

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

Yasser Shakeri^{1*}, Ahmad Darudi², Jalal Bazargan³

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.

*Yasser.shakeri@znu.ac.ir

Received: 6 May 2025

Revised: 1 September 2025

Accepted: 9 September 2025

Discussion: 23 September 2026



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Shock waves generated by floods or landslides entering reservoirs can produce tsunami-like waves, as observed in events such as the 1963 Vajont Dam disaster, the 1958 Lituya Bay tsunami, and the Papua New Guinea landslide. Predicting wave velocity, amplitude, and propagation is essential for dam safety and structural design.

Traditional contact-based velocity measurement methods, such as propeller and electromagnetic meters, often suffer from mechanical problems and limited accuracy. Although non-contact techniques including Doppler systems and image processing methods are available, they can be complex and difficult to implement.

This study proposes a laser surface imaging technique, in which a laser beam scans the water surface while a high-speed camera records the laser reflections. The method enables measurement of wave velocity and amplitude along a water surface profile, although it requires high-speed imaging and careful system calibration.

Experimental and Theoretical Principles: In this research, the laser surface imaging technique is used to investigate shock wave characteristics generated by the impact of a falling mass into a laboratory-scale dam reservoir. A structured array of laser beams is projected onto the water surface, while a DSLR camera records the scattered light at the laser–water intersection points. Experiments are conducted in a flume measuring 12.5 m in length, 6.5 m in width, and 1 m in height. Waves are generated by releasing a 200 kg mass down a 60° slope from a height of 3 m into the reservoir.

A network of laser impact points is established on the water surface, and variations in water level cause displacements of these points in the recorded images. Wave amplitude is determined by converting pixel

displacement into physical distance using a calibration coefficient. In the laser imaging system, a glass blade acts as a beam splitter to generate multiple laser beams from a single source.

Although the calibration coefficient can be obtained from system geometry, this approach is prone to measurement errors. Therefore, an experimental calibration method is adopted, in which rulers placed beneath each laser beam are photographed and used to establish the pixel-to-length relationship.

After filling the reservoir, both the laser spots on the pool floor and on the water surface become visible. Camera settings are adjusted to maximize the separation between these spots for easier detection. By tracking temporal changes in wave amplitude at each laser point and comparing wave arrival times among the measurement network, both wave amplitude evolution and wave propagation velocity vectors can be determined.

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 earth fill dams.

Keywords : Mass fall, Impact waves, Wavelength, Wave speed, Laser surface profilometry.

Conflict of Interest: The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding: The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements: All information and results are presented in the text of the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution:

First Author: Conducted the laboratory experiments, collected and analyzed the experimental data, and prepared the manuscript.

Second Author: Reviewed and analyzed the results from an optical perspective and critically reviewed the final version of the manuscript.

Third Author: Reviewed and analyzed the results from a hydraulic perspective and critically reviewed the final version of the manuscript.

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

یاسر شاکری^{۱*}، احمد درودی^۲، جلال بازرگان^۳

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

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

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

* Yasser.shakeri@znu.ac.ir

نشریه هیدرولیک

انجمن هیدرولیک ایران

وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir



دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

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 تیغه ها 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

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

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 زبان‌های زیادی همچون خرابی سد و سازه‌هایی

جابه‌جایی ذرات را پیشنهاد کردند، در این روش سرعت جابه‌جایی آب با دقت بالا و با اندازه‌گیری جابه‌جایی ذرات در سطح آب محاسبه می‌شود، که این روش نیاز به محاسبه‌های پیچیده و وارد کردن مقدار 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 (Bin Asad et al., 2019; Fujita et al., 2002; Gunawan et al., 2012; Scarano et al., 2013; Fang et al., 2019; Bai et al., 2019). همچنین با پیشرفت این روش از چگالی جریان نوری نیز استفاده شد (Milan et al., 1993) 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، به صورت تجربی فراسنجه‌های موج ضربه‌ای ایجاد شده بر اثر سقوط توده بررسی شده است. مدل‌سازی عددی سه بعدی این پدیده پیشتر 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 نقطه‌های برخورد باریکه‌های لیزر با سطح آب تعریف شده است، تغییر در ارتفاع سطح آب، سبب جابه‌جایی محل برخورد لیزر با سطح آب می‌شود در نتیجه محل برخورد در تصویر نیز جابجا می‌شود. با واسنجی پیکسل‌های دوربین در امتداد هر باریکه لیزر، مقدار جابه‌جایی به طول تبدیل شده و لذا دامنه پذیره‌های موج برای همه‌ی نقطه‌های شبکه به دست می‌آید. با مقایسه دامنه پذیره‌های زمانی دامنه موج در نقطه‌های اندازه‌گیری مجاور هم سرعت موج محاسبه می‌شود. از برتری‌های روش آرایه شده، هزینه راه اندازی و پیچیدگی کم و میدان دید گسترده آن می‌باشد در این پژوهش در آغاز ساختار پژوهش برای بررسی موج‌های ضربه‌ای در یک مخزن ارائه و آنگاه مبانی روش اندازه‌گیری توضیح داده شده است.

این پژوهش از مرحله‌های زیر تشکیل شده است:

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 درون مخزن‌های آن‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به عبارتی، ریزش ناگهانی صخره‌های پیرامون مخزن‌های سدها و بارش‌های فصلی باعث ایجاد موج‌هایی با ارتفاع و سرعت بالا می‌شوند (Pereira et al., 2002; Kim et al., 2008). پیش‌بینی سرعت، دامنه و چگونگی انتشار موج در اثر سیلاب یا ریزش سنگ در مخزن‌های سدها و آبگیرها، می‌تواند در ساخت سدها و مقدار استحکام مورد نیاز برای مقاومت در برابر این موج‌های کمک بسیار شایانی داشته باشد. روش‌های معمول اندازه‌گیری سرعت شامل استفاده از ابزار اندازه‌گیری تماسی مانند سرعت‌سنج پره‌ای و سرعت‌سنج الکترومغناطیسی جریان هستند. این دستگاه‌ها می‌توانند به صورت مستقیم سرعت‌های نقطه‌ای را با قرارگیری در آب اندازه‌گیری کنند که مسئله اصلی آن‌ها برخورد با جریان و تاثیر در جریان اندازه‌گیری شده و همچنین آسیب پذیر بودن آن‌هاست (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 بسامد بین موج ورودی و موج بازتاب‌شده برای دریافت سرعت جریان استفاده می‌کند. با این حال، در این روش توزیع سرعت جریان به دست نمی‌آید و همچنین پیچیدگی نصب تجهیزات را به همراه دارد (Kawanisi et al., 2012; Katakura et al., 2002; Yoo et al., 2009). در روش‌های غیرتماسی می‌توان به استفاده از دوربین برای تصویربرداری از سطح آب و تجزیه و تحلیل تصویرها با استفاده از روش فن‌های سرعت‌سنجی تصویر ذرات در پژوهش (Bradley et al., 1999) اشاره کرد که با اندازه‌گیری سرعت سطح آزاد آب به عنوان ورودی یک مدل هیدرولیکی به برآورد دبی آب پرداخته است. در دیگر روش‌های غیرتماسی Fujita et al. (1998) و Fujita et al., (2000) روش اندازه‌گیری

- تاباندن باریکه‌های لیزر، تصویربرداری شده است.
- با استفاده از تصویرها ثبت شده، مقدارهای ارتفاع، طول و سرعت موج به دست آمده است.
- مقایسه کردن مقدارهای به دست آمده سرعت جریان با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی با مقدارهای محاسباتی که دقت بالای روش پیشنهادی را تأیید می‌کند.

- 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 روبه‌ری هم قرار گرفته اند، برای تاباندن باریکه لیزر استفاده شده است.
- با استفاده از دوربین^۱ DSLR با سرعت ۲۵ فریم برثانیه، پذیره‌های موج ایجاد شده بر اثر سقوط توده و به کمک

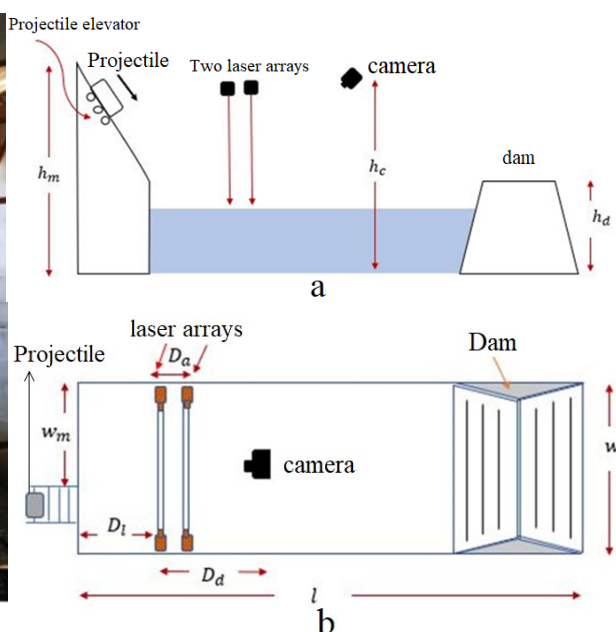


Fig. 1 a) A schematic front view of the laboratory-scale dam reservoir setup, b) A schematic top view of the laboratory-scale dam reservoir setup with two arrays spaced 76 centimeters apart, c) View of the laboratory-scale dam reservoir setup

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

نمای کلی چیدمان یکی از آرایه‌ها در شکل (2-b) نمایش داده شده است. دو لیزر در آغاز و انتهای محور قرار دارد که با شماری تیغه شیشه‌ای، باریکه‌های منظم لیزر ایجاد می‌شود. مکان باریکه‌های لیزر در دو ردیف با نمایه i نام گذاری شده است که شماره گذاری از کنار مخزن به سمت وسط آغاز می‌شود. فاصله تیغه‌ها از یکدیگر $\Delta y = 24 \text{ cm}$ ، فاصله دو ردیف $\Delta z = 76 \text{ cm}$ و فاصله نخستین آرایه از سطح شیبدار $D_l = 3 \text{ m}$ است. دوربین DSLR در ارتفاع از $h_c = 2.85 \text{ m}$ از کف مخزن و در فاصله $D_d = 1.5 \text{ m}$ 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

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 درون مخزن آب سقوط می‌کند، استفاده شده است. برای بالا کشیدن دوباره توده، از جرتقیل سقفی استفاده شده است. در شکل (1-a) چگونگی چیدمان لیزرها، محل قرارگیری دوربین و توده و دیگر قسمت‌های آزمایشگاه نشان داده شده است.

برای سطح نگاری از چیدمان اپتیکی برابر شکل (1-b) شامل دو آرایه لیزری و یک دوربین DSLR با سرعت 25 فریم برثانیه و رزولوشن 1920×1080 استفاده شده است.

1. DSLR Canon EOS D50

باریکه است، لذا دو لکه بر روی سطح آب مخزن قابل جداسازی نخواهند بود و یک لکه فرض می‌شوند. برابر شکل (۳-ب). همان‌طور که انتظار می‌رود لکه‌های انعکاسی از تیغه قابل جداسازی نیستند. به‌خاطر ضعیف شدن شدت لیزر در عبور از تیغه‌های شیشه، برای ایجاد باریکه‌های به‌تقریب هم شدت، لازم است ضریب بازتاب باریکه‌شکن‌های انتهایی افزایش یابد. لذا از دو تیغه شیشه‌ای روی هم برای افزایش ضریب بازتاب به‌عنوان باریکه‌شکن استفاده شده است.

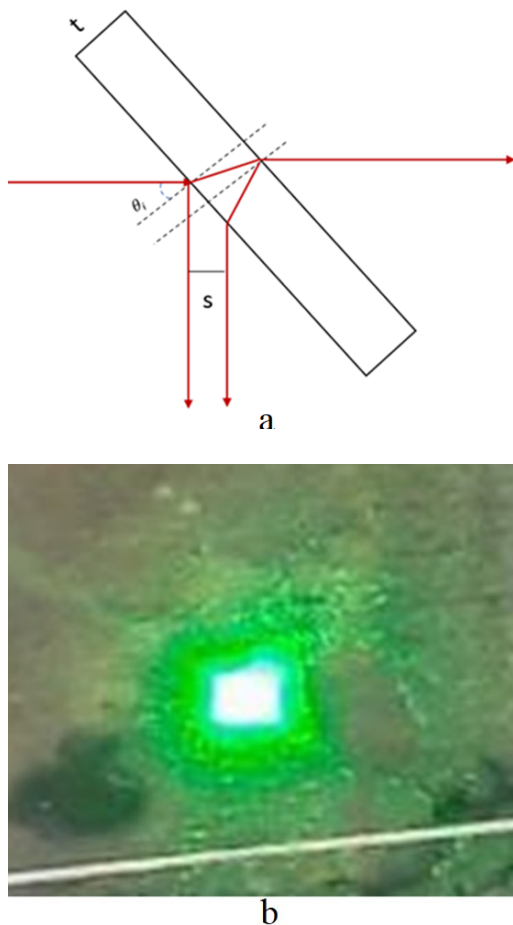


Fig. 3 a) Reflection of light from the glass plate
b) Light spot formed on the bottom of the laboratory-scale dam reservoir setup

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

لیزر مورد استفاده طول موج 532nm و توان در حدود 1000mw دارد. با توجه به افت توان در عبور از هر تیغه، شدت هر باریکه بازتابی I_i از رابطه زیر برحسب شدت اولیه لیزر I_0 برای $i > 1$ به‌دست می‌آید:

مسیر باریکه لیزر در آب به‌خاطر پراکندگی از ذرات معلق در آب با شدت کمتری مشاهده می‌شود. برابر شکل (۲-ا) باریکه لیزر به‌صورت عمودی بر سطح آب می‌تابد و یک دوربین DSLR از محل برخورد آن تصویر برداری کرده است. در سامانه سطح نگاری لیزری از تیغه شیشه‌ای به‌عنوان باریکه‌شکن برای تولید شماری باریکه لیزر از یک منبع لیزری استفاده شده است. برابر شکل (۳-ا)، در بازتاب لیزر از تیغه شیشه‌ای دو باریکه نور لیزر ایجاد می‌شود و برابر رابطه (۱) فاصله دو باریکه بازتابی (S) به ضخامت تیغه (t)، ضریب شکست نور در شیشه (n) و زاویه تیغه (θ_i) بستگی دارد.

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

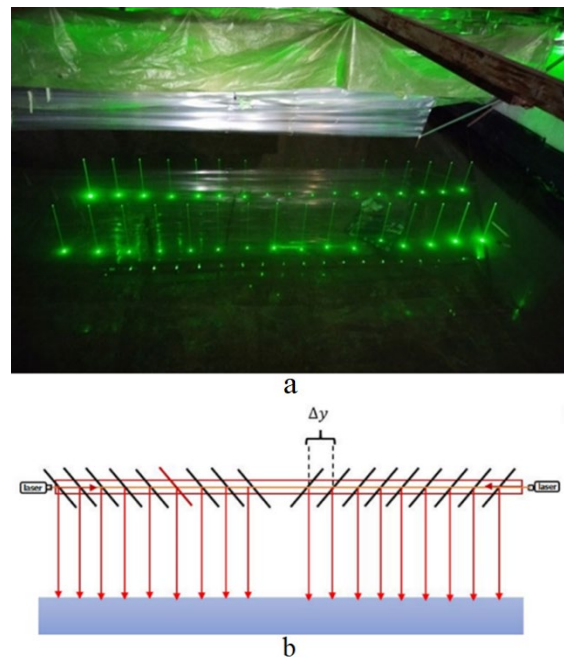


Fig 2 a) Laser beams propagation within the reservoir with a water depth of 75cm. b) Schematic diagram of the laser setup with a 24 cm spacing

شکل ۲ (a) تابیدن لیزرها درون مخزن با عمق آب ۷۵ سانتی متری، (b) نمای کلی چیدمان لیزرها با فاصله ۲۴ سانتی متری

برای تیغه با ضخامت $t=1\text{mm}$ و ضریب شکست $n=1.56$ زاویه تابش 45° 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

جدول (۱) نشان داده شده است.

در سامانه سطح نگار لیزری با پذیره‌های ارتفاع سطح آب ناشی از موج، محل برخورد لیزر با سطح آب نیز جابجا می‌شود. در تصویر ثبت شده مقدار جابه‌جایی محل برخورد بر حسب پیکسل اندازه‌گیری می‌شود. برای محاسبه دامنه جابه‌جایی موج در واحد طول، از ضرب جابه‌جایی بر حسب پیکسل در ضریب واسنجی به‌دست می‌آید.

ضریب واسنجی به دو روش اصولاً قابل محاسبه است. در روش اول با استفاده از هندسه سامانه 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 خط کش در امتداد هر لیزر درون 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 واسنجی به‌دست می‌آید.

$$Ir_{i+1} = R_{i+1}(I_0 - Ir_i) \quad (2)$$

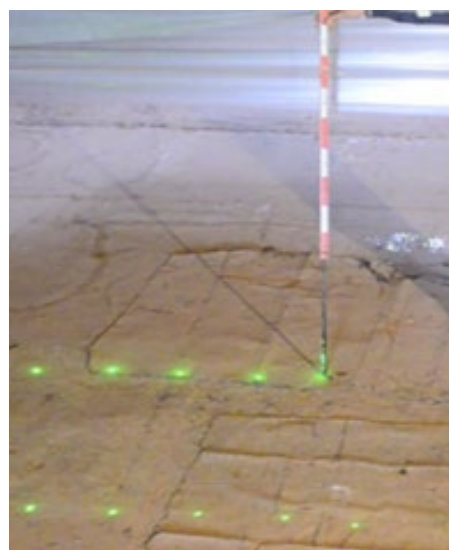


Fig. 4 Experimental determination of calibration in a laboratory-scale dam reservoir setup

شکل ۴ تعیین تجربی واسنجی در مخزن

مقدارهای شدت هر باریکه با استفاده از رابطه‌های فرنل در فرود $\theta = 45^\circ$ و با استفاده از رابطه (۲) محاسبه و در

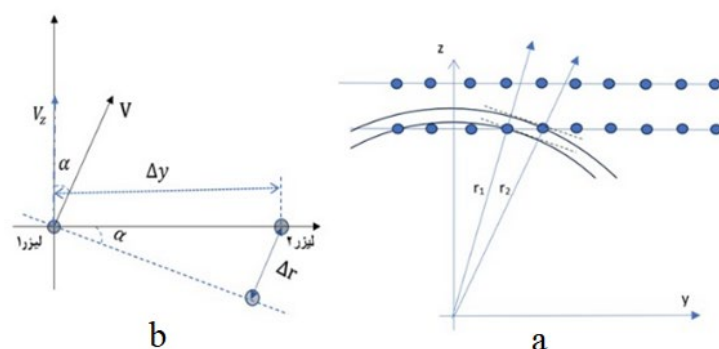


Fig. 5 a) Data point layout on the water surface, b) velocity profiles along the y and z axes

شکل ۵ (a) آرایش نقاط داده برداری روی سطح آب، (b) نمودار سرعت موج در راستای y و z

نقطه‌های نورانی کف مخزن و نقطه‌های نورانی روی سطح آب قابل مشاهده است. هدف این است از نقطه‌های روشن روی سطح آب در این تصویر ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شود. لذا برای تشخیص ساده تر این نقطه‌های بهتر است زاویه دوربین پیش از واسنجی طوری تنظیم شود که در تصویر دوربین نقطه‌های نورانی کف مخزن جدا شده‌گی کافی از نقطه‌های نورانی روی آب داشته باشد.

شکل (۴) تصویر ثبت شده توسط دوربین، پیش از آنگاه‌گیری مخزن است. برای واسنجی، یک متر چوبی که با فاصله‌های 1.0cm مدرج شده است در راستای فرود هر یک از باریکه‌های لیزر، قرار داده شده است. آنگاه در هر تصویر با محاسبه نسبت طول خط کش در بخشی از تصویر به تعداد پیکسل در همان طول، ضریب واسنجی برای هر باریکه لیزر به‌صورت جداگانه به‌دست می‌آید.

پس از آنگاه‌گیری مخزن مسیر باریکه‌های لیزر درون آب و

جدول ۱ مقدرهای شدت باریکه بازتابی

Table 1 Reflected beam intensity values

<i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
Laser beam number	1	1	1	1	2	2	2	3
Number of blades	1	1	1	1	2	2	2	3
Reflected beam intensity(microwatts)	40	38	36.8	35	66	61	57	73

دوم و مشخص بودن فاصله دو آرایه از هم Δz ، سرعت موج با رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

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

برای دیگر نقطه‌های آرایه با فرض اینکه اختلاف زمانی رسیدن قله موج بین دو نقطه مجاور از هر آرایه، $\Delta t'$ باشد و با توجه به شکل (۵-b) اختلاف طول رسیدن موج بین همان دو نقطه $\Delta r = r_2 - r_1$ باشد سرعت موج V برابر شکل (۵) 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، برابر شکل (۵) جهت انتشار موج در نقطه‌هایی به غیر از پیشانی موج با محور Z زاویه α می‌سازد که به آن زاویه انتشار موج گفته می‌شود. که برای محاسبه‌ی زاویه انتشار موج با استفاده از رابطه‌های مثلثاتی رابطه (۶) برقرار است:

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

بنابراین زاویه انتشار در نقطه‌های شبکه از رابطه (۷) به دست می‌آید:

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

۳- نتایج و بحث

فیلم ثبت شده از باریکه لیزرها بر روی موج ایجاد شده درون مخزن، توسط الگوریتم به صورت شکل (۶) پردازش شده است. همچنین تصویرهای انتقال داده شده به

هدف، رسم بردار انتشار موج یا همان بردارهای جریان است که به این منظور باید مقدار سرعت موج و زاویه انتشار موج را محاسبه کرد. به این منظور برای اندازه‌گیری سرعت موج نیاز است اندازه‌گیری دامنه موج در دو آرایه منظم روی سطح آب مخزن برابر 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 نقطه‌هایی که هم فاز هستند جبهه موج را تعریف می‌کنند به عبارتی فاصله زمانی نقطه‌های روی جبهه موج تا محل تولید یکسان است. در هر نقطه از آرایه لیزر ارتفاع موج برحسب 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 برای محاسبه سرعت موج استفاده می‌شود. فرض‌های زیر در نظر گرفته شده است:

۱. جبهه موج در فاصله دو نقطه متوالی در آرایه، تخت در نظر گرفته شده است (شکل ۵).
۲. در آب‌های کم عمق یا میانگین سرعت موج در همه نقطه‌های 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.

در آغاز سرعت را در پیشانی موج یعنی برای نقطه‌های وسط آرایه اول و دوم که به تقریب در مقابل محل رها سازی توده به درون مخزن هستند و امتداد انتشار موج در امتداد Z است محاسبه می‌کنیم. برای این نقطه‌های از شبکه با اندازه‌گیری فاصله زمانی، Δt ، رسیدن موج از آرایه اول به آرایه

برخورد یکی از باریکه‌های لیزر با سطح موج آب بر حسب زمان در شکل ۹ نشان داده شده است.

الگوریتم یادشده برای پردازش تصویر، در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین توزیع شدت در امتداد باریکه لیزر درون آب در شکل ۸، پذیره‌های دامنه موج در نقطه

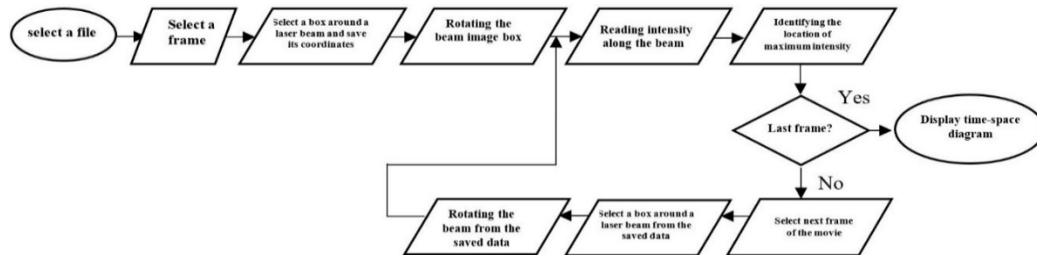


Fig. 6 The algorithm for measuring wave height and the time during which the wave passes through the array."

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

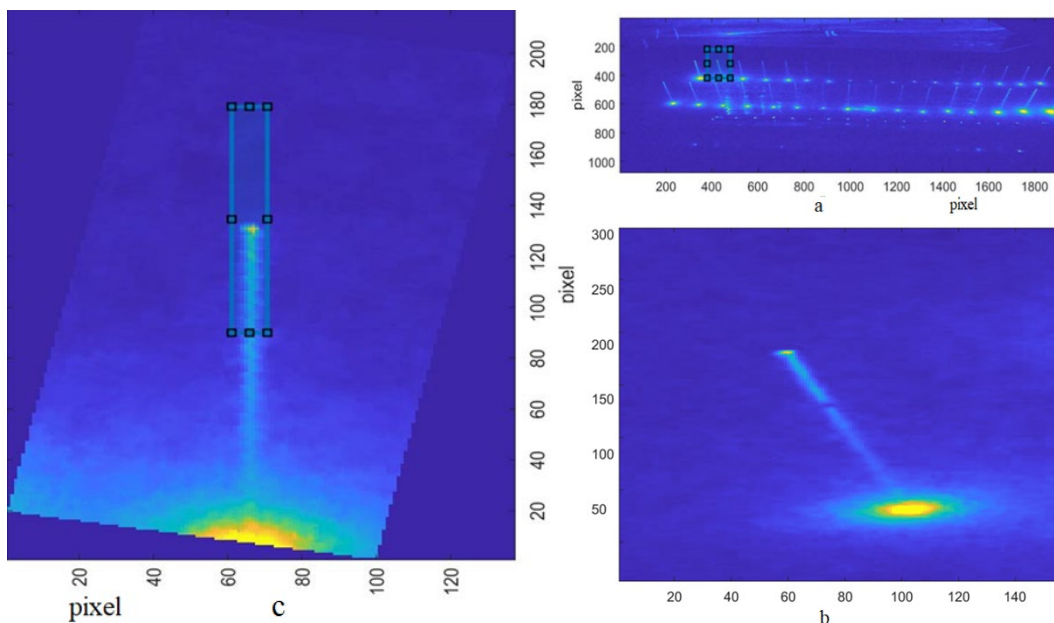


Fig. 7 a) Selection of a beam, b) The selected beam, c) The rotated view of the figure

شکل ۷ (a) انتخاب یکی از باریکه‌ها (b) باریکه انتخاب شده (c) تصویر دوران داده شده شکل

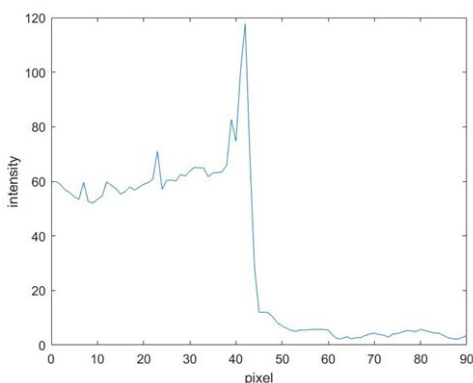


Fig. 8 Intensity distribution along the laser beam inside the water

شکل ۸ توزیع شدت در امتداد باریکه داخل آب

در شکل ۹ محور عمودی با اعمال ضریب واسنجی نشان دهنده پذیره‌های دامنه موج به واحد میلی‌متر است. در محور افقی آن شماره فریم به زمان تبدیل شده است. خطای محاسبه دامنه به دقت به دست آوردن محل برخورد لیزر با سطح آب که از شکل (۸) به دست می‌آید، بستگی دارد. دقت محاسبه مکان ماکزیمم از این نمودار به خاطر برازش تابع درجه ۲ بر روی داده‌های پیرامون ماکزیمم بهتر از یک پیکسل است. ضریب واسنجی برای باریکه لیزر مرتبط با شکل (۸) برابر با 0.05 mm/pixel بوده و لذا خطای اندازه‌گیری دامنه موج $\pm 0.05 \text{ mm}$ است.

ندارد. لذا از تقسیم فاصله دو آرایه‌ها Δz به اختلاف زمانی رسیدن موج از آرایه اول به آرایه دوم، برابر رابطه (۳) سرعت موج $2.67 \frac{m}{s}$ به دست می‌آید. با توجه به برازش صورت گرفته بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده نمودار شکل ۱۰ دقت اندازه‌گیری زمان در حدود $0.01s$ برآورد 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 به صورت نظری برآورد 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 نقطه‌های دیگر شبکه محاسبه می‌شود. با مشخص شدن مقدار سرعت و زاویه انتشار موج برای تمام نقطه‌های 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 به صورت دو بعدی بوده و در طول مسیر آن موج‌های مستهلک می‌شود که این موضوع در شکل (۱۱) نیز قابل مشاهده است. به عبارت دیگر، برابر شکل (۱۱) موج ایجاد شده بر اثر سقوط توده در آغاز به سمت دیواره‌های عرضی مخزن نیز منحرف شده و آنگاه به صورت طولی به مسیر خود ادامه داده است.

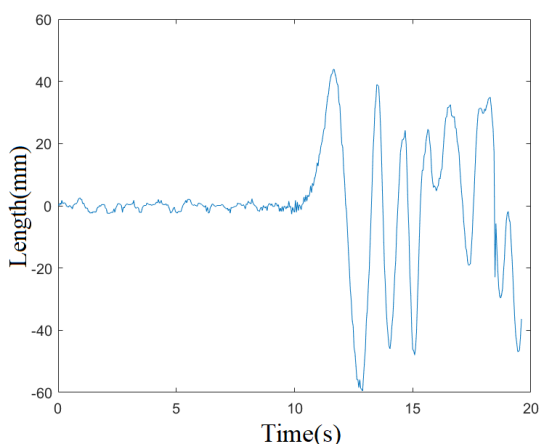


Fig. 9 variation of wave amplitude at the point of laser beam impact with the water surface over time.

شکل ۹ پذیره‌های دامنه موج در نقطه برخورد یکی از باریکه‌های لیزر با سطح موج آب بر حسب زمان

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

۱- فایل پذیره‌های دامنه باریکه در آغاز بازخوانی می‌شود (شکل ۱۰).

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

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

۴- این مرحله‌های برای همه باریکه‌های 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 به تقریب در برابر محل ایجاد موج قرار داد. در روشی که در این پژوهش آرایه شده اختلاف زمانی رسیدن موج به نقطه‌های شبکه اندازه‌گیری اهمیت دارد. لذا مقدارهای مطلق زمانی اهمیت ندارد.

با توجه به سرعت ثابت حرکت موج که همان سرعت تصویربرداری 25 فریم بر ثانیه است، آرایه‌های یادشده در فاصله‌های زمانی $0/04$ ثانیه تصویربرداری شده است. برابر شکل (۱۰) فرض می‌شود بدترین حالت برای ثبت داده‌ها زمانی رخ دهد که قله موج در لحظه تصویربرداری ثبت نشود بلکه در فاصله زمانی دو فریم قرار بگیرد و در نتیجه آن دقت زمان ثبت حرکت موج بین 0 تا $0/04$ ثانیه است که مقدار بیشینه آن همان $0/04$ ثانیه است در نظر گرفته می‌شود. پس از برازش داده‌های ثبت شده برابر شکل (۱۰)، باریکه‌های دقت روش اندازه‌گیری پیشنهادی کمتر از $0/04$ ثانیه به دست آمده است که بیانگر دقت بالای برداشت داده‌ها و روش پیشنهادی است. از طرفی برای موج برابر شکل (۱۰)، کمترین زمان رسیدن موج از سرچشمه موج تا آرایه‌ها، مربوط به آرایه‌های شماره 10 الی 12 است که کمترین فاصله را با چشمه موج دارند و مکان آن‌ها روبه‌روی توده قرار دارد. به عبارت دیگر در فاصله بین $264cm$ و $312cm$ از کناره مخزن قرار دارند. در محدوده آرایه‌های 10 تا 12 ، موج به تقریب در امتداد z منتشر می‌شود و مولفه افقی

۴- نتیجه گیری

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

- برابر 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 در حدود $4/9$ و $3/5$ 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 $2/67$ متر بر ثانیه به دست آمده و این مقدار با استفاده از رابطه موج ثقی $C = \sqrt{gh}$ برابر با $2/71$ متر محاسبه شده است. به عبارت دیگر خطای روش یادشده $1/48$ درصد بوده و بیانگر دقت بالای روش پیشنهادی است. مقایسه با روش‌های دیگر لازم است.

- پس از سقوط توده درون مخزن، موج افزون بر مسیر مستقیم (حرکت یک بعدی) به سمت دیواره‌های عرضی مخزن نیز حرکت کرده و آنگاه 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 بررسی و ارزیابی شده است.

به طور کلی نتایج این پژوهش بیانگر آن است که روش سطح نگار لیزری افزون بر دقت مناسب، نسبت به دیگر روش‌های اندازه گیری ساده تر و هزینه بسیار پایین تری دارد. به عبارت دیگر، برای برآورد فراسنجه‌های موج ایجاد شده در مخزن‌های سدها بر اثر سقوط توده و در نتیجه آن دیگر تجزیه و تحلیل‌های وابسته به تاثیر موج ایجاد شده بر روی سدهای خاکی، روش پیشنهادی از دقت مناسب و

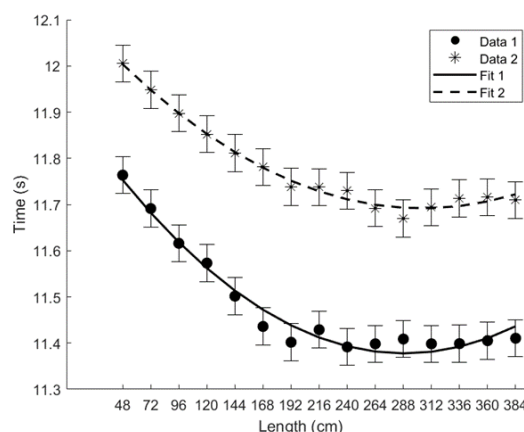


Fig. 10 Curve of in-phase wave points (the first and second arrays are represented by solid circles and stars, respectively). The dashed and solid lines represent the best fit curves. Horizontal axis: Positions of recorded points."

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 پیوسته بهترین منحنی‌های برازش شده هستند. محور افقی: موقعیت نقاط ثبت شده)

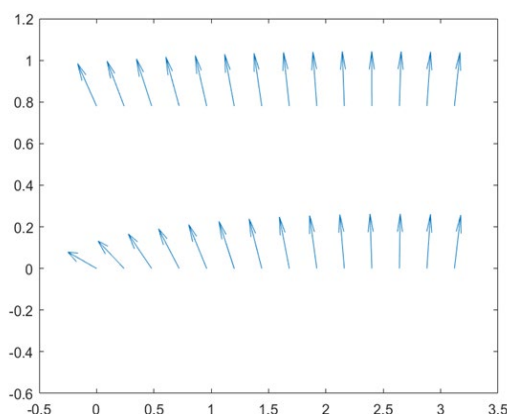


Fig. 11 Wave velocity vector for the points of the two laser arrays (vertical axis is dimensionless and the horizontal axis is in terms of length, with the origin taken at the side of the pool).

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).

همچنین با توجه به شکل مکعب مستطیلی توده جبهه موج به شکل نیم‌دایره نیست. شایان یادآوری اینکه معیار برای واسنجی لیزر و دوربین‌ها نقطه برخورد نور لیزر با سطح آب بوده و شکست نور درون آب تاثیری در این اندازه‌گیری ندارد. همچنین واسنجی برای ارتفاع آب موجود و 15 سانتی‌متر بالاتر و پایین‌تر از این سطح صورت گرفته است.

کارایی بالایی برخوردار است.

نویسنده دوم: بررسی نتایج از نظر اپتیکی و تجزیه و تحلیل آنها و بررسی متن نهایی مقاله.

نویسنده سوم: بررسی نتایج از نظر هیدرولیکی و تجزیه و تحلیل آنها و بررسی متن نهایی مقاله.

۵- نشانه‌ها

S	فاصله دو باریکه بازتابی (mm)
t	ضخامت تیغه (mm)
n	ضریب شکست نور در شیشه
Ir_i	شدت هر باریکه بازتابی (mw)
I_0	شدت اولیه لیزر (mw)
V	سرعت موج (ms^{-1})
$\Delta t'$	اختلاف زمانی رسیدن اوج موج بین دو نقطه مجاور از هر آرایه (s)
Δr	اختلاف طول رسیدن موج بین دو نقطه (mm)
	نشانه‌های یونانی:
θ	زاویه تیغه
α	زاویه انتشار در نقطه‌های شبکه زیرنویس‌ها:
z	امتداد محور z

۶- منبع‌ها

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>.

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>.

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>.

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. Building Partnerships, Proceedings, [https://doi.org/10.1061/40517\(2000\)312](https://doi.org/10.1061/40517(2000)312).

Fujita, I. & Tsubaki, R. (2002). A novel free-surface velocity measurement method using spatio-temporal images. Proceedings of the Joint IAHR & ASCE Conference on Hydraulic Measurements & Experimental Methods, Estes Park, 28 July-1 August 2002. [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>.

Heng, W., Zhao, R., Gan, X. & Ma, X. (2019). Measuring surface velocity of water flow by dense optical flow method. *Water*, 11(11), 2320. <https://doi.org/10.3390/w11112320>.

تضاد منافع نویسندگان

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

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ‌گونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: برداشت داده‌های آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل داده‌ها و نگارش مقاله.

& Hall Computing, Boca Raton, FL, USA.

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).

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

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>.

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.

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).

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(4), 765. <https://doi.org/10.3390/w11040765>

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>

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>.

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>.

Maleki, F. & Bazargan, J. (2025). Three-dimensional numerical modeling of impulsive wave generation and propagation induced by landslides on dam reservoir slopes. *Journal of Hydraulics*, 20(2), 37–52. (In Persian)

Milan, S., Roger, B. & Vaclav, H. (1993). *Image processing, analysis, and machine vision*. Chapman

© 2026 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

