

# Laboratory Experimental Measuring speed and WaveLength of Impact Waves Generated by Mass Movement in Dam Reservoirs Using Laser Surface Profilometry

Yasser Shakeri<sup>1</sup>, Ahmad Darudi<sup>2</sup>, Jalal Bazargan<sup>3</sup>

1- PhD Candidate of Laser Optics, Department of Physics, Faculty of Science, University of Zanjan.

2- Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Zanjan.

3- Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan.

\* [jbazargan@znu.ac.ir](mailto:jbazargan@znu.ac.ir)

## Abstract

**Introduction:** Shock waves are, in fact, a type of tsunami phenomenon generated by the transfer of momentum from a landslide or collapsing mass onto a water surface. Prominent examples include the 1963 Vajont Dam landslide in Italy, the 1958 Lituya Bay tsunami, and Papua New Guinea landslide.

prediction of the velocity, amplitude, and propagation behavior of the waves caused by flood or landslides into dam reservoirs or intake basins, can provide significant assistance dam construction and in determining the amount of reinforcement needed to withstand such waves.

Conventional techniques for measuring velocity, employ contact-based instruments, like propeller-type velocimeters and electromagnetic current meters. However, due to direct water contact, these methods are prone to mechanical failure and produce inaccurate results.

non-contact approaches such as Doppler techniques, particle displacement tracking technique, and image processing methods—are also used to measure water velocity, but they bring their own complexities.

The proposed method is the use of laser surface imaging. In this method, a laser beam sweeps the water surface, and a camera with a high frame rate captures where the laser beam hits the water surface. Therefore, the wave speed and amplitude are measured along a line on the water surface. This method requires a very fast camera, and the calibration of the laboratory system is complex.

**Experimental and Theoretical Principles:** In this research, using the laser surface imaging method, shock wave parameters triggered by fall of a mass into a laboratory sized dam are being studied. In this method an organized array of laser beams is emitted perpendicular to water flow level to the water with a DSLR digital camera capturing the scattered light where the laser beams hit the water surface. The experiments are in a 12.5m length, 6.5m width and 1m height pool. To create waves a 200kg mass on a 60-degree slope at the height of 3 meters plunges into the water reservoir. The mass then is pulled up again with the help of an overhead crane. In other words, a network of

points where the lasers hit the water is defined and change in the water surface height will result in displacement in the laser impact location. For calculating amplitude of wave displacement in Per unit length, multiplication of displacement in pixel by a Calibration coefficient is employed. In laser surface imaging system, glass blade is used as laser beam splitter to create a number of laser beams from a laser source. the Calibration coefficient can be calculated using two methods, first one by using the system geometry and the second one by experimental method.

In the first method measuring the camera's distance from the laser beams and the viewing angle of the camera is needed which is difficult and comes with error so the second method is applied. In the experimental method a ruler is placed along side every laser beam in the empty water reservoir and is captured by a camera. Calibration coefficient is calculated by dividing the distance between scales on the ruler in length by the same extent on the image in pixel.

After filling the water reservoir, the path of laser beams in water, light spots on the pool floor and on the water surface are visible. The goal is to measure the water level height using light spots on the water surface. In order to detect the spots more easily, it is better to adjust the camera before Calibration in a way that the light spots on the pool floor are distant enough from the light spots on the water surface in the Camera Frame. Water wave is described with Mechanical motion model which defines the geometry position of the in-phase waves as wavefront. In other words, Time interval of points on the wavefront to the generation point are the same. Measuring the change of wave amplitude at the location of each laser beam, determines the amplitude changes with respect to time. With difference between the times wave reaches to network points, Wave propagation velocity vector is obtained.

**Results and Discussion:** Wave velocity value obtained by using the laser surface imaging method is 2.67m/s. the calculated wave velocity value from the gravitational wave equation  $C = \sqrt{gh}$  is 2.71m/s. that is to say the error value is 1.48 percent which indicates the high accuracy of the proposed method.

**Conclusion:** The result of this research indicates that the laser surface imaging method in addition to its accuracy is also easier and significantly cheaper in comparison to other methods. To put it another way the proposed method has appropriate accuracy and high performance to determine the wave parameters in the dam reservoir due to mass collapse and, consequently, other analyses related to the impact of the wave generated on earthfill dams.

**Keywords :** Mass fall, impact waves, wavelength, wave speed, laser surface profilometry.

# اندازه‌گیری آزمایشگاهی سرعت و شکل موج امواج ضربه‌ای ناشی از سقوط توده در مخازن سدها با استفاده از روش سطح‌نگاری لیزری

یاسر شاکری<sup>۱</sup>، احمد درودی<sup>۲</sup>، جلال بازرگان<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری فیزیک گرایش اپتیک ولیزر، دانشگاه زنجان.

۲- دانشیار، گروه فیزیک دانشکده علوم، دانشگاه زنجان.

۳- استاد، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان.

\* jbazargan@znu.ac.ir

**چکیده:** بررسی خصوصیات امواج ناشی از سقوط توده‌های سنگی دیواره مخازن سدها از اهمیت ویژه‌ای در طراحی استحکام و جلوگیری از شکستن سد برخوردار است. طول، ارتفاع و سرعت موج ایجاد شده به دلیل سقوط توده‌های سنگی بر اثر عوامل مختلف، از جمله عوامل تاثیرگذار در جریان آب عبوری از تاج سد است. به همین دلیل در پژوهش حاضر که در دانشگاه زنجان ایران انجام شد، درون مخزنی به طول ۱۲/۵ متر، عرض ۶/۵ و ارتفاع ۱ متر، پارامترهای مذکور موج بر اثر سقوط توده در این مخزن برای اولین بار با استفاده از روش سطح‌نگاری لیزری، اندازه‌گیری شده است. آزمایش‌ها با استفاده از توده لغزشی به وزن ۲۰۰ کیلوگرم و برای عمق آب ۷۵ سانتی متری انجام شد. چیدمان سطح نگار از دو آرایه متشکل شده است که در هر آرایه نور لیزر در ابتدای آرایه توسط ۱۵ تیغه شیشه‌ای بصورت عمود بر سطح آب می‌تابد. دو آرایه (با فاصله ۷۶ سانتی متری از یکدیگر) بصورت موازی قرار گرفته اند به گونه ای که تیغه‌ها روبروی هم قرار گرفته اند. پس از سقوط توده قرار داده شده بر روی سطح شیبدار، با استفاده از لیزرهای مذکور و دوربین *DSLR*، تغییرات ارتفاعی موج ایجاد شده بر حسب زمان تصویربرداری شده است. سپس با استفاده از تصویرهای مذکور و روش سطح‌نگاری لیزری، ابتدا ارتفاع موج اندازه‌گیری شده و سپس با استفاده از تغییرات آن، طول موج و پس از آن با توجه به اندازه‌گیری فاصله زمانی عبور موج از مقابل دو ردیف آرایه لیزر، سرعت موج نیز به دست آمده است. شایان ذکر است که سرعت تصویربرداری دوربین مذکور برابر با ۲۵ فریم بر ثانیه می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی بیانگر آنست که مقدار سرعت موج اندازه‌گیری شده با روش مذکور برابر با ۲/۶۷ متر بر ثانیه بوده و این مقدار در حالت استفاده از رابطه سرعت موج ( $C = \sqrt{gh}$ ) برابر با ۲/۷۱ محاسبه شده که بیانگر اختلاف ۱/۴۸ درصدی و دقت بالای روش اندازه‌گیری پیشنهادی می‌باشد.

**کلیدواژگان:** سقوط توده، امواج ضربه‌ای، طول موج، سرعت موج، روش سطح‌نگاری لیزری.

## ۱- مقدمه

امواج ضربه‌ای در واقع یک نوع از امواج گذرا هستند که مهم‌ترین عامل ایجاد این امواج، انتقال تکانه از توده‌ی لغزشی به سطح آب است. این پدیده همواره در سراسر جهان با خسارات زیادی همچون خرابی سد و سازه‌هایی چون نیروگاه‌های برق آبی و یا سرریز شدن سد که می‌تواند تهدیدی برای ساکنان باشد، همراه بوده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به رویداد لغزش در مخزن سد وایونت در

ایتالیا و خلیج لیتویا در کانادا و گینه نو اشاره کرد (Siebert et al., 2010) شناخت دقیق و علمی این پدیده و پارامترهای مؤثر بر آن در محافظت از تأسیسات و منابع انسانی و زیست‌محیطی اطراف دریاچه‌ها و همچنین پایین دست مخزن سدها، نقش بسزایی دارد. در ساخت سدها و آبگیرها مسئله استحکام سازه در برابر موج ناشی از سیلاب و موج‌های ناگهانی بر اثر سقوط صخره‌ها و بهمن به داخل مخازن آن‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به عبارتی، ریزش

Bin Asad et al. و Gunawan et al. 2012 و al. 2002 و 2019 و Fang et al. 2019 و Bai et al. 2019 و Scarano و et al. 2013). همچنین با پیشرفت این روش از چگالی جریان نوری نیز استفاده شد (Milan et al. 1993 و Xiaoping et al. 1993 و Heng et al. 2019) که این روش دارای پیچیدگی بوده و یا نیاز به هزینه‌های بالا و امکانات پیشرفته دارد.

در این پژوهش با استفاده از روش سطح نگاری لیزری، بصورت تجربی پارامترهای موج ضربه ای ایجاد شده بر اثر سقوط توده مورد بررسی قرار گرفته است. مدلسازی عددی سه بعدی این پدیده قبلا بررسی شده است (۱۴۰۴، ملکی و همکاران). در این روش یک آرایه منظم از باریکه‌های لیزر، عمود بر سطح جریان آب به آن تابیده می‌شود و یک دوربین دیجیتال DSLR تصویر نور پراکنده شده از محل برخورد لیزرها به سطح آب را ثبت می‌کند. به عبارتی یک شبکه از نقاط برخورد باریکه های لیزر با سطح آب تعریف شده است، تغییر در ارتفاع سطح آب، سبب جابجایی محل برخورد لیزر با سطح آب می‌شود در نتیجه محل برخورد در تصویر نیز جابجا می‌شود. با کالیبراسیون پیکسل‌های دوربین در امتداد هر باریکه لیزر، مقدار جابجایی به طول تبدیل شده و لذا دامنه تغییرات موج برای تمامی نقاط شبکه بدست می‌آید. با مقایسه دامنه تغییرات زمانی دامنه موج در نقاط اندازه گیری مجاور هم سرعت موج محاسبه می‌شود. از مزایای روش آرایه شده، هزینه راه اندازی و پیچیدگی کم و میدان دید وسیع آن می‌باشد در این مقاله ابتدا ساختار پژوهش جهت مطالعه امواج ضربه ای در یک مخزن ارائه و سپس مبانی روش اندازه گیری توضیح داده شده است.

- مخزن به طول ۱۲/۵ متر، عرض ۶/۵ متر و ارتفاع ۱ متر ساخته شده است.
- از دو آرایه لیزر که در هر آرایه از ۱۵ لیزر که دو به دو روبروی هم قرار گرفته اند، جهت تاباندن باریکه لیزر استفاده شده است.
- با استفاده از دوربین<sup>1</sup> DSLR با سرعت ۲۵ فریم بر ثانیه، تغییرات موج ایجاد شده بر اثر سقوط توده و به کمک تاباندن باریکه‌های لیزر، تصویربرداری شده است.

ناگهانی صخره‌های اطراف مخازن سدها و بارش‌های فصلی باعث ایجاد موج‌هایی با ارتفاع و سرعت بالا می‌شوند (Pereira et al., 2002 and Kim, Y. et al 2008). پیش‌بینی سرعت، دامنه و نحوه انتشار موج در اثر سیلاب یا ریزش سنگ در مخازن سدها و آبگیرها، می‌تواند در ساخت سدها و مقدار استحکامات مورد نیاز برای مقاومت در برابر این امواج کمک بسیار شایانی داشته باشد. روش‌های معمول اندازه‌گیری سرعت شامل استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری تماسی مانند سرعت‌سنج پره‌ای و سرعت‌سنج الکترومغناطیسی جریان هستند. این دستگاه‌ها می‌توانند به‌صورت مستقیم سرعت‌های نقطه‌ای را با قرارگیری در آب اندازه‌گیری کنند که مشکل اصلی آن‌ها برخورد با جریان و تاثیر در جریان اندازه‌گیری شده و همچنین آسیب پذیر بودن آن‌ها است (Aricò et al., 2010). بنابراین نیاز به یک دستگاه اندازه‌گیری غیر تماسی مشهود است. برای اندازه‌گیری سرعت موج به روش غیرتماسی روش‌های گوناگونی مانند سرعت سنج دوپلر وجود دارد. این روش از اثر دوپلر موج‌های فراصوتی برای اندازه‌گیری تغییر فرکانس بین موج ورودی و موج بازتاب شده برای دریافت سرعت جریان استفاده می‌کند. با این حال، در این روش توزیع سرعت جریان بدست نمی‌آید و همچنین پیچیدگی نصب تجهیزات را به همراه دارد (Katakura et al. و Kawanisi et al., 2012). در روش‌های (Yoo, M. W. et al., 2009 و al., 2002) می‌توان به استفاده از دوربین برای تصویربرداری از سطح آب و آنالیز تصاویر با استفاده از تکنیک‌های سرعت‌سنجی تصویر ذرات در مقاله (Bradley, A. A., et al., 1999) اشاره کرد که با اندازه‌گیری سرعت سطح آزاد آب به عنوان ورودی یک مدل هیدرولیکی به تخمین دبی آب پرداخته است. در دیگر روش‌های غیرتماسی Fujita et al. 1998 و Fujita et al., 2000 روش اندازه‌گیری جابه‌جایی ذرات را پیشنهاد کردند، در این روش سرعت جابجایی آب با دقت بالا و با اندازه‌گیری جابه‌جایی ذرات در سطح آب محاسبه می‌شود، که این روش نیاز به محاسبات پیچیده و وارد کردن مقادیر زیادی ماده برای رهگیری دارد. با پیشرفت الگوهای تصویربرداری از الگوهای طرح موج‌های روی آب (روش جریان نوری فارنیک) برای اندازه‌گیری سرعت سطحی جریان آب استفاده شده است (Fujita et al.)

<sup>1</sup> DSLR Canon EOS D50

نام گذاری شده است که شماره گذاری از کنار مخزن به سمت وسط شروع می‌شود. فاصله تیغه‌ها از یکدیگر  $\Delta y = 24 \text{ cm}$ ، فاصله دو ردیف  $\Delta z = 76 \text{ cm}$  و فاصله اولین آرایه از سطح شیبدار  $D_l = 3 \text{ m}$  است. دوربین DSLR در ارتفاع  $h_c = 2.85 \text{ m}$  از کف مخزن و در فاصله  $D_a = 1.5 \text{ m}$  از آرایه اول لیزرها نصب شده است. با تاباندن باریکه لیزر به سطح آب، در محل برخورد باریکه لیزر، پراکندگی رخ می‌دهد و لذا محل برخورد قابل مشاهده است. همچنین مسیر باریکه لیزر در آب بخاطر پراکندگی از ذرات معلق در آب با شدت کمتری مشاهده می‌شود. مطابق شکل (a-2) باریکه لیزر بصورت عمودی بر سطح آب می‌تابد و یک دوربین DSLR از محل برخورد آن تصویر برداری کرده است.

در سیستم سطح نگاری لیزری از تیغه شیشه‌ای به عنوان باریکه شکن برای تولید تعدادی باریکه لیزر از یک منبع لیزری مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق شکل (a-3)، در بازتاب لیزر از تیغه شیشه‌ای دو باریکه نور لیزر ایجاد می‌شود و مطابق رابطه (1) فاصله دو باریکه بازتابی (S) به ضخامت تیغه (t)، ضریب شکست نور در شیشه (n) و زاویه تیغه ( $\theta_i$ ) بستگی دارد.

- با استفاده از تصاویر ثبت شده، مقادیر ارتفاع، طول و سرعت موج بدست آمده است.
- مقایسه کردن مقادیر بدست آمده سرعت جریان با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی با مقادیر محاسباتی که دقت بالایی روش پیشنهادی را تأیید می‌کند.

## ۲- مبانی تجربی و نظری آزمایش

آزمایش‌ها درون یک مخزن به طول ۱۲/۵ متر، عرض ۶/۵ متر و ارتفاع ۱ متری انجام شده است (شکل ۱). برای ایجاد موج، از یک توده به وزن ۲۰۰ کیلوگرم که از سطح شیبدار ۶۰ درجه به ارتفاع ۳ متر به داخل مخزن آب سقوط می‌کند، استفاده شده است. برای بالا کشیدن مجدد توده، از جرثقیل سقفی استفاده شده است. در شکل (a-1) نحوه چیدمان لیزرها، محل قرارگیری دوربین و توده و سایر قسمت‌های آزمایشگاه نشان داده شده است.

جهت سطح نگاری از چیدمان اپتیکی مطابق شکل (b-1) شامل دو آرایه لیزری و یک دوربین DSLR با سرعت 25 فریم برثانیه و رزولوشن  $1920 \times 1080$  استفاده شده است. شماتیک چیدمان یکی از آرایه‌ها در شکل (b-2) نمایش داده شده است. دو لیزر در ابتدا و انتهای محور قرار دارد که با تعدادی تیغه شیشه‌ای، باریکه‌های منظم لیزر ایجاد می‌شود. مکان باریکه‌های لیزر در دو ردیف با اندپس

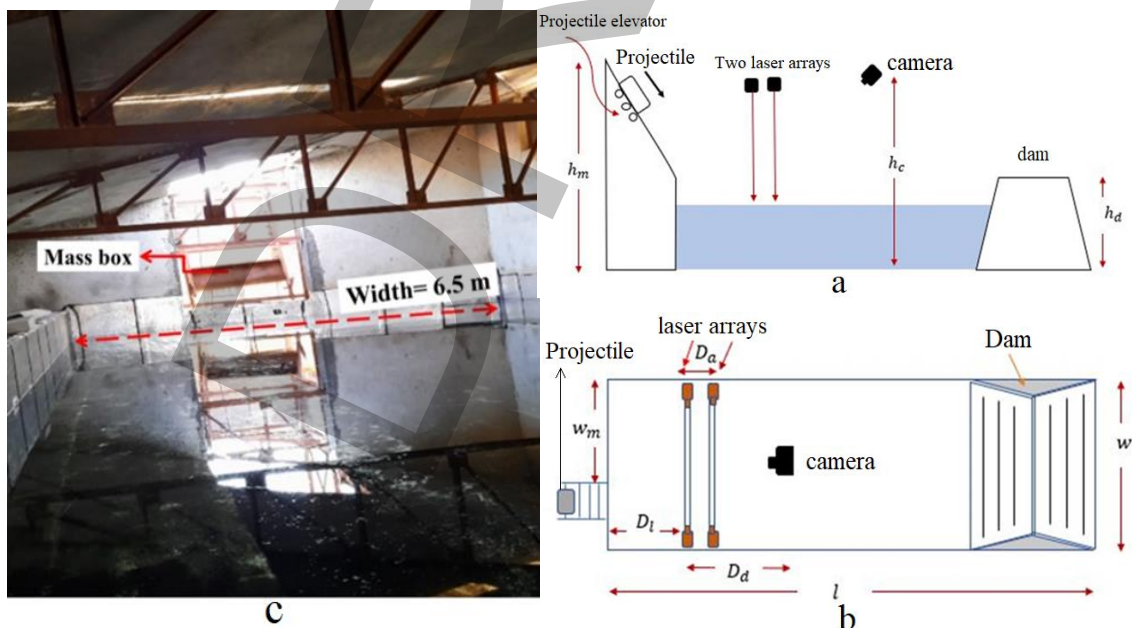
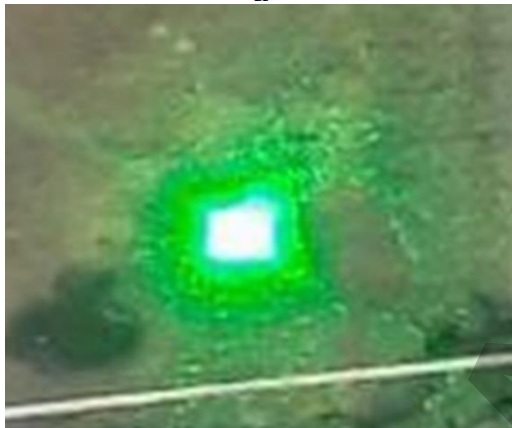
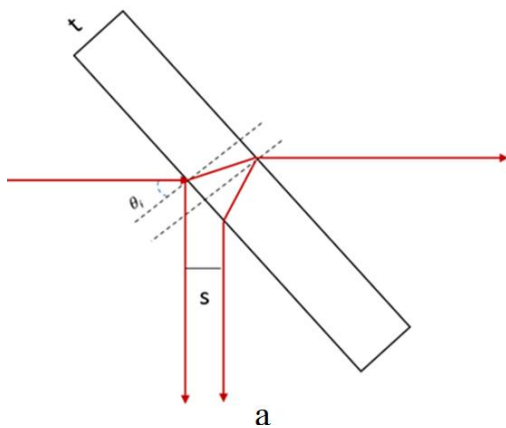


Fig. 1 a) A schematic front view of the laboratory-scale dam reservoir setup, b) A schematic top view of the laboratory-scale dam reservoir setup with two arrays spaced 76 centimeters apart, c) View of the laboratory-scale dam reservoir setup

شکل ۱ (a) شکل شماتیک مخزن از نمای روبرو، (b) شکل شماتیک مخزن از نمای بالا با فاصله 76cm دو آرایه، (c) نمایی از مخزن



**Fig. 3** a) Reflection of light from the glass plate  
b) Light spot formed on the bottom of the laboratory-scale dam reservoir setup

شکل ۳ a) نحوه بازتاب نور از تیغه شیشه ای (b) لکه نور ایجاد شده در کف مخزن شکل

مقادیر شدت هر باریکه با استفاده از روابط فرنل در فرود  $\theta = 45^\circ$  و با استفاده از رابطه (۲) محاسبه و در جدول (۱) نشان داده شده است.

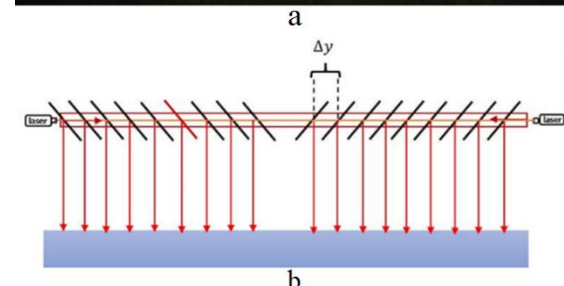
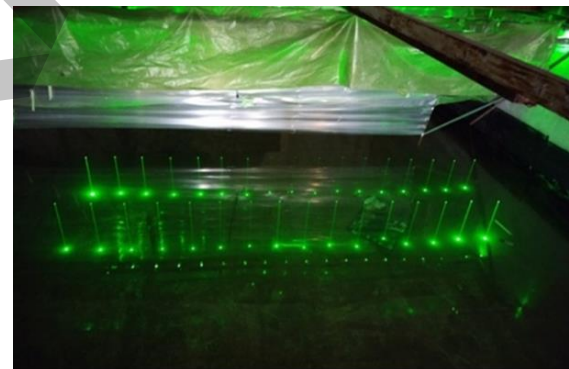
در سیستم سطح نگار لیزری با تغییرات ارتفاع سطح آب ناشی از موج، محل برخورد لیزر با سطح آب نیز جابجا می‌شود. در تصویر ثبت شده مقدار جابجایی محل برخورد برحسب پیکسل اندازه گیری می‌شود. برای محاسبه دامنه جابجایی موج در واحد طول، از ضرب جابجایی بر حسب پیکسل در ضریب کالیبراسیون بدست می‌آید.

ضریب کالیبراسیون به دو روش اصولاً قابل محاسبه است. در روش اول با استفاده از هندسه سیستم و در روش دوم با استفاده از روش تجربی قابل محاسبه است. در روش اول نیاز است فاصله دوربین از محل باریکه‌ها و زاویه دید دوربین اندازه‌گیری شود که دشوار و با خطای بالایی همراه است؛ لذا از روش تجربی استفاده می‌شود. در روش تجربی یک

$$S = \frac{t \sin 2\theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \quad (1)$$

برای تیغه با ضخامت  $t=1\text{mm}$  و ضریب شکست  $n=1.56$  در زاویه تابش  $45^\circ$  درجه جدایی دو لکه لیزر بازتابی برابر  $S=0.7\text{mm}$  خواهد شد. از آنجایی که قطر باریکه لیزر ۴ میلیمتر می‌باشد و جدایی دو لکه لیزر کمتر از نصف قطر باریکه است، لذا دو لکه بر روی سطح آب مخزن قابل تفکیک نخواهند بود و یک لکه فرض می‌شوند. مطابق شکل (۳-b). همانطور که انتظار می‌رود لکه‌های انعکاسی از تیغه قابل تفکیک نیستند. بخاطر ضعیف شدن شدت لیزر در عبور از تیغه‌های شیشه، جهت ایجاد باریکه‌های تقریباً هم شدت، لازم است ضریب بازتاب باریکه‌شکن‌های انتهایی افزایش یابد. لذا از دو تیغه شیشه‌ای روی هم جهت افزایش ضریب بازتاب به عنوان باریکه شکن استفاده شده است. لیزر مورد استفاده طول موج  $532\text{nm}$  و توان حدوداً  $1000\text{mw}$  دارد. با توجه به افت توان در عبور از هر تیغه، شدت هر باریکه بازتابی  $I_{r_i}$  از رابطه زیر برحسب شدت اولیه لیزر  $I_0$  برای  $i > 1$  بدست می‌آید:

$$I_{r_{i+1}} = R_{i+1}(I_0 - I_{r_i}) \quad (2)$$



**Fig. 2** a) Laser beams propagation within the reservoir with a water depth of 75cm. b) Schematic diagram of the laser setup with a 24 cm spacing

شکل ۲ a) تابیدن لیزرها درون مخزن با عمق آب ۷۵ سانتی متری. (b) شکل شماتیک چیدمان لیزرها با فاصله ۲۴ سانتی متری

جدول ۱ مقادیر شدت باریکه بازتابی  
Table 1 Reflected beam intensity values

$i$	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
Laser beam number								
Number of blades	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۳
Reflected beam intensity(microwatts)	۴۰	۳۸	۳۶/۸	۳۵	۶۶	۶۱	۵۷	۷۳

شکل (۴) تصویر ثبت شده توسط دوربین، قبل از آبیگری مخزن است. جهت کالیبراسیون، یک متر چوبی که با فواصل  $1.0\text{cm}$  مدرج شده است در راستای فرود هر یک از باریکه‌های لیزر، قرار داده شده است. سپس در هر تصویر با محاسبه نسبت طول خط کش در بخشی از تصویر به تعداد پیکسل در همان طول، ضریب کالیبراسیون برای هر باریکه لیزر به صورت مجزا به دست می‌آید.

پس از آبیگری مخزن مسیر باریکه‌های لیزر داخل آب و نقاط نورانی کف مخزن و نقاط نورانی روی سطح آب قابل مشاهده است. هدف این است از نقاط روشن روی سطح آب در این تصویر ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شود. لذا جهت تشخیص ساده تر این نقاط بهتر است زاویه دوربین قبل از کالیبراسیون طوری تنظیم شود که در تصویر دوربین نقاط نورانی کف مخزن جدا شده‌گی کافی از نقاط نورانی روی آب داشته باشد.

هدف، رسم بردار انتشار موج یا همان بردارهای جریان است که به این منظور باید مقدار سرعت موج و زاویه انتشار موج را محاسبه کنیم. به این منظور جهت اندازه‌گیری سرعت موج نیاز است اندازه‌گیری دامنه موج در دو آرایه منظم روی سطح آب مخزن مطابق شکل (۵) صورت گیرد. آرایه اول نزدیک محل تولید موج و دومی دورتر در نظر گرفته می‌شود. محور  $Z$  امتداد طولی و محور  $Y$  در امتداد عرضی مخزن فرض شده است.

با توجه به شکل (۵)، موج آب با یک مدل حرکت مکانیکی توصیف شده است که مکان هندسی نقاطی که هم فاز هستند جبهه موج را تعریف می‌کنند به عبارتی فاصله زمانی نقاط روی جبهه موج تا محل تولید یکسان است. در هر نقطه از آرایه لیزر ارتفاع موج بر حسب زمان اندازه‌گیری می‌شود که دامنه موج را به ما می‌دهد. با توجه به ثابت و مشخص بودن فاصله دو آرایه، از اختلاف زمانی رسیدن قله موج به دو آرایه جهت محاسبه سرعت موج استفاده می‌شود. فرض‌های زیر در نظر گرفته شده است:

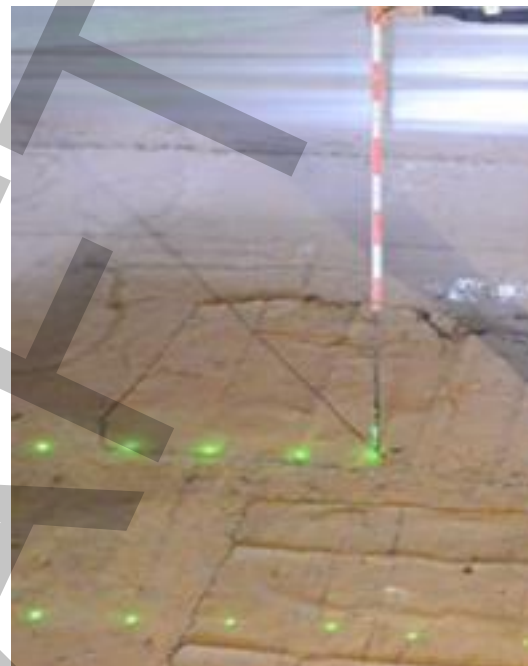


Fig. 4 Experimental determination of calibration in a laboratory-scale dam reservoir setup

شکل ۴ تعیین تجربی کالیبراسیون در مخزن

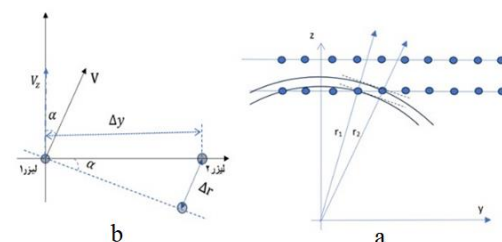


Fig. 5 a) Data point layout on the water surface  
b) velocity profiles along the y and z axes

شکل ۵ a) آرایش نقاط داده برداری روی سطح آب b) نمودار سرعت موج در راستای  $Y$  و  $Z$

خط کش در امتداد هر لیزر داخل مخزن خالی از آب قرار داده شده و از آن توسط دوربین تصویربرداری می‌شود. از تقسیم فاصله مقیاس‌های روی خط کش بر حسب طول بر همان اندازه روی تصویر بر حسب پیکسل، ضریب کالیبراسیون بدست می‌آید.

### ۳- نتایج و بحث

فیلم ثبت شده از باریکه لیزرها بر روی موج ایجاد شده درون مخزن، توسط الگوریتم به صورت شکل (6) پردازش شده است. همچنین تصاویر انتقال داده شده به الگوریتم مذکور جهت پردازش تصویر، در شکل (7) نشان داده شده است. همچنین توزیع شدت در امتداد باریکه لیزر داخل آب در شکل (8)، تغییرات دامنه موج در نقطه برخورد یکی از باریکه‌های لیزر با سطح موج آب بر حسب زمان در شکل (9) نشان داده شده است.

در شکل (9) محور عمودی با اعمال ضریب کالیبراسیون نشان دهنده تغییرات دامنه موج به واحد میلی‌متر است. در محور افقی آن شماره فریم به زمان تبدیل شده است. خطای محاسبه دامنه به دقت بدست آوردن محل تقاطع لیزر با سطح آب که از شکل (8) بدست می‌آید، بستگی دارد. دقت محاسبه مکان ماکزیمم از این نمودار بخاطر برازش تابع درجه ۲ بر روی داده‌های اطراف ماکزیمم بهتر از یک پیکسل است. ضریب کالیبراسیون برای باریکه لیزر مرتبط با شکل (8) برابر با  $0.05 \text{ mm/pixel}$  بوده و لذا خطای اندازه‌گیری دامنه موج  $\pm 0.05 \text{ mm}$  است.

در این مرحله پارامتر زمان رسیدن موج به نقاط هر آرایه با روش زیر قابل محاسبه است:

۱- فایل تغییرات دامنه باریکه ابتدا بازخوانی می‌شود (شکل ۱۰).

۲- زمان اولین ماکزیمم با برازش یک تابع درجه ۲ در اطراف آن محاسبه و در یک آرایه ثبت می‌شود.

۳- فایل تغییرات دامنه باریکه بعدی از هارد بازخوانی شده و مرحله ۲ تکرار می‌شود.

۴- این مراحل برای تمام باریکه‌ها یک آرایه لیزر انجام می‌شود.

این الگوریتم برای آرایه دوم هم تکرار می‌شود. نتایج ذخیره شده برای آرایه اول و آرایه دوم در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. در نمودار شکل (۱۰)، کوتاهترین زمان مربوط به مکانی از آرایه است که تقریباً در برابر محل ایجاد موج قرار داد. در روشی که در این پژوهش آرایه شده اختلاف زمانی رسیدن موج به نقاط شبکه اندازه‌گیری اهمیت دارد. لذا مقادیر مطلق زمانی اهمیت ندارد.

I. جبهه موج در فاصله دو نقطه متوالی در آرایه، تخت در نظر گرفته شده است (شکل ۵).

II. در آب‌های کم عمق یا متوسط سرعت موج در همه نقاط مخزن یکسان است.

فرض اول از در نظر گرفتن کوچک بودن فاصله دو نقطه متوالی روی آرایه نسبت به کمان موج در این محل از مخزن به دست آمده است.

ابتدا سرعت را در پیشانی موج یعنی برای نقاط وسط آرایه اول و دوم که تقریباً در مقابل محل رها سازی توده به داخل مخزن هستند و امتداد انتشار موج در امتداد  $Z$  است محاسبه می‌کنیم. برای این نقاط از شبکه با اندازه گیری فاصله زمانی،  $\Delta t$ ، رسیدن موج از آرایه اول به آرایه دوم و مشخص بودن فاصله دو آرایه از هم  $\Delta z$ ، سرعت موج با رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$V = V_z = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (3)$$

برای دیگر نقاط آرایه با فرض اینکه اختلاف زمانی رسیدن قله موج بین دو نقطه مجاور از هر آرایه،  $\Delta t'$  باشد و با توجه به شکل (b-5) اختلاف طول رسیدن موج بین همان دو نقطه  $\Delta r = r_2 - r_1$  باشد سرعت موج  $V$  مطابق شکل (5) با رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$V = \frac{\Delta r}{\Delta t'} \quad (4)$$

$$V = \vec{V}_z + \vec{V}_y \quad (5)$$

با توجه به فرض شماره II، اندازه سرعت موج محاسبه شده از رابطه (۴) با اندازه سرعت در پیشانی موج که از رابطه (۳) محاسبه می‌شود، یکی است. همچنین، مطابق شکل (5) جهت انتشار موج در نقاطی به غیر از پیشانی موج با محور  $Z$  زاویه  $\alpha$  می‌سازد که به آن زاویه انتشار موج می‌گوییم. که برای محاسبه‌ی زاویه انتشار موج با استفاده از روابط مثلثاتی رابطه (۶) برقرار است:

$$\sin(\alpha) = \frac{\Delta r}{\Delta y} = V \frac{\Delta t'}{\Delta y} \quad (6)$$

بنابراین زاویه انتشار در نقاط شبکه از رابطه (۷) بدست می‌آید:

$$\alpha = \sin^{-1}(V \frac{\Delta t'}{\Delta y}) \quad (7)$$

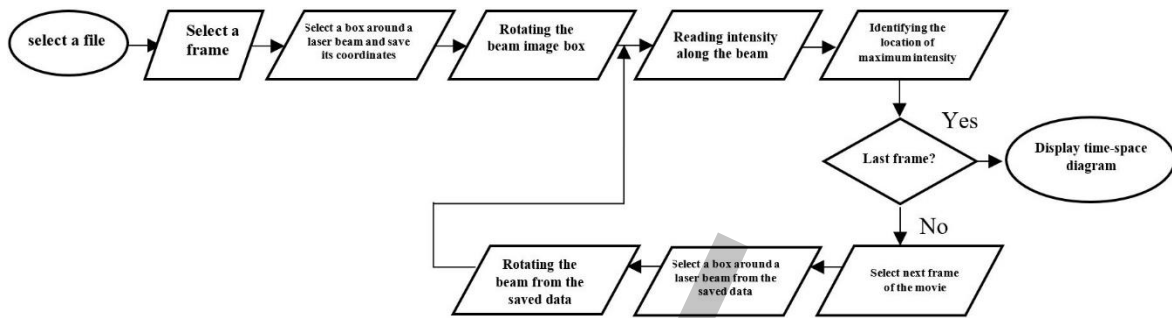


Fig. 6 The algorithm for measuring wave height and the time during which the wave passes through the array."

شکل ۶- الگوریتم اندازه گیری ارتفاع و زمان عبور موج از آرایه

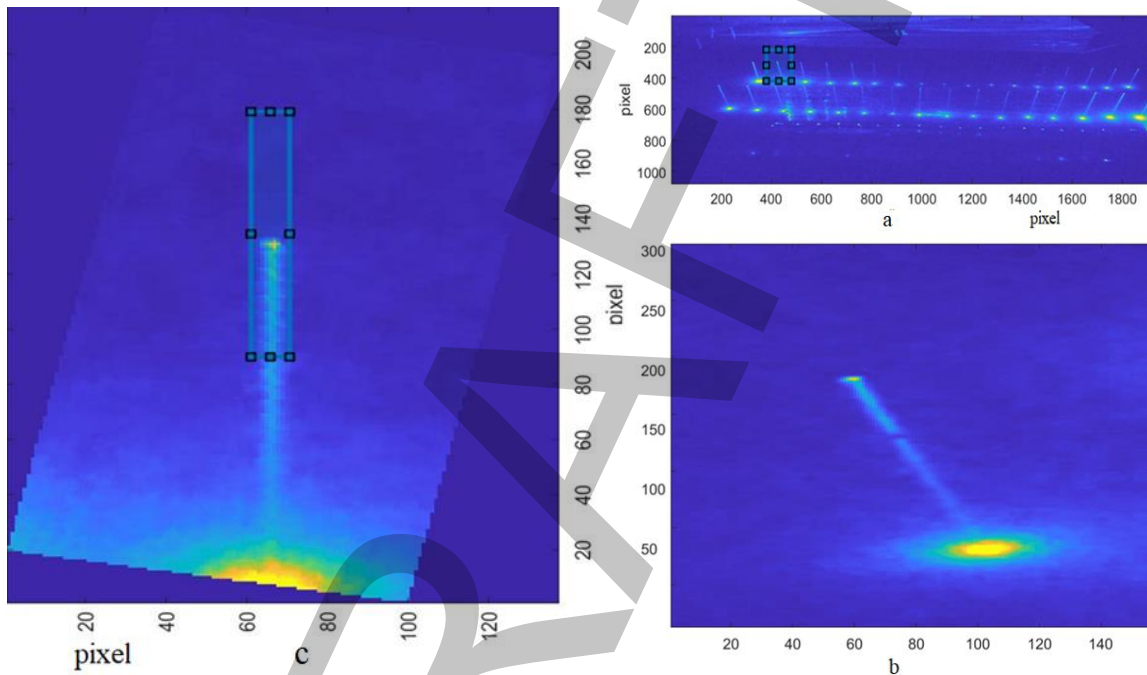


Fig. 7 a) Selection of a beam, b) The selected beam, c) The rotated view of the figure  
شکل ۷- (a) انتخاب یکی از باریکه‌ها (b) باریکه انتخاب شده (c) تصویر دوران داده شده شکل

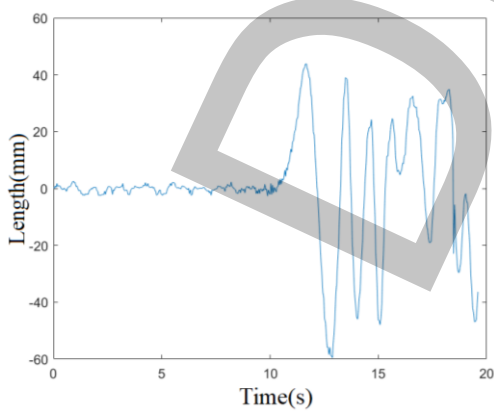


Fig. 9 variation of wave amplitude at the point of laser beam impact with the water surface over time.

شکل ۹- تغییرات دامنه موج در نقطه برخورد یکی از

باریکه‌های لیزر با سطح موج آب بر حسب زمان

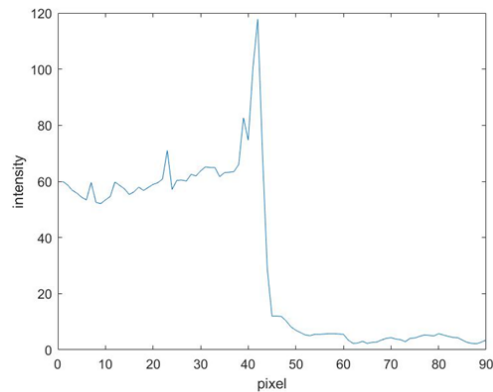


Fig. 8 Intensity distribution along the laser beam inside the water

شکل ۸- توزیع شدت در امتداد باریکه داخل آب

است که مقدار بیشینه آن همان  $0.04$  ثانیه است در نظر می‌گیریم. پس از برازش رابطه بین داده‌های ثبت شده مطابق شکل (۱۰)، مجدداً دقت روش اندازه‌گیری پیشنهادی کمتر از  $0.04$  ثانیه بدست آمده است که بیانگر دقت بالای برداشت داده‌ها و روش پیشنهادی است. از طرفی برای موج مطابق شکل (۱۰)، کمترین زمان رسیدن موج از سرچشمه موج تا آرایه‌ها، مربوط به آرایه‌های شماره ۱۰ الی ۱۲ است که کمترین فاصله را با چشمه موج دارند و مکان آن‌ها روبروی توده قرار دارد. به عبارت دیگر در فاصله بین  $264\text{cm}$  و  $312\text{cm}$  از کناره مخزن قرار دارند. در محدوده آرایه‌های ۱۰ تا ۱۲، موج تقریباً در امتداد Z منتشر می‌شود و مولفه افقی ندارد. لذا از تقسیم فاصله دو آرایه‌ها  $\Delta z$  به اختلاف زمانی رسیدن موج از آرایه اول به آرایه دوم، طبق رابطه (۳) سرعت موج  $2.67 \frac{m}{s}$  بدست می‌آید. با توجه به برازش صورت گرفته بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده نمودار شکل ۱۰ دقت اندازه‌گیری زمان حدوداً  $0.01s$  تخمین زده می‌شود. لذا خطای محاسبه سرعت حدود  $0.04 \frac{m}{s}$  معادل  $1/48$  درصد است. به عبارت دیگر با استفاده از رابطه  $C = \sqrt{gh}$  سرعت موج برای عمق آب  $75$  سانتی متری برابر با  $2/71$  متر بر ثانیه بصورت نظری تخمین زده می‌شود.

با محاسبه مشتق،  $\frac{\Delta t'}{\Delta y}$ ، از داده‌های شکل (۱۰) برای آرایه اول و دوم و قرار دادن مقدار سرعت موج در رابطه (۶)، زاویه انتشار موج در نقاط دیگر شبکه محاسبه می‌شود. با مشخص شدن مقدار سرعت و زاویه انتشار موج برای تمام نقاط شبکه، بردار انتشار موج یا همان بردارهای جریان در شکل (۱۱) برای دو آرایه شبکه نمایش داده شده است. موج ایجاد شده ناشی از برخورد توده در مخزن بصورت دو بعدی بوده و در طول مسیر آن امواج مستهلک می‌شود که این موضوع در شکل (۱۱) نیز قابل مشاهده است. به عبارت دیگر، مطابق شکل (۱۱) موج ایجاد شده بر اثر سقوط توده ابتدا به سمت دیواره‌های عرضی مخزن نیز منحرف شده و سپس به صورت طولی به مسیر خود ادامه داده است.

همچنین با توجه به شکل مکعب مستطیلی توده جبهه موج به شکل نیم‌دایره نیست. شایان ذکر اینکه معیار برای کالیبراسیون لیزر و دوربین‌ها نقطه برخورد نور لیزر با سطح آب بوده و شکست نور داخل آب تاثیری در این اندازه‌گیری

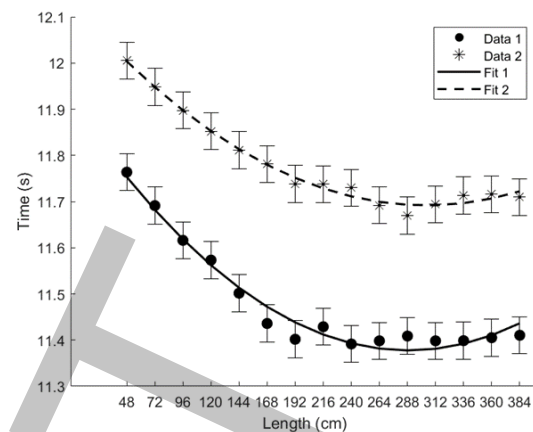


Fig. 10 Curve of in-phase wave points (the first and second arrays are represented by circles and stars, respectively). The dashed and solid lines represent the best fit curves. Horizontal axis: Positions of recorded points."

شکل ۱۰- منحنی نقاط هم فاز موج (آرایه اول و آرایه دوم به ترتیب با دایره و ستاره نشان داده شده‌اند. خط چین و خط بیوسسته بهترین منحنی‌های برازش شده هستند. محور افقی: موقعیت نقاط ثبت شده)

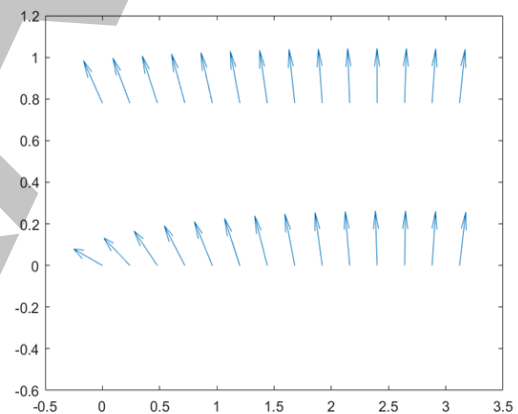


Fig. 11 Wave velocity vector for the points of the two laser arrays (vertical axis is dimensionless and the horizontal axis is in terms of length, with the origin taken at the side of the pool).

شکل ۱۱- بردار سرعت موج برای نقاط دو آرایه لیزر (محور عمودی بدون بعد و محور افقی بر حسب طول است که مبدا کنار مخزن در نظر گرفته شده است).

با توجه به سرعت ثبت حرکت موج که همان سرعت تصویربرداری  $25$  فریم بر ثانیه است، آرایه‌های مذکور در فواصل زمانی  $0.04$  ثانیه تصویر برداری شده است. مطابق شکل (۱۰) فرض می‌کنیم بدترین حالت برای ثبت داده‌ها زمانی اتفاق افتد که قله موج در لحظه تصویربرداری ثبت نشود بلکه در فاصله زمانی دو فریم قرار بگیرد و به تبع آن دقت زمان ثبت حرکت موج می‌تواند بین  $0$  تا  $0.04$  ثانیه

تحلیل‌های وابسته به تاثیر موج ایجاد شده بر روی سدهای خاکی، روش پیشنهادی از دقت مناسب و کارایی بالایی برخوردار است.

ندارد. همچنین کالیبراسیون برای ارتفاع آب موجود و ۱۵ سانتی‌متر بالاتر و پایین‌تر از این سطح صورت گرفته است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش موج حاصل از رها شدن یک توده به درون مخزن ساخته شده در دانشگاه زنجان ایران به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. برای اولین بار با استفاده از روش سطح نگار لیزری، ارتفاع، طول و سرعت موج حاصل از سقوط توده به درون مخزن به دست آمده است. در این روش از لیزرهای با توان پایین و یک دوربین DSLR و سپس کدنویسی درون محیط متلب برای بدست آوردن پارامترهای مذکور استفاده شده است. به طور کلی نتایج پژوهش حاضر به شرح زیر می‌باشد:

- مطابق شکل (۹) موج ایجاد شده داری موج اول، دوم و ریز موج‌های بعدی است که طول موج‌های یکسانی ندارند. در اندازه گیری صورت گرفته، طول موج اول و دوم به ترتیب حدوداً ۴/۹ و ۳/۵ سانتی‌متر می‌باشد که بیانگر ویژگی موج ایجاد شده است. همانطور که از شکل مشخص است ارتفاع موج در ردیف دوم کاهش داشته که نشان دهنده استهلاک موج است.
- مقدار سرعت موج با استفاده از روش سطح نگار لیزری برابر با ۲/۶۷ متر بر ثانیه بدست آمده و این مقدار با استفاده از رابطه موج ثقیلی  $C = \sqrt{gh}$  برابر با ۲/۷۱ متر محاسبه شده است. به عبارت دیگر خطای روش مذکور ۱/۴۸ درصد بوده و بیانگر دقت بالای روش پیشنهادی است. مقایسه با روش‌های دیگر لازم است.
- بعد از سقوط توده درون مخزن، موج علاوه بر مسیر مستقیم (حرکت یک بعدی) به سمت دیواره‌های عرضی مخزن نیز حرکت کرده و سپس مستهلک شده و حرکت رو به جلو خواهد داشت که بردار سرعت نیز بیانگر این موضوع می‌باشد. به عبارت دیگر موج به صورت دو بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.

به طور کلی نتایج پژوهش حاضر بیانگر آنست که روش سطح نگار لیزری علاوه بر دقت مناسب، نسبت به سایر روش‌های اندازه گیری ساده تر و هزینه بسیار پایین‌تری دارد. به عبارت دیگر، برای برآورد پارامترهای موج ایجاد شده در مخازن سدها بر اثر سقوط توده و به تبع آن سایر

#### ۵- علائم

$S$	فاصله دو باریکه بازتابی (mm)
$t$	ضخامت تیغه (mm)
$n$	ضریب شکست نور در شیشه
$I r_i$	شدت هر باریکه بازتابی (mw)
$I_0$	شدت اولیه لیزر (mw)
$V$	سرعت موج ( $ms^{-1}$ )
$\Delta t'$	اختلاف زمانی رسیدن قله موج بین دو نقطه مجاور از هر آرایه (s)
$\Delta r$	اختلاف طول رسیدن موج بین دو نقطه (mm)

#### علائم یونانی:

$\theta$	زاویه تیغه
$\alpha$	زاویه انششار در نقاط شبکه

#### زیرنویس‌ها:

$z$	امتداد محور $z$
-----	-----------------

#### ۶- منابع

Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation—a global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010>

Pereira, L. S., Oweis, T., & Zairi, A. (2002). Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management*, 57, 175–206. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00075-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00075-6)

Kim, Y., Evans, R. G., & Iversen, W. M. (2008). Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57, 1379–1387. <https://doi.org/10.1109/TIM.2008.917198>

Aricò, C., Corato, G., & Tucciarelli, T. (2010). Discharge estimation in open channels by means of water level hydrograph analysis. *Journal of Hydraulic Research*, 48, 612–619. <https://doi.org/10.1080/00221686.2010.507352>

Kawanisi, K., Razaz, M., & Ishikawa, K. (2012). Continuous measurements of flow rate in a shallow gravel-bed river by a new acoustic system. *Water Resources Research*, 48, 5547. <https://doi.org/10.1029/2012WR012064>

Milan, S., Roger, B., & Vaclav, H. (1993). *Image processing, analysis, and machine vision*. Chapman & Hall Computing, Boca Raton, FL, USA.

Xiaoping, H., & Ahuja, N. (1993). Motion and structure estimation using long sequence motion models. *Image and Vision Computing*, 11, 549–569. [https://doi.org/10.1016/02628856\(93\)90021-8](https://doi.org/10.1016/02628856(93)90021-8)

Heng, W., Zhao, R., Gan, X., & Ma, X. (2019). Measuring surface velocity of water flow by dense optical flow method. *Water*, 11. <https://doi.org/10.3390/w11112320>

ملکی، ف و بازرگان، ج، (۱۴۰۴). مدلسازی عددی سه بعدی تولید و انتشار موج ضربهای ناشی از لغزش دیواره های مخزن سد، فصلنامه هیدرولیک، دوره: ۲۰، شماره ۲: <https://civilica.com/doc/2218136>

Katakura, K., & Alain, P. (2002). Ultrasonic measurement method for transversal component of water flow velocity. In *Proceedings of the International Symposium on Underwater Technology* (pp. 45–48), Tokyo, Japan, 16–19 April. <https://doi.org/10.1109/UT.2002.1002381>

Yoo, M. W., Kim, Y. D., & Lyu, S. (2009). Flowrate and velocity measurement in Nakdong River using ADCP. In *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering* (pp. 1946–1949). Springer, Berlin/Heidelberg, Germany. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-89465-0\\_333](https://doi.org/10.1007/978-3-540-89465-0_333)

Bradley, A. A., Kruger, A., & Meselhe, E. A. (1999). Flow measurement in streams using video imagery. *Water Resources Research*, 38, 51. <https://doi.org/10.1029/2002WR001317>

Fujita, I., Muste, M., & Kruger, A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36, 397–414. <https://doi.org/10.1080/00221689809498626>

Fujita, I., & Aya, S. (2000). Refinement of LS-PIV technique for monitoring river surface flows. *Water Resources*. [https://doi.org/10.1061/40517\(2000\)31](https://doi.org/10.1061/40517(2000)31)

Fujita, I., & Tsubaki, R. (2002). A novel free-surface velocity measurement method using spatio-temporal images. *Journal of Hydraulic Measurement and Experimental Methods*. [https://doi.org/10.1061/40655\(2002\)85](https://doi.org/10.1061/40655(2002)85)

Gunawan, B., Sun, X., & Sterling, M. (2012). The application of LS-PIV to a **small irregular river for inbank and overbank flows**. *Flow Measurement and Instrumentation*, 24, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.02.001>

1. Bin Asad, S. M. S., Lundström, T. S., Andersson, A. G., Hellström, J. G. I., & Leonardsson, K. (2019). Wall shear stress measurement on curve objects with PIV in connection to benthic fauna in regulated rivers. *Water*, 11, 650. <https://doi.org/10.3390/w11040650>

2. Fang, S. Q., Chen, Y. P., Xu, Z. S., Otoo, E., & Lu, S. Q. (2019). An improved integral model for a non-buoyant turbulent jet in wave environment. *Water*, 11, 765. <https://doi.org/10.3390/w11040765>

Bai, R., Zhu, D., Chen, H., & Li, D. (2019). Laboratory study of secondary flow in an open channel bend by using PIV. *Water*, 11, 659. <https://doi.org/10.3390/w11040659>

Scarano, F. (2013). Tomographic PIV: principles and practice. *Measurement Science and Technology*, 24, 012001. <https://doi.org/10.1088/09570233/24/1/012001>