

## Application of Structure from Motion (SFM) Method to Determine the Bed Surface Particles Sizes in Gravel Bed Rivers

PARISA ZAMANI<sup>1</sup>, SEYED HOSSEIN MOHAJERI<sup>2</sup>, AMIR SAMADI<sup>3\*</sup>

1. Graduated M.Sc., Water Eng. Dept., Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran.
2. Assistant Professor, Civil Eng. Dept., Faculty of Eng. and Tech., Kharazmi University, Karaj, Iran.
3. Assistant Professor, Water Eng. Dept., Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran.

(Received: Apr. 4, 2018- Revised: May. 17, 2018- Accepted: May. 20, 2018)

### ABSTRACT

Accurate and precise characterization of the natural rough bed has great importance. Without any doubt, there is not any example of natural flow or flow near hydraulic structures with no roughness on their surrounding walls. Although the traditional bed roughness characterization approach is based on the grain size distribution curve, in the recent approach, roughness determination is based on the point-to-point height measurement of the bed, which cannot be easily determined. Therefore, despite of many studies and various methods and tools which have been developed for determining the digital model elevation and statistical properties of such substrates, there is a lack of simple and low-cost method with high accuracy. In the present study, the capabilities of a close-range photogrammetric method called the Structure from Motion (SFM) have been investigated for determining the bed surface particles sizes. For verification, the digital elevation of various objects with regular geometric shapes, such as spheres and cubes, was determined using SFM method and compared with the theoretical values derived from their mathematical equation. The results of the model derived by the structure from motion method for irregular geometric shapes was performed using a laser scanner and a caliper which indicated the high precision of the simple and low-cost SFM method. The results showed that the SFM method could accurately developed a digital model of an artificial gravel and sand bed (absolute error of 0.19 to 1 mm). Furthermore, this method was applied in the real environment; Kordan River bed and the size distribution of the point to point bed particles were calculated based on the cloud points of the developed digital model, indicating the capability of the method for determining the natural roughness of the river bed based on the concepts of statistical methods.

**Keywords:** Close-Range Photogrammetry, Digital Elevation Model, Laser Scanner, Rough Bed, Structure from Motion.

## کاربرد روش ساختار ناشی از حرکت (SFM) برای تعیین اندازه ذرات سطحی بستر در آبراهه‌های شنی

پریسا زمانی<sup>۱</sup>، سید حسین مهاجری<sup>۲</sup>، امیر صمدی<sup>۳\*</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.

۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. (تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱/۱۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۲/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۲/۳۰)

### خلاصه

مطالعه دقیق و کمی در مورد بسترهای زبر از اهمیت بسیاری برخوردار است. بدون تردید کمتر مثالی از حرکت سیال در طبیعت و پیرامون سازه‌های هیدرولیکی می‌توان یافت که جداره پیرامونی آن در شرایط بستر زبر قرار نداشته است. اگرچه رویکرد سنتی در تعیین زبری بستر بر اساس منحنی توزیع اندازه سنگ‌دانه‌ها استوار است، اما در رویکرد نوین، تعیین زبری بر اساس ارتفاع نقطه به نقطه بستر استوار می‌باشد که تعیین آن خود به‌سادگی میسر نیست. لذا با وجود مطالعات بسیار در زمینه جریان با بستر زبر و نیز توسعه روش‌ها و ابزارهای گوناگون جهت تعیین مدل رقومی و خصوصیات آماری چنین بسترهایی، فقدان یک روش ساده، کم هزینه و با دقت بالا احساس می‌گردد. در مطالعه حاضر به بررسی قابلیت‌های یکی از روش‌های فتوگرامتری بُرد نزدیک با عنوان روش ساختار ناشی از حرکت دوربین (اصطلاحاً SFM) در تعیین اندازه ذرات سطحی بستر پرداخته شده است. به منظور صحت‌سنجی، موقعیت رقومی اشیای مختلفی با شکل هندسی منظم مانند کره و مکعب با این روش تعیین گردید و با مقادیر تئوری حاصل از معادله ریاضی آنها مقایسه شدند. صحت‌سنجی نتایج مدل حاصل از روش ساختار ناشی از حرکت برای اشکال هندسی نامنظم با استفاده از دستگاه لیزر اسکنر و کولیس انجام شد که بیانگر دقت بالای روش ساده و کم‌هزینه SFM بود. نتایج نشان داد که این روش قادر است با دقت مناسبی (۰/۱۹ تا ۱ میلی‌متر) یک مدل رقومی بستر سنگ‌دانه‌ای و شنی مصنوعی را شبیه‌سازی کند. سپس این روش در محیط واقعی بستر رودخانه کردان بکار برده شد و توزیع اندازه نقطه به نقطه ذرات بستر بر اساس ابر نقاط حاصل از مدل رقومی توسعه‌یافته بدست آمد که نشان‌دهنده قابلیت مناسب این روش برای تعیین زبری طبیعی بستر رودخانه‌ها بر اساس مفاهیم روش‌های آماری می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** بستر زبر، مدل رقومی ارتفاعی، فتوگرامتری برد نزدیک، ساختار ناشی از حرکت، لیزر اسکنر

### مقدمه

توصیف کمی و دقیق بسترهای شنی از اهمیت اساسی در هیدرولیک جریان رودخانه‌ها و مهندسی رودخانه‌های رسوبی برخوردار است. اهمیت این موضوع به این علت است که بسیاری از خصوصیات جریان مانند سرعت متوسط، انتقال رسوب و خصوصیات آشفتگی تحت تأثیر ساختار و شکل بستر رودخانه‌ها می‌باشد (Mohajeri, 2014b; Mohajeri et al., 2015).

زبری بستر معرف یک مسئله‌ی اساسی در هیدرولیک و ژئومورفولوژی رودخانه است. زبری کف بر ویژگی‌های جریان متوسط، تلاطم جریان، مقاومت جریان و حرکت ذرات بستر تأثیر می‌گذارد. با این وجود، تعریف کمی مناسب برای زبری

بستر همچنان یک مسئله است. روش‌های جدید در تعریف کمی زبری بستر در دو گروه قرار می‌گیرند: ۱- روش اندازه ذرات مشخصه و ۲- روش ارتفاع نقطه به نقطه. روش اول مربوط به این واقعیت است که سطح یک بستر شنی متشکل از اجزای مجزایی هستند که زبری بستر را شکل می‌دهند، در حالی که گروه دوم بر این باورند که سطح بستر یک میدان تصادفی  $Z(x, y)$  (لا از تراز بستر است. هر دو روش معایب و مزایای خود را دارند و هر دو نیازمند تحقیقات بیشتر هستند (Mohajeri, 2014)). در رابطه با گروه اول تحقیقات بسیار زیادی در مطالعات مربوط به هیدرولیک و مورفولوژی رودخانه‌ها صورت گرفته است (برای مثال، Hey (1979)، Griffiths (1981)، Bathurst (1985)؛ Bray (1985)، Kirchner et al. (1990)، Whiting and Dietrich (1990)). تعداد بسیار معدودی از مطالعات در تعیین زبری بستر شنی از روش میدان تصادفی استفاده نموده‌اند

\* نویسنده مسئول: amsamadi@gmail.com

ناچیز برای استفاده از آن، توجه خاص محققان را به خود جلب نموده است. استخراج مدل سه‌بعدی از یک شی یا محیط تنها با به‌کارگیری تصاویر دوبعدی، یکی از مسائل اساسی در بینایی کامپیوتر است. از خصوصیات این روش می‌توان به امکان خودکار نمودن فرایند استخراج داده‌های سه‌بعدی، قابلیت استفاده برای اجسام با ویژگی‌های مختلف، عدم نیاز به تماس مستقیم با جسم جهت اندازه‌گیری و حصول دقت‌های قابل قبول اشاره نمود (Esmaelpour, 2009).

اساس روش ساختار ناشی از حرکت، از نحوه ادراک اجسام توسط چشم انسان الگوبرداری شده است. انسان از طریق حرکت دادن چشم، اطلاعات زیادی در مورد ساختار سه‌بعدی در محیط زیست خود درک می‌کند. هنگامی که ناظر حرکت می‌کند و اشیاء اطراف ناظر حرکت می‌کنند، اطلاعات از تصاویری که در طول زمان حساس هستند حاصل می‌شود. در حقیقت نحوه عملکرد این روش بر اساس دید سه‌بعدی (استریو) می‌باشد و بر این اساس جسم سه‌بعدی ساخته می‌شود (Shapiro and Stockman, 2001).

روش ساختار ناشی از حرکت (SFM) اولین بار توسط Ullman (1979) مطرح شد که در آن به بازسازی شکل سه‌بعدی یک شیء توسط عکس‌های متوالی پرداخته است. این روش توسط افراد مختلف و با پیاده‌سازی‌های متفاوتی ارائه شده است. برای مثال، Bomminayun and Stoesser (2011) برای بررسی آشفتگی جریان در کانال‌های با بستر زبر، یک فلوم آزمایشگاهی را با ایجاد بستر زبر مصنوعی توسط گوی‌های نیم‌دایره در کف فلوم و عکس‌های متوالی مورد مطالعه قرار دادند. همچنین Dietrich (2014) در مطالعات خود به بررسی کاربرد تکنیک SFM در میدان ژئومورفولوژی رودخانه‌ای و تهیه نقشه مدل رقومی مورد استفاده در تحقیقات مورفولوژیکی پرداخته است. سنجش از دور ثابت کرده است که یک ابزار ارزشمند برای تحقیقات رودخانه‌ای برای محققان می‌باشد که به محققان این فرصت را می‌دهد تا به جمع‌آوری مجموعه داده‌های فضایی پیوسته از متغیرهای مورفولوژیک کلیدی رودخانه (یعنی عرض، عمق، اندازه رسوبات بستر) بپردازند (Fonstad and Marcus, 2010; Carbonneau et al., 2012). برخی از مطالعات در مقیاس قاره‌ای با تصاویر ماهواره‌ای متمرکز (Yamazaki et al., 2014) و برخی دیگر از عکاسی هوایی استفاده کرده‌اند (Dugdale et al., 2010). با کمک اندازه‌گیری متغیرهای مورفولوژیکی همراه با سایر متغیرهای هیدرولیکی می‌توان نقشه‌های دقیق مکانی پیوسته از ساختار فیزیکی رودخانه‌ها برای مطالعات ژئومورفولوژی و زیستگاه‌های تحت تأثیر سیلاب

(Furbish, 1987; Robert, 1988, 1990). زبری بستر بر اساس منحنی توزیع اندازه ذرات، به جهت سادگی تا مدت‌ها به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت. اما در واقعیت توصیف بستر رودخانه تنها با یک عدد که قطر معادل نامیده می‌شود کافی نمی‌باشد. در حقیقت در این روش هیچ‌گونه نتیجه‌ای از نحوه قرارگیری ذرات نسبت به یکدیگر، شکل سنگ‌دانه‌ها و جهت‌گیری آنها در راستای جریان و فاصله بین سنگ‌دانه‌ها در مقدار به دست آمده حاصل نمی‌شود (Nikora et al., 1998; Aberle and Nikora, 2006). اما روش جایگزین دیگر، در نظر گرفتن یک بستر شنی به صورت مجموعه‌ای از ارتفاع‌های نقطه به نقطه است که به صورت تصادفی در مکان تغییر می‌کنند (Nikora et al., 1998; Mohajeri, 2014a). رویکرد اندازه‌گیری نقطه به نقطه در تعیین خصوصیات بسترهای شنی، قابلیت‌های بسیار بالایی در قیاس با رویکرد سنتی دارد، اما استفاده از این رویکرد مانند رویکرد سنتی منحنی توزیع اندازه سنگ‌دانه‌ها رایج نیست. به‌علاوه بسیاری از ویژگی‌های این روش به‌خصوص در مقیاس آزمایشگاهی و صحرایی به‌علت محدودیت‌های ابزار در دسترس به خوبی بررسی نشده‌اند.

دانشمندان با پیشرفت در علوم کامپیوتر به رویکرد جدیدی در زمینه آنالیز تصویری دست یافته‌اند که ساختار ناشی از حرکت نامیده می‌شود (Westoby et al., 2012)؛ James and Robson (2012)، Fonstad et al. (2013)، Micheletti et al. (2014). این روش به کنترل زمینی محدودی نیازمند است و معمولاً تصاویر بدست آمده از دوربین‌های دیجیتال ارزان قیمت و غیرمتریک نزدیک‌برد یا تصاویر هوایی برای آن مناسب است. این روش رو به رشد به علت ارزان بودن و سرعت بالا، ارجح‌تر از روش لیزر اسکنر برشمرده می‌شود (Javernick et al., 2014). اگر چه این روش در یک دهه اخیر مورد توجه بسیاری از محققان (Fonstad and Marcus, 2010; Bomminayun and Stoesser, 2011; Carbonneau et al., 2012; Dietrich, 2014) قرار گرفته است، ولی تاکنون کاربرد این روش در تعیین مشخصات هندسی بسترهای زبر آبراهه‌ها گزارش نشده است. به‌عنوان نمونه در سال‌های اخیر استخراج داده‌های سه‌بعدی از سطح اشیاء و بازسازی و مدل‌سازی آنها به دلیل کاربردهای متنوعی که در علوم مختلف دارند سبب شده است که روش‌های مختلفی جهت استخراج داده‌های سه‌بعدی بکارگرفته شوند، مثلاً روش‌هایی که در ساخت قطعات صنعتی بکار می‌روند یا روش‌هایی که برای برآورد احجام خاکبرداری استفاده می‌شوند. در این بین استفاده از تصاویر متوالی یا همان روش ساختار ناشی از حرکت (SFM)، از جمله روش‌هایی است که به دلیل امکانات

داده‌ها به صورت کاملاً خودکار را به کمک دوربین‌های دیجیتال کاهش می‌دهد. بنابراین SFM امکان دستیابی سریع، خودکار و کم‌هزینه از داده‌ها را به صورت سه‌بعدی که تحول زیادی در میان جامعه ژئومورفولوژی ایجاد کرده است، ارائه می‌دهد (Micheletti et al., 2014). ساختار اصلی این روش کمک گرفتن از تصاویر متوالی گرفته شده از یک شی یا یک ناهمواری و با استفاده از علم کامپیوتر تصویر دوبعدی را به یک تصویر سه‌بعدی دارای مختصات  $x$ ،  $y$  و  $z$  تبدیل می‌کند.

در این مقاله ضمن معرفی روش ساختار ناشی از حرکت SFM و روند کار با تصاویر مربوطه در نرم‌افزار Agisoft، صحت‌سنجی‌هایی که بر روی اشکال هندسی منظم، بستر سنگدان‌های مصنوعی در آزمایشگاه (نامنظم) و بستر طبیعی دو آبراهه صورت گرفته ارائه و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. نرم‌افزار Agisoft نسخه 1.2.4.2399 (۶۴ بیت) که در این تحقیق بکار رفته (شکل ۱)، در سال ۲۰۱۶ به‌عنوان یک نرم‌افزار مستقل که امکان انجام پردازش‌های تصویرسنجی یا همان فتوگرامتری و تولید اطلاعات و داده‌های خاص سه‌بعدی از عکس‌های دیجیتال را برای بررسی دقیق‌تر تصاویر در حوزه سامانه اطلاعات جغرافیایی، میراث فرهنگی، ساخت جلوه‌های ویژه و همچنین اندازه‌گیری غیر مستقیم اشیاء از مقیاس‌های مختلف ممکن می‌سازد، ارائه شده است (AgiSoft, 2012). تکنیک‌های فتوگرامتری دیجیتال به صورت هوشمندانه‌ای به وسیله روش‌های بینایی رایانه‌ای (شامل روش‌های مربوط به دستیابی تصاویر، پردازش، آنالیز و درک محتوای آن‌ها) در این نرم‌افزار بکار گرفته می‌شوند و نتایج به صورت هوشمندانه، خودکار و دقیق تولید می‌شوند تا حتی افراد تازه‌وارد در زمینه فتوگرامتری نیز پروژه‌های موفق را ارائه دهند. از سوی دیگر، این نرم‌افزار ویژگی‌های پیشرفته‌ای مانند تنظیم جریان کاری برای انجام کارهای خاص و کار با انواع داده‌ها را برای افراد حرفه‌ای در حوزه فتوگرامتری نیز فراهم نموده است.

این نرم‌افزار به صورت خودکار از عکس‌های متوالی ثبت‌شده از محیط سنگی بستر آبراهه یا هر شیء دیگری، تصاویری سه‌بعدی می‌سازد که می‌توان از آنها در مدل‌سازی رقومی بستر یا آن شیء استفاده کرد. برای ساخت مدل سه‌بعدی، قبل از عکس‌برداری از یکسری نقاط با مختصات مشخص یا نقاط با فاصله‌های مشخص از هم استفاده می‌شود. در این تحقیق، اشیاء مورد نظر روی مختصات دقیق جانمایی و سپس در تمام زوایا عکس‌برداری شده‌اند. بعد از اتمام عکس‌برداری از صفحات که اشیاء بر روی آن قرار داشتند، تصاویر آنها برای تولید تصویر مجسم سه‌بعدی و استخراج مختصات صفحه تصویر

استخراج کرد (Fausch et al., 2002; Carbonneau et al., 2012).

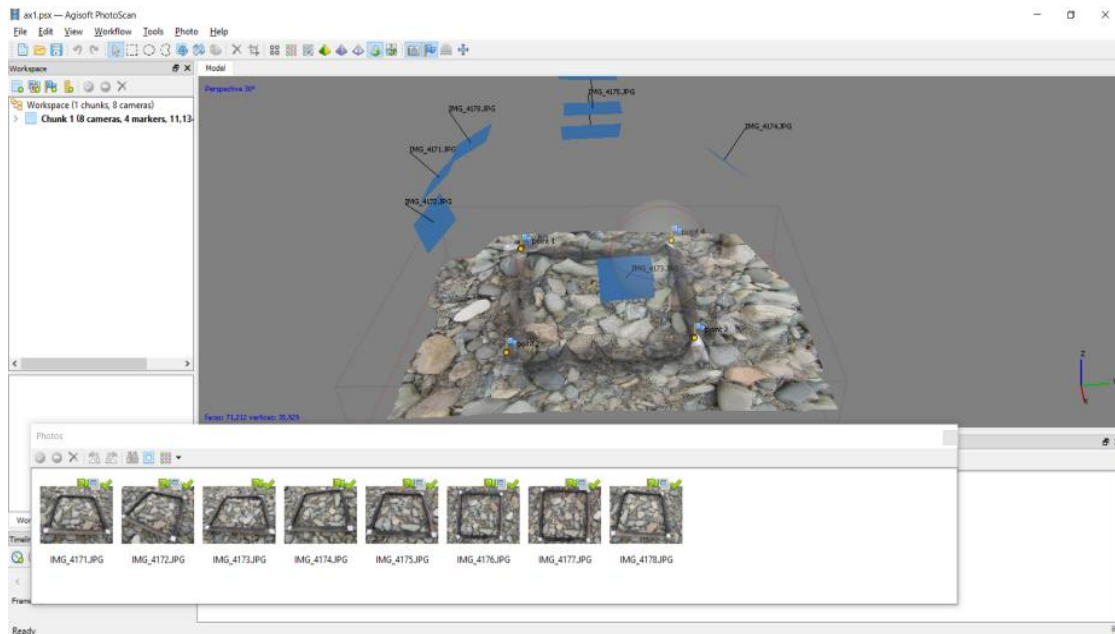
با توجه به اهمیت موضوع، هدف این مقاله معرفی و نحوه کاربرد روش آسان و پیشرو ساختار ناشی از حرکت در بررسی خصوصیات آماری بسترهای شنی رودخانه‌ها می‌باشد. برای صحت‌سنجی و ارزیابی اولیه روش SFM، در ابتدا به بررسی آن بر روی اشکال منظم هندسی مانند کره و مکعب پرداخته شده که به راحتی امکان تعیین ابعاد هندسی آنها وجود دارد. سپس برای بررسی دقت و کارایی روش ساختار ناشی از حرکت در تعیین مدل رقومی بستر زبر آبراهه‌ها، نسبت به ساخت مدل مصنوعی بستر به وسیله دو صفحه چوبی که بر روی آن سنگ‌دانه‌ها با آرایش با و بدون فاصله قرار داشتند، اقدام گردید. سپس به وسیله لیزر اسکنر این مدل هندسی صحت‌سنجی و کارایی دو روش با یکدیگر مقایسه شدند. در انتهای ارزیابی روش، برداشت‌هایی نیز از بستر واقعی دو رودخانه طبیعی انجام شد و نتایج حاصله با روش SFM تجزیه و تحلیل گردیدند. در نهایت می‌توان در خصوص کاربرد این روش نوین برای تعیین ارتفاع نقطه به نقطه ذرات به منظور برآورد زبری بستر با روش‌های دقیق‌تر آماری- تجربی اظهار نظر نمود.

### روش انجام تحقیق

فتوگرامتری به علم، تکنیک، فناوری و هنر اخذ اطلاعات کمی و کیفی از طریق آنالیز بر روی تصاویر گفته می‌شود. کاربردهای فتوگرامتری دارای وسعت زیادی از تهیه نقشه، تولید مدل سه‌بعدی تا رباتیک و پزشکی است. در فتوگرامتری متریکی، اندازه‌گیری‌های کمی مطرح است، یعنی با استفاده از اندازه‌گیری‌های دقیق نقاط از طریق عکس می‌توان فواصل حجم، ارتفاع و شکل زمین را تعیین کرد که معمول‌ترین کاربردهای این شاخه از فتوگرامتری تهیه نقشه‌های مسطحاتی و توپوگرافی از روی عکس‌هاست. جمع‌آوری تصاویر و داده‌های ارتفاعی برای این نوع از نقشه‌برداری و مطالعات می‌تواند بسیار وقت‌گیر و پرهزینه باشد، به‌ویژه در نواحی بزرگ (Dietrich, 2014). تحولات جدید در کامپیوتر بر اساس دید ساختار ناشی از حرکت یا فتوگرامتری استریو (SFM) یا  $MVS^1$ -(SFM)، این مطالعات را تنها با یک GPS یا دوربین‌های دیجیتال برای جمع‌آوری مجموعه‌ای از داده‌های ارتفاعی با کیفیت بالا آسان نموده است (Fonstad et al., 2013; Javernick et al., 2014). روش ساختار ناشی از حرکت (SFM) هزینه‌های بالا و پردازش

صفحه تصویر (X,Y)، بُعد رقومی (Z) شکل هندسی موردنظر استخراج می‌گردد. سپس بُعد مزبور که از معادله ریاضی بدست آمده با مقدار حاصل از روش SFM مقایسه شده است. با توجه به تعداد زیاد نقاط حاصل از مدل رقومی (ابر نقاط)، به منظور تعیین خطا و مقایسه نتایج از کدهای توسعه یافته در نرم‌افزار متلب استفاده شد.

وارد نرم‌افزار می‌شوند. در نهایت با استخراج موقعیت ارتفاعی هر یک از نقاط و مقایسه آن با اندازه‌های واقعی نتایج بررسی گردید و دقت این روش در تعیین مدل رقومی بستر تعیین گردید. برای صحت‌سنجی روش، ابتدا نسبت به انتخاب اشکال هندسی منظم (مکعب و کره) اقدام گردید که معادله ریاضی آنها مشخص می‌باشد. از روی این معادلات، با وارد نمودن مقادیر

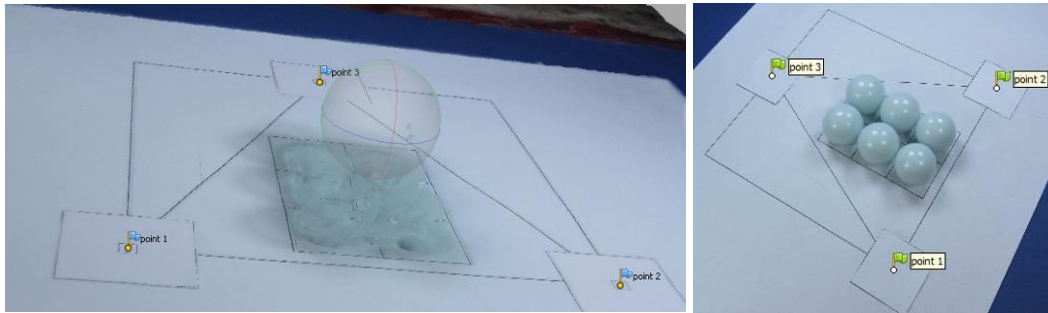


شکل ۱- نمای کلی نرم‌افزار Agisoft

مناسب از مدل‌ها میسر نگردید. این تلاش چندین بار با جانمایی‌های مختلف، تنظیم نور در زوایای مختلف، افزایش نقاط ثابت (با مختصات معلوم) پیرامون اشیاء، تغییر رنگ گوی‌ها، کم و زیاد کردن تعداد گوی‌های بکار گرفته شده، تغییر اندازه نقاط ثابت، تکرار شد. اما در نهایت مشخص گردید که بازتاب نوری یکی از مهم‌ترین مشکلات در ساخت مدل هندسی توسط Agisoft است و بایستی به دنبال اشکالی رفت که به جای بازتاب نور، جاذب نور باشند. در نهایت از مکعب‌هایی از جنس MDF و گوی‌هایی از جنس سیمان استفاده شد (شکل ۳). بدین منظور مکعب‌های چوبی توسط برش لیزری با دقت بالا تهیه شدند. برای ساخت گوی‌های سیمانی نیز از توپ پینگ‌پنگ استفاده شد. بدین منظور دوغاب سیمان با قیف کاغذی از داخل سوراخی به داخل توپ ریخته شده و بعد از گیرش سیمان داخل توپ، با سوزاندن توپ، گوی سیمانی شکل‌گرفته داخل توپ بدست می‌آمد. این اشکال منظم بازتاب نورشان تقریباً در حدود صفر بود و در ادامه از آرایش تکی و گروهی آنها برای صحت‌سنجی روش استفاده شد.

برای تصویربرداری از یک دوربین کانون مدل PowerShot SX200IS دارای لنز واید 28mm، زوم اپتیک 12x، با رزولوشن 12.1 مگاپیکسلی که امکان بزرگ کردن یا برش عکس را دارد و مجهز به تنظیم دستی و دارای تکنولوژی تشخیص صحنه می‌باشد، استفاده شده است. برای بهتر شدن نتایج عکس‌برداری در محیط آزمایشگاه، از ۴ سری لامپ کم مصرف با نور مهتابی همراه با پایه در چهار طرف شیء مورد نظر استفاده شده است تا از میزان سایه و بازتاب نوری اشیاء کاسته شود. اما این روش در طبیعت و با وجود نور طبیعی نیازمند منبع تأمین نور دیگری نمی‌باشد و تنها با اخذ تصاویر کافی از اطراف محیط موردنظر می‌توان نسبت به ساخت مدل سه‌بعدی با روش SFM اقدام نمود.

در ابتدای کار برای ارزیابی دقت روش SFM از اشیای مختلفی چون توپ پینگ‌پنگ و گوی‌های شیشه‌ای (تبله) با شعاع ۱۱ میلی‌متر استفاده شد. در آزمایش‌های اولیه به علت مشکلاتی چون بازتاب نور و ناموزون بودن مدل ساخته شده توسط نرم‌افزار Agisoft (شکل ۲) عملاً امکان اخذ خروجی



شکل ۲- (راست) گوی‌های شیشه‌ای بدون فاصله؛ (چپ) مدل ناموزون به علت بازتاب نور شدید

می‌دهد. نمای دستگاه بکار رفته در حین انجام آزمایش در شکل (۴) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده، بسترهای مصنوعی سنگ‌دانه‌ها در کانال آزمایشگاهی شیشه‌ای که توسط قاب‌های فلزی پایدار شده، مستقر و تراز شده است و دستگاه لیزر اسکنر با جاروی عرضی و طولی بستر، مختصات سه‌بعدی نقاط مختلف تشکیل‌دهنده بستر سنگ‌دانه‌ای را در قالب مدل سه‌بعدی برداشت نموده که قابل قیاس با نتایج روش SFM است. از آنجا که قطر برداشت لیزر دستگاه ۵ میلی‌متر بوده است، برای برداشت صفحه سنگ‌دانه‌ها به‌صورت نوارهای ۵ میلی‌متری، لیزر به‌صورت عرضی بر روی صفحاتی با قطر ۵ میلی‌متر در راستای طول کانال، برای برداشت تصاویر حرکت داده شده است. با توجه به ابعاد  $30 \times 30$  سانتیمتری صفحات، داده‌ها در ۶۰ مرحله حرکت رفت لیزر در جهت عرضی فلوم با مدت زمان هر کدام ۶۰ ثانیه برداشته شده‌اند.

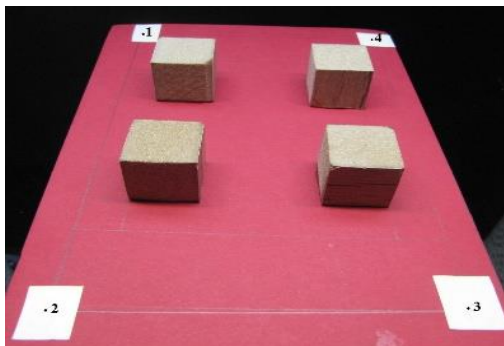
نحوه عملکرد روش SFM بدین صورت می‌باشد که با انجام عکس‌برداری از زوایای مختلف یک جسم با فواصل تقریباً یکسان، عکس‌های اخذشده وارد نرم‌افزار Agisoft می‌شوند. قبل از تهیه عکس بایستی نسبت به ایجاد حداقل ۳ نقطه واسنجی با مختصات معلوم اطراف جسم موردنظر اقدام کرد که نرم‌افزار با استفاده از مختصات معلوم این سه نقطه و همپوشانی تصاویر مختلف بتواند به ساخت مدل سه‌بعدی رقومی اقدام نماید. نرم‌افزار این قابلیت را دارد که با ورود تصاویر، انتخاب نقاط واسنجی و ثبت مختصات آنها و سپس به ترتیب با انجام مراحل مختلفی چون Align Photos، Build Dense Cloud، Build Mesh، Build texture، Build Tiled Model و Build Dem مدل سه‌بعدی جسم موردنظر را بازسازی و ارائه نماید. مدل مزبور بر اساس ابرنقاط با مختصات معلوم حاصل از روش SFM ساخته شده که می‌توان با ذخیره مختصات ابرنقاط در فایل با فرمت TXT نسبت به صحت‌سنجی نتایج با مقادیر واقعی (برای

چهار سری بستر مختلف با اشکال هندسی منظم و دو سری بستر مصنوعی با سنگ‌دانه‌های جمع‌آوری شده از بستر رودخانه برای عکس‌برداری‌ها و ساخت مدل سه‌بعدی ساخته شد (شکل ۳). این شش سری بستر شامل تک مکعب، دسته مکعب با فاصله، تک گوی، دسته گوی با فاصله، سنگ‌دانه با فاصله نامتراکم و سنگ‌دانه‌های بهم چسبیده بودند. مکعب‌های چوبی با ابعاد ۱۶ میلی‌متر و گوی‌های سیمانی نیز با قطر ۲۲ میلی‌متر ساخته شدند. سنگ‌دانه‌ها از بستر رودخانه برداشت و بدون نظم خاصی بر روی دو صفحه چوبی در دو آرایش مختلف چسبانده شدند. علت انتخاب این اشکال هندسی برای مطالعه زبری بستر این بود که سنگ‌دانه‌های بستر رودخانه‌های کوهستانی اغلب به‌صورت گرد گوشه هستند و گوی‌ها نماینده خوبی برای آنها می‌باشند و در مقابل مکعب‌های تیز گوشه می‌توانند به نوعی نماینده سنگ‌دانه‌های تیز گوشه باشند، هر چند که این نوع سنگ‌دانه کمتر در رودخانه‌ها یافت می‌شوند. مدل‌های مختلف مورد مطالعه بر روی صفحات مسطح با مختصات معلوم چیده شدند و در این صفحات امکان تعیین موقعیت مکانی هر یک از اجزای بستر فرضی با دقت قابل تعیین است. برخلاف اشیای هندسی دارای شکل منظم (مکعب و کره) که معادله ریاضی‌شان مشخص می‌باشد و با در نظر گرفتن مختصات آنها در پلان  $(x,y)$ ، می‌توان بُعد ارتفاعی  $(z)$  روی سطح آنها را تشخیص داد و بر اساس آن نسبت به صحت‌سنجی نتایج روش اقدام کرد، در مورد بسترهای سنگ‌دانه‌ای عملاً انجام این کار میسر نبود. در این حالت برای صحت‌سنجی دقت روش SFM از کولیس و دستگاه لیزر اسکنر که برای برداشت پروفیل بستر در کانال آزمایشگاهی بکار می‌رود، استفاده شد. این دستگاه به‌صورت خودکار، بر روی عرض کانال حرکت کرده و بدون هیچ‌گونه تماسی با بستر کانال و با دقت بالا در حد میلی‌متر، تراز رسوب‌های کف کانال را ثبت کرده و در نهایت داده‌های رقومی محل‌های برداشت را در اختیار کاربر قرار

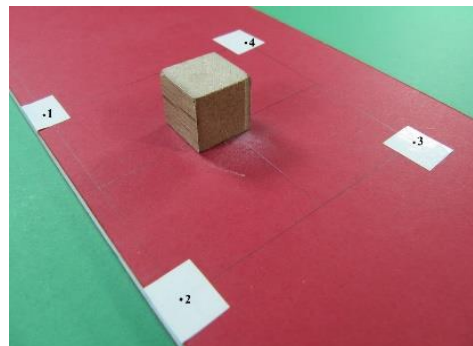
مدل‌ها با مقادیر واقعی مقایسه شده و دقت روش در حالت‌های مختلف ارزیابی شده است.

اشکال منظم هندسی از معادله ریاضی و برای بستر سنگ‌دانه‌ای از لیزر اسکنر) اقدام نمود. در بخش بعدی ضمن ارائه مدل‌های ساخته شده مختلف با روش SFM، نتایج مقایسه نقاط رقومی

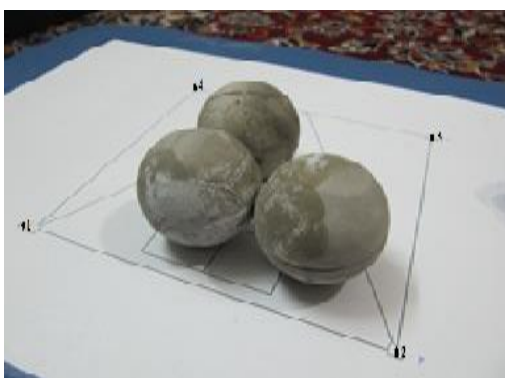
ب



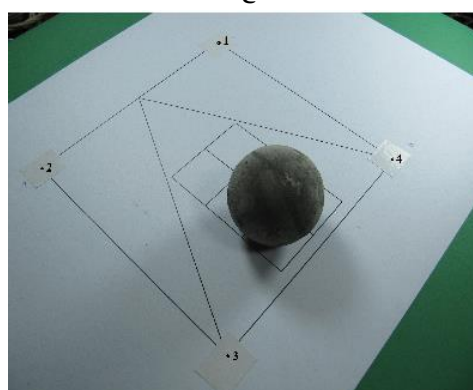
الف



د



ج



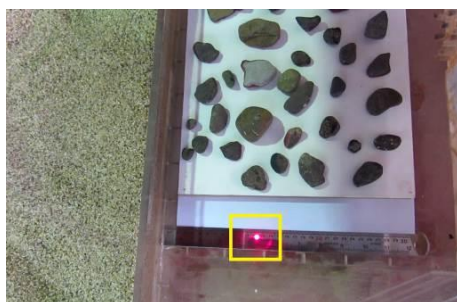
و



ه



شکل ۳- تصویر شکل‌های مورد مطالعه: الف) تک مکعب چوبی، ب) دسته مکعب چوبی با فاصله، ج) تک گوی سیمانی، د) دسته گوی سیمانی، ه) سنگ‌دانه با فاصله، و) سنگ‌دانه بدون فاصله



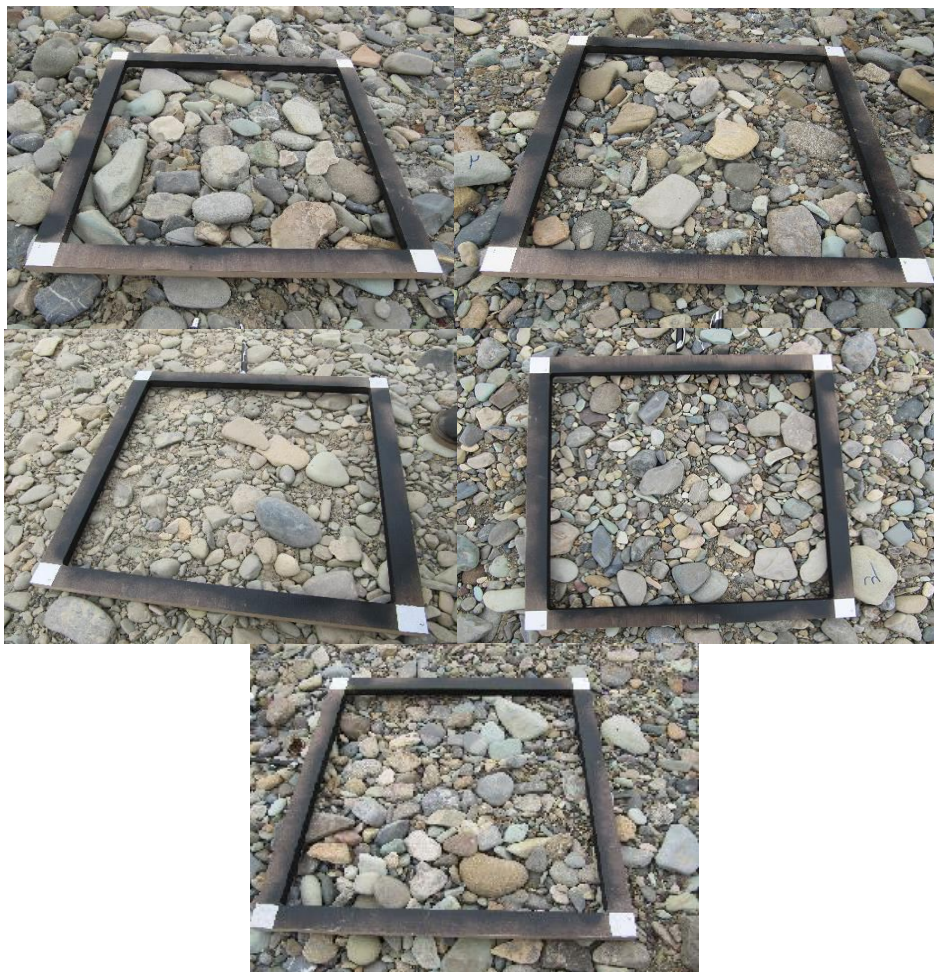
شکل ۴- نمایی از دستگاه لیزر اسکنر و نحوه حرکت آن برای برداشت توپوگرافی بستر سنگ‌دانه‌ای (پیکان)

تصاویر هر یک از نقاط نشان داده شده است. نقاط واسنجی روش SFM نیز بر روی لبه‌های قاب چوبی توسط برچسب مشخص شده است. در نهایت نتایج بدست آمده از کاربرد روش SFM بر روی بستر رودخانه کردان در بخش بعدی ارائه و کاربرد آن در مطالعات رسوبی و هیدرولیکی بیان شده است.



شکل ۵- موقعیت جغرافیایی ناحیه مورد بررسی رودخانه کردان

در نهایت بعد از اطمینان از دقت روش، نسبت به کاربرد آن در بستر واقعی یک رودخانه طبیعی دارای بستر شنی (رودخانه کردان) اقدام شد. 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. این رودخانه پس از خروج از دامنه‌های البرز میانی وارد جلگه‌های شرقی هشتگرد شده و سرانجام در شرق مردآباد کرج وارد رودخانه شور می‌شود. (افشین، ۱۳۷۳). در این تحقیق، بستر رودخانه کردان واقع در پائین‌دست راه‌آهن سراسری تهران- تبریز و پس از معادن شن و ماسه که غالباً از مصالح درشت‌دانه تشکیل شده مورد بررسی و برداشت قرار گرفته است (روستای عباس‌آباد). این محدوده در قسمتی از رودخانه کردان که فصلی می‌باشد و در اکثر فصول سال خشک است واقع می‌باشد (شکل ۵). از محدوده مشخص شده در شکل، تعداد ۵ سری برداشت از فواصل مختلف انجام گرفته است. برای عکس‌برداری از محدوده ۴۰ در ۴۰ سانتی‌متر مطابق شکل (۶) استفاده شده است. در این شکل



شکل ۶- تصویر از بالای قاب چوبی ۴۰ در ۴۰ سانتی‌متر همراه با نقاط واسنجی در چهار گوشه آن برای ۵ محل مختلف رودخانه



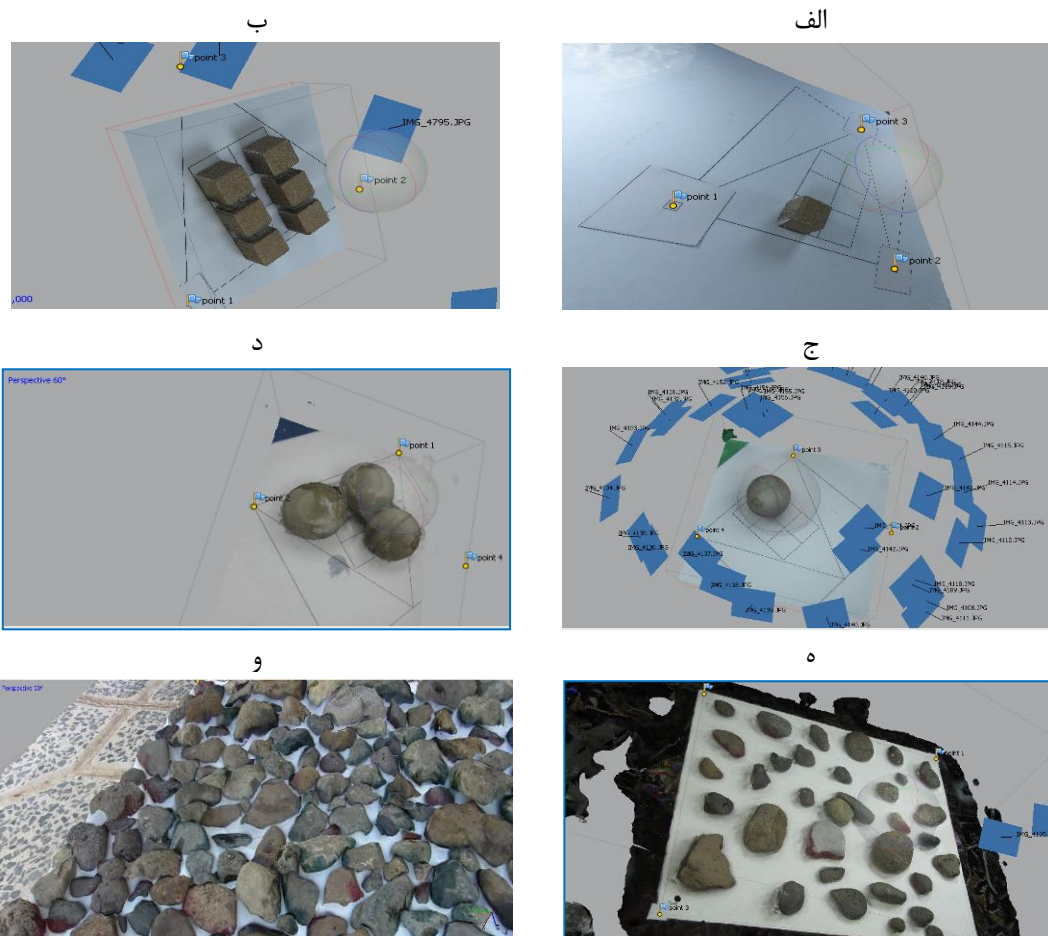
## نتایج و بحث

بعد از تصویربرداری از جبهه‌های مختلف حول اجسام مورد اشاره، با تجزیه و تحلیل داده‌های گردآوری شده، نسبت به ساخت مدل رقومی ارتفاعی در نرم‌افزار Agisoft پرداخته و نتایج مدل‌های اجرا شده تک مکعب، دسته مکعب، تک گوی، دسته گوی و صفحات دارای سنگ‌دانه‌های با فاصله و بدون فاصله تحلیل گردیدند. عکس‌های برداشتی جهت استفاده و وارد کردن در نرم‌افزار باید به نحوی باشند که یک دید ۳۶۰ درجه از محیط را فراهم نمایند و در تمامی عکس‌ها نقاط مارکر قابل مشاهده و شناسایی باشند. میزان هم‌پوشانی عکس‌ها نیز از اهمیت بالایی برخوردار است و توصیه می‌شود حداقل عکس‌ها ۳۰ درصد هم‌پوشانی داشته باشند.

یکی از اطلاعات مهم و اساسی در تعیین ساختار بستر، تعداد نقاط مارکر می‌باشد که این نقاط به عنوان نقاط مبنا برای تعیین مختصات سایر نقاط در ابر نقاط مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالت کلی حداقل ۳ نقطه مارکر برای تعیین مختصات ارتفاعی نقاط لازم است و بالاتر از آن به شرط تعیین

دقیق آنها می‌تواند اثر مثبت داشته باشد. اما اگر حداقل خطایی برای تعیین نقاط مارکر وجود داشته باشد، بر نتایج اثر محسوسی دارد. در این مطالعات در اغلب اشکال از ۴ نقطه مارکر استفاده شده است.

ابزار مورد استفاده برای تحلیل داده‌ها، کدنویسی در نرم‌افزار متلب (برای اشکال هندسی منظم) و دستگاه لیزر اسکنر (برای سنگ‌دانه‌ها) بوده است. در شکل (۷) مدل‌های ساخته شده مختلف با نرم‌افزار Agisoft که مربوط به تصاویر شکل (۳) می‌باشند نشان داده شده است. در این تصاویر، مدل‌های ساخته شده برای تک مکعب و دسته مکعب با تعداد ۲۲ و ۳۵ عکس تهیه شدند. مدل‌های ساخته شده برای تک گوی و دسته گوی با تعداد ۴۹ و ۱۷ عکس تهیه شدند. مدل‌های ساخته شده برای صفحات سنگ‌دانه با فاصله و بدون فاصله نیز با تعداد ۱۱ و ۱۰ عکس تهیه شدند. همان‌طور که در تصاویر مزبور دیده می‌شود، از لحاظ ظاهری شش مدل ساخته شده در نرم‌افزار Agisoft از کیفیت بالایی برخوردار می‌باشند و مقایسه میزان خطای آنها در ادامه انجام شده است.



شکل ۷- مدل ساخته شده سه بعدی با روش SFM برای: الف) تک مکعب، ب) دسته مکعب، ج) تک گوی، د) دسته گوی، ه) سنگ‌دانه با فاصله و و) سنگ‌دانه بدون فاصله

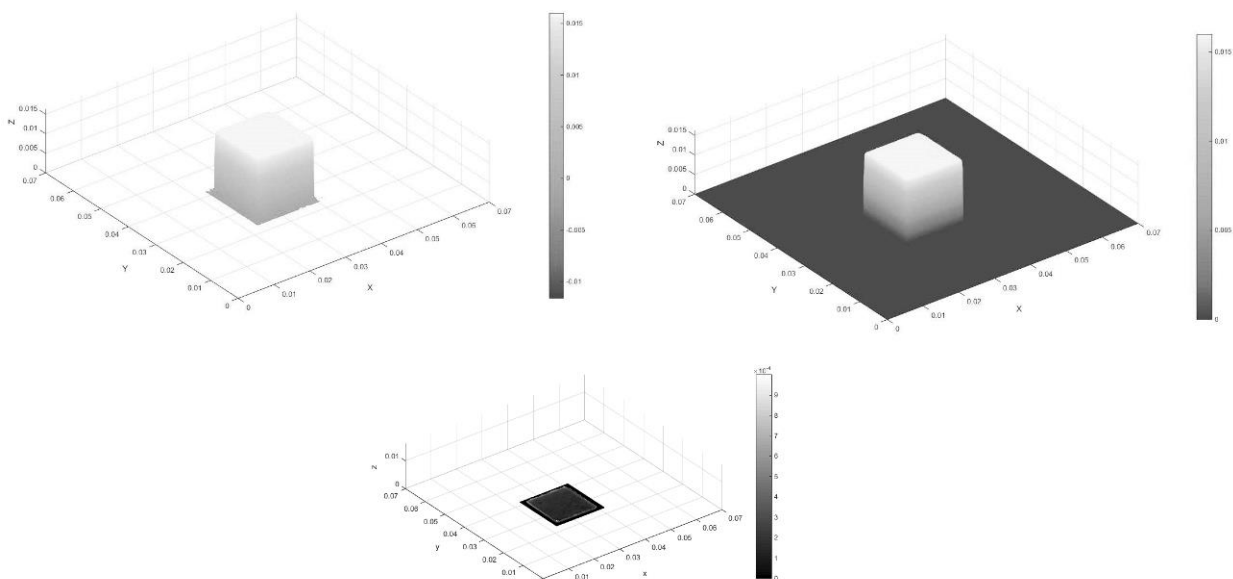
است. مقادیر گزارش شده بیانگر این واقعیت است که این روش با دقت بالایی می‌تواند بستر را در شرایطی که چند مکعب با فاصله از یکدیگر قرار گرفته‌اند به خوبی مدل کند.

در شکل (۱۰) نیز مدل واقعی تک گوی همراه با مدل رقومی ساخته شده با روش ساختار ناشی از حرکت و میزان اختلاف آنها با یکدیگر نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، در این حالت نیز اختلاف بین نتایج مدل رقومی و مدل واقعی بسیار کم (۰/۷۶ میلی‌متر) می‌باشد و لذا می‌توان عنوان نمود این روش به خوبی توانسته مدل رقومی بستر را با فرض وجود سنگ‌دانه‌های کاملاً مدور و کروی مدل کند. متوسط خطای این روش در تعیین مدل رقومی بستر در جدول (۱) ارائه شده است که بیانگر دقت خوب و قابل قبول مدل سه بعدی ایجاد شده با روش پیشنهادی در شرایط تک گوی می‌باشد.

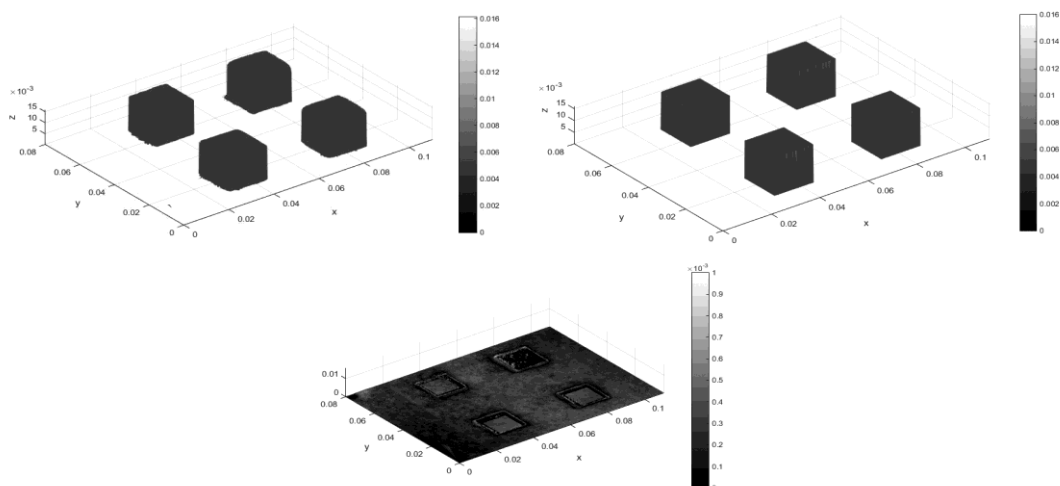
در شکل (۱۱) مدل واقعی دسته گوی همراه با مدل رقومی ساخته شده با روش ساختار ناشی از حرکت و میزان اختلاف مدل رقومی با مدل واقعی نمایش داده شده است. در این حالت هم اختلاف بین نتایج مدل رقومی و مدل واقعی بسیار کم (۰/۶۷ میلی‌متر) می‌باشد و می‌توان عنوان نمود این روش به خوبی توانسته مدل رقومی بستر را حتی در شرایطی که چندین سنگ‌دانه مدور و کروی به صورت بهم چسبیده باشند مدل کند. متوسط خطای این روش در تعیین مدل رقومی بستر همراه با انحراف معیار خطاها نیز در جدول (۱) ارائه شده است.

در این قسمت نتایج حاصل از مدل اشکال منظم به روش SFM و کدنویسی معادلات ریاضی در متلب مقایسه شده است. ارزیابی نتایج حاصل از این قسمت پیش‌نیاز ورود به مرحله بعدی برای سنجش دقت روش در تهیه مدل هندسی اشکال هندسی نامنظم خواهد بود. در شکل (۸) مدل‌های واقعی و رقومی ساخته شده از تک مکعب همراه با اختلاف آنها که بیانگر دقت روش SFM می‌باشد، نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، اختلاف بین نتایج مدل رقومی و مدل واقعی بسیار کم (۱ میلی‌متر) می‌باشد و لذا می‌توان عنوان نمود این روش به خوبی توانسته مدل رقومی المان‌های تیز گوشه مکعبی را مدل کند. به منظور تعیین بهتر دقت این روش متوسط خطای این روش در تعیین مدل رقومی بستر همراه با انحراف معیار خطاها در جدول (۱) ارائه شده است. مقادیر گزارش شده بیانگر این واقعیت است که این روش با دقت بالایی می‌تواند بستر را در شرایط تک مکعب مدل کند.

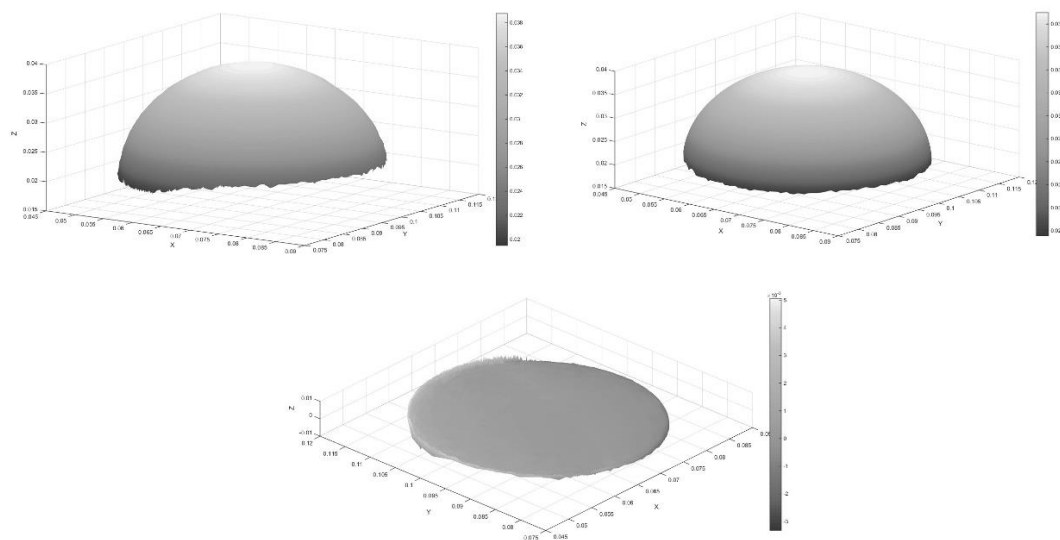
در شکل (۹) مدل واقعی دسته مکعب‌ها همراه با مدل رقومی ساخته شده با روش ساختار ناشی از حرکت و میزان اختلاف مدل رقومی با مدل واقعی نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، اختلاف بین نتایج مدل رقومی و مدل واقعی بسیار کم (۱/۱ میلی‌متر) می‌باشد و باز هم می‌توان به دقت بالای این روش در مدل‌سازی سه بعدی قطعات تیز گوشه اذعان کند. متوسط خطای این روش در تعیین مدل رقومی بستر همراه با انحراف معیار خطاها در جدول (۱) ارائه شده



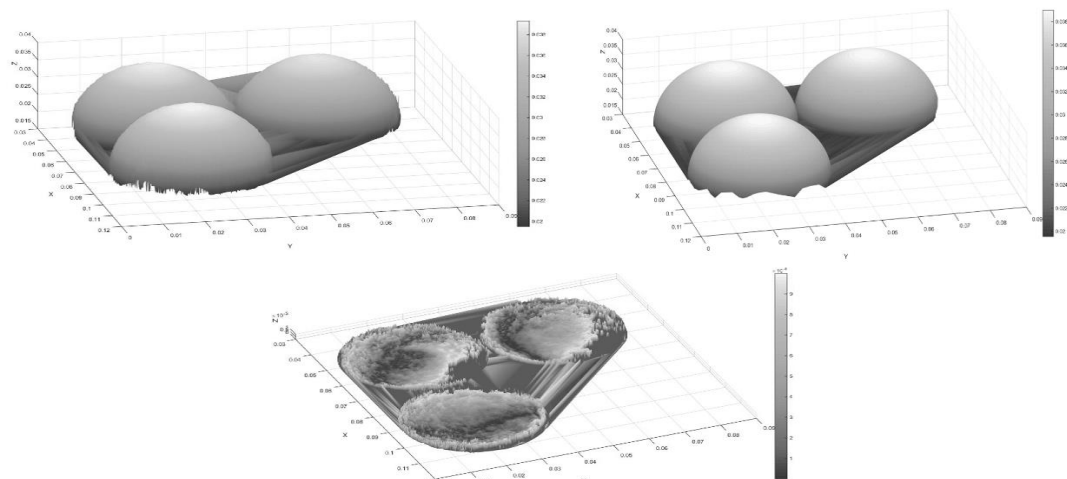
شکل ۸- (راست) مدل واقعی از تک مکعب، (چپ) مدل رقومی تک مکعب به روش SFM، (پایین) اختلاف نتایج مدل رقومی تک مکعب به روش SFM با مدل واقعی



شکل ۹- (راست) مدل واقعی از گروه مکعب، (چپ) مدل رقومی گروه مکعب به روش SFM، (پایین) اختلاف نتایج مدل رقومی دسته مکعب به روش SFM با مدل واقعی



شکل ۱۰- (راست) مدل واقعی از تک گوی (کره)، (چپ) مدل رقومی تک گوی به روش SFM، (پایین) اختلاف نتایج مدل رقومی تک گوی به روش SFM با مدل واقعی



شکل ۱۱- (راست) مدل واقعی از دسته گوی، (چپ) مدل رقومی دسته گوی به روش SFM، (پایین) اختلاف نتایج مدل رقومی دسته گوی به روش SFM با مدل واقعی

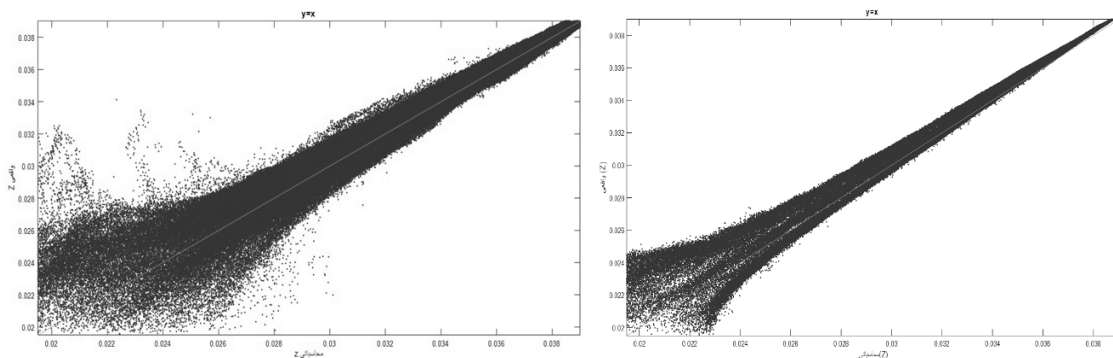
سطح فوقانی مکعب‌ها صرفاً دارای یک مقدار ثابت  $Z$  واقعی می‌باشند که با توجه به دقت بالای مدل، پراکنش چندانی مشاهده نمی‌شود.

بعد از ساخت مدل سه‌بعدی اشکال منظم و مقایسه‌های فوق، با استفاده از کولیس و لیزر اسکنر ابعاد ارتفاعی ( $Z$ ) قسمت های متعددی از سنگ‌دانه‌های با فاصله و بدون فاصله اندازه گیری گردید و نتایج آن با مقادیر حاصل از مدل SFM برای مختصات متناظر ( $x,y$ ) مقایسه گردید. با توجه به نامنظم بودن هندسه سنگ‌دانه‌ها و تعداد بسیار زیاد ابرنقاط حاصل از دو روش لیزر اسکنر و SFM، از آنجا که هدف از توسعه این روش ساده‌سازی فرایند دست یافتن به قطر معادلی برای تعیین زبری هیدرولیکی می‌باشد و نه پیچیده‌سازی و افزایش تعداد نقاط رقومی سطح ذرات، از مقایسه نقطه به نقطه ابرنقاط حاصله صرف‌نظر و صرفاً دقت دو روش در برخی نقاط تصادفی مقایسه شد. این مقایسه برای شرایط عدم دسترسی به لیزر اسکنر، با یک عدد کولیس نیز تکرار و نتایج هر سه روش با یکدیگر مقایسه شدند. از این‌رو، تعداد ۵۰ نقطه تصادفی از ابر نقاط حاصل از مدل SFM با اندازه‌گیری‌های دستگاه لیزر اسکنر و کولیس مقایسه شدند (جدول ۲).

جدول ۱- خطای برآوردی در تعیین مدل‌های رقومی مختلف اشکال هندسی

منظم به روش ساختار ناشی از حرکت SFM	
نوع بستر	خطای متوسط (میلی‌متر)
تک مکعب	۱
گروه مکعب	۱/۱
تک گوی	۰/۷۶
گروه گوی	۰/۶۷

در شکل (۱۲) به منظور بررسی بیشتر خطاهای مشاهداتی برای حالت تک گوی و دسته گوی، مقادیر واقعی و مقادیر مشاهداتی نقاط ارتفاعی در مختصات مختلف ( $x,y$ ) به ترتیب برای تعداد ۲۸۷۵۰۰۰ و ۳۴۳۲۰۰۰ نقطه از ابر نقاط حاصل از نرم‌افزار به‌صورت نمودار پراکنندگی نشان داده شده است. بر اساس نتایج بررسی آماری، ضریب همبستگی ( $R^2$ ) حاصله به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۳ بوده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، پراکنش نقاط در کلیه حالت‌ها به خط نیمساز نزدیک می‌باشد و این نمودار تأیید می‌کند که روش SFM به‌خوبی اشکال هندسی منظم کروی را مدل کرده است. لازم به توضیح است که این بررسی صرفاً برای حالت گوی‌ها انجام شده است زیرا در حالت مکعب، نقاط مختلف واقع در



شکل ۱۲- نتایج نمودار پراکنندگی نتایج مدل سه‌بعدی SFM با مقادیر واقعی بر اساس معادلات حاکم (محور افقی  $Z$  محاسباتی، محور قائم  $Z$  واقعی): (راست) تک گوی، (چپ) دسته گوی

در جدول (۲)، به‌منظور تعیین بهتر دقت این روش‌ها، متوسط خطای روش‌های واقعی (لیزر و کولیس) به‌صورت دو به دو با مقادیر متناظر روش SFM مقایسه شده است. برداشت‌های حاصل از لیزر اسکنر و کولیس به‌عنوان مدل واقعی و برداشت‌های SFM به‌عنوان برداشت رقومی فرض شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در سنگ‌دانه‌های با فاصله، اختلاف بین نتایج مدل رقومی (SFM) و مقادیر واقعی (لیزر) مقایسه شده، بسیار کم (۰/۲۱ میلی‌متر) و همچنین اختلاف بین نتایج مدل رقومی (SFM) و مقادیر واقعی (کولیس)، بسیار

کم (۱ میلی‌متر) می‌باشد و لذا می‌توان عنوان نمود این روش به‌خوبی توانسته مدل رقومی بستر مصنوعی متشکل از سنگ‌دانه را نیز مدل کند. در سنگ‌دانه‌های بدون فاصله نیز اختلاف بین نتایج مدل رقومی (SFM) و مقادیر واقعی (لیزر) بسیار کم (۰/۱۹) و همچنین اختلاف بین نتایج مدل رقومی (SFM) و مقادیر واقعی (کولیس) همانند حالت با فاصله حدود ۱ میلی‌متر می‌باشد و لذا می‌توان عنوان نمود این روش به‌خوبی توانسته مدل رقومی بستر را مدل کند. همان‌طور که در جدول ارائه خطاها مشاهده می‌شود، خطای محاسبه‌شده به‌وسیله‌ی ابزار

می‌توانند در بین سنگ‌دانه‌ها نشسته و بستر پیچیده‌تری با ساختار متفاوتی را ایجاد نمایند. از طرف مقابل پدیده چسبیدن و هم‌آوری نیز می‌تواند بر نتایج مؤثر باشد و ساختار متفاوتی را ایجاد نماید. این موارد از اهمیت بالایی برخوردار هستند که باید در مطالعات آتی مورد بررسی قرار گیرند.



شکل ۱۳- تصاویر مدل‌های ساخته‌شده به روش SFM در نرم‌افزار

Agisoft

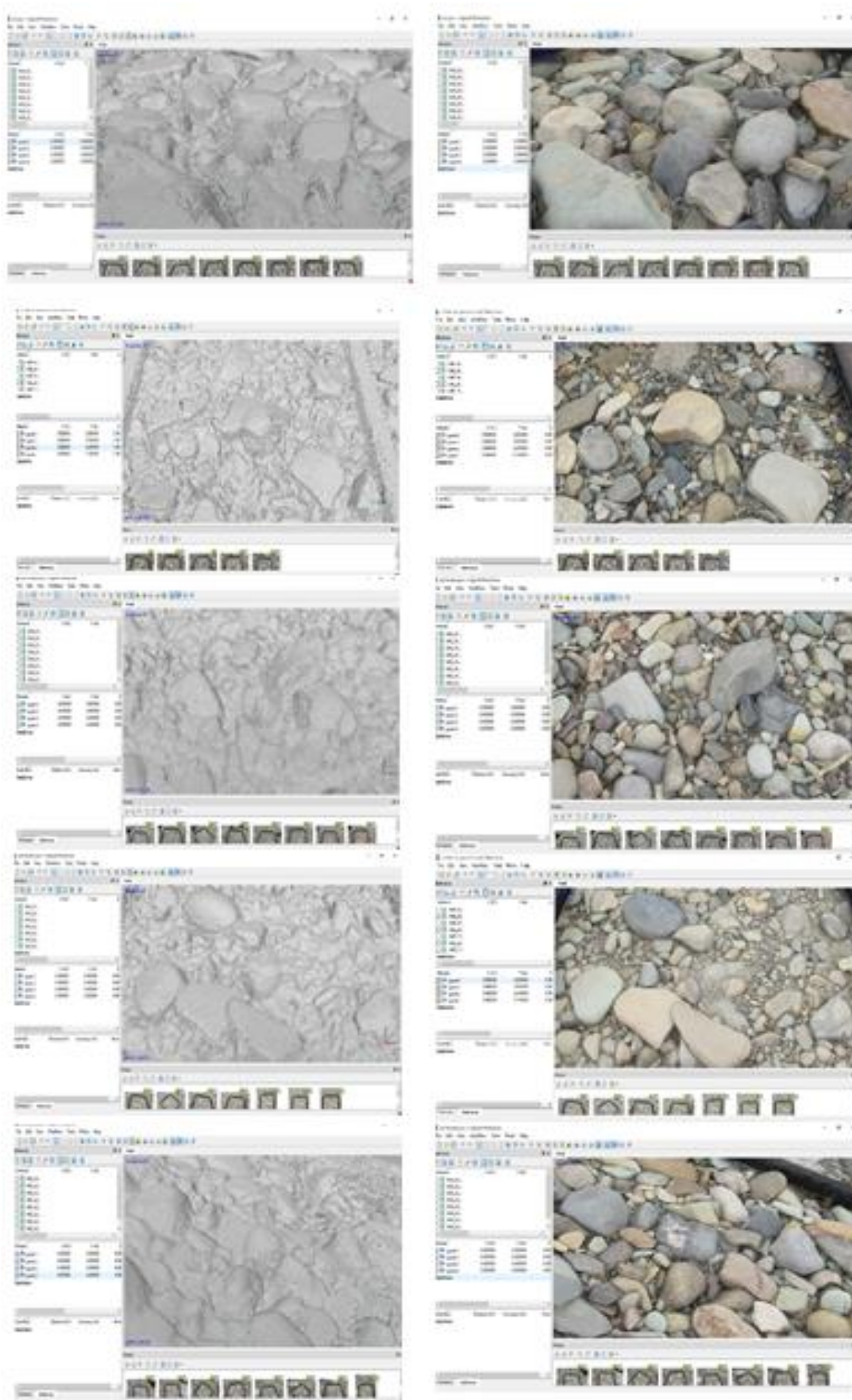
کولیس بالاتر از دستگاه لیزر اسکنر می‌باشد که این تفاوت خطا به دلیل وارد شدن خطای دید انسان در برداشت‌ها به‌وسیله کولیس می‌باشد.

جدول ۲- خطای برآوردی در تعیین مدل‌های رقومی مختلف سنگ‌دانه‌های با فاصله و بدون فاصله به روش ساختار ناشی از حرکت

نوع بستر	خطای متوسط روش SFM و دستگاه لیزر (میلی‌متر)	خطای متوسط روش SFM و کولیس (میلی‌متر)
سنگ‌دانه‌های با فاصله	۰/۲۱	۱
سنگ‌دانه‌های بدون فاصله	۰/۱۹	۱

در ادامه این تحقیق، بعد از اطمینان از نتایج تمام آزمایش‌های صحت سنجی اولیه برای شش حالت فوق‌الذکر، به استفاده از روش ساختار ناشی از حرکت در بستر واقعی رودخانه کردن اقدام شد. مطابق شکل‌های (۵) و (۶)، برداشت تصویر از ۵ نقطه مختلف از بستر رودخانه کردن انجام شده و همانند فوق کلیه مراحل تهیه مدل سه‌بعدی رقومی با روش SFM انجام شده است که در ادامه نتایج مربوط به این نقاط ارائه شده است. لازم به ذکر است که برای ساخت مدل نقاط مختلف به ترتیب از ۸، ۵، ۸، ۷ و ۸ عکس استفاده شده است. در شکل (۱۳)، تصاویر مدل‌های سه‌بعدی تهیه‌شده با روش SFM مربوط به تمام نقاط برداشتی از رودخانه کردن نشان داده شده است. همچنین در شکل (۱۴)، تصاویری از مقاطع مشخصی از مدل سه‌بعدی همراه با ابر نقاط متناظر آن که توسط روش SFM تهیه شده، به ترتیب از بالا به پایین برای نقاط ۱ الی ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمام نقاط نرم‌افزار به‌خوبی توانسته توپوگرافی بستر را برداشت کند و امکان استفاده از آن برای تعیین زبری واقعی بستر آبراهه در مطالعات هیدرولیکی و رسوبی وجود دارد. به عبارت ساده تر، با برداشت تعداد نقاط بیشتر یا دامنه بزرگتری از بستر توسط دوربین‌های با میدان دید وسیع‌تر، امکان بدست آوردن هندسه دقیق بستر آبراهه (ارتفاع نقطه به نقطه ذرات) وجود داشته و می‌توان از آن برای تعیین زبری واقعی‌تر بستر بر مبنای روش‌های مختلف آماری استفاده نمود.

با توجه به نتایج مشاهداتی می‌توان به‌دقت خوب این روش در تولید نقشه رقومی (ابر نقاط) بستر رودخانه نیز پی برد. با این وجود باید به این واقعیت اشاره نمود که نتایج مشاهداتی مربوط به شرایط ایده‌آلی است که تنها سنگ‌دانه‌های شنی وجود دارد. در اغلب رودخانه‌ها ساختار بستر پیچیده‌تر بوده و تنها از سنگ‌دانه‌های شنی تشکیل نشده است. به‌عنوان نمونه سنگ‌دانه و رسوبات ریزدانه



شکل ۱۴- (راست) تصاویر مقاطعی از مدل‌های ساخته‌شده رقومی، (چپ) تصاویر ابر نقاط متناظر مدل رقومی

## نتیجه‌گیری

۱- با وجود مشاهده نتایج مطلوب در بسیاری از سناریوهای طراحی اولیه، این روش نتوانست مدل رقومی دسته گوی از جنس شیشه یا سایر مواد دارای بازتاب نور را به خوبی تهیه نماید. مهم‌ترین دلیل عدم کارایی این روش در تعیین مدل رقومی برخی مواد، جنس ماده تشکیل دهنده می‌باشد. در حقیقت جنس مواد بایستی به صورتی باشد که بازتاب نور نداشته باشد.

۲- مقایسه نتایج مشاهده‌شده برای حالت‌های تکی و نیز گروهی اشکال هندسی منظم (مکعب و گوی) نشان داد که روش ساختار ناشی از حرکت با دقت بسیار بالایی (حدود ۰/۶۷ تا ۱/۱ میلی‌متر) می‌تواند مدل رقومی بستر را بسازد. این تفاوت در مقدار خطاها به دلیل وارد شدن خطای انسانی، متفاوت بودن بسترهای مورد مطالعه و متفاوت بودن ابزارهای سنجش بوده است.

۳- نتایج بررسی‌ها نشان داد که این روش توانسته مدل رقومی صفحات دارای سنگ‌دانه‌های با فاصله و بدون فاصله را که در ۵۰ نقطه تصادفی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، با اختلاف بسیار کمی (۰/۱۹ تا ۱ میلی‌متر) با مقادیر اندازه‌گیری شده با دستگاه لیزر اسکنر و کولیس مدل‌سازی نماید.

۴- نتایج نهایی از کاربرد روش در بستر رودخانه کردان، مؤید دقت خوب این روش در تولید نقشه رقومی (ابر نقاط) بستر رودخانه است که با استفاده از مختصات سه‌بعدی نقاط بستر می‌توان از روش‌های آماری- تجربی برای تخمین زبری بستر آبراهه‌ها در مطالعات هیدرولیکی و رسوبی استفاده نمود.

با توجه به دشوار و زمان‌بر بودن روش‌های مختلف تعیین ضریب زبری و اندازه ذرات به‌خصوص در مطالعه میدانی مسیر یک رودخانه، استفاده از روشی برای تعیین ضریب زبری ذرات در بستر رودخانه‌ها که ضمن صرف زمان کمتر، از دقت مطلوبی برخوردار بوده و دیدگاه کارشناسی افراد بر روی نتایج آن چندان اثرگذار نباشد، ضروری به نظر می‌رسد. در مطالعه حاضر به بررسی کاربرد یکی از روش‌های فتوگرامتری تحت عنوان روش ساختار ناشی از حرکت که در تعیین مدل رقومی سه‌بعدی بسترهای شنی رودخانه‌ها کاربرد دارد، پرداخته شد. نتایج حاصل از این روش (بستر رقومی) به‌عنوان اطلاعاتی ارزشمند جهت تعیین زبری بستر بر مبنای اندازه نقطه به نقطه ارتفاع بستر بکار می‌رود.

به منظور بررسی و تعیین قابلیت‌های این روش، ابتدا اشکال منظم متشکل از مکعب و گوی (کره) در حالت تکی و در حالت گروهی که چند جسم در کنار هم هستند، مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه مدل رقومی دو سری صفحات چوبی که بر روی آن سنگ‌دانه‌های شنی جمع‌آوری شده از بستر آبراهه در دو حالت بدون فاصله و با فاصله چسبانده شده، مورد بررسی قرار گرفتند. سپس برداشت‌هایی از ۵ نقطه متفاوت از بستر واقعی رودخانه کردان انجام و نتایج حاصل از مدل‌سازی آنها به روش ساختار ناشی از حرکت مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. بر این اساس، نتایج اصلی حاصل از آزمایش‌ها، تصویربرداری‌های میدانی و تحلیل‌های صورت‌گرفته به‌صورت زیر می‌باشد:

## REFERENCES

- Aberle, J., and Nikora, V. (2006). Statistical properties of armored gravel bed surfaces. *Water Resources Research*, 42, W11414.
- Afshin, Y. (2004). *Iran Rivers*, Vols. 1-2, Ministry of Energy, Jamab Consulting Engineers Company, Tehran.
- AgiSoft. (2012). *AgiSoft PhotoScan User Manual: Professional Edition. Version 0.9.0*. Retrieved June 15, 2012 from: <http://www.agisoft.ru/products/photoscan/professional/>.
- Bathurst, J.C. (1985). Theoretical aspects of flow resistance, in *Gravel-Bed Rivers*, edited by R.D. Hey, J.C. Bathurst, and C.R. Thorne, pp. 83-108, John Wiley, New York, 1985.
- Bomminayun, S. and Stoesser, T. (2011). Turbulence Statistics in an Open-Channel Flow over a Rough Bed, *J. Hydraul. Eng.*, 137(11), 1347-1358.
- Bray, D.I. (1985). Flow resistance in gravel-bed rivers, in *Gravel-Bed Rivers*, edited by R.D. Hey, J.C. Bathurst, and C.R. Thorne, pp. 109-132, John Wiley, New York.
- Carbonneau, P., Fonstad, M.A., Marcus, W.A. and Dugdale, S.J. (2012). Making riverscapes real. *Geomorphology*, 137, 74-86. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.09.03033.
- Dietrich, J.T., 2014. Applications of structure-from-motion photogrammetry to fluvial geomorphology, PhD Thesis, Department of Geography, University of Oregon, USA.
- Dugdale, S.J., Carbonneau, P.E., Campbell, D. (2010). Aerial photosieving of exposed gravel bars for the rapid calibration of airborne grain size maps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 627-639.
- Esmaeelpour, M. (2009). Evaluation of a method for justifying video-based video frames for 3D image reconstruction, M.Sc. Thesis, Department of Surveying Engineering, University of Tehran. (In Farsi)
- Fausch, K.D., Torgersen, C.E., Baxter, C.V., Li, H.W. (2002). Landscapes to Riverscapes: Bridging the Gap between Research and Conservation of Stream Fishes. *BioScience*, 52, 483-498.

- Fonstad, M.A. and Marcus, W.A. (2010). High resolution, basin extent observations and implications for understanding river form and process. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 680–698.
- Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L., Carbonneau, P.E. (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement, *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4), 421-430.
- Furbish, D.J. (1987). Conditions for geometric similarity of coarse streambed roughness, *Math. Geol.*, 19(4), 291-307.
- Griffiths, G.A. (1981). Flow resistance in coarse gravel-bed rivers, *J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 107(HY7), 899-918.
- Hey, R.D. (1979). Flow resistance in gravel-bed rivers, *J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 105, 365-379.
- James, M.R., and Robson, S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application, *Journal of Geophysical Research, Earth Surface*, 117, F03017.
- Javernick, L., Brasington, J., Caruso, B.S. (2014). Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry, *Geomorphology*, 213, 166–182.
- Kirchner, J.W., Dietrich, W.E., Iseya, F. and Ikeda, H. (1990). The variability of critical shear stress friction angle and grain protrusion in water worked sediments, *Sedimentology*, 37, 647- 672.
- Micheletti, N., Chandler, J.H., Lane, S.N. (2014). Structure from Motion (SFM) Photogrammetry, BSG, ISSN 2047-0371.
- Mohajeri S.H. (2014a). Hydrodynamics of gravel bed flows (Implications in colmation). PhD Thesis, Department of Civil, Mechanics and Environmental Engineering, University of Trento and School of Geography, Queen Mary University of London.
- Mohajeri, S.H. (2014b). An Investigation on Gravel-Bed Roughness Characterization, *Journal of Hydraulics*, 9(4), 73-86. (In Farsi)
- Mohajeri, S.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.
- Robert, A. (1988). Statistical properties of sediment bed profiles in alluvial channels, *Math. Geol.*, 20(3), 205-225.
- Robert, A. (1990). Boundary roughness in coarse-grained channels, *Prog. Phys. Geogr.*, 14(1), 42-70.
- Shapiro, L. and Stockman, G. (2001). *Computer Vision*. Prentice Hall. ISBN 0-13-030796-3.
- Ullman, S. (1979). *The Interpretation of Structure from Motion*. The royal society. Available from: <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/203/1153/405>
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser N.F., Hambrey, M.J., and Reynolds, J.M. (2012). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Whiting, P.J. and Dietrich, W.E. (1990). Boundary shear stress and roughness over mobile alluvial beds, *J. Hydraul. Eng.*, 116, 1495-1511.
- Yamazaki, D., O’Loughlin, F., Trigg, M.A., Miller, Z.F., Pavelsky, T.M., Bates, P.D. (2014). Development of the Global Width Database for Large Rivers. *Water Resources Research*, 50, 3467–3480. DOI: 10.1002/2013WR014664.