

Performance Evaluation of Submerged Vanes by Flow-3D Numerical Model

Reza Azizi ^{1*}, Mahmood Shafai Bajestan ²

1- Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan.

2- Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz.

* re_azizi@ymail.com

Received: 29 May 2019, Accepted: 7 March 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Submerged vanes are flow-pattern altering structures that are mounted vertically on channel-bed at a small angle of attack to the approach flow. A submerged vane generates a secondary circulation (a spiral flow), due to the vertical pressure gradients on the two sides of the vane, which originates below the top elevation of the vane and extends in the downstream of the vane. The vane-induced vortex redistributes sediment within the channel cross section and changes the alluvial bed profile. However local scour around the vanes is one of the problems in using of submerged vane technique. The extension of local scour hole is related to the shape of the vanes.

Primary submerged vanes are generally flat rectangular plates. In the present research, cutting a part of the leading edge of the vanes out is studied as a countermeasure in reducing the local scour. Studied vanes include a rectangular vane (as the baseline vane), and five other modified vanes with tapered leading edges with angle of $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ, \text{ and } 73.3^\circ$. The present study aims to evaluate the effect of this modification on the vertical velocity components at the leading edge and strength of the secondary circulation in the downstream of the vanes. Flow-3D numerical model, version 10, is used to study the flow field around the vanes.

Methodology: The commercial CFD model Flow-3D was used in this research. Experimental velocity measurements were used for calibration of the model. For this purpose, a recirculating flume (7.30 m long by 0.56 m wide by 0.6 m deep) was used. A centrifugal pump discharged the water into the stilling tank at the entrance of the flume. In order to create a uniform inflow of water, a screen was placed at a distance of 1 m from the flume entrance. A tail gate was used to adjust the depth (d_0) of water in the flume to a constant value of 0.25 m.

The dimensions of the vanes were determined using Odgaard's (2008) design criteria: a vane height-to-water depth ratio of $H_0/d_0 = 0.3$ and length of $L = 3H_0$. A mean flow depth of $d_0 = 0.25$ m yielded $H_0 = 0.075$ m and $L = 0.25$ m. velocity measurements carried out using vanes V_0 and V_3 at a flow Froude number of $Fr = 0.16$. In each test, the vanes were installed on the centerline of the flume at an angle of 20° to the flow.

In order to study vane-induced velocity field, 4×4 cm² grids across the flume were taken at the center of the vanes. At each grid point, three-dimensional components of velocity vector (u, v, w) were measured by means of an electromagnetic velocimeter (EVM). Velocity very close to

the walls of the flume was not measured.

Results and discussion: On the high-pressure side of the vanes, vertical velocity components were upward (positive) and on the low-pressure side were downward (negative). Therefore, a clockwise secondary circulation was generated at downstream of the vanes.

Downward velocity components at leading edge of primary rectangular vane (vane V_0) were obvious. By cutting parts of leading edge out of vane V_0 for tapered vanes V_1 and V_2 , the magnitude of negative w -velocity components was respectively reduced by 40% and 69%. By increasing the taper angle for vanes V_3 , V_4 and V_5 , downward velocity components were diminished, effectively.

Moment of momentum (MOM) quantity was used in order to evaluate strength of vane-induced circulation. MOM values were applied for comparison of performance of the vanes. For this purpose, velocity data at two sections at the distances of $2H_0$ and $4H_0$, i.e., 15 cm and 30 cm downstream from center of the vanes was used. In the calculation of MOM , 100 velocity components (50 v -components and 50 w -components) were used. Therefore, this quantity is a useful criterion for evaluation of the performance and efficiency of the submerged vanes.

Conclusion: Velocity distribution and moment of momentum (MOM) of the vanes indicated the reduction of erosive negative velocity components at the leading edge of the tapered vanes. Based on MOM values, cutting the leading edge out of the vanes causes lower performance. In other words, this modification restricts the vane-influenced field of the tapered vanes relative to the rectangular vane (vane V_0). Results showed that the performance of tapered vanes (V_1 to V_5), relative to the rectangular vane, (at distance of $2H_0$) is respectively reduced by 5.8%, 7.3%, 17.8%, 33% and 42.6%; at distance of $4H_0$ the amount of reduction respectively is 7.4%, 11.9%, 17%, 25.5% and 34.3%. On the contrary, the efficiency of the tapered vanes increased. The amount of increasing at distance of $2H_0$ from the center of vanes V_1 to V_5 respectively is 3.2%, 9%, 11%, 14% and 14.8% and at distance of $4H_0$ respectively is 1.4%, 3.6%, 12.1%, 26.7% and 31.3%. Therefore, if tapered vanes are used to reduce the local scour, big values for the distance between the vanes arrays (δ_s), according to the design criteria, are not recommended.

Keywords: Sediment management, river, secondary circulation, moment of momentum.

ارزیابی عملکرد صفحه‌های مستغرق با استفاده از مدل عددی Flow-3D

رضا عزیزی^{۱*}، محمود شفاعی بجنستان^۲

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

* re_azizi@ymail.com

دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۸، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۷ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: هر صفحه مستغرق، یک مولد جریان چرخشی ثانوی است که در نتیجه‌ی وجود گرادیان قائم فشار در دو طرف صفحه حاصل می‌شود. عملکرد یک صفحه‌ی مستغرق به الگوی جریان ثانوی ناشی از آن بستگی دارد. در این تحقیق تأثیر برش لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها بر عملکرد شش نوع شکل مختلف صفحه‌های مستغرق با استفاده از مدل عددی Flow-3D ارزیابی شده است. صفحه‌های مورد بررسی عبارتند از یک صفحه‌ی مستطیلی ساده و پنج صفحه که لبه‌ی ابتدایی آن‌ها به ترتیب با زاویه‌های ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۰ و ۷۳/۳ درجه نسبت به امتداد قائم برش خورده است. مدل عددی با استفاده از داده‌های سرعت‌سنجی آزمایشگاهی واسنجی شده است. نتایج نشان می‌دهد که برش لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها در کاهش مؤلفه‌های منفی سرعت در لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها بسیار مؤثر است. این روش اصلاحی موجب کاهش نسبی گشتاور اندازه‌ی حرکت (*MOM*) ناشی از صفحه‌ها، نسبت به صفحه‌ی مستطیلی مبنا می‌شود؛ در عین حال بازده (عملکرد در واحد سطح) صفحه‌های برش خورده نسبت به صفحه‌ی مستطیلی ساده افزایش یافته است.

کلید واژگان: مدیریت رسوب، رودخانه، جریان چرخشی ثانوی، گشتاور اندازه حرکت.

۱- مقدمه

روش صفحه‌های مستغرق یکی از روش‌های مؤثر مدیریت رسوب در مجاری آبرفتی می‌باشد. صفحه‌ها هم می‌توانند عامل رسوب‌گذاری و هم رسوب‌زدایی باشند، که به هدف برنامه‌ی مدیریت رسوب بستگی دارد. صفحه‌های مستغرق به صورت قائم و اغلب با زاویه‌ای کم نسبت به جریان نزدیک‌شونده، در بستر آبراهه نصب می‌شوند. یک صفحه‌ی مستغرق موجب شکل‌گیری یک جریان چرخشی (حلزونی) می‌شود که از قسمت بالای لبه‌ی انتهایی صفحه سرچشمه می‌گیرد و در جهت پایین‌دست امتداد می‌یابد. بنابر نتایج بررسی‌های Odgaard and Spoljaric (1986) هسته‌ی جریان چرخشی دنباله‌دار ناشی از صفحه‌ها، به اندازه‌ی ۰/۲ ارتفاع صفحه، و بنابر نتایج بررسی‌های Gupta et al. (2006) به اندازه ۰/۱ ارتفاع صفحه، پایین‌تر از وجه بالایی صفحه، واقع می‌شود.

آب‌شستگی موضعی پیرامون صفحه‌ها همواره یکی از دشواری‌های استفاده از صفحه‌های مستغرق بوده است که در صورت نبود کنترل، سبب ناپایداری و در نهایت تخریب سامانه‌ی صفحه‌ها می‌شود؛ لذا بررسی و ارزیابی در این زمینه و ارائه‌ی راهکارهایی برای مدیریت و کاهش آب‌شستگی موضعی پیرامون صفحه‌ها ضروری است. تاکنون روش‌هایی مانند نصب عمیق‌تر صفحه‌ها در بستر رسوبی (Spoljaric, 1988)، و استفاده از طوقه (Gupta et al., 2010) به منظور کاهش ناپایداری صفحه‌ها و مدیریت آب‌شستگی پیرامون صفحه‌ها پیشنهاد شده است. در تحقیق Gupta et al. (2010) ابعاد بهینه‌ی طوقه به صورت نسبت‌هایی از ارتفاع صفحه‌ها ارائه شده است. در تحقیق Flokstra (2006) عملکرد صفحه‌های مستغرق با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی شده و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. در این تحقیق، سرعت

عددی با یک شبکه یا مش محاسباتی آغاز می‌شوند. این شبکه از شماری عنصر^۳ یا سلول محاسباتی تشکیل شده است. سلول‌های محاسباتی فضای فیزیکی مسئله را به حجم‌های کوچکی تقسیم می‌کنند، به طوری که هر حجم محاسباتی با چند گره به حجم‌های مجاور متصل شده است. گره‌ها محل محاسبه کمیت‌های مجهول مانند فشار، دما و سرعت هستند.

مدل عددی Flow-3D یک بسته نرم‌افزاری جامع دینامیک سیالات محاسباتی است. حرکت سیال با استفاده از معادله‌های دیفرانسیل غیرخطی و از مرتبه‌ی دوم، توصیف می‌شود. حل عددی این معادله‌ها شامل پیش‌بینی و برآورد هر یک از ترم‌های معادله‌ها با استفاده از عبارات‌های جبری است. معادله‌های دیفرانسیل مورد استفاده در مدل عددی Flow-3D به صورت ترم‌هایی در مختصات کارتزین (z, y, x) نوشته می‌شوند.

در مختصات استوانه‌ای، مختصه‌ی x با مختصه‌ی شعاعی r ، و مختصه‌ی y با مختصه‌ی سمتی θ جایگزین می‌شود. z نیز مختصه‌ی محوری است. در مدل عددی Flow-3D افزون بر معادله‌های پیوستگی و ناویر-استوکس، مجموعه‌ی گسترده‌ای از رابطه‌ها و معادله‌ها شامل معادله‌های برآورد لزجت دینامیک سیالات، معادله‌های انرژی سیال، انتقال گرما، پخشیدگی گرمایی، معادله‌ی حالت، و راهکارهای محاسباتی کمکی پرشمار برای شرایط ویژه و خاص می‌باشد. در این تحقیق فرآیند شبیه‌سازی همه‌ی صفحه‌ها بر مبنای حفظ پایداری^۴ و همگرایی^۵ روش حل بوده و برای واسنجی^۶ مدل، از داده‌های سرعت‌سنجی آزمایشگاهی استفاده شد. تهیه داده‌های مورد نیاز برای واسنجی مدل عددی، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران انجام شد. برای این منظور، از یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۷/۳۰ متر، عرض ۰/۵۶ متر، ارتفاع ۰/۶۰ متر استفاده شد.

آزمایش‌ها در شرایط بستر صلب انجام شد. جریان مورد نیاز با استفاده از یک پمپ سانتریفیوژ، از منبع تأمین آب، پس از عبور از مخزن آرام کننده، وارد فلوم می‌شد. جریان خروجی نیز در انتهای فلوم پس از عبور از یک سرریز مثلثی

جریان در پایین‌دست صفحه‌ها و نیروهای رانشی و بالابرنده مورد توجه قرار گرفته است. (Ouyang 2009) با استفاده از یک مدل محاسباتی که بر مبنای نظریه‌ی باله‌ی غیرلزج^۱ و نظریه‌ی شیب عرضی بستر (Odgaard and Wang, 1991a) است، ابعاد و سه شکل مختلف صفحه‌های مستغرق را بررسی نموده است. در تحقیق Ouyang and Cheng (2016) عملکرد صفحه‌های مستغرق با شکل‌های مختلف بررسی شده و یک مدل عددی به منظور ارزیابی تأثیر شکل صفحه‌ها توسعه داده شده است. در تحقیق Kalathil et al. (2018) کاربرد صفحه‌های مستغرق به منظور مدیریت و کاهش رسوب ورودی به یک کانال آبیگر ذوزنقه‌ای بررسی شده است. در این تحقیق به جای استفاده از صفحه‌هایی با ارتفاع یکسان، از صفحه‌هایی با ارتفاع مختلف استفاده شده است.

در این تحقیق، ایجاد برش در لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها به عنوان روشی جهت کاهش آب‌شستگی در لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها ارزیابی شده است. هدف این تحقیق ارزیابی تأثیر برش لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها بر مؤلفه‌های رو به پایین (منفی) جریان، که عامل آب‌شستگی در لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها هستند، توزیع سرعت در دو وجه کم‌فشار و پر فشار صفحه‌ها، و قدرت جریان چرخشی ناشی از صفحه‌ها می‌باشد. در این تحقیق نسخه‌ی ۱۰ مدل عددی Flow-3D برای ارزیابی الگوی جریان پیرامون شش نوع از صفحه‌ها استفاده شده است. واسنجی مدل عددی با استفاده از داده‌های سرعت‌سنجی آزمایشگاهی انجام شده است. همچنین ارزیابی قدرت جریان چرخشی ناشی از صفحه‌ها، از طریق محاسبه‌ی کمیت گشتاور اندازه‌ی حرکت (MOM) در مقطعی در پایین‌دست صفحه‌ها صورت گرفته است.

۲- روش کار

دینامیک سیالات محاسباتی^۲ یک روش شبیه‌سازی جریان با استفاده از معادله‌های استاندارد جریان، مانند معادله‌های پیوستگی و ناویر-استوکس است که پس از گسسته‌سازی، برای هر سلول محاسباتی حل می‌شوند. اغلب مدل‌های

⁴ Stability

⁵ Convergence

⁶ Calibration

¹ Inviscid wing theory

² Computational Fluid Dynamics (CFD)

³ Element

استاندارد ۵۳ درجه، بار دیگر وارد منبع تأمین آب می‌شد. اندازه‌گیری دبی جریان با خواندن ارتفاع آب روی رأس سرریز و استفاده از رابطه‌ی دبی- اشل سرریز صورت می‌گرفت (شکل ۱). در همه‌ی آزمایش‌ها عمق جریان (d_o) ثابت و برابر با ۰/۲۵ متر بود. طول (L) و ارتفاع اولیه صفحه‌ی مستطیلی مبنا، بر پایه‌ی معیارهای ارائه شده توسط Odgaard and Wang (1991) تعیین شد: $H_o/L = 0/3$ و $H_o = 0/3d_o$. بنابراین با توجه به عمق جریان، ارتفاع و طول صفحه‌ها به ترتیب

سرعت‌سنجی در عدد فرود (Fr) ۰/۱۶ (دبی ۰/۳۵ مترمکعب بر ثانیه) و با استفاده از دو صفحه‌ی V_3 و V_0 (جدول ۱) انجام شد. در هر آزمایش، هر یک از صفحه‌های یاد شده در امتداد خط مرکزی فلوام و با زاویه‌ی 20° نسبت به جریان اصلی نصب شدند. با توجه به اینکه در آزمایش‌ها، شرایط جریان زیربحرانی بود، کنترل عمق جریان با استفاده از یک دریچه‌ی کشویی که در انتهای فلوام قرار داشت، صورت می‌گرفت (شکل ۱).

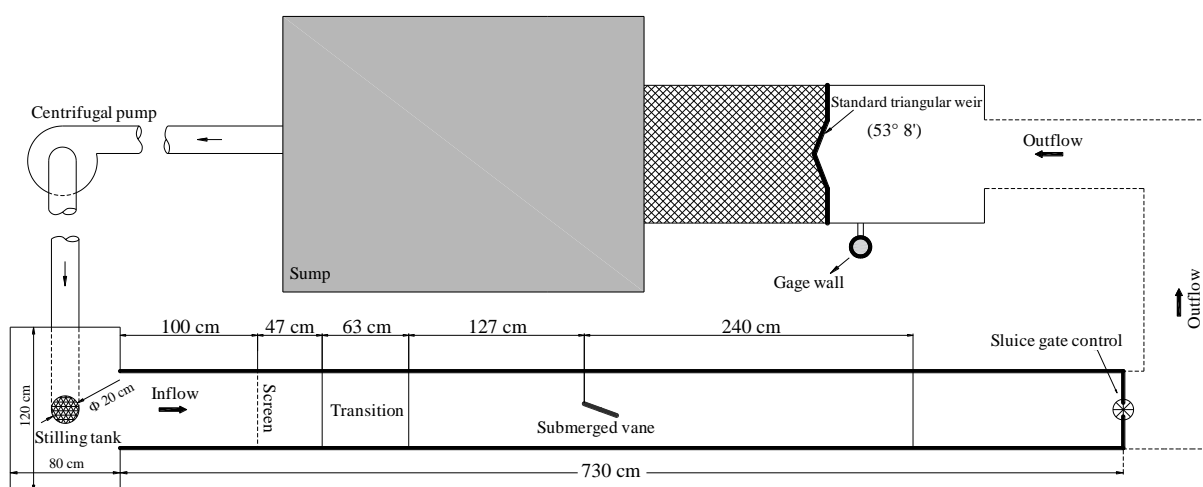


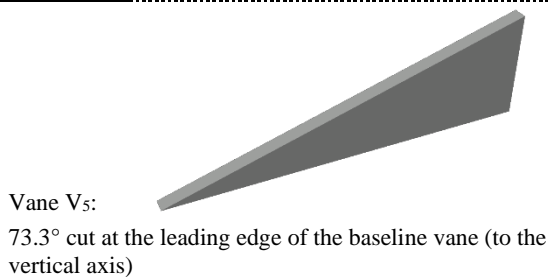
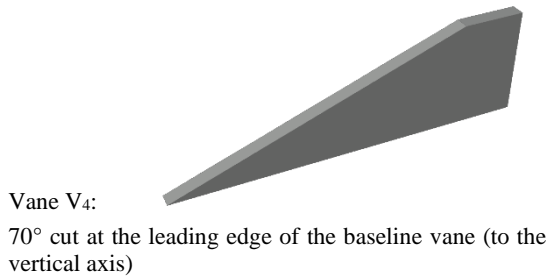
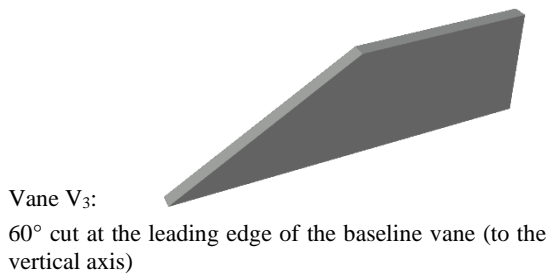
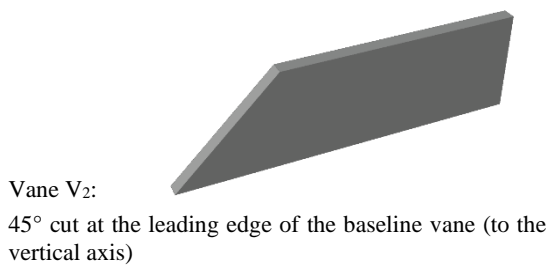
Fig. 1 Laboratory flume used in present research

شکل ۱ ویژگی‌های فلوام آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق

در هر آزمایش، پس از تنظیم دبی و عمق جریان، برای اندازه‌گیری، از دستگاه سرعت‌سنج الکترومغناطیس (EVM) مدل ACM3-RS که قابلیت اندازه‌گیری نقطه‌ای مؤلفه‌های سه بعدی سرعت (u, v, w) با دقت $\pm 0/5$ سانتی‌متر بر ثانیه را دارد استفاده شد. پایه و مبناى اندازه‌گیری این دستگاه بر استفاده از قانون القای الکترومغناطیس مایکل فارادی استوار است. برای هر صفحه، اندازه‌گیری‌ها در سه مقطع در بالادست، مرکز، و پایین دست صفحه انجام شد و در هر سه مقطع، از برداشت سرعت در فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متری از دیواره‌ها صرف‌نظر شد تا تأثیر دیواره‌ها بر جریان چرخشی ناشی از صفحه‌ها حذف شود. در هر مقطع، سرعت‌سنجی در یک شبکه $4 \times 4 \text{ cm}^2$ در 50 نقطه انجام گرفت که انتخاب این شبکه با توجه به ابعاد حسگر دستگاه سرعت‌سنج بود. در این شرایط با توجه به

ارتفاع صفحه‌ها، برداشت سرعت در امتداد قائم، در بیش از دو نقطه امکان‌پذیر نبود؛ لذا به منظور واسنجی مدل عددی از توزیع عرضی مؤلفه‌ی قائم سرعت در ارتفاع ثابت $z = 6/5 \text{ cm}$ (نسبت به کف فلوام) استفاده شد. در این تحقیق، هم در مدل آزمایشگاهی و هم در مدل عددی، جهت x دستگاه مختصات در امتداد جریان اصلی، به طرف پایین‌ست، جهت y در امتداد عرضی و عمود بر جریان، و جهت z در امتداد قائم و عمود بر دو محور دیگر فرض شده است. در فرآیند شبیه‌سازی عددی، جریان یک سیال تراکم‌ناپذیر با سطح آزاد در نظر گرفته شد. سیستم یکاهای سانتی‌متر-گرم-ثانیه (CGS) انتخاب شد و بر این مبنا در بخش مربوط به ویژگی‌های فیزیکی مسئله، شتاب گرانش 981 cm/s^2 - در امتداد قائم (z) فرض شد. از بین گزینه‌های مربوط به لزجت سیال، سیال لزج نیوتنی، و از بین مدل‌های

در هر آزمایش، پس از تنظیم دبی و عمق جریان، برای اندازه‌گیری، از دستگاه سرعت‌سنج الکترومغناطیس (EVM) مدل ACM3-RS که قابلیت اندازه‌گیری نقطه‌ای مؤلفه‌های سه بعدی سرعت (u, v, w) با دقت $\pm 0/5$ سانتی‌متر بر ثانیه را دارد استفاده شد. پایه و مبناى اندازه‌گیری این دستگاه بر استفاده از قانون القای الکترومغناطیس مایکل فارادی استوار است. برای هر صفحه، اندازه‌گیری‌ها در سه مقطع در بالادست، مرکز، و پایین دست صفحه انجام شد و در هر سه مقطع، از برداشت سرعت در فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متری از دیواره‌ها صرف‌نظر شد تا تأثیر دیواره‌ها بر جریان چرخشی ناشی از صفحه‌ها حذف شود. در هر مقطع، سرعت‌سنجی در یک شبکه $4 \times 4 \text{ cm}^2$ در 50 نقطه انجام گرفت که انتخاب این شبکه با توجه به ابعاد حسگر دستگاه سرعت‌سنج بود. در این شرایط با توجه به



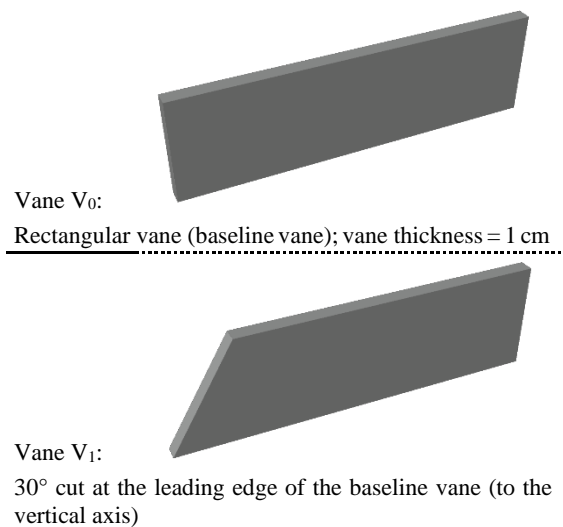
۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها

در شکل ۲، توزیع عرضی مؤلفه‌ی قائم سرعت در مقطع میانی صفحه‌های V₀ و V₃ (مقطعی که مرکز صفحه‌ها روی خط مرکزی فلوم واقع شده است)، به دست آمده از داده‌های سرعت‌سنجی آزمایشگاهی و مدل عددی ارائه شده است. در این شکل، تشکیل مؤلفه‌های رو به بالای w در سمت پرفشار صفحه‌ها، و مؤلفه‌های رو به پایین در سمت کم‌فشار صفحه‌ها به‌طور کامل مشخص است. شکل ۲ هماهنگی خوبی را بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، بیشترین تفاوت بین داده‌های آزمایشگاهی و خروجی مدل عددی برای صفحه

تلاطم، مدل شبیه‌سازی گردابه‌ی بزرگ^۱ انتخاب شد. سیال مورد بررسی، آب با دمای ۲۰ درجه سلسیوس بود. صفحه‌ها به صورت اجسام صلب در محیط اتوکد ترسیم شدند؛ پس از آن، در قالب اجزای stl^۲ وارد محیط Flow-3D شدند. شبیه‌سازی در بازه‌ای به طول ۱۰۰ سانتی‌متر انجام شد به گونه‌ای که مرکز صفحه‌ها در فاصله‌ی ۵۰ سانتی‌متری از ابتدای بازه قرار داشت. عرض بازه برابر با عرض فلوم آزمایشگاهی، ۵۶ سانتی‌متر، و ارتفاع آن نیز برابر با عمق جریان، ۲۵ سانتی‌متر بود. به عبارت دیگر فضای شبیه‌سازی، مکعبی به طول ۱۰۰ سانتی‌متر، عرض ۵۶ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر بود. در امتداد طول، ۲۰۰ سلول محاسباتی و در امتداد عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۱۲ و ۷۵ سلول محاسباتی در نظر گرفته شد. توزیع فشار هیدرواستاتیک در امتداد قائم و جریانی با سرعت کم در بازه‌ی مورد بررسی به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شد. شرایط مرزی شامل سرعت جریان در مرز بالادست، پیوستگی جریان در مرز پایین‌دست و فشار نسبی صفر برای مرز بالایی (سطح آب) در نظر گرفته شد. دیواره‌های جانبی و کف نیز به صورت مرزهای نفوذناپذیر به مدل معرفی شدند. در مدل عددی نیز صفحه‌ها، مشابه با شرایط آزمایشگاهی با زاویه‌ی ۲۰° نسبت به جریان اصلی روی خط مرکزی کانال فرضی قرار گرفتند.

جدول ۱ ویژگی‌های صفحه‌های مورد استفاده در این تحقیق

Table 1 Geometry of studied vanes



² Stereo lithographic image

¹ Large eddy simulation model

می‌باشد. با در نظر داشتن این نکته که در سمت پرفشار صفحه‌ها، مؤلفه‌های سرعت قائم، رو به بالا (مثبت) و در سمت کم‌فشار، رو به پایین (منفی) هستند؛ صفحه مستطیلی یک جریان چرخشی ساعتگرد (با نگاه از پایین‌دست) تولید کرده است.

به منظور مشخص شدن تأثیر برش لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها بر شکل‌گیری مؤلفه‌ی قائم سرعت، توزیع مؤلفه‌ی w سرعت در یک نقطه در محل لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها بررسی شده است. نقطه یاد شده با حرف U در شکل ۴ نشان داده شده است.

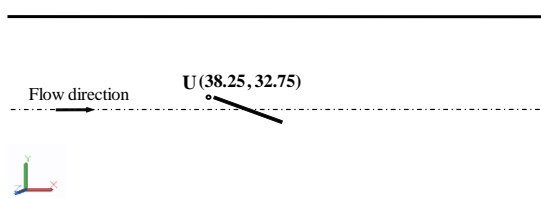


Fig. 4 Evaluation of w -velocity component at leading edge of vanes (point U)

شکل ۴ ارزیابی مؤلفه‌ی قائم سرعت (w) در لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها (نقطه‌ی U)

در شکل ۵ توزیع مؤلفه w در محل لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها V_0, V_1, V_2, V_3, V_4 و V_5 ارائه شده است. در این شکل توزیع مؤلفه‌ی رو به پایین (منفی) سرعت در لبه‌ی ابتدایی صفحه V_0 نسبت به صفحه‌های دیگر به کلی متمایز است. با ایجاد برش در لبه‌ی ابتدایی صفحه‌های V_1, V_2 ، به ترتیب به میزان ۴۰ و ۶۹ درصد، بزرگی مؤلفه‌های رو به پایین سرعت نسبت به صفحه V_0 کاهش یافته است. در صفحه‌های V_3, V_4 و V_5 نیز با افزایش زاویه برش، مؤلفه‌های منفی سرعت به طور کامل از بین می‌روند.

برای ارزیابی قدرت جریان چرخشی ناشی از صفحه‌ها و مقایسه‌ی عملکرد آن‌ها با استفاده از گشتاور اندازه‌ی حرکت (MOM)، از داده‌های سرعت در مقطع پایین‌دست صفحه‌ها استفاده شد. برای این منظور دو مقطع در پایین‌دست صفحه‌ها، در فاصله‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر نسبت به مرکز صفحه‌ها، به ترتیب معادل با $2H_0$ و $4H_0$ ، در نظر گرفته شد. برای جرم نقطه‌ای m ، متمرکز در نقطه‌ی P (شکل ۶)، می‌توان رابطه‌ی زیر را برای گشتاور اندازه‌ی حرکت (MOM_P) نوشت (Gupta et al., 2006):

V_0 ، برای سرعت‌های مثبت و منفی به ترتیب برابر است با: ۱/۷ درصد و ۱۰/۸ درصد. در صفحه‌ی V_3 ، بیشترین تفاوت بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی، برای سرعت‌های مثبت و منفی به ترتیب عبارت است از: ۵/۱ درصد و ۱۰/۶ درصد. در تمامی موارد یاد شده، مدل عددی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، مقادیر کمتری را برای مؤلفه‌ی قائم سرعت (w) برآورد کرده است.

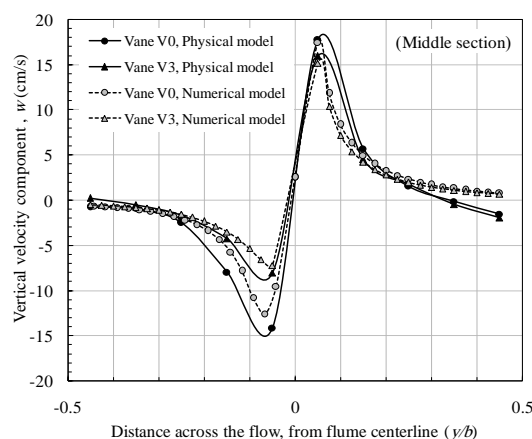
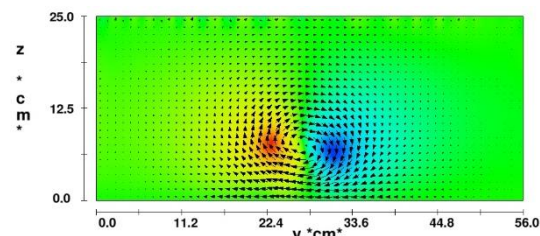


Fig. 2 Transverse distribution of vertical velocity component at constant height of $z = 6.5$ cm, middle section of vanes V_0 and V_3

شکل ۲ توزیع عرضی مؤلفه‌ی قائم سرعت در ارتفاع ثابت $Z = ۶/۵$ cm در مقطع میانی صفحه‌های V_0 و V_3

پس از واسنجی مدل عددی، به طور کیفی در شکل ۳ الگوی جریان چرخشی (در قالب توزیع عرضی مؤلفه‌ی w سرعت) ناشی از صفحه‌ی مستطیلی ساده (صفحه‌ی V_0) در مقطعی در پایین‌دست صفحه در فاصله ۱۵/۵ سانتی‌متری نسبت به مرکز صفحه ارائه شده است. در دو شکل یاد شده، جهت جریان اصلی عمود بر صفحه کاغذ و به سوی خارج می‌باشد.



FLOW-3D I=10.099879 x=6.550E+01 j=2 to 57 k=2 to 26
16:31:37 03/27/2019 mjbv hydr3d: version 10.0.1.3 win64 2011
Vane V0

Fig. 3 Vane V_0 induced circulation downstream of vane ($x = 65.5$ cm), flow Froude number of $Fr = 0.16$

شکل ۳ جریان چرخشی ناشی از صفحه‌ی V_0 در پایین‌دست صفحه (مختصات $X = ۶۵/۵$ cm)، عدد فرود جریان

$$Fr = 0.16$$

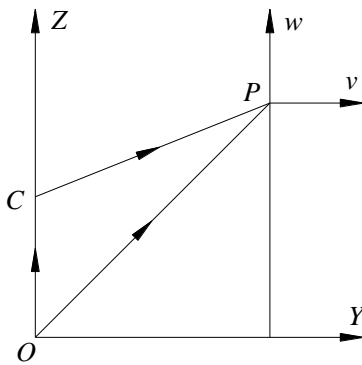


Fig. 6 Position vectors and velocity components at point P

شکل ۶ بردارهای مکان و مؤلفه‌های سرعت در نقطه‌ی P

با استفاده از رابطه‌های (۲) و (۳) بردار مکان نقطه P نسبت به نقطه C را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \vec{R} &= \vec{OP} - \vec{OC} = y\vec{j} + z\vec{k} - 0.9H_o\vec{k} \\ &= y\vec{j} + (z - 0.9H_o)\vec{k} \end{aligned} \quad (4)$$

بنابراین گشتاور اندازه‌ی حرکت در نقطه‌ی P، نسبت به مرکز گردابه، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} MOM_P &= m \left[\{y\vec{j} + (z - 0.9H_o)\vec{k}\} \times (V_y\vec{j} + V_z\vec{k}) \right] \\ &= m\vec{i} [yV_z - (z - 0.9H_o)V_y] \\ &= m\vec{i} [yV_z + (0.9H_o - z)V_y] \end{aligned} \quad (5)$$

در رابطه بالا، بردار یکه \vec{i} بیان می‌دارد که MOM هم‌جهت با جریان اصلی است. عبارت myV_z مقدار MOM ناشی از مؤلفه‌ی قائم سرعت، و $m(0.9H_o - z)V_y$ مقدار MOM ناشی از مؤلفه‌ی عرضی سرعت است.

در یک شبکه $4 \times 4 \text{ cm}^2$ ، در طول ۱ سانتی‌متر در جهت جریان، با فرض این‌که چگالی آب $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$ باشد، مقدار جرم آب در یک سلول شبکه در واحد طول جریان ۱۶ گرم به‌دست می‌آید، بنابراین: $m = 16 \text{ g}$

با جایگذاری مقدار m در معادله (۵) رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$MOM_P = 16\vec{i} [yw + (0.9H_o - z)v] \quad (6)$$

در نتیجه مقدار کل MOM به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$MOM_{Total} = \sum_{i=1}^{50} MOM_i \quad (7)$$

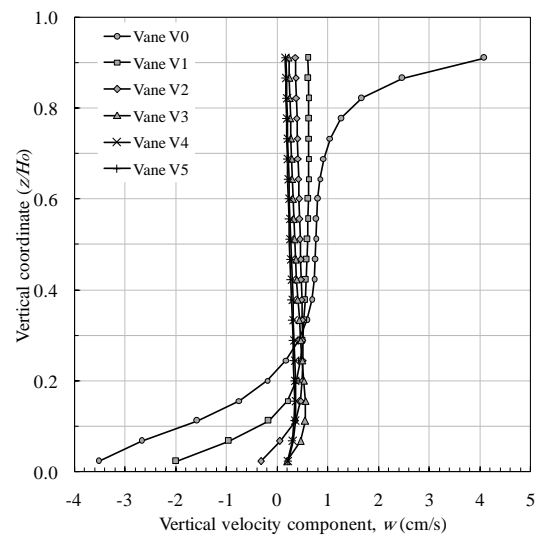


Fig. 5 Vertical distribution of w-velocity component at leading edge of the vanes (from numerical model)

شکل ۵ توزیع قائم مؤلفه‌ی قائم سرعت (w) در محل لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها (حاصل از مدل عددی)

$$MOM_P = m(\vec{R} \times \vec{V}) \quad (1)$$

در رابطه بالا، m جرم سیال، \vec{R} بردار مکان نقطه‌ی P، نسبت به مرکز گردابه (C) می‌باشد و به صورت \vec{CP} بیان می‌شود (شکل ۶)؛ به عبارت دیگر $\vec{R} = \vec{CP}$. \vec{V} نیز بردار سرعت است. برای تحلیل گشتاور اندازه‌ی حرکت گردابه‌ی ناشی از صفحه‌ی مستغرق، مبدأ دستگاه مختصات (O) بر روی خط مرکزی در کف فلوم و در مرکز صفحه‌ی مستغرق در نظر گرفته شد؛ در این صورت بردار مکان نقطه‌ی P نسبت به نقطه‌ی O، \vec{OP} می‌باشد که به صورت زیر نوشته می‌شود (Gupta et al., 2006):

$$\vec{OP} = y\vec{j} + z\vec{k} \quad (2)$$

در معادله (۲)، y و z مختصات نقطه‌های شبکه و \vec{j} و \vec{k} بردارهای یکه به ترتیب در امتداد محورهای Y و Z هستند. چنانچه فرض شود مرکز گردابه‌ی ناشی از صفحه‌ی مستغرق، به اندازه‌ی $0.1H_o$ پایین‌تر از لبه‌ی بالایی صفحه‌ها قرار دارد، در این صورت با توجه به شکل ۶ می‌توان نوشت:

$$\vec{OC} = 0.9H_o\vec{k} \quad (3)$$

مناسب و جامعی برای ارزیابی عملکرد و کارایی (عملکرد در واحد سطح) صفحه‌های مستغرق می‌باشد. محاسبات مربوط به گشتاور اندازه‌ی حرکت (MOM) صفحه‌های مستغرق در جدول ۲ خلاصه شده است.

در رابطه بالا، i شمار نقطه‌ها در مقطع عرضی جریان است که از مؤلفه‌های بردار سرعت در آن نقطه‌ها برای محاسبه گشتاور اندازه حرکت استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در محاسبه MOM از ۱۰۰ مؤلفه‌ی سرعت (۵۰ مؤلفه‌ی v و ۵۰ مؤلفه‌ی w) استفاده شده است؛ لذا این کمیت معیار

جدول ۲ گشتاور اندازه حرکت صفحه‌های مستغرق

Table 2 Moment of momentum of submerged vanes

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Vane type	θ	A	MOM_{2H_0}	MOM_{4H_0}	\overline{MOM}_{2H_0}	\overline{MOM}_{4H_0}
	(deg.)	(cm ²)	(g.cm ² /s)	(g.cm ² /s)	(g/s)	(g/s)
V_0	0	187.50	2264.1	2002.5	12.1	10.7
V_1	30	171.26	2133.4	1854.2	12.5	10.8
V_2	45	159.38	2098.4	1764.1	13.2	11.1
V_3	60	138.79	1860.3	1661.1	13.4	12.0
V_4	70	110.23	1517.6	1491.4	13.8	13.5
V_5	73.3	93.75	1299.5	1315.2	13.9	14.0

با استفاده از جدول ۲، درصد کاهش عملکرد و درصد افزایش کارایی صفحه‌ها در دو مقطع در پایین دست صفحه‌ها، در فاصله‌های $2H_0$ و $4H_0$ نسبت به مرکز صفحه‌ها، محاسبه شده و در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به این جدول کارایی صفحه‌های برش خورده، نسبت به صفحه‌ی مستطیلی مبنا، افزایش یافته است.

در این جدول، در ستون‌های (۱)، (۲) و (۳) به ترتیب نوع صفحه‌ها، زاویه‌ی برش و مساحت جانبی صفحه‌های (A) مشخص شده است. در ستون‌های (۴) و (۵) گشتاور اندازه‌ی حرکت، و در ستون‌های (۶) و (۷) کارایی صفحه‌ها ($\overline{MOM} = MOM/A$) به ترتیب در فاصله‌های $2H_0$ و $4H_0$ ، نسبت به مرکز صفحه‌ها، ارائه شده است.

جدول ۳ درصد کاهش عملکرد و درصد افزایش کارایی صفحه‌های برش خورده نسبت به صفحه‌ی مستطیلی مبنا

Table 3 Percent of performance decrease and efficiency increase of tapered vanes relative to primary rectangular vane

Vane type	V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
Decrease in performance of vanes, at distance of $2H_0$ (%)		-5.8	-7.3	-17.8	-33.0	-42.6
Decrease in performance of vanes, at distance of $4H_0$ (%)		-7.4	-11.9	-17.0	-25.5	-34.3
Increase in efficiency of vanes, at distance of $2H_0$ (%)		3.2	9.0	11.0	14.0	14.8
Increase in efficiency of vanes, at distance of $4H_0$ (%)		1.4	3.6	12.1	26.7	31.3

با توجه به جدول ۳، کاهش عملکرد صفحه‌ها به این معنی است که تأثیر جریان چرخشی ناشی از صفحه‌ها در فاصله‌ی کوتاه‌تری از محل نصب صفحه‌ها از بین می‌رود، لذا در صورت استفاده از صفحه‌های برش خورده، لازم است تا فاصله نصب صفحه‌ها نسبت به معیارهای طراحی موجود، مقادیر کمتری در نظر گرفته شود.

در لبه ابتدایی صفحه‌ها، در کاهش مؤلفه‌های منفی سرعت در محل لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها مؤثر بوده است؛ بر مبنای محاسبات گشتاور اندازه‌ی حرکت، برش لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها موجب کاهش عملکرد صفحه‌ها، و به عبارت دیگر سبب کاهش طول میدان تحت تأثیر صفحه‌ها، نسبت به صفحه‌ی مستطیلی مبنا (صفحه V_0)، می‌شود. این کاهش در فاصله‌ی $2H_0$ از مرکز صفحه‌های V_1 تا V_5 به ترتیب $5/8\%$ ، $7/3\%$ ، $17/8\%$ ، 33% و $42/6\%$ است؛ در فاصله‌ی $4H_0$ از مرکز صفحه‌ها نیز میزان کاهش به

با توجه به جدول ۳، کاهش عملکرد صفحه‌ها به این معنی است که تأثیر جریان چرخشی ناشی از صفحه‌ها در فاصله‌ی کوتاه‌تری از محل نصب صفحه‌ها از بین می‌رود، لذا در صورت استفاده از صفحه‌های برش خورده، لازم است تا فاصله نصب صفحه‌ها نسبت به معیارهای طراحی موجود، مقادیر کمتری در نظر گرفته شود.

۵- نتیجه‌گیری

پس از ارزیابی نمودارهای توزیع سرعت و محاسبات گشتاور اندازه حرکت (MOM) صفحه‌ها، مشخص شد که ایجاد برش

∇	حجم یک سلول از شبکه در واحد طول در جهت جریان (cm^3)
δ_s	فاصله‌ی طولی بین ردیف‌های صفحه‌ها
θ	زاویه‌ی برش لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها نسبت به امتداد قائم (درجه)
ρ_w	چگالی آب (g.cm^{-3})

۷- سپاسگزاری

داده‌های این تحقیق برگرفته از تحقیق آزمایشگاهی است که در دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شده است و بدین‌وسیله از همکاری‌های به عمل آمده در اجرای این تحقیق قدردانی می‌شود.

۸- منابع

Flokstra, C. (2006). Modeling of submerged vanes. *J. Hydraulic Research*. 44(5), 591-602.

Gupta, U.P., Ojha, C.S.P. and Sharma, N. (2010). Enhancing utility of submerged vanes with collar. *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, 136(9), 651-655.

Gupta, U.P., Sharma, N. and Ojha, C.S.P. (2006). Performance evaluation of submergence ratio of a rectangular submerged vane with a collar. *International Journal of Sediment Research*. 21(1), 42-49.

Kalathil, S.T., Wuppukondur, A., Balakrishnan, R.K. and Chandra, V. (2018). Control or sediment inflow into a trapezoidal intake canal using submerged vanes. *ASCE, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 144(6), 04018020.

Odgaard, A.J. and Spoljaric, A. (1986). Sediment control by submerged vanes. *ASCE, J. Hydraulic Engineering*. 112(12), 1164-1181.

Odgaard, A.J. and Wang, Y. (1991a). Sediment management with submerged vanes, I: Theory. *J. Hydraulic Engineering, ASCE*. 117(3), 267-283.

Odgaard, A.J. and Wang, Y. (1991b). Sediment management with submerged vanes, II: Application. *J. Hydraulic Engineering, ASCE*. 117(3), 284-302.

Ouyang, H.T. (2009). Investigation on the Dimensions and shape of a submerged vane for sediment management in alluvial channels. *J. Hydraulic Engineering, ASCE*. 135(3), 209-217.

Ouyang, H.T. and Cheng, P.L. (2016). Characteristics of interactions among a row of

ترتیب ۷/۴٪، ۱۱/۹٪، ۱۷٪، ۲۵/۵٪ و ۳۴/۳٪ می‌باشد. این وجود محاسبات کمیت کارایی نشان می‌دهد که بازده صفحه‌های برش خورده، نسبت به صفحه‌ی مستطیلی ساده، افزایش یافته است. میزان افزایش در فاصله‌ی $2H_o$ از مرکز صفحه‌های V_1 تا V_5 به ترتیب ۳/۲٪، ۹٪، ۱۱٪، ۱۴٪ و ۱۴/۸٪ است؛ در فاصله‌ی $4H_o$ نیز میزان افزایش به ترتیب ۱/۴٪، ۳/۶٪، ۱۲/۱٪، ۲۶/۷٪ و ۳۱/۳٪ می‌باشد. بنابراین چنانچه از برش لبه‌ی ابتدایی صفحه‌ها به عنوان راهکاری برای کاهش آب‌شستگی موضعی پیرامون صفحه‌ها استفاده شود، در هنگام طراحی سامانه‌ی صفحه‌ها، فاصله‌ی طولی بین ردیف‌ها (δ_s) نباید مقادیر بزرگی (با توجه به معیارهای طراحی موجود) انتخاب شود تا همپوشانی جریان‌های چرخشی ناشی از صفحه‌ها حفظ شود، که این امر در جهت اطمینان است.

۶- فهرست نشانه‌ها

A	مساحت جانبی صفحه‌ها (cm^2)
b	عرض فلوم (cm)
d_o	عمق میانگین جریان (cm)
Fr	عدد فرود جریان
H_o	ارتفاع اولیه‌ی صفحه‌های مستغرق (cm)
\bar{i}	بردار یکه در امتداد محور x
\bar{j}	بردار یکه در امتداد محور y
\bar{k}	بردار یکه در امتداد محور z
L	طول صفحه‌های مستغرق (cm)
MOM	گشتاور اندازه‌ی حرکت ناشی از صفحه‌ها ($\text{g.cm}^2.\text{s}^{-1}$)
\overline{MOM}	MOM به ازای واحد سطح صفحه‌ها (g.s^{-1})
m	جرم نقطه‌ای (g)
u	مؤلفه‌ی طولی بردار سرعت (cm.s^{-1})
V_n	نوع صفحه‌های مستغرق
V_y	مؤلفه‌ی عرضی بردار سرعت (cm.s^{-1})
V_z	مؤلفه‌ی قائم بردار سرعت (cm.s^{-1})
v	مؤلفه‌ی عرضی بردار سرعت (cm.s^{-1})
w	مؤلفه‌ی قائم بردار سرعت (cm.s^{-1})
x	محور مختصات در جهت جریان
y	محور مختصات در امتداد عرضی
z	محور مختصات در امتداد قائم

submerged vanes in various shapes. J. Hydro-environmental Research. 13, 14-25.

Spoljaric, A. (1988). Mechanics of submerged vanes on flat boundaries. PhD thesis, University of Iowa, Iowa city, Iowa.