

یادداشت فنی

بررسی آزمایشگاهی تعیین رابطه عمق جریان غلیظ در محل غوطه‌وری

حسن گلیج^{۱*} و مهدی قمشی^۲

چکیده

جریان‌های غلیظ در اثر اختلاط دو جریان با دانسیته متفاوت ایجاد می‌شوند. موقعی که جریان با دانسیته بالا به توده سیال ساکن برخورد می‌کند، جریان غلیظ به درون سیال ساکن نفوذ کرده و باعث ایجاد عمق غوطه‌وری می‌شود. در این پژوهش پارامترهای هیدرولیکی جریان غلیظ و همچنین شیب بستر سیال ساکن که بر نقطه غوطه‌وری تأثیرگذار است، بررسی شده است. در تمامی آزمایش‌ها ارتفاع غوطه‌وری در دبی‌های مختلف از سیال غلیظ و تفاوت دانسیته ۶، ۹، ۱۳ و ۱۶ گیلوگرم بر مترمکعب برای سه شیب ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد اندازه‌گیری شد. به طور کلی نتایج نشان داد که شیب اثر چندانی بر روی ارتفاع نقطه غوطه‌وری ندارد. با افزایش دبی ورودی جریان غلیظ به درون مخزن با دانسیته مشخص، مقدار ارتفاع نقطه غوطه‌وری برای شیب‌های مختلف افزایش می‌یابد. سپس با استفاده از آنالیز ابعادی پارامترهای مؤثر بر ارتفاع نقطه غوطه‌وری، رابطه‌ای برای ارتفاع نقطه غوطه‌وری بر حسب پارامترهای مؤثر به دست آمد. بررسی مقایسه‌ای داده‌های حاصل از رابطه با داده‌های اندازه‌گیری شده، نشان داد که رابطه به دست آمده، داده‌های واقعی را با دقت خوبی برآورد می‌کند. اختلاف نسبی بین داده‌های به دست آمده از رابطه این پژوهش و داده‌های اندازه‌گیری شده ۰/۹۱ درصد است. همچنین داده‌های حاصل از رابطه به دست آمده، در مقایسه با داده‌های حاصل از رابطه های پژوهشگران دیگر، همگرایی بیشتری بین داده‌های واقعی ایجاد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آنالیز ابعادی، جریان غلیظ، مدل آزمایشگاهی، نقطه غوطه‌وری.

ارجاع: گلیج ح. و قمشی م. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی تعیین رابطه عمق جریان غلیظ در محل غوطه‌وری. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۴): ۲۱۷-۲۲۲.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

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

* نویسنده مسئول: Hassan_goleij37@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۹/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۰۳

مقدمه

در یک نقطه از جریان به نام نقطه غوطه‌وری، اندازه حرکت جریان ورودی با نیروی فشاری ناشی از اختلاف چگالی جریان ورودی و آب ساکن به تعادل رسیده و جریان غلیظ زیرگذر پس از آن به زیر سطح آب ساکن رفته و به حرکت خود ادامه می‌دهد (شکل ۱). از آن جایی که نقطه غوطه‌وری، مرز جداکننده بین آب زلال مخزن و آب کدر جریان غلیظ را مشخص می‌کند، و همچنین برای بررسی مشخصات جریان غلیظ غوطه‌ور شده در مخزن مانند سرعت جریان غلیظ (سرعت بدنه و پیشانی)، میزان شدت اختلاط و غیره، دانستن ارتفاع نقطه غوطه‌وری به عنوان نقطه شروع غوطه‌ور شدن جریان غلیظ ورودی به درون مخزن ضروری است. پس پژوهشگران فرمول‌های مختلفی برای محاسبه عمق جریان غلیظ (h_p) در محل غوطه‌وری ارائه داده‌اند (خانجانی و همکاران، ۱۳۷۸؛ آکیما و استعفان، ۱۹۸۴ و هیبرت و همکاران، ۱۹۷۹). سینگ و شاه (۱۹۷۱) رابطه ارتفاع غوطه‌وری را به صورت زیر استخراج کردند:

$$h_p = 0.0185 + 1.3 \left(\frac{q^2}{g'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (۱)$$

براساس مطالعات سویچ و بریمبرگ (۱۹۷۵) معادله ارتفاع غوطه‌وری به صورت زیر استخراج شد:

$$h_p \approx \left(\frac{4q^2}{g'} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.587 \left(\frac{q^2}{g'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (۲)$$

در این پژوهش نیز سعی شد که با استفاده از مدل آزمایشگاهی موجود، معادله‌ای برای ارتفاع نقطه غوطه‌وری جریان غلیظ با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر آن ارائه شود. مطالعات و آزمایش‌های تجربی به عمل آمده بر روی پدیده غوطه‌وری نشان می‌دهد که عمق جریان غلیظ در نقطه غوطه‌وری (h_p) تابع متغیرهای زیر است (فان جیاهو، ۱۹۶۰).

$$\Phi = f(h_p, q, g, s, \rho_d, \rho_a) \quad (۳)$$

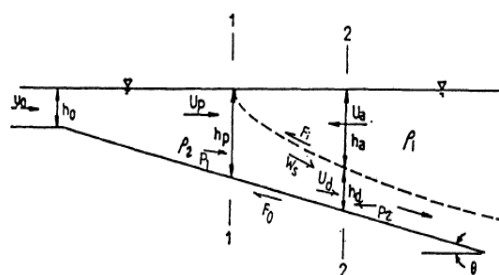
در این معادله، h_p ارتفاع نقطه غوطه‌وری، q دبی در واحد عرض، g شتاب ثقل، s شیب کف کانال، ρ_d دانسیته جریان غلیظ و ρ_a دانسیته آب پیرامون است. با توجه به رابطه‌هایی که پژوهشگران دیگر برای ارتفاع نقطه

غوطه‌وری ارائه کردند، شکل کلی معادله ارتفاع نقطه غوطه‌وری را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$h_p = \alpha \left(\frac{q^2}{g\Delta} \right)^{\beta} f(s) \quad (۴)$$

به طوری که در معادلات بالا، $\Delta = \frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_a}$ (اختلاف نسبی دانسیته‌ها) است. با انجام آزمایش‌های متعدد روی

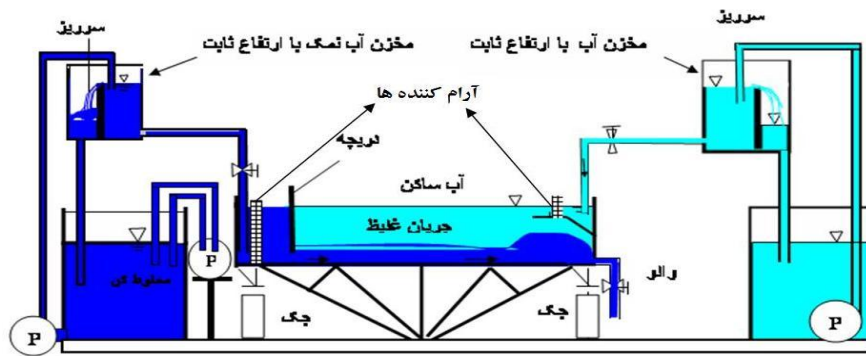
مدل هیدرولیکی می‌توان ضریب‌های معادله بالا (β, α) و همچنین تأثیر پارامتر $f(s)$ را به دست آورد. شکل ۱ نماینگر پدیده غوطه‌وری در هنگام ورود جریان غلیظ به درون دریاچه‌ها است (آکیما و استعفان، ۱۹۸۴).



شکل ۱- پدیده غوطه‌وری در هنگام ورود جریان غلیظ به دریاچه

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز برپا شد که دارای طول کل ۹/۲۵ متر و عرض ۰/۵ متر با ارتفاع ۰/۸ متر بود. این پژوهش در تابستان ۱۳۹۰ در دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. برای اندازه‌گیری دبی ورودی جریان غلیظ به درون فلوم از روش حجمی استفاده شد. هنگامی که سطح جریان غلیظ پشت دریچه با سطح آب زلال درون فلوم برابر شد، دریچه ورودی فلوم به طور کامل باز می‌شود تا جریان غلیظ وارد آب زلال ساکن درون فلوم شود. با توجه به غلظت بیشتر جریان ورودی به درون فلوم، جریان غلیظ به درون آب ساکن غوطه‌ور خواهد شد پس از پایداری نقطه غوطه‌وری، این عمق اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۲ نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی را نمایش می‌دهد. همچنین شکل ۳ نشان‌دهنده ارتفاع غوطه‌وری در آزمایشگاه است.



شکل ۲- نمای شماتیک از مدل آزمایشگاهی



شکل ۳- ارتفاع غوطه‌وری مشاهده شده در آزمایشگاه

نتایج و بحث

در این پژوهش تعداد ۶۰ آزمایش به گونه‌ای انجام شد که برای هر شیب، پنج دبی ورودی متفاوت و در هر دبی نیز چهار غلظت متفاوت از جریان غلیظ نمکی ارزیابی شد (جدول ۱).

جدول ۱- محدوده آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش

شیب کف مجرا (m/m)	دانسیته جریان غلیظ (Kg/m ³)	دبی جریان غلیظ (L/s)
۰/۱۶ و ۰/۱۲، ۰/۰۸	۱۰۱۶ و ۱۰۱۳، ۱۰۰۹، ۱۰۰۶	۲ تا ۵/۵

دانسیته مشخص، ارتفاع نقطه غوطه‌وری برای شیب‌های مختلف افزایش می‌یابد. با به دست آوردن $\left(\frac{q^2}{g\Delta}\right)$ برای هر بار آزمایش در مقابل h_p اندازه‌گیری شده، می‌توان مقادیر ضریب‌های α و β موجود در معادله ۵ را با توجه به نمودار به دست آورد (شکل ۵). همان‌طوری که از شکل ۵ مشخص است، مقدار α و β در معادله ۵ به ترتیب برابر ۲/۸۸۷ و ۰/۴۱۴ و ضریب همبستگی بین پارامترهای موجود در شکل برابر ۰/۸۸ است که نشان می‌دهد معادله به دست آمده از شکل ۵ همبستگی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. برای به دست آوردن ضریب‌های معادله ۵ از ۸۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. بنابراین شکل کلی معادله ۵ با توجه به ضریب‌های به دست آمده از شکل ۵ به‌صورت زیر خواهد بود.

برای بررسی اثر شیب روی عمق غوطه‌وری، شکل ۴ که تغییرات ارتفاع غوطه‌وری در مقابل شیب در دبی‌های مختلف برای غلظت‌های مختلف را نمایش می‌دهد، رسم شد.

با توجه به شکل ۴ مشخص است که عمق‌های نقطه غوطه‌وری اندازه‌گیری شده در یک دانسیته ثابت، برای تمام شیب‌ها در یک محدوده تقریباً ثابتی تغییر می‌کند، به طوری که می‌توان گفت که شیب اثر چندانی بر روی عمق نقطه غوطه‌وری ندارد. لذا، ارتفاع نقطه غوطه‌وری تابع $f(s)$ یا شیب نیست. بنابراین شکل کلی معادله ۴ به‌صورت زیر کاهش می‌یابد:

$$h_p = \alpha \left(\frac{q^2}{g\Delta} \right)^\beta \quad (5)$$

همچنین با توجه به شکل ۴ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با افزایش دبی ورودی جریان غلیظ به درون مخزن با

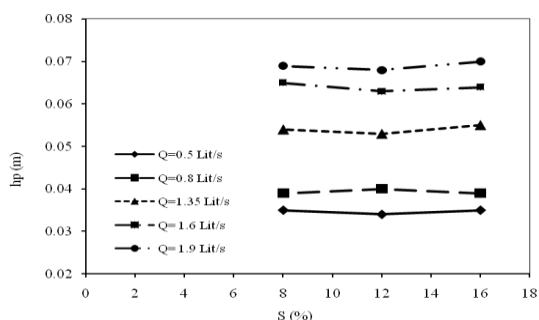
معادله ۶ در مقابل رقم‌های اندازه‌گیری شده در شکل ۷ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۷ مشخص است که داده‌های حاصل از معادله ۶ همگرایی خوبی نسبت به خط ۴۵ درجه (داده‌های اندازه‌گیری شده) از خود نشان می‌دهند، و اختلاف نسبی بین داده‌های به دست آمده از معادله این پژوهش (معادله ۶) و داده‌های اندازه‌گیری شده ۰/۹۱ درصد می‌باشد.

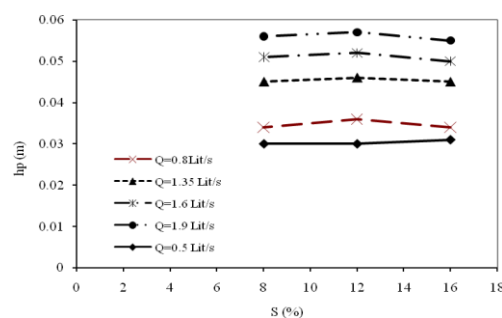
$$h_p = 2.887 \left(\frac{q^2}{g\Delta} \right)^{0.414} \quad (۶)$$

پارامترهای موجود در معادله ۶ مشابه پارامترهای ذکر شده در معادله ۳ هستند. برای صحت‌سنجی معادله ۶ ۲۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی باقیمانده با معادله ۶ به دست آمد و مقابل داده‌های آزمایشگاهی ترسیم شد. شکل ۶ این موضوع را نشان می‌دهد.

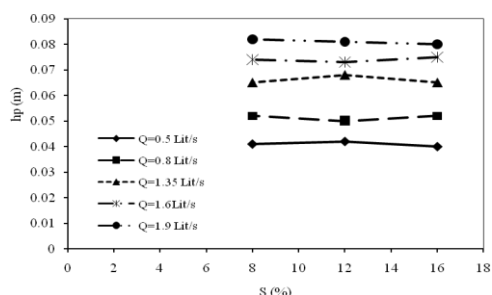
با توجه به شکل ۶ مشخص است که معادله ۶ داده‌های آزمایشگاهی را با دقت خوبی برآورد می‌کند. همچنین برای نشان دادن دقت معادله ۶ داده‌های به دست آمده از



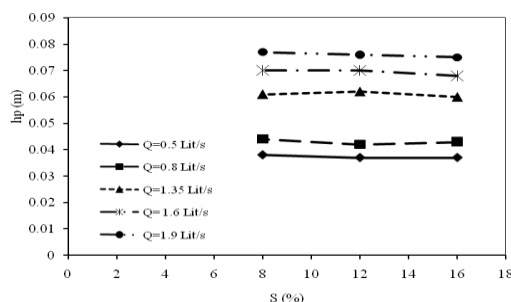
(ب)



(الف)

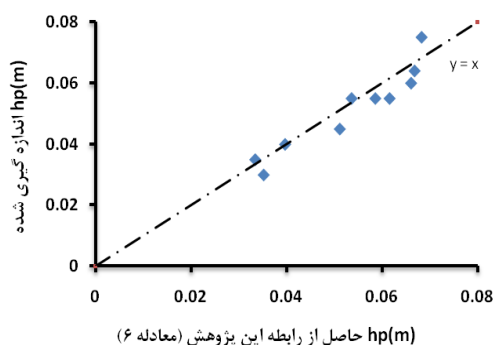


(د)

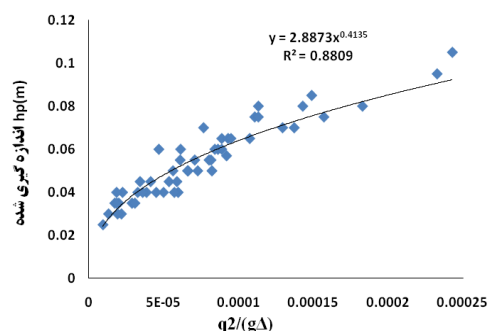


(ج)

شکل ۴- عمق غوطه‌وری اندازه‌گیری شده در مقابل شیب (الف) دانسیته ۱۰۱۶ (ب) ۱۰۱۳ (ج) ۱۰۰۹ (د) ۱۰۰۶ (kg/m³)



شکل ۶- صحت‌سنجی رابطه این پژوهش (معادله ۶) نسبت به ۲۰ درصد داده‌ها و خط ۴۵ درجه



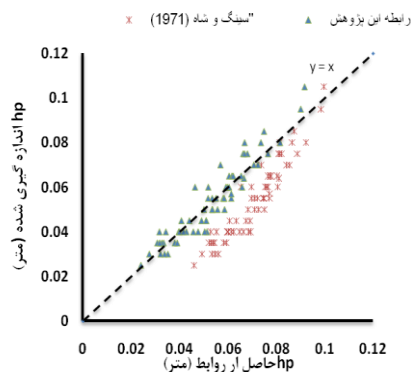
شکل ۵- نمودار تعیین ضریب‌های موجود در معادله ۵

از معادله ۶ این پژوهش نسبت به خط ۴۵ درجه در مقایسه با داده‌های معادله ووندربلیچ و الدر (۱۹۷۳) بیشتر است. همچنین نتایج این پژوهش با معادله سینگ و شاه (۱۹۷۱) مقایسه شد که شکل کلی معادله این پژوهشگران به شرح زیر است:

$$h_p = 0.0185 + 1.3 \left(\frac{q^2}{g'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (۸)$$

شکل ۹ نتایج مقایسه‌ای بین نتایج معادله ۶ در این پژوهش و معادله ۸ متناظر با داده‌های اندازه‌گیری شده را نمایش می‌دهد.

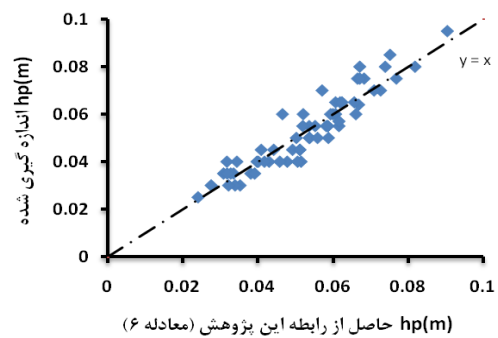
با توجه به شکل ۹ و بررسی آماری مشخص شد که اختلاف نسبی بین داده‌های به دست آمده از معادله سینگ و شاه (۱۹۷۱) و داده‌های اندازه‌گیری شده ۳۷/۷۷ درصد است، که این امر نشان دهنده دقت بیشتر معادله ۶ به اندازه ۳۶/۸۶ درصد است، به همین دلیل همگرایی داده‌های حاصل از معادله ۶ نسبت به خط ۴۵ درجه در مقایسه با معادله سینگ و شاه (۱۹۷۱) بیشتر است. دلیل این موضوع را می‌توان به دامنه شرایط آزمایشگاهی ربط داد.



شکل ۹- مقایسه بین رابطه این پژوهش (معادله ۶) و معادله سینگ و شاه (۱۹۷۱)

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از آنالیز ابعادی ابتدا معادله‌ای برای محاسبه عمق جریان در محل غوطه‌وری بر حسب ضرایب مجهول ارائه شد، که تابع پارامترهای متعددی از جمله دبی ورودی جریان غلیظ است. با استفاده از مدل آزمایشگاهی تهیه شده، عمق جریان غلیظ در نقطه غوطه‌وری برای شیب‌های مختلف ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد و دبی‌های ورودی متفاوت با دانسیته‌های گوناگون ۱۰۰۶، ۱۰۱۳ و ۱۰۱۶ گیلوگرم بر مترمکعب اندازه‌گیری



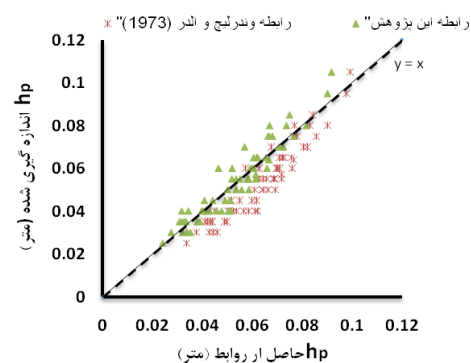
شکل ۷- پراکندگی کلیه داده‌های محاسباتی از معادله ۶ نسبت به خط ۴۵ درجه

مقایسه بین معادله ۶ با رابطه‌های پژوهشگران دیگر

در این پژوهش مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از معادله ۶ و نتایج دیگر پژوهشگران که در زمینه ارتفاع نقطه غوطه‌وری روابطی را ارائه کردند انجام شد. از جمله این پژوهشگران ووندربلیچ و الدر (۱۹۷۳) است. شکل کلی معادله ووندربلیچ و الدر (۱۹۷۳) به صورت زیر است:

$$h_p = \left(\frac{1}{0.5} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{q^2}{g\Delta} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (۷)$$

پارامترهای موجود در معادله ۷ مشابه پارامترهای ذکر شده در معادله ۳ هستند. شکل ۸ مقایسه بین داده‌های حاصل از معادله ۶ که در این پژوهش به دست آمده را با داده‌های حاصل از معادله ووندربلیچ و الدر (۱۹۷۳) را نشان می‌دهد.



شکل ۸- مقایسه بین رابطه این پژوهش (معادله ۶) و معادله ووندربلیچ والدر (۱۹۷۳)

با بررسی آماری مشخص شد که اختلاف نسبی بین داده‌های به دست آمده از معادله ووندربلیچ و الدر (۱۹۷۳) و داده‌های اندازه‌گیری شده ۲۱/۸۵ درصد است، که این امر نشان دهنده دقت بیشتر معادله ۶ به اندازه ۲۰/۹۴ درصد می‌باشد، به همین دلیل همگرایی داده‌های حاصل

7. Wunderlich, W. O. and Elder R. A. 1973. Mechanics of flow through man made lakes. Man- Made Lakes: Their Problems and Environmental Effects W. Physical Union Washington D. C. 300-310.

شد. برای بررسی اثر شیب بر روی ارتفاع نقطه غوطه‌وری شکل ۴ رسم شد. این شکل نشان داد که شیب اثر چندانی بر روی ارتفاع نقطه غوطه‌وری ندارد. شکل ۵ تغییرات ارتفاع نقطه غوطه‌وری را نسبت به پارامتر $\left(\frac{q^2}{g\Delta}\right)$ برای ۸۰ درصد از داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد، که با توجه به این نمودار ضریب‌های α و β در معادله ۵ به ترتیب برابر $۲/۸۸۷$ و $۰/۴۱۴$ و ضریب همبستگی بین پارامتر های موجود در نمودار برابر $۰/۸۸$ است که نشان می‌دهد معادله به دست آمده از شکل ۵ همبستگی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. شکل ۷ پراکندگی داده‌های حاصل از معادله ۶ را نسبت به خط ۴۵ درجه (داده‌های اندازه‌گیری شده) نشان می‌دهد، که با توجه به آن داده‌های حاصل از معادله ۶ همگرایی خوبی نسبت به داده‌های واقعی دارند و اختلاف نسبی بین داده‌های به دست آمده از معادله این پژوهش (معادله ۶) و داده‌های اندازه‌گیری شده $۰/۹۱$ درصد می‌باشد. همچنین مقایسه‌هایی بین معادله ۶ و معادلات پژوهشگران دیگر از جمله ووندریلیچ و الدر (۱۹۷۳) و سینگ و شاه (۱۹۷۱) انجام شده که در شکل‌های ۸ و ۹ آمده، که این شکل‌ها دقت بیشتر معادله ۶ را نسبت به معادلات ووندریلیچ و الدر (۱۹۷۳) و سینگ و شاه (۱۹۷۱) به ترتیب به مقدار $۲۰/۹۴$ و $۳۶/۸۶$ درصد نشان می‌دهند.

منابع

۱. خاندانی م. ج. بارانی غ. و شفیعی ع. ۱۳۷۷. کاربرد تحلیل ابعادی و مدل آزمایشگاهی در بررسی عمق جریان چگال در محل فروروی دریاچه‌ها. نشریه دانشکده فنی، دانشگاه کرمان. ۳۳(۳):۳۳-۵۲.
2. Akiyama J. and Stefan H. G. 1984. Plunging flow into a reservoir: Theory. Journal of Hydraulic Engineering ASCE. 110(4):484-499.
3. Fan Jiahua. 1960. Experimental studies on density current. Scientia Sinica. 9:275-303.
4. Hebbert B. Imberger J. Loh I. and Patterson J. 1979. Collie river underflow into the wellington reservoir Journal of Hydraulic. Div. ASCE 105 (HYS):553-545.
5. Savage S. B. and Brimberg J. 1975. Analysis of plunging phenomena in water resource. Journal of Hydraulic Research IAHR. 13(2):187-204.
6. Singh B. and Shah C. R. 1971. Plunging phenomena of density currents in reservoirs. Lahouille Blanche. 26(1):59-64.