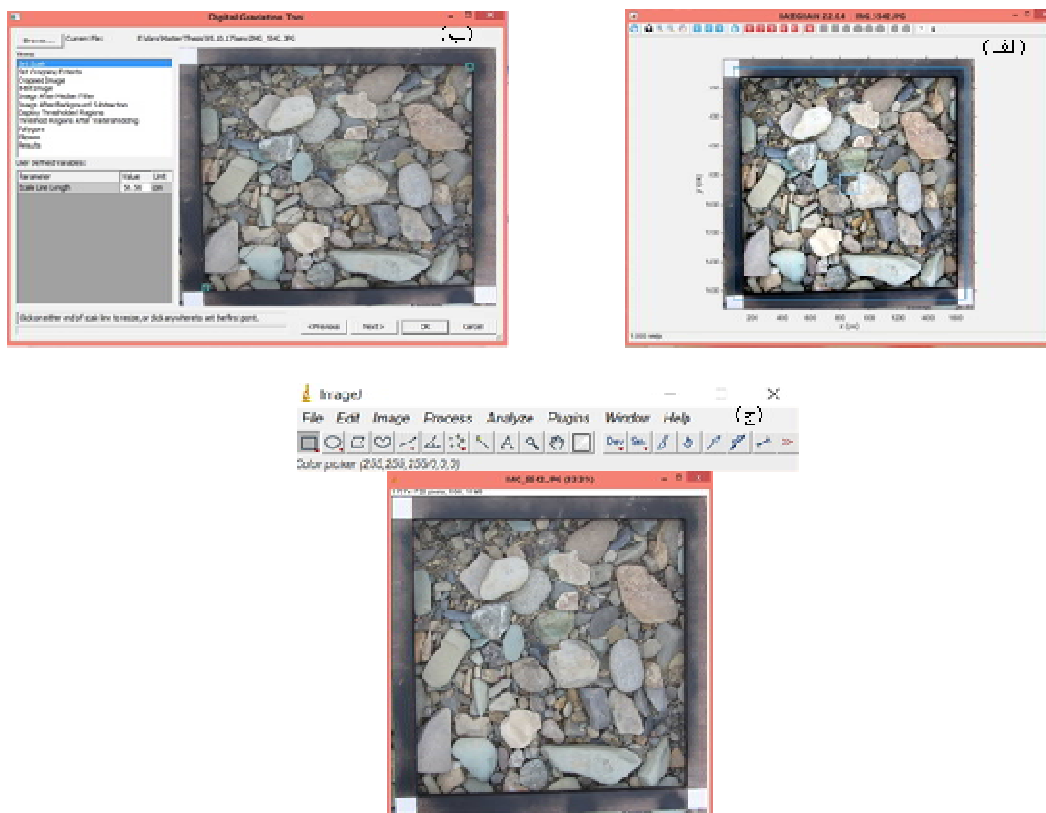
نتایج منحنی دانه‌بندی حاصل از نرم افزارهای Hydraulic Toolbox و BG پرداختند. ایشان مشاهده نمودند که اگرچه منحنی دانه‌بندی حاصل از روش Hydraulic Toolbox به منحنی دانه‌بندی الک نزدیک است، اما از نظر تعداد سنگدانه‌ها خطای زیادی در شمارش آنها وجود دارد. در مقابل روش BG نتایج نزدیکتری از نظر تعداد سنگدانه‌های شمارش شده ارائه می‌کند اما دقت منحنی دانه‌بندی آن بسیار کم بوده و خطای اندازه ذرات آن با اندازه واقعی زیاد است. با این وجود در این مطالعه خطاها و دقت‌ها کمی نشده‌اند و درباره علت این تفاوت بحثی انجام نشده است.

مراحل کلی پردازش برای استخراج اطلاعات مربوط به دانه‌بندی در نرم‌افزارهای مزبور در شکل 2 نمایش داده شده است. جزئیات مراحل مختلف کار با نرم‌افزار BG نیز توسط (Detert and Weitbrecht (2012) تشریح شده است. این نرم‌افزار یک نرم‌افزار شناسایی خودکار ذرات برپایه متلب می‌باشد که برای تجزیه و تحلیل دانه‌بندی تصاویر اخذ شده از بالای بسترهای شنی غیرچسبنده رودخانه‌ها به منظور مدل‌سازی عددی هیدرولیک جریان‌های یک بعدی و دوبعدی همراه با انتقال رسوب کاربرد دارد. تصاویر پنجره‌های نرم‌افزارهای مورد بررسی در شکل 3 نشان داده شده است.

(3) الگوریتم واترشد به طور قابل توجهی برای اجتناب از تقسیم‌بندی بیش از حد بهبود یافته است؛ (4) عناصر دانه‌ای منفرد می‌توانند در یک فرایند پس پردازش توسط یک رابط کاربری گرافیکی انجام شود؛ (5) نگرش Fehr (1987) برای برآورد و بستن لایه زیرسطحی پیاده‌سازی شده است تا سطح فوقانی ذرات بدست آید؛ و (6) اگر عکس‌های جغرافیایی برچسب خورده مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد، فرایند ژئورفرنس به طور خودکار انجام می‌شود. الگوریتم بکار رفته در مدل‌های Hydraulic و ImageJ Toolbox براساس الگوریتم کلی تعیین خودکار اندازه ذرات AGS که توسط (Graham et al. (2005b و et al. (2010 توسعه یافته می‌باشد. با این تفاوت که مدل اولی در محیط جاواست ولی مدل دومی به زبان C++ با استفاده از کتابخانه متن باز OpenCV توسعه یافته است. دیگر تفاوت این دو مدل در قابلیت‌های بیشتر و تنظیم‌های تخصصی مدل ImageJ نسبت به مدل دیگر است که کار کردن با آنرا سخت‌تر و تخصصی‌تر نموده است. برخلاف نرم‌افزار ImageJ که بیشتر برای کارهای پزشکی توسعه یافته، نرم‌افزار Hydraulic Toolbox بطور تخصصی برای تعیین دانه‌بندی ذرات بستر آبراهه‌ها در مطالعات هیدرولیکی توسعه یافته است. در یک مطالعه مقدماتی زارعی و همکاران (1396) به بررسی و قیاس



شکل 2 مراحل پردازش تصویر در نرم افزارهای: ImageJ و FHWA Hydraulic Toolbox



شکل 3 نمایش تصویر پنجره مدل های: (الف) BG، (ب) FHWA Hydraulic Toolbox، (ج) ImageJ



### 3-2- روش تحقیق

هیدرولیکی که نیازمند تعیین توزیع اندازه ذرات می‌باشند، استفاده می‌گردند.

روش اصلی تحقیق حاضر بر پایه عکس‌برداری از بستر رودخانه مورد مطالعه، پردازش تصاویر میدانی، جمع‌آوری و انتقال ذرات سطحی به آزمایشگاه و تصویربرداری مجدد از آنها، شمارش ذرات و انجام آزمایش الک استوار است. به منظور عکس‌برداری از سنگ‌دانه‌ها در منطقه مذکور، از یک دوربین عکاسی دیجیتال مدل Canon دارای قدرت تفکیک‌پذیری 16 مگاپیکسل، استفاده شده است. در طی عکس‌برداری‌های میدانی، دوربین با استفاده از یک بازوی فلزی افقی بر روی سه‌پایه‌ای مستحکم در برابر جریان باد قرار می‌گرفت که این تجهیزات در شکل 4 نمایش داده شده است. سپس توسط یک تراز یاب لوله‌ای صفحه‌ای، این دوربین تراز گردیده و در نهایت از ذرات موجود در قاب  $40 \times 40$  سانتی‌متری عکس‌برداری شده و موقعیت نقاط نیز توسط دستگاه موقعیت‌یاب GPS، ثبت شده است. طول مورد بررسی و نمونه‌برداری در رودخانه کردان یک کیلومتر بوده که در این بازه از 13 نقطه مشخص شده در شکل 1 عکس‌برداری و نمونه‌برداری ذرات سطحی بستر انجام گرفته است. لازم به ذکر است که توزیع اندازه ذرات بستر در این محدوده تقریباً یکسان بوده است.



شکل 4 تجهیزات مورد استفاده برای عکس‌برداری



شکل 5 نمونه‌های رنگ‌پاشی شده داخل قاب برای انتقال به آزمایشگاه

در هر نقطه پس از اتمام عکس‌برداری، ذرات موجود در سطح بستر با استفاده از اسپری رنگ‌پاشی شده‌اند (شکل 5) و به صورت جداگانه جمع‌آوری، بسته‌بندی و به آزمایشگاه مکانیک خاک برای انجام آزمون دانه‌بندی با الک منتقل شده‌اند. در آزمایشگاه از الک‌های دارای ابعاد چشمه  $50/8$  میلی‌متر (2 اینچ)،  $38/1$  میلی‌متر ( $1/5$  اینچ)،  $6/35$  میلی‌متر ( $1/4$  اینچ) استفاده گردید و منحنی دانه‌بندی برای هر 13 نقطه محاسبه شد.

همان‌طور که اشاره شد برای پردازش تصویر از سه نرم‌افزار استفاده شد که منحنی دانه‌بندی از نرم‌افزارهای BG و FHWA Hydraulic Toolbox بصورت مستقیم استخراج می‌شود. به عبارت دیگر توسعه دهندگان این دو مدل بصورت ویژه برای تحقیقات رودخانه‌های با بستر سنگدانه‌ای به‌گونه‌ای الگوریتم‌های بهینه پردازش تصویر را در این نرم‌افزارها بکار برده‌اند که بدون نیاز به تنظیم خاصی، توانایی تهیه منحنی‌های دانه‌بندی بسترهای آبراه‌ها را از روی تصاویر موجود دارد و در سایر محاسبات

اگرچه امکان انجام تنظیم دستی برخی فیلترها و فرایندهای پردازش وجود دارد، اما کاربرد نرم‌افزار ImageJ که برای تحقیقات تصویری در زمینه‌های مختلف توسعه یافته، به این سادگی نیست و علاوه بر نیاز آن به انجام تنظیم‌ها و کاربرد فیلترهای مختلف توسط کاربر، باید اطلاعات حاصل از پردازش ذرات داخل تصویر را به نرم‌افزار اکسل انتقال داده و با در نظر گرفتن قطر حاصل از مساحت مستخرج شده توسط نرم‌افزار و دسته‌بندی آن و



نمونه‌ها در این قسمت، حساسیت روش‌های پردازش تصویری به میزان نور، بازتاب نور و کیفیت تصویر دوربین می‌باشد و سعی شده است که بحث و مقایسه بر روی بهترین تصاویر و نمونه‌های انتخابی از بازه مورد بررسی صورت گیرد که الگوریتم‌های پردازش تصویر موجود در نرم‌افزارهای مورد اشاره در پردازش تصاویر با کمترین خطا روبرو بوده‌اند.

خطوط قرمز در بخش‌های (ج) و (د) شکل 6، در واقع بیضی برازش داده شده برای هر سنگ‌دانه در نرم‌افزار Hydraulic Toolbox می‌باشد که در شکل (د) خطوط فقط در برخی نقاط قابل مشاهده است. خطوط متقاطع آبی مشاهده شده در قسمت (ه) و (و) قطرهای کوچک و بزرگ بیضی برازش داده شده را با نرم‌افزار BG نشان می‌دهد که در شکل (ه) مشخص است که به اشتباه پس-زمینه را پردازش و منظور نموده است.

اگرچه تحقیقات قبلی (مانند، عزیزیان و همکاران در سال 1391؛ صادقی و قره محمودلی در سال 1392؛ حسن نژاد شریفی و همکاران در سال 1395) به دقت خوب روش پردازش تصویر در مقایسه با روش آزمون الگ اشاره کرده‌اند، اما در ابتدای این تحقیق که تمرکز بر روی تصاویر کوچک و محدود برای شناسایی ذرات تشکیل دهنده کلاسترهای بستر آبراه‌های شنی بود، در حین بررسی مشاهده شد که نرم‌افزار در آنالیز تصاویر دچار خطا می‌گردد. به عبارتی مشاهده شد که نرم‌افزارهای پردازش تصویر، به دلیل وجود سایه، تمرکز نور، وجود رنگی متفاوت از بافت اصلی سنگ و یا لکه‌ای بر روی آن‌ها، نتایج درستی ارائه نمی‌دهند و چون تعداد سنگدانه‌های تشکیل دهنده کلاسترها نسبت به کل قاب تصویر محدود است، نتایج خروجی معنی‌دار بوده و دارای خطایی فاحش می‌باشد. بدین صورت که نرم‌افزارها سایه موجود را بخشی از پس‌زمینه یا بستر به حساب می‌آورند و هنگام شمارش و آنالیز برای منحنی دانه‌بندی، سنگ‌دانه را در نظر نمی‌گیرند. همچنین در صورت توزیع نامناسب نور در تصویر، نرم‌افزارها دچار خطا در تشخیص ذرات از پس‌زمینه می‌شوند. نتایج حاصل از پردازش تصویر با هر چهار روش و برای دو حالت تصاویر صحرایی و آزمایشگاهی در 5 نقطه منتخب در شکل

شمارش تعداد فراوانی در هر دسته، منحنی دانه‌بندی را رسم کرد. علاوه بر این نظر به اهمیت بازتاب نور، وجود سایه در تصاویر، رنگ پس‌زمینه، وضوح تصویر و ... برای تعیین میزان حساسیت نرم‌افزارها به میدان تصویر و پس‌زمینه‌های موجود، ذرات جمع‌آوری شده در آزمایشگاه بر روی دو سطح مختلف (سفید و سیاه) با فاصله از یکدیگر چیده شده و مجدداً تصاویری از آنها اخذ شده است تا بتوان نقش رنگ پس‌زمینه را نیز در دقت نرم‌افزار برای تعیین منحنی دانه‌بندی و تفکیک ذرات براساس نور را از رنگ پس‌زمینه ارزیابی نمود.

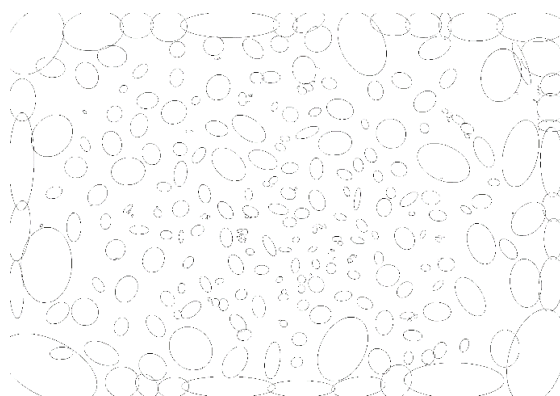
### 3- نتایج و بحث

در این تحقیق از هر دو رنگ پس‌زمینه (پس‌زمینه سفید و سیاه) برای هر سه نرم‌افزار استفاده شد و در نهایت با بررسی نتایج و مقایسه قطر متوسط و تعداد ذرات حاصل از نرم‌افزارها با تعداد واقعی ذرات و قطر متوسط حاصل از آزمایش الگ مشخص شد که برای استفاده از نرم‌افزارهای ImageJ و Hydraulic Toolbox بهتر است از پس‌زمینه سفید رنگ استفاده شود. زیرا در مسیر پردازش تصویر، این نرم‌افزارها سنگ‌ها را به رنگ مشکی درآورده و از آنجا که باید رنگ پس‌زمینه و سنگ‌ها متفاوت باشد، لذا استفاده از رنگ سفید نتیجه بهتری می‌دهد. اما مسیر پردازش در نرم‌افزار BG به گونه‌ایست که نقاط روشن را به‌عنوان ذرات سنگ در نظر می‌گیرد، لذا بهتر است در این نرم‌افزار از رنگ سیاه استفاده شود. خلاصه‌ای از مشاهدات بعمل آمده در آزمایشگاه در شکل 6 نمایش داده شده است.

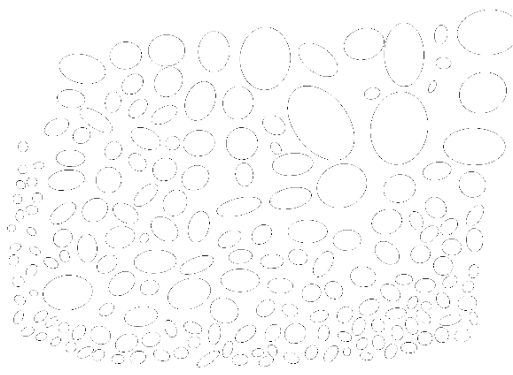
همان‌طور که بیان گردید، تعداد 13 عکس به صورت میدانی تهیه شد و سنگ‌های داخل نمونه‌ها برای انجام آزمایش دانه‌بندی و فرایند پردازش تصویر به صورت چیدمان جداگانه سنگ‌دانه‌ها بر روی پس‌زمینه مشکی و سفید (سته به نوع نرم‌افزار) به آزمایشگاه منتقل شده‌اند. منحنی‌های دانه‌بندی استخراج شده مربوط به عکس‌های میدانی و آزمایشگاهی توسط نرم‌افزارهای Hydraulic Toolbox، ImageJ و BG و آزمایش الگ با یکدیگر مقایسه شده‌اند که در ادامه نتایج مربوط به 5 نمونه از 13 نمونه مذکور قابل مشاهده می‌باشد. علت حذف نتایج برخی از

استفاده از پردازش تصاویر عکس‌های میدانی (صحرائی)، نتایج نزدیک‌تری نسبت به سایر روش‌ها به منحنی مستخرج از نتایج آزمایشگاهی با الگ ارائه می‌دهد.

7 ارائه شده است. مطابق شکل 7 می‌توان اذعان داشت منحنی دانه‌بندی بدست آمده از نرم‌افزار Hydraulic Toolbox، به‌ویژه با



(ب)



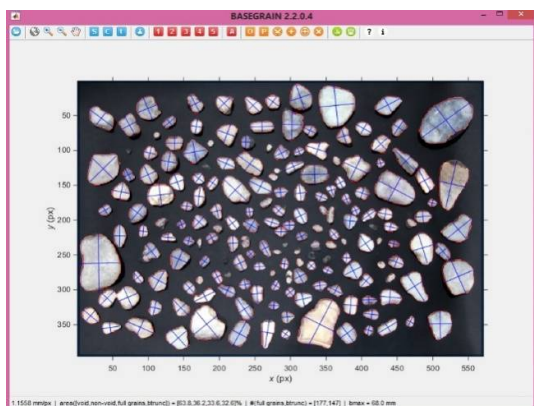
(الف)



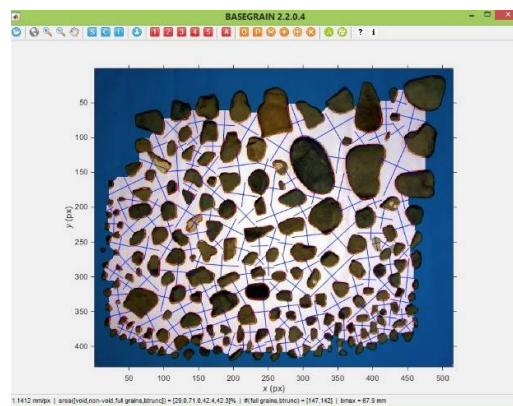
(د)



(ج)

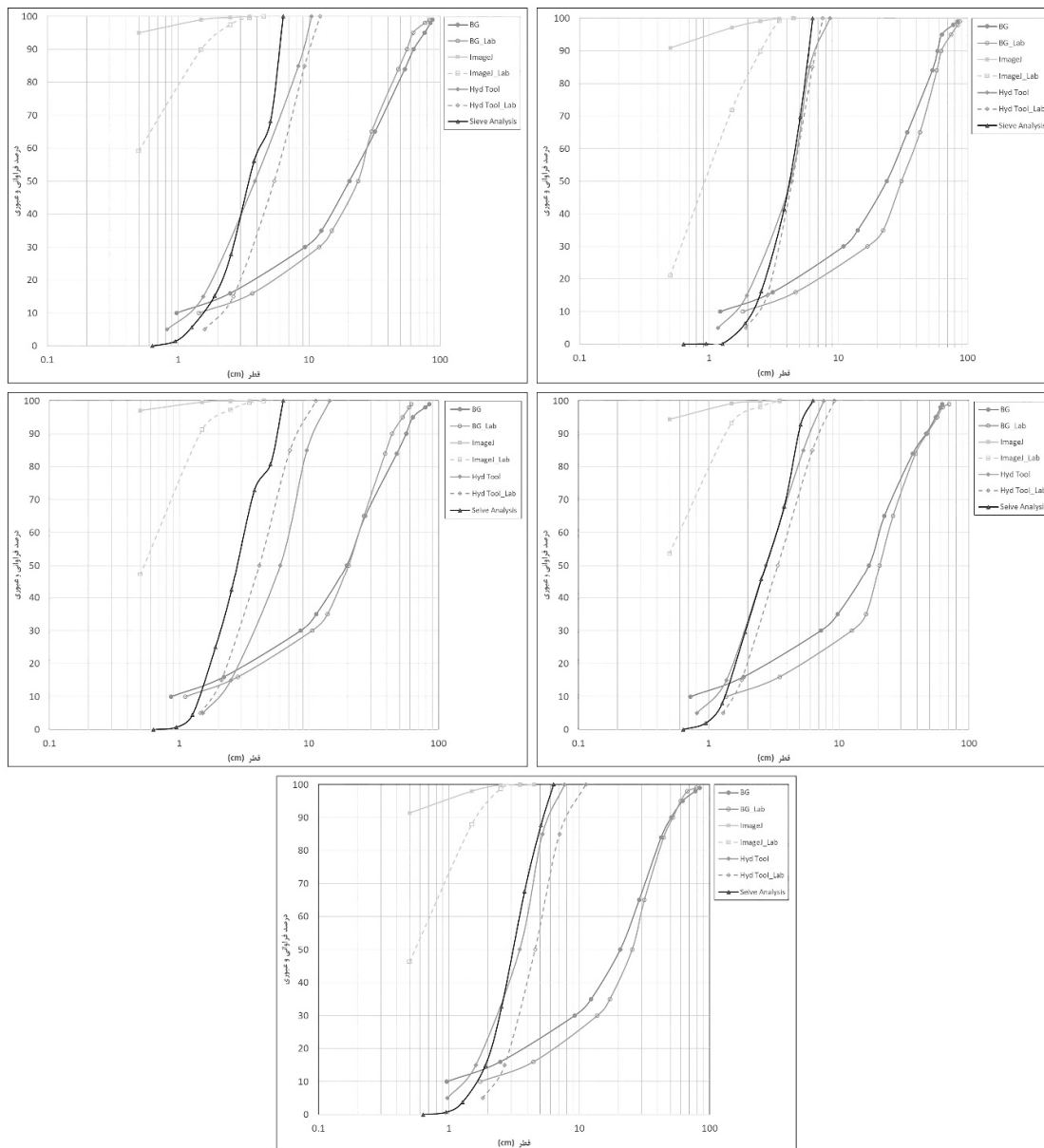


(و)



(ه)

شکل 6 (الف) ImageJ با پس‌زمینه سفید، (ب) ImageJ با پس‌زمینه مشکی، (ج) Hydraulic Toolbox با پس‌زمینه سفید، (د) Hydraulic Toolbox با پس‌زمینه مشکی، (ه) BG با پس‌زمینه سفید، (و) BG با پس‌زمینه مشکی



شکل 7 منحنی‌های دانه‌بندی بدست آمده از هر 4 روش برای 5 نمونه منتخب

از سوی دیگر، علت اختلاف بیشتر نتایج پردازش تصاویر آزمایشگاهی نسبت به صحرایی با نتایج آزمون الک بدین خاطر است که در روش الک کوچکترین قطر عبوری ذرات در شرایط بهم خورده مدنظر قرار می‌گیرد حال آنکه در آزمایشگاه ذرات بر روی دو قطر بزرگتر خود مستقر شده و قطعاً پردازش تصویر ذرات چیده شده در آزمایشگاه، قطر بزرگتری نسبت به آزمون الک بدست خواهد داد.

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که اختلاف مشاهده شده در نمودارها به دلیل اختلاف موجود در شمارش تعداد سنگدانه‌ها توسط روش‌های متفاوت می‌باشد که تاکنون محققان مختلف در هنگام استفاده از این نرم‌افزارها به این مسأله توجهی نکرده و صرفاً برپایه شکل منحنی دانه‌بندی یا قطرهای مشخص آن نسبت به خطای نرم‌افزارها در قیاس با آزمون الک اظهار نظر کرده‌اند.

ارائه شده است. در تمامی قطرها، قطر حاصل از روش Hydraulic Toolbox در تصاویر میدانی (صحرائی) به قطر به دست آمده از آزمایش الگ بسیار نزدیک است. به عبارت ساده‌تر به نظر می‌رسد متخصصان سازمان زمین شناسی آمریکا براساس آزمون‌های متعدد و تجربیات مختلف، الگوریتم‌های پردازش تصویر را به نحوی بهینه کرده‌اند که نزدیک‌ترین برآورد اندازه توزیع ذرات را به منحنی دانه‌بندی وزنی حاصل از آزمایش الگ ارائه می‌نماید.

علاوه بر این، قطرهای مختلف شاخص منحنی دانه‌بندی نمونه‌ها ( $D_{25}$ ,  $D_{40}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{85}$ ) با استفاده از آزمایش الگ و پردازش تصاویر میدانی و آزمایشگاهی (سنگ‌های چیده شده جدا از هم) با یکدیگر مقایسه شده‌اند که در جدول 1 قابل مشاهده است. همان‌طور که در نتایج مشخص می‌باشد، به غیر از نمونه 4، در باقی نمونه‌ها خطای الگوریتم بکار رفته در نرم‌افزار Hydraulic Toolbox بسیار کم بوده است. برای مقایسه بهتر، میزان خطای متوسط روش‌های مختلف در تعیین قطرهای مختلف در جدول 2

جدول 1 قطرهای شاخص حاصل از 4 روش مختلف (برحسب سانتی‌متر)\*

نمونه	قطر	BG		ImageJ		Hyd Tool		آزمون الگ
1	D25	8/2	17/35	0/5	5/5	2/6	3/2	3
	D40	12/5	25/2	0/5	7/5	3/7	4	3/8
	D50	23/7	30/9	0/5	0/9	4/2	4/4	4/2
	D85	53/4	58/0	0/5	2/2	6	6/3	5/9
2	D25	6/9	9/0	0/5	0/5	2	3/2	2/5
	D40	15/1	17/9	0/5	0/5	3	4/7	3
	D50	20/3	23/7	0/5	0/5	3/85	5/4	3/6
	D85	53/8	48/1	0/5	1/3	8/2	9/3	5/9
3	D25	5/3	9/3	0/5	0/5	1/8	2/1	1/8
	D40	12/2	17/7	0/5	0/5	2/3	2/9	2/3
	D50	17/0	20/6	0/5	0/5	2/7	1/3	2/7
	D85	37/1	38/8	0/5	1/2	5/3	6/3	4/18
4	D25	6/4	7/9	0/5	0/5	3/3	4/4	2/9
	D40	14/2	16/1	0/5	0/5	5	5	2/5
	D50	19/6	20/3	0/5	4/2	6	4/1	2/8
	D85	47/8	38/8	0/5	1/4	9/6	7/1	5/4
5	D25	6/8	10/4	0/5	0/5	2/1	3/1	2/3
	D40	15/1	19/9	0/5	0/5	2/9	4	2/8
	D50	20/6	25/4	0/5	2/6	3/5	4/5	3/2
	D85	42/4	44/3	0/5	1/5	5/2	7	5

\* ستون‌های خاکستری مربوط به نتایج تصاویر آزمایشگاهی و ستون‌های بی‌رنگ مربوط به نتایج صحرائی (میدانی) هستند.

جدول 2 خطای روش‌های مختلف در تعیین قطر شاخص نسبت به نتایج آزمون الگ (برحسب درصد)\*

نمونه	BG		ImageJ		Hyd Tool	
1	417/88	639/55	87/45	80/50	4/41	5/87
2	463/24	507/34	85/24	81/85	16/48	48/07
3	457/26	614/67	80/39	76/74	2/60	31/46
4	521/35	524/54	81/64	69/44	91/44	77/37
5	481/74	611/61	83/69	62/29	6/41	30/56
مقدار متوسط	468/3	579/6	83/7	74/1	24/3	38/7

\* ستون‌های خاکستری مربوط به نتایج تصاویر آزمایشگاهی و ستون‌های بی‌رنگ مربوط به نتایج صحرائی (میدانی) هستند.

بر نتایج روش‌های مزبور است. از این رو در جدول 3 نتایج بر مبنای تعداد سنگدانه‌های شناسایی شده توسط نرم‌افزارها ارزیابی شده است.

همان‌طور که در جدول 3 مشخص است، الگوریتم شناسایی نرم‌افزار ImageJ در تصاویر میدانی و الگوریتم نرم‌افزار Hydraulic Toolbox هم در تصاویر میدانی و هم در تصاویر آزمایشگاهی، نتایجی با اختلاف فاحش نسبت به مقادیر واقعی تعداد ذرات ارائه داده‌اند. به عبارت ساده‌تر، الگوریتم شناسایی در نرم‌افزار Hydraulic Toolbox چه در پردازش تصاویر صحرایی و چه در پردازش سنگدانه‌های مجزای چیده شده در آزمایشگاه، دارای خطاست و این خطا با کاهش تعداد سنگدانه‌ها یا کوچک شدن میدان تصویربرداری، بیشتر نمایان خواهد شد. اما این اختلاف در نرم‌افزار BG در پردازش تصاویر میدانی نسبت به دو روش دیگر بسیار ناچیز است و به عبارت بهتر، این نرم‌افزار دقت خوبی در شناسایی و تفکیک ذرات در تصاویر شلوغ بستر رودخانه‌ها دارد. یعنی ادعای محققان توسعه دهنده این الگوریتم در خصوص بهینه‌سازی روش شناسایی مرز میان ذرات، به خوبی عمل می‌نماید. اما به نظر می‌رسد الگوریتم بکار رفته برای ارائه منحنی دانه‌بندی در این نرم‌افزار با وجود دقت خوب در شناسایی ذرات و اندازه آنها، دارای تفاوت زیادی با نتایج آزمون الک هست. یعنی این نرم‌افزار ذرات را بخوبی شناسایی کرده و اندازه آنها در تصویر (با توجه به نحوه قرارگیری در تصویر) را ارائه می‌نماید لیکن اندازه ذرات با روش الک همخوانی ندارد چرا که در این روش اندازه ذرات با قطر کوچک و متوسط ارتباط نزدیک‌تری تا قطر بزرگ و متوسط که معمولاً از روش تصویری حاصل می‌شود دارد.

در خصوص تفاوت نتایج نمونه 4 با سایر نمونه‌ها، بررسی‌های انجام شده مؤید این مسأله است که در این عکس اولاً تعداد سنگدانه‌ها از بقیه نمونه‌ها کمتر است و در نتیجه خطا بیشتر نمایان می‌شود، ثانیاً بخشی از قاب عکس توسط ذرات ریزدانه کوچکتر از ماسه اشغال شده که نرم‌افزارهای پردازش تصویر قادر به تشخیص و دانه‌بندی صحیح آنها نیست و دچار خطای مضاعف می‌شود.

از سوی دیگر ذرات موجود در قابل تصویر دارای کشیدگی در راستای طولی هستند که باعث شده قطر حاصل از پردازش تصویر با قطر عبوری از الک نیز تفاوت بیشتری نماید. به زبان ساده‌تر مشاهده می‌شود با کاهش تعداد سنگدانه داخل نمونه و افزایش ذرات ریزانه بین ذرات، خطای روش‌های تصویری به طور فاحشی افزایش یافته و غیرقابل اعتماد خواهند بود.

باتوجه به نتایج به دست آمده می‌توان همانند بسیاری از محققان قبلی (حسن نژاد شریفی و همکاران، 1395b) روش Hydraulic Toolbox را به‌عنوان روشی جایگزین برای آزمایش الک استفاده کرد. اما نکته حائز اهمیت در این تحقیق که محققان قبلی بر آن اشاره نکرده بودند، توجه به تعداد سنگدانه‌های شناسایی شده توسط روش‌های مختلف برای تعیین منحنی دانه‌بندی می‌باشد. نتایج بررسی‌ها مویید این نکته است که در صورت وجود تعداد زیاد ذرات داخل تصویر نمونه‌ها (مشابه تحقیقات پیشین)، خطاهای منفی و مثبت شناسایی غلط ذرات توسط نرم‌افزارها با یکدیگر خنثی شده و خطای کلی پایین می‌باشد. اما اگر در تحقیقات خاصی چون شناسایی کلاسترها و یا در شرایطی که میدان تصویر کوچک بوده و یا توسط تعداد زیادی ذرات ریزدانه اشغال شده باشد، این خطا به خوبی قابل لمس خواهد بود و بیانگر عدم اعتماد

جدول 3 تعداد سنگ‌دانه‌های شناسایی شده در روش‌های مختلف \*

نمونه	BG	ImageJ	Hyd Tool	واقعی (الک)			
1	161	124	901	128	818	240	125
2	191	194	1561	238	1332	474	230
3	234	276	1444	324	1255	463	312
4	247	163	1995	182	534	586	182
5	216	186	905	233	946	431	187

\* ستون‌های خاکستری مربوط به نتایج تصاویر آزمایشگاهی و ستون‌های بی‌رنگ مربوط به نتایج صحرایی (میدانی) هستند.

از سوی دیگر، نتایج شمارش و تفکیک ذرات توسط نرم‌افزارهای BG و ImageJ بدون تفاوت معنی‌داری بر روی نتایج آزمایشگاهی (سنگدانه‌های مجزا) به عنوان بهترین گزینه است. یعنی این دو نرم‌افزار به خوبی با انتخاب پس‌زمینه مناسب می‌توانند تعداد سنگدانه‌ها را شناسایی کنند، هرچند در تعیین منحنی دانه‌بندی و قطر حاصل از آن خطای زیادی را گزارش می‌کنند. لذا نتیجه می‌شود در کارهایی مانند شناسایی کلاسترها یا تشخیص تعداد ذرات، نرم‌افزارهای ImageJ و BG با دقت خوبی می‌توانند تعداد سنگدانه‌ها را ارائه کنند. اما اگر هدف بدست آوردن منحنی دانه‌بندی باشد، نرم‌افزار Hydraulic Toolbox با دقت خوبی قابل استفاده هست هرچند با کوچک شدن میدان تصویر، کاهش تعداد سنگدانه‌ها، وجود مقدار زیادی ذرات ریزدانه در لابلای ذرات، توزیع نامناسب نور و ...، بایستی با احتیاط کافی به نتایج آن استناد نمود.

یکی از دلایل این اختلاف‌ها وجود رنگ‌های مختلف در سنگ‌های موجود در نمونه‌ها می‌باشد که در حساسیت الگوریتم‌های شناسایی نرم‌افزارهای مختلف خود را نشان می‌دهد. در استفاده از این نرم‌افزارها به خصوص ImageJ و Hydraulic Toolbox باید دقت داشت که سنگدانه‌ها تک‌رنگ و ترجیحاً به‌رنگ تیره باشند و در روش BG بهتر است با توجه به رنگ پس‌زمینه سیاه، رنگ سنگدانه‌ها روشن باشد. نکته حائز اهمیت دیگر این است که در هر سه روش باید از وجود سایه جلوگیری کرد زیرا هر روش به‌نوبه خود نسبت به سایه دچار خطا می‌شود.

روابط تجربی تعیین زبری دانه‌های رسوب عمدتاً به‌صورت رابطه توانی (1) بیان می‌شوند:

$$n = \alpha d^{\frac{1}{6}} \quad (1)$$

که در آن،  $n$  و  $d$  به‌ترتیب بیان‌گر ضریب زبری مانینگ و قطر مشخصه‌ای از رسوب می‌باشند. با توجه به اینکه قطر

متوسط ذرات یک قطر شاخص رایج می‌باشد که عمدتاً در تحقیقات مهندسی رودخانه برای تخمین اندازه ذرات بستر بکار رفته و از آن در تخمین ضریب زبری استفاده می‌شود، در ادامه سه رابطه ارائه شده توسط محققین مختلف که براساس قطر متوسط ذرات برای تخمین ضریب زبری بکار می‌روند مورد ارزیابی قرار گرفته و میزان خطای حاصل از الگوریتم‌های پردازش تصویر برای نمونه‌های موجود بررسی شده است. پارامترهای این روابط در جدول 4 ارائه شده است. نتایج محاسبه ضرایب زبری 5 نمونه با توجه به فرمول (1) و ضرایب مربوطه در جدول 4، در جدول 5 ارائه شده است. نظر به اختلاف ناچیز ضریب روابط ردیف‌های 1 و 3 جدول 4، این دو روش تفاوتی در نتایج حاصل ندارند.

همان‌طور که در جدول 6 مشاهده می‌شود، نتایج قطر ذرات بدست آمده از روش Hydraulic Toolbox در هر دو حالت (آزمایشگاهی و میدانی) که برای تخمین ضریب زبری با رابطه (1) بکار رفته است، به مقادیر حاصل از آزمون الک نزدیک‌ترند. پس از آن، نتایج روش ImageJ در آزمایشگاه قرار می‌گیرد و سایر روش‌ها دارای خطای بیشتر از 25 درصد در تخمین ضریب زبری هستند که این مسأله به شدت نتایج مدل‌سازی هیدرولیکی را تحت تأثیر قرار خواهد داد.

براساس مطالعات قبلی، خطاهای مرتبط با کاربرد روش دانه‌بندی خودکار (AGS) در نرم‌افزارهای موجود را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم نمود (Graham et al., 2005a):

- 1- خطاهای پردازش تصویر در تشخیص و اندازه‌گیری ذرات داخل تصویر، 2- اعوجاج فضایی ناشی از تبدیل یک سطح سه بعدی به یک صفحه دو بعدی توسط یک لنز ناقص، 3- خطاهای اساسی مربوط به ساختار پیچیده سه بعدی رسوبات آبراهه‌ها.

**جدول 4** روابط تعیین ضریب زبری دانه‌های رسوب در مطالعات هیدرولیک براساس قطر متوسط (برگرفته از نشریه 688 سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، 1394)

ردیف	نام رابطه	واحد d	ضریب $\alpha$	موارد کاربرد
1	Strickler (1923)	m	0/0474	برای رسوبات یکنواخت
2	Henderson (1966)	ft	0/034	بسترهای شنی
3	Garde & Ranga Raju (1978), Subramanya (1982)	m	0/047	بسترهای شنی

**جدول 5** برآورد ضریب زبری مانینگ با رابطه (1) و روش‌های مختلف جدول 4\*

نمونه	BG		ImageJ		Hyd Tool		واقعی (لک)
1	0/037	0/039	0/020	0/022	0/028	0/028	0/028
	0/033	0/034	0/017	0/019	0/024	0/025	0/024
2	0/036	0/037	0/020	0/02	0/028	0/029	0/027
	0/032	0/033	0/017	0/017	0/024	0/025	0/024
3	0/035	0/036	0/020	0/02	0/026	0/023	<b>0/026</b>
	0/031	0/032	0/017	0/017	0/023	0/020	<b>0/023</b>
4	0/036	0/036	0/020	0/028	0/030	0/028	<b>0/026</b>
	0/032	0/032	0/017	0/024	0/026	0/024	<b>0/023</b>
5	0/036	0/038	0/020	0/026	0/027	0/028	<b>0/027</b>
	0/032	0/033	0/017	0/023	0/024	0/025	<b>0/023</b>

\*ردیف بالای هر نمونه، رابطه ردیف 1 و 3 جدول 4 و ردیف پایین، رابطه ردیف 2 جدول 4.

**جدول 6** درصد خطای روش‌های مختلف برآورد ضریب زبری مانینگ با توجه به روش پردازش تصویر بکار رفته

نمونه	BG		ImageJ		Hyd Tool	
1	33/4	39/5	29/9	22/6	0/0	0/8
2	33/4	36/9	28/0	28/0	1/1	7/0
3	35/9	40/3	24/5	24/5	0/0	11/5
4	38/3	39/1	25/0	7/0	13/5	6/6
5	36/4	41/2	26/6	3/4	1/5	5/8
متوسط خطا	35/5	39/4	26/8	14/3	3/2	1/7

دوربین‌های موجود نیست، پر شده است. همچنین وجود سایه در اثر ذرات مجاور یکدیگر، از عوامل ایجاد خطا در پردازش تصویر است.

این درحالیست که خطاهای ناشی از عامل دوم یعنی اعوجاج فضایی، براساس بررسی‌های سایر محققین تقریباً ناچیز هستند (Butler et al., 2001). ایشان همچنین گزارش کردند که هیچ اختلاف معنی‌داری بین توزیع اندازه ذرات حاصل از تصاویر اصلاح شده برای رفع اعوجاج ناشی از توپوگرافی و آنهایی که هیچ اصلاحی روی آنها صورت نگرفته بود، وجود ندارد. در واقع می‌توان گفت با استفاده از دوربین مناسب و دقت در مراحل کار، این خطا مؤثر نمی‌باشد.

اما خطای سوم ناشی از روش‌های عکسبرداری است چراکه این روش‌ها تنها می‌توانند آن چیزی که توسط دوربین دیده می‌شود را اندازه‌گیری کنند. لذا عنوان خطاهای اساسی برای این موارد بکار می‌رود چون نشان دهنده

دو خطای پردازش تصویر وجود دارد. اولی ناشی از طبیعت رسوبات در زمانی است که عکس گرفته شده است. سطوح دارای ذرات بزرگتر بعد از باران یا سیلاب، سریع تر خشک می‌شوند، حال آنکه مرزهایشان مرطوب هستند. دانه‌های ریز مرطوب واقع در میان دانه‌های بزرگتر، به علت عدم وجود تنوع کافی در میان آنها، از روند فرایند پردازش تصویر حذف می‌شوند. مشکل دوم مرتبط با خود فرآیند پردازش تصویر است. این مسأله ممکن است ذرات را در هم ادغام کرده یا به دانه‌های منفرد تقسیم کند، که در نتیجه به ترتیب توزیع اندازه ذرات درشت‌تر و ریزتر خواهد شد. این مشکلات ناشی از تقسیم‌بندی ناقص یا بیش از حد بزرگ توسط فرایند واترشد می‌باشد. در تصاویر رودخانه کردان نیز یکی از مشکلات موجود تشخیص و اندازه‌گیری ذرات داخل قاب تصویر هست و بیشترین خطا در تصاویری است که فضای میان ذرات درشت‌دانه توسط ذرات ریزدانه‌ای که عملاً قابل اندازه‌گیری با دقت



اگرچه در تحقیقات قبلی عمدتاً بر استفاده از روش‌های مختلف پردازش تصاویر به منظور دستیابی به منحنی دانه‌بندی و نحوه توزیع اندازه ذرات تمرکز شده و نتایج حاصله دارای دقت خوبی در آن تحقیق ارزیابی شده است، لکن تاکنون به مقایسه تطبیقی نتایج این روش‌ها با مقادیر واقعی طبیعت پرداخته نشده و نتایج نرم‌افزارهای مختلف در شرایط یکسان ارزیابی نشده است. در این تحقیق در وهله اول دقت نرم‌افزارها از نظر شمارش تعداد سنگ‌دانه‌ها بررسی شده و سپس حساسیت روش‌های پردازش تصویر مختلف به رنگ پس زمینه بررسی شده است. براساس نتایج مشخص شد که برای استفاده از نرم‌افزارهای ImageJ و Hydraulic Toolbox بهتر است از پس‌زمینه سفیدرنگ و در نرم‌افزار BG از رنگ سیاه در پس زمینه استفاده شود تا نرم‌افزار با دقت بیشتری تمایز بین سنگدانه با پس زمینه را انجام دهد.

علاوه بر این، براساس نتایج حاصله می‌توان گفت اگرچه منحنی دانه‌بندی حاصل از روش Hydraulic Toolbox به منحنی دانه‌بندی الک نزدیک است اما در شمارش تعداد سنگدانه‌ها دارای خطای زیادی است از نظر تعداد سنگدانه‌ها خطای زیادی در شمارش آنها وجود دارد. در مقابل روش BG نتایج نزدیکتری از نظر تعداد سنگدانه‌های شمارش شده ارائه می‌کند اما دقت منحنی دانه‌بندی آن بسیار کم بوده و خطای اندازه ذرات آن با اندازه واقعی زیاد است. در واقع روش BG آن ذراتی را که در تصویر مشاهده می‌کند، به خوبی شناسایی کرده و اندازه آنرا تعیین می‌کند لکن این نتایج بسته به نوع ذرات و آرایش آنها در مجاور یکدیگر لزوماً با نتایج آزمون الک قابل قیاس نیست. در واقع می‌توان گفت برای کارهای تحقیقاتی دیگری که شمارش ذرات و ارزیابی تغییرات اندازه آنها در خارج از محیط طبیعی مدنظر باشد، نرم‌افزار BG دارای دقت بسیار خوبی است. اما نرم‌افزار Hydraulic Toolbox با توجه به الگوریتم‌های بکار رفته، نزدیک‌ترین نتیجه به منحنی دانه‌بندی حاصل از روش الک را ارائه می‌نماید و دقت آن با کوچک شدن میدان تصویر، افزایش ذرات ریزدانه مابین ذرات، وجود ذرات با کشیدگی طولی و وجود توزیع نور نامناسب در تصویر تحت تأثیر قرار خواهد

خطاهای ناشی از نحوه قرار گرفتن ذرات نسبت به سطح تصویر (که منجر به کاهش اندازه ظاهری آنها می‌شود) و مخفی کردن دانه‌ها توسط یکدیگر است. حتی اگر روش AGS اندازه ظاهری هر دانه در تصویر را بدون خطا اندازه‌گیری کند، توزیع اندازه ذرات حاصله نسبت به توزیع واقعی (دانه‌بندی با الک) متغیر خواهد بود. به عبارت دیگر می‌توان گفت این خطا در کلیه کارهای پردازش تصویر وجود داشته و جزو لاینفک آن می‌باشد که میزان آن تابع نحوه قرار گرفتن و آرایش ذرات داخل قابل تصویر هست. این مسأله در پردازش با نرم‌افزار BG به خوبی مشخص می‌باشد چرا که این نرم‌افزار با دقت بالایی ذرات و مرز بین آنها را شناسایی می‌کند، لکن قطره‌های ارائه شده دارای تفاوت معنی‌داری با نتایج آزمون الک است. بدیهی است هرچقدر ذرات متراکم‌تر بوده و بر روی سطوح کوچکتر خود مستقر شده باشند، خطای ناشی از روش پردازش تصویر افزایش خواهد یافت. در خصوص تصاویر این تحقیق نیز مقایسه کیفی تصاویر با مقادیر خطاهای کمی موید این مسأله هست که آرایش ذرات نسبت به یکدیگر می‌تواند در اختلاف بین نتایج روش الک با پردازش تصویر حایز اهمیت باشد.

#### 4- نتیجه‌گیری

تعیین دانه‌بندی ذرات بستر آبراهه‌های شنی از اهمیت اساسی در هیدرولیک جریان، انتقال رسوب و ژئومورفولوژی رودخانه برخوردار می‌باشد. همچنین یکی از پیش نیازهای تهیه هر مدل هیدرولیکی با رسوبی در رودخانه‌ها ارائه منحنی توزیع دانه‌بندی ذرات بستر می‌باشد. در سالیان اخیر، با توسعه تکنولوژی ساخت دوربین‌های دیجیتال و نرم‌افزارهای جانبی برای کاربرد این تصاویر، امکان تحلیل تصویری بسترهای سنگدانه‌ای رودخانه‌ها فراهم شده و تهیه منحنی دانه‌بندی آنها تسهیل شده است. از جمله نرم‌افزارهای پردازش تصویری که در علوم مختلف و همچنین مطالعات دانه‌بندی ذرات بکار رفته‌اند می‌توان به نرم‌افزارهای BaseGrain، hydraulic Toolbox و ImageJ اشاره نمود که دو مورد اول اساساً برای دانه‌بندی و تهیه منحنی توزیع اندازه ذرات و کاربرد آنها در مطالعات هیدرولیکی توسعه یافته‌اند.

گرفت. هیدرولیک ایران. دانشگاه شهید باهنر. کرمان. 19- 17 آبان. عزیزیان، ا.، مرشدی، ف. و آری، ا. (1391). "استفاده از تکنیک پردازش تصویر جهت استخراج منحنی دانه‌بندی مصالح سطحی بستر رودخانه". نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران، اهواز. ایران. 5- 3 بهمن. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. (1394). راهنمای تعیین ضریب زبری هیدرولیکی رودخانه‌ها، نشریه شماره 688، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

Adams, R.D. (2013). "Tool for Automated Image Based Grain Sizing", MSc Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Brigham Young University.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2006). "Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates". C136 / C136M: 14.

Aquaveo LLC. (2013). "Hydraulic Toolbox". Provo, Utah.

Beggan, C., and Hamilton, C.W. (2010). "New image processing software for analyzing object size-frequency distributions, geometry, orientation, and spatial distribution". Computers & Geosciences. 36: 539-549.

Bergendahl, B.S., and Arneson, L.A. (2014). "FHWA Hydraulic Toolbox", v.4.2, Desktop Reference Guide, FHWA, Lakewood, CO.

Buffin-Bélanger, T., and Roy, A.G. (1998). "Effects of a pebble cluster on the turbulent structure of a depth-limited flow in a gravel-bed river", *Geomorphology*, 25: 249-267.

Buscombe, D., Rubin, D.M., and Warrick, J.A. (2010). "A universal approximation of grain size from images of noncohesive sediment". *Journal of Geophysical Research*, 115(F02015).

Butler, J.B., Lane, S.N., and Chandler, J.H. (2001). "Automated extraction of grain-size data from gravel surfaces using digital image processing", *J. Hydraul. Res.*, 39: 519-529.

Carboneau, P.E., Lane, S.N., and Bergeron, N.E. (2004). "Catchment-scale mapping of surface grain size in gravel bed rivers using airborne digital imagery". *WRR* 40(W07202).

Chang, F.J., and Chung, Ch.H. (2012). "Estimation of riverbed grain-size distribution using image processing techniques". *Journal of Hydrology*, 440-441: 102-112.

به نظر می‌رسد بهینه‌سازی مناسبی در الگوریتم‌های تشخیص ذرات در روش پردازش تصویر با Hydraulic Toolbox صورت گرفته که باعث ارائه نتایج مناسبی در خصوص قطر ذرات و در نتیجه تخمین ضریب زبری هیدرولیکی با روابط تجربی موجود می‌شود. از کاربرد مستقیم نتایج پردازش تصویر بستر رودخانه (منحنی دانه‌بندی) با روش‌های ImageJ و BG بایستی اجتناب گردد زیرا خطای آنها در تخمین قطر ذرات و ضریب زبری علی‌الخصوص در طبیعت قابل توجه است.

## 5- منابع

حسن‌نژاد شریفی، ف.، صمدی، ا.، عزیزیان قطار، ا. (1395a). "ارزیابی عملکرد روش پردازش تصویر در تخمین ضریب زبری مانینگ در لایه سطحی بستر رودخانه‌ها". *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*. 47 (4): 711-722.

حسن‌نژاد شریفی، ف.، صمدی، ا.، عزیزیان قطار، ا. (1395b). "تحلیل حساسیت روش پردازش تصاویر در برآورد منحنی دانه‌بندی رسوبات سطحی بستر رودخانه نسبت به اندازه سطح رسوبی". *مجله پژوهش آب ایران*. 23: 133-142.

زارعی، م.، مهاجری، س. ح.، صمدی، ا. (1396). "ارزیابی نتایج روش‌های مختلف پردازش تصویر برای تهیه منحنی دانه‌بندی بستر آبراهه‌های شنی". *شانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران*، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

صادقی، س. ح. و قره‌محمودلی، س. (1392). "تحلیل دقت دانه‌بندی رسوبات بستر با استفاده از پردازش تصاویر حاصل از دوربین‌های با قدرت تفکیک مختلف". *نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز*. 5 (2): 115-124.

صمدی، ا. و عزیزیان، ا. (1394). "ارزیابی اثر توان تفکیک‌های مختلف تصویر بر نحوه استخراج منحنی دانه‌بندی مصالح سطحی بستر رودخانه به روش پردازش تصویر". *نخستین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران*. دانشگاه فردوسی مشهد. مشهد. ایران. 23-24 اردیبهشت.

عبد شریف اصفهانی، م.، کرباسی، م.، رجبی هاشجین، م. و کیاسالاری، ا. (1384). "معرفی روش عکس‌برداری شبکه‌ای از بستر رودخانه در تعیین دانه‌بندی لایه محافظ یک بستر درشت‌دانه (مطالعه موردی: رودخانه کرج)". *پنجمین کنفرانس*

- G. (2001). "Spatially Averaged Open-Channel Flow over Rough Bed", *Journal of Hydraulic Engineering*, 127: 123–133.
- Nikora, V., McEwan, I., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D., and Walters, R. (2007). "Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical background", *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(8): 873-883.
- Parker, G. (1991). "Selective sorting and abrasion of river gravel. II: Applications". *J. of Hyd. Eng.*, 117(2): 150-171.
- Penders, C.A. (2010). "Determining Mean Grain-size In High Gradient Streams with Autocorrelative Digital Image Processing", Master of Science Thesis, Appalachian State University, Boone, North Carolina, US.
- Rasband, W.S. (2012). "ImageJ", U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, 1997–2012.
- Rice, S.P. (1999). "The nature and controls on downstream fining within sedimentary links". *J. of Sed. Res.*, 69(1): 32–39.
- Sadeghi, S.H.R., Khaledi Darvishan, A.A.V., and Vafakhah, M. (2007). "Study on Channel Hydraulic Characteristics on Morphometric Variations of Bed Materials", *Journal of Hydraulics*, 2: 1-10. (In Farsi)
- Stähly, S., Friedrich, H., and Detert, M. (2017). "Size Ratio of Fluvial Grains' Intermediate Axes Assessed by Image Processing and Square-Hole Sieving", *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, 143(6): 06017005-1 to 06017005-6.
- Strom, K.B., Kuhns, R.D., and Lucas, H.J. (2010). "Comparison of Automated Image-Based Grain Sizing to Standard Pebble-Count Methods", *Journal of Hydraulic Engineering*, 136: 461–473.
- Webb, R.H., and Leake, S.A. (2006). "Ground-water surface-water interactions and long-term change in riverine riparian vegetation in the southwestern United States", *Journal of Hydrology*, 320: 302-323.
- Weichert, R., Wickenhäuser, M., Bezzola, G.R., and Minor, H.-E. (2004). "Grain size analysis for coarse river beds using digital imagery processing". *Proc. RF 2004*, Naples, Italy, 753–760.
- Chung, Ch.H., and Chang, F.J. (2013). "A refined automated grain sizing method for estimating river-bed grain size distribution of digital images". *Journal of Hydrology*, 486: 224–233.
- Detert, M., and Weitbrecht, V. (2012). "Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains – a free stand-alone tool". *River Flow 2012*, R.M. Muñoz, ed., Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62129-8, 595-600.
- Detert, M., and Weitbrecht, V. (2013). "User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN", In: *Advances in River Sediment Research*, S. Fukuoka, H. Nakagawa, T. Sumi, H. Zhang, eds., Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00062-9, 1789-1795.
- Fehr, R. (1987). "Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse (Simple detection of grain size distribution of sediment material using line-count analysis)". *Schweizer Ingenieur undArchitekt* 105(38); 1104–1109. (In German)
- Ferreira, T., and Rasband, W.S. (2012). "ImageJ, User Guide", IJ 1.46r, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, [imagej.nih.gov/ij/docs/guide/](http://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/), 2010-2012.
- Graf, W. and Altinakar, M. (1998). *Fluvial Hydraulics*, Wiley, New York.
- Graham, D.J., Reid, I., and Rice, S.P. (2005a). "Automated sizing of coarse grained sediments: Image-processing procedures". *Mathematical Geology*, 37(1): 1-28.
- Graham, D.J., Rice, S.P., and Reid, I. (2005b). "A transferable method for the automated grain sizing of river gravels". *Water Resources Research*, 41, W07020.
- Heritage, G.L., and Milan, D.J. (2009). "Terrestrial Laser scanning of grain roughness in a gravel-bed river". *Geomor.* 113, 4–11.
- Mohajeri, H., Grizzi, S., Righetti, M., Romano, G.P., and Nikora, V. (2015). "The structure of gravel-bed flow with intermediate submergence: a laboratory study". *Water Resources Research*, 51(11): 9232-9255.
- Nikora V.I., Goring D.G. and Biggs B.F. (1998). "On gravel-bed roughness characterization". *Water Resources Research*. 34, 517-527.
- Nikora, V., Goring, D., McEwan, I., and Griffiths,