

کاربرد آنالیز ابعادی برای بررسی پدیده افزایش اکسیژن محلول در جهش هیدرولیکی کلاسیک

سار البرزی ورکی^۱، محمد بی‌جن‌خان^{۲*}، پیمان دانش‌کار آراسته^۳

۱. فارغ‌التحصیل مقطع کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام

خمینی (ره)، قزوین

۲. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۳. دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱/۲۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۳/۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۳/۲۷)

چکیده

اکسیژن محلول یکی از پارامترهای مهم در بررسی کیفیت آب می‌باشد. در این پژوهش جهش هیدرولیکی کلاسیک به‌عنوان یک سیستم مورد استفاده در بخش هوادهی، جهت افزایش اکسیژن محلول مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌هایی جهت بررسی این پدیده برای اعداد فرود در محدوده ۲ الی ۴/۵ صورت گرفت. در این پژوهش به‌طور کلی ۲۴۰ داده در آزمایش با شرایط هیدرولیکی متفاوت برداشت شد. برخلاف نتایج ارائه‌شده در مطالعات پیشین مبنی بر اینکه راندمان هوادهی جهش هیدرولیکی فقط تابعی از افت جهش است، نتایج این تحقیق نشان داد که راندمان هوادهی در جهش هیدرولیکی به پارامترهای کیفی و هیدرولیکی نیز بستگی دارد. با استفاده از تئوری باکینگهام پارامترهای مؤثر در افزایش اکسیژن محلول به‌وسیله جهش هیدرولیکی بررسی شد. سپس شکل ریاضی تابع ابعادی با استفاده از تئوری خود-شبیه ناقص (Incomplete Self-Similarity) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که میانگین قدرمطلق خطاهای نسبی، به‌دست‌آمده از رابطه ارائه‌شده در تحقیق حاضر و مدل ارائه‌شده در سابقه مطالعات برای محاسبه اکسیژن محلول بعد از جهش، به ترتیب برابر ۰/۹ و ۲/۲۴٪ می‌باشند. همچنین جذر میانگین مربعات خطا، $RMSE$ حاصل از رابطه ارائه‌شده در این تحقیق و نتایج موجود در سابقه مطالعات به ترتیب برابر با ۰/۴۲ و ۱ پی‌پی‌ام به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: جهش هیدرولیکی، اکسیژن محلول، آنالیز ابعادی.

مقدمه

انتخاب روش مناسب تصفیه فاضلاب در بخش هوادهی موجب به حداقل رساندن هزینه‌های اجرای طرح و بهبود کیفیت پساب می‌گردد. سازه‌های هیدرولیکی می‌توانند جایگزینی مناسب برای هوادهنده‌های مصنوعی از جهت افزایش راندمان سیستم و مدت‌زمان تصفیه باشند. مطالعاتی از جهت بررسی تأثیر و عملکرد سازه‌های هیدرولیکی بر روند افزایش اکسیژن محلول صورت گرفته است. جهش هیدرولیکی یکی از سازه‌هایی است که منجر به تولید حباب هوای بیشتر و به‌تبع آن افزایش اکسیژن محلول می‌گردد. جهش هیدرولیکی یک هوادهنده محسوب می‌شود و یکی از روش‌های کلاسیک افزایش اکسیژن محلول آب می‌باشد.

توزیع نقطه‌ای مقدار حباب هوا در آب برای اعداد فرود مختلف در پرش هیدرولیکی به این صورت است که حداکثر

ورودی هوا در ابتدای پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد (Gulliver et al 1998). اثر نرخ تعداد حباب هوا در کانال با عرض کمتر به‌ویژه در لایه اختلاط پرش به‌طور قابل توجهی کمتر خواهد بود. همچنین در عدد رینولدز و عدد فرود مشابه با عرض متفاوت، اثر عرض کانال، B ، در محدوده $0/5 < B(m) < 0/25$ ناچیز است (Chanson, 2006).

نرخ بازده هوادهی توسط Gameson (1957) به‌صورت رابطه زیر پیشنهاد شد:

$$E = \frac{C_d - C_u}{C_s - C_u} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن C_d و C_u به ترتیب غلظت اکسیژن محلول در بالادست و پایین‌دست سازه می‌باشد و C_s نیز غلظت اشباع اکسیژن محلول است.

Kucukali and Cokgor (2009) اظهار داشتند در پرش هیدرولیکی نرخ اتلاف انرژی در اثر ایجاد جهش هیدرولیکی بر روند هوادهی ناشی از جهش تأثیرگذار است. در رابطه پیشنهادی Kucukali and Cokgor (2009) اگر نرخ اتلاف انرژی

* نویسنده مسئول: bijankhan@ut.ac.ir

در واحد عرض را با ω نمایش دهیم آنگاه داریم:

$$\omega = q \times \Delta H \times \gamma \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن γ (N/m^3) وزن مخصوص آب و q (m^2/s) جریان در واحد عرض کانال می‌باشند.

$$E_{20} = 0.0015\omega + 0.01 \quad (\text{رابطه ۳})$$

در رابطه (۳)، E_{20} راندمان اکسیژن محلول در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

Bostan et al. (2013) به بررسی اثر جهش هیدرولیکی بر راندمان هوادهی برای ۵ جهش هیدرولیکی مختلف در محدوده عدد فرود $6/07 - 3/55$ پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از جهش هیدرولیکی، راندمان اکسیژن محلول (E_{20}) در محدوده اعداد فرود آزمایش‌شده تا حدود ۶۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین نشان دادند که افزایش اکسیژن محلول در ۵ دقیقه ابتدایی تشکیل جهش بیشتر است.

Chipongo and Khiadani (2016) رفتار انتقال اکسیژن به‌وسیله چندین جت موازی را در یک کانال باز مستطیل شکل بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هر یک از پارامترهای سرعت جت، ارتفاع جت و تعداد آن‌ها بر ضریب انتقال اکسیژن و در نتیجه میزان افزایش اکسیژن محلول مؤثر است. همچنین بیشترین عامل تأثیرگذار در این سیستم را ارتفاع جت‌ها معرفی کردند.

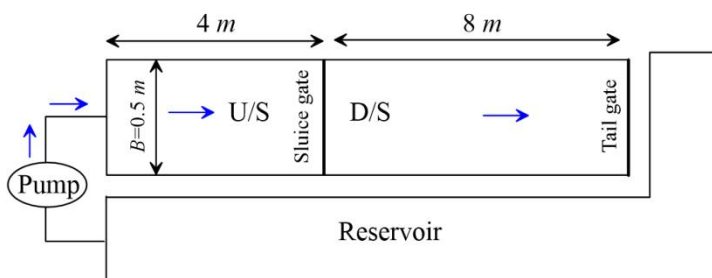
اگرچه مطالعات روابط تجربی برای پیش‌بینی انتقال اکسیژن در پدیده جهش هیدرولیکی ارائه شده است، با این حال، نتایج به‌دست‌آمده از این ایده در مورد حباب‌های هوا مبتنی بر پرش هیدرولیکی هنوز کافی به نظر نمی‌رسد. مطالعه حاضر یک تحقیق آزمایشگاهی برای بررسی تأثیر جهش هیدرولیکی

کلاسیک در افزایش اکسیژن محلول می‌باشد. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن راندمان هوادهی به‌عنوان تابعی از نرخ اتلاف انرژی نمی‌تواند نتایج مطلوبی به همراه داشته باشد. از همین رو با استفاده از آنالیز ابعادی روابط جدیدی برای محاسبه اکسیژن محلول پایین دست جهش هیدرولیکی ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفت. رابطه ارائه‌شده در این مقاله با دقت مناسبی می‌تواند در محدوده اعداد بدون بعد مورد استفاده در این تحقیق مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

مجموعه آزمایشگاهی

در این پژوهش از یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶۵ متر واقع در آزمایشگاه هیدرولیک گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) مورد استفاده قرار گرفت. جنس دیواره‌های فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق از شیشه نشکن شفاف ۸ میلی‌متری تشکیل شده است و چارچوب فلزی آن به‌صورت جداگانه طراحی و ساخته شده است. پایه‌های قاب‌های فلزی به نحوی تنظیم شده‌اند که شیب در طول و عرض فلوم آزمایشگاهی صفر باشد. برای ایجاد جهش هیدرولیکی، یک دریچه کشویی در فاصله ۴ متری از محل ورودی آب نصب شد. همچنین به‌منظور تنظیم محل وقوع جهش یک سرریز تحتانی استفاده شد. شکل (۱) نمایی شماتیک از مجموعه آزمایشگاهی و نمایی از جهش هیدرولیکی و محل نمونه‌برداری برای تعیین اکسیژن محلول را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از فلوم آزمایشگاهی، گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)



شکل ۲- دستگاه اندازه‌گیری اکسیژن محلول جریان

آزمایش‌ها با دبی‌های متفاوت از ۱۵/۹ تا ۴۰/۶۸ لیتر بر ثانیه برای ۳ بازشدگی معادل ۲،۳ و ۳/۹ سانتی‌متر انجام شد. جهت اندازه‌گیری کیفیت آب از دستگاه اکسیژن‌متر پورتابل مدل ۸۴۰۳ ساخت کمپانی AZ تایوان (شکل ۲) استفاده شد. این دستگاه با دقت ۰/۵ پی‌پی‌ام اکسیژن محلول را اندازه‌گیری می‌کند.

$$F''' \left(\frac{C_s}{\rho} \cdot \frac{C_u}{\rho} \cdot \frac{C_d}{\rho} \cdot \frac{Q}{w^{\frac{5}{2}} g^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{B}{w} \cdot \frac{\mu}{w^{\frac{3}{2}} g^{\frac{1}{2}} \rho} \cdot \frac{y_0}{w} \cdot \frac{y_t}{w} \right) = 0 \quad (\text{رابطه ۶})$$

با ترکیب گروه‌های بدون بعد می‌توان پارامترهای بدون بعد جدیدی به دست آورد. در نتیجه با ترکیب گروه‌های بدون بعد شماره ۴ و ۵ عدد فرود، Fr ، زیر دریچه به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\Pi_{4.5} = (\Pi_4)(\Pi_5)^{-1} = \frac{Q}{Bw^{\frac{3}{2}}g^{\frac{1}{2}}} = Fr \quad (\text{رابطه ۷})$$

با استفاده از رابطه (۷) عدد فرود برای آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق محاسبه شد. نتایج نشان داد که عدد فرود در محدوده ۲/۰۲-۴/۴۴ می‌باشد. از طرف دیگر با ترکیب پارامترهای بدون بعد شماره ۲ و ۴ و ۷ و ۸ داریم:

$$\Pi_{2.4} = \Pi_2 \Pi_4 = \frac{C_u Q}{\rho w^{\frac{5}{2}} g^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$\Pi_{7.8} = \Pi_7 - \Pi_8 = \frac{y_0 - y_t}{w} \quad (\text{رابطه ۹})$$

همچنین با ترکیب Π_3 و Π_1 داریم:

$$\Pi_{1.3} = \frac{\Pi_3}{\Pi_1 - \Pi_3} = \frac{C_d}{C_s - C_d} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

و در نهایت رابطه ابعادی به شکل زیر خواهد شد:

$$F'''' \left(\frac{C_u Q}{\rho w^{\frac{5}{2}} g^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{C_d}{C_s - C_d} \cdot Fr \cdot \frac{B}{w} \cdot \frac{y_0 - y_t}{w} \right) = 0 \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

یا به عبارت دیگر داریم:

$$\frac{C_d}{C_s - C_d} = f' \left(\frac{C_u Q}{\rho w^{\frac{5}{2}} g^{\frac{1}{2}}} \cdot Fr \cdot \frac{B}{w} \cdot \frac{y_0 - y_t}{w} \right) \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

شکل ریاضی تابع ابعادی بالا می‌تواند با استفاده از تئوری خود-شبیه ناقص (Incomplete Self-Similarity) مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

در یک رابطه ابعادی به شکل $\Pi_1 = \varphi_1(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n)$ زمانی که Π_n به سمت صفر یا بی‌نهایت میل کند تابع Π_1 نیز به سمت صفر یا بی‌نهایت میل کند تابع φ_1 نسبت به پارامتر Π_n خود شبیه ناقص نامیده می‌شود (Barenblatt, 1979-1987). در این صورت تابع ابعادی φ_1 به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Pi_1 = \prod_n^{\epsilon} \varphi_2(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-1}) \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

به منظور تعیین پتانسیل هوادهی جهش هیدرولیکی، قبل از انجام هر آزمایش مقدار مشخصی از سدیم سولفات (حدود ۶۰۰ تا ۸۰۰ گرم به ازای هر آزمایش) به آب مخزن اضافه شد تا اکسیژن محلول کاهش یابد. سپس به ازای یک دبی و بازشدگی مشخص دریچه کشویی، ابتدا دریچه تحتانی به شکلی تنظیم شد که جهش آزاد تشکیل گردد. در هر آزمایش، پس از تنظیم محل جهش هیدرولیکی به صورت هم‌زمان دو نمونه، یکی از بالادست دریچه کشویی و دیگری پایین‌دست جهش هیدرولیکی برداشت شد. سپس اکسیژن محلول هر نمونه قرائت شد. با توجه به تغییرات ناچیز اکسیژن محلول در یک مقطع عمودی از جریان، تمامی نمونه‌ها تقریباً از مرکز جریان برداشت شد. از آنجاکه خواص فیزیکی و شیمیایی آب در دماهای مختلف تغییر خواهد کرد، هم‌زمان با اکسیژن محلول دمای سیال نیز قرائت شد. در این آزمایش به‌طور کلی ۲۴۰ نمونه که ۱۲۰ نمونه از بالادست و ۱۲۰ نمونه از پایین‌دست به صورت هم‌زمان برداشت شد. نمونه‌ها به ازای هر دبی و بازشدگی مشخص در فاصله زمانی ۱ الی ۵ دقیقه برداشت شد.

آنالیز ابعادی

به منظور بررسی عوامل مختلف در پدیده افزایش اکسیژن محلول توسط جهش هیدرولیکی می‌توان از آنالیز ابعادی استفاده کرد. به منظور بررسی مقدار افزایش اکسیژن محلول توسط جهش هیدرولیکی رابطه ابعادی زیر پیشنهاد می‌شود:

$$f(\rho, g, \mu, Q, B, w, y_0, y_t, C_u, C_d, C_s) = 0 \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در این رابطه Q دبی جریان، y_0, y_t به ترتیب عمق آب در بالادست دریچه و پایاب، C_d, C_u, C_s به ترتیب اکسیژن محلول اشباع و بالادست و پایاب، B عرض دریچه، w مقدار بازشدگی دریچه، g شتاب گرانش و μ لزجت سیال و ρ چگالی سیال هستند.

طبق تئوری باکینگهام برای بررسی آنالیز ابعادی به شکل صحیح انتخاب متغیرهای تکراری اهمیت زیادی دارد، در این مطالعه پارامترهای g, μ و w به عنوان پارامترهای تکراری در نظر گرفته شده‌اند. از آنجایی که تعداد ۱۱ پارامتر در این پدیده مؤثر است، می‌توان با در نظر گرفتن ۸ پارامتر بدون بعد پدیده انتقال اکسیژن محلول به وسیله جهش هیدرولیکی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد:

$$F'(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8) = 0 \quad (\text{رابطه ۵})$$

با استفاده از مبانی تئوری باکینگهام، رابطه ابعادی به صورت ذیل خلاصه می‌شود:

در این رابطه ε یک ضریب ثابت (عدد) است که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تعیین می‌شود.

برای یک شرایط هیدرولیکی مشخص و بازشدگی معین دریاچه کشویی، عدد فرود و B/w و $(y_t - y_0)/w$ همواره مقادیری ثابت هستند. در نتیجه رابطه بالا را می‌توان به شکل زیر نوشت:

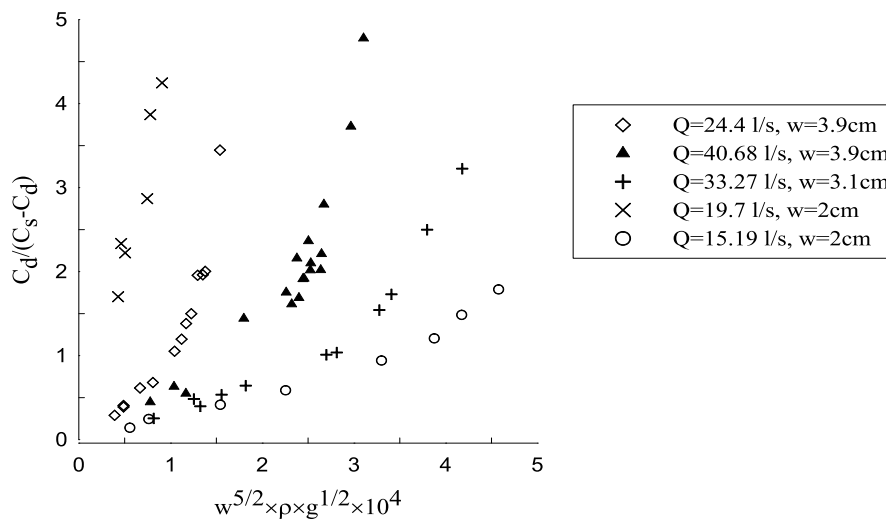
$$\frac{C_d}{C_s - C_d} = f'' \left(\frac{C_u Q}{\rho w^2 g^{1/2}} \right) \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

می‌دانیم که اکسیژن محلول همواره مقادیری بین صفر تا اکسیژن محلول اشباع، C_s را می‌تواند اختیار کند. در نتیجه هرگاه اکسیژن محلول پایین‌دست، C_d ، به سمت صفر میل کند اکسیژن محلول بالادست دریاچه کشویی نیز به سمت صفر میل می‌کند. حال آنکه اگر اکسیژن محلول پایین‌دست به سمت C_s

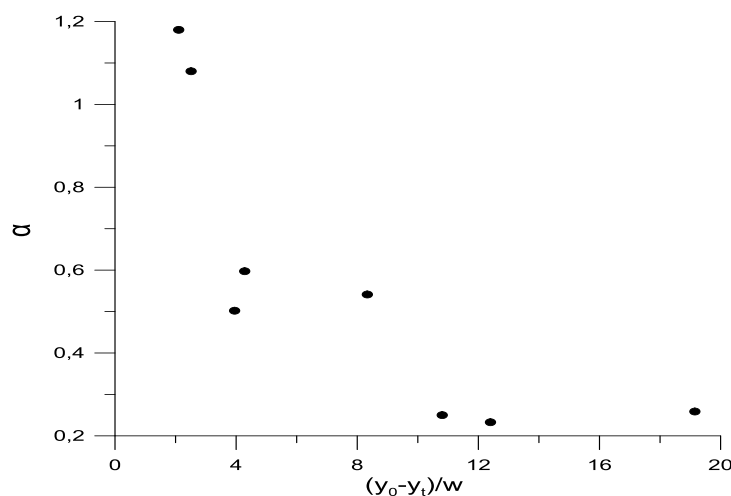
میل کند، مقدار $C_d/(C_s - C_d)$ به سمت بی‌نهایت رفته اما پارامتر $C_u Q/(w^{5/2} g^{1/2} \rho)$ به سمت یک عدد مشخص میل خواهد کرد. در نتیجه تئوری ISS در این حالت برقرار نیست و در نتیجه اگر رابطه (۱۵) به شکل زیر نوشته شود پارامترهای α و β نمی‌توانند اعداد ثابتی در نظر گرفته شوند و باید به‌عنوان تابعی از عدد فرود، B/w و $(y_0 - y_t)/w$ بیان شوند.

$$\frac{C_d}{C_s - C_d} = \alpha \left(\frac{C_u Q}{\rho w^2 g^{1/2}} \right)^\beta \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده در این تحقیق رابطه بالا به ازای شرایط مختلف هیدرولیکی در شکل (۳) رسم شد و ضرایب α و β متناظر به دست آمد.



شکل ۳- مقادیر مختلف عدد فرود و B/w به ازای $C_d/(C_s - C_d)$



شکل ۴- رابطه ریاضی ضریب α با $(y_0 - y_t)/w$

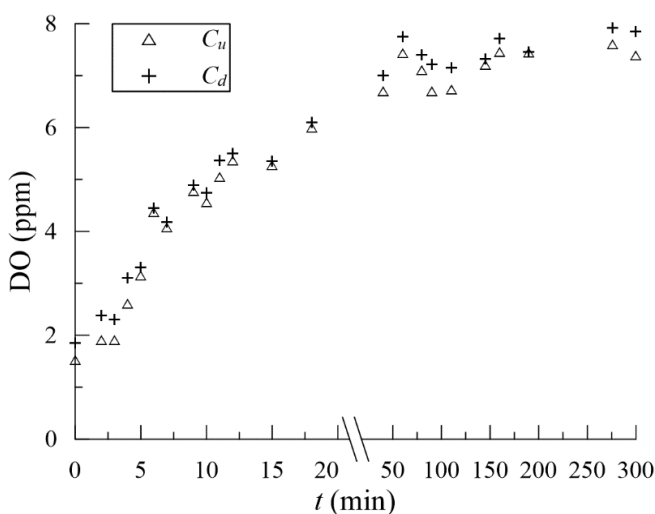
در $(y_t)/w$ در نظر گرفت. معادله استخراج‌شده در شکل (۴) برای به دست آمدن ضریب α استفاده می‌گردد که نشان می‌دهد ضریب

همان‌طور که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود ضریب α را می‌توان با همبستگی مناسبی ($R^2=0.9$) به‌عنوان تابعی از $(y_0 -$

نتایج آزمایشگاهی

مشاهدات آزمایشگاهی

مقدار اکسیژن محلول باگذشت زمان به دلیل تولید حباب هوا به وسیله جهش هیدرولیکی، ریزش در قسمت سرریز تحتانی و گردش آب افزایش می‌یابد. به‌عنوان نمونه، شکل (۷) نرخ تغییرات اکسیژن محلول با زمان را برای دبی جریان ۲۴/۴ لیتر بر ثانیه، نشان می‌دهد که رابطه صعودی داشته است. با توجه به آزمایش‌ها مشخص شد که درصد افزایش اکسیژن محلول در ۱۰ دقیقه اول در شرایط هیدرولیکی مختلف بسیار بالا بوده و مقدار افزایش اکسیژن محلول پس از دوره ۱۰ دقیقه اول روند کندتری را نشان می‌دهد، به طوری که زمانی که اکسیژن محلول اولیه کم باشد، نرخ افزایش آن در سیستم بیشتر می‌باشد. به عبارت دیگر، افزایش اکسیژن در شرایطی که تقاضای اکسیژن محلول در آب زیاد باشد بیشتر از زمانی است که تقاضای اکسیژن محلول کم است.



شکل ۷- تغییرات اکسیژن محلول بالادست و پایین دست جریان با زمان در شرایط هیدرولیکی دبی ۲۴/۴ لیتر بر ثانیه و بازشدگی ۳/۹ سانتی‌متر درجه

درصد افزایش اکسیژن محلول ناشی از جهش هیدرولیکی، $100 \times (C_d - C_u) / C_u$ ، در مقابل اکسیژن محلول اولیه (مقطع بالادست) در شکل (۸) رسم شد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود در شرایط هیدرولیکی مختلف، هراندازه مقدار اکسیژن محلول بالادست درجه کمتر باشد درصد افزایش اکسیژن محلول بیشتر است و با افزایش اکسیژن محلول بالادست جهش هیدرولیکی تأثیر بسیار کمتری در تغییرات اکسیژن محلول داشته و عملاً به سمت صفر میل می‌کند.

آلفا به پارامترهای بدون بعد بعد y_0/w , y_t/w بستگی دارد.

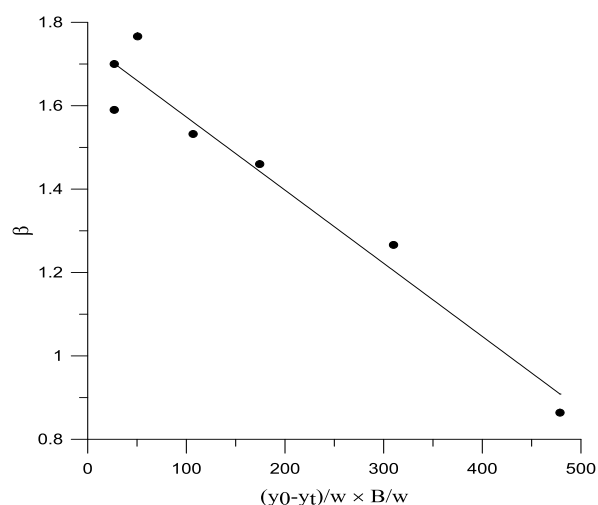
$$\alpha = 1.85 \times \left(\frac{y_0 - y_t}{w} \right)^{-0.728} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

شکل (۵) رابطه ضریب β را نمایش می‌دهد. ضریب β علاوه بر پارامترهای مؤثر بی‌بعد در شرایط جریان به ابعاد کانال (B/w) نیز بستگی دارد.

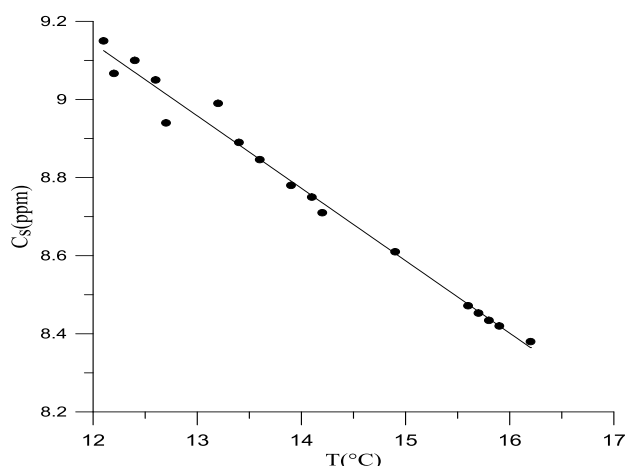
$$\beta = -0.0018 \times \left(\frac{y_0 - y_t}{w} \times \frac{B}{w} \right)^{0.74} + 1 \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

همچنین آزمایش‌ها در بازه‌های دمایی متفاوت ۱۲ الی ۱۸ درجه سانتی‌گراد انجام شد. تغییرات اکسیژن محلول اشباع C_s ، با دما در شکل (۶) رسم شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش دما مقدار اکسیژن محلول اشباع کاهش پیدا می‌کند. رابطه (۱۸) برای محاسبه C_s برحسب دما در این تحقیق ارائه شده است:

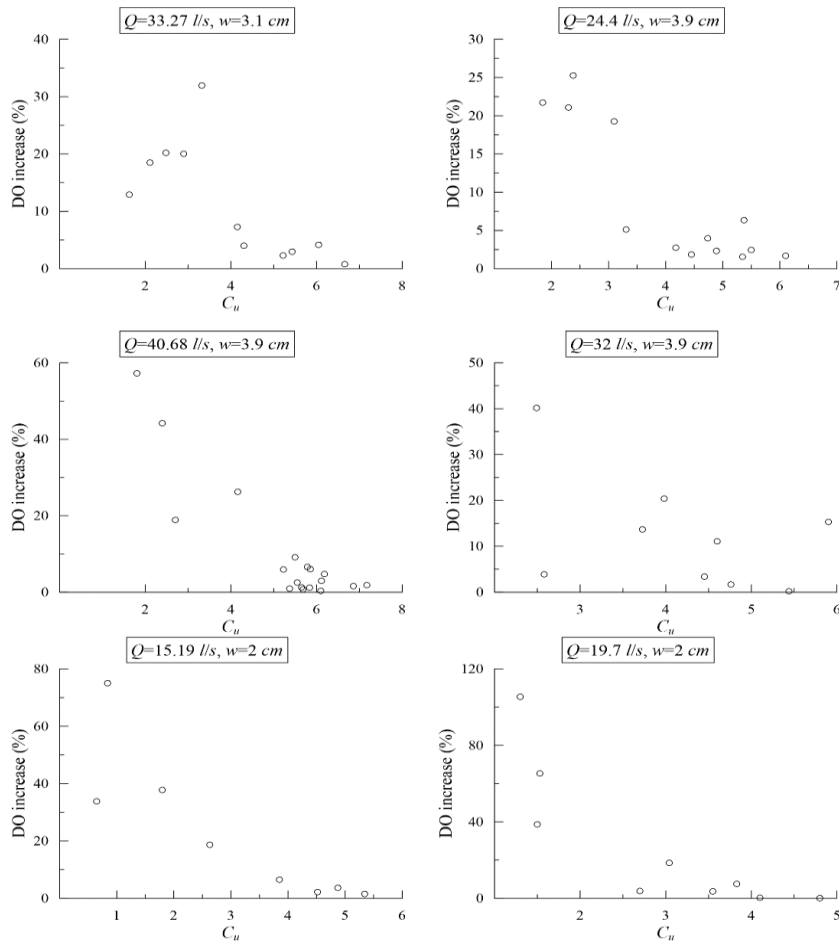
$$C_s = \frac{60.67 - T}{5.32} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$



شکل ۵- رابطه ریاضی ضریب β با $B/w \times (y_0 - y_t) / w$



شکل ۶- تغییرات اکسیژن محلول اشباع با دما

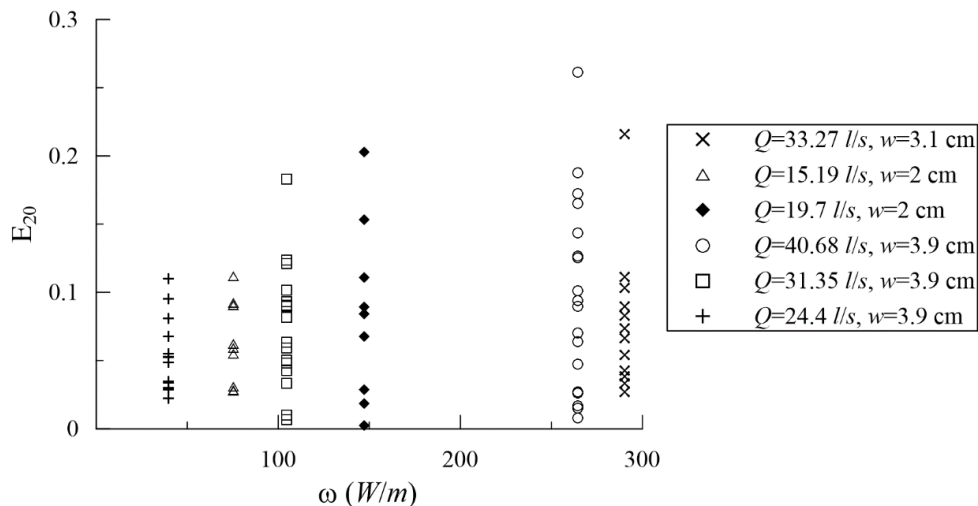


شکل ۸- تغییرات درصد افزایش اکسیژن با اکسیژن محلول بالادست در شرایط مختلف جریان

از راندمان، E_{20} ، به دست آمده است (شکل ۹). این امر نشان می‌دهد که راندمان هوادهی علاوه بر افت در طول جهش حتماً باید به پارامترهای دیگری نیز ارتباط داشته باشد. با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی یکی از این پارامترها می‌تواند اکسیژن محلول اولیه (قبل از جهش هیدرولیکی) باشد.

ارزیابی روش Kucukali and Cokgor (2009)

با توجه به سابقه مطالعات Kucukali and Cokgor (2009) چنین نتیجه‌گیری کردند که با استفاده از افت ناشی از جهش هیدرولیکی می‌توان راندمان هوادهی را تخمین زد. این در حالی است که در این پژوهش ملاحظه می‌شود که به ازای یک مقدار مشخص از نرخ اتلاف انرژی در طول جهش، w ، مقادیر متفاوتی



شکل ۹- نرخ اتلاف انرژی در جهش هیدرولیکی کلاسیک برای دی‌های مختلف

در این رابطه $C_{d(m)}$ و $C_{d(c)}$ به ترتیب مقادیر اکسیژن محلول محاسبه شده و اندازه گیری شده در مقطع پایین دست جهش هیدرولیکی می باشند.

خطای نسبی روش های مختلف با استفاده از رابطه (۱۹) محاسبه و در مقابل اکسیژن محلول ورودی، Cu، در شکل (۱۱) رسم شد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود روش Kucukali and Cokgor (2009) به صورت کلی مقادیر اکسیژن محلول پایین دست را بیشتر از مقادیر مشاهداتی نشان می دهد به طوری که با کاهش اکسیژن محلول بالادست خطای نسبی مربوط به این روش به شدت افزایش می یابد. لازم به ذکر است که محدوده مربوط به مقادیر کمتر اکسیژن محلول بالادست از نظر عملی بسیار با اهمیت هستند چراکه معمولاً اکسیژن محلول ورودی به ایستگاه فاضلاب بسیار کم (عموماً زیر ۲ppm) می باشد. با توجه به شکل (۱۱) ملاحظه می شود که توزیع خطای نسبی مربوط به روش ارائه شده در این تحقیق در تمام محدوده تغییرات اکسیژن محلول بالادست (اکسیژن محلول ورودی به سیستم) در محدوده $\pm 10\%$ قرار می گیرد.

با استفاده از رابطه زیر مقادیر میانگین قدرمطلق خطاهای نسبی برای رابطه ارائه شده در این تحقیق و روش Kucukali and Cokgor (2009) محاسبه و در جدول (۱) نشان داده شد:

$$MARE(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{C_{d(c)i} - C_{d(m)i}}{C_{d(m)i}} \right| \times 100 \quad (\text{رابطه } 20)$$

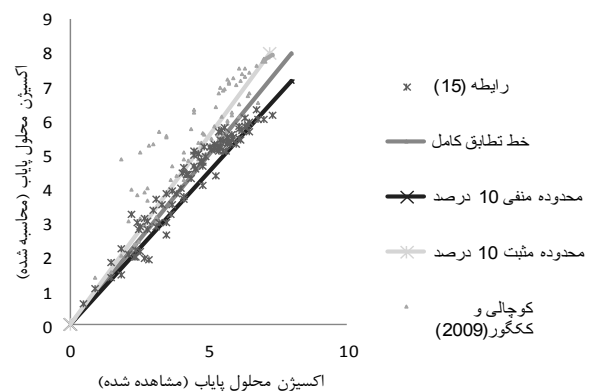
در رابطه بالا i شماره مربوط به رخداد، n تعداد مشاهدات، و MARE میانگین قدرمطلق خطاهای نسبی می باشند. همچنین آماره جذر مجموع مربعات خطا، $RMSE$ ، نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه و در جدول (۱) نشان داده شد:

$$RMSE(ppm) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{d(c)i} - C_{d(m)i})^2} \quad (\text{رابطه } 21)$$

نتایج نشان می دهد که میانگین قدرمطلق خطاهای نسبی، MARE، به دست آمده از Kucukali and Cokgor (2009) و معادله ارائه شده در این تحقیق به ترتیب برابر 24% و 9.09% می باشند. همچنین با توجه به جدول (۱) ملاحظه می شود که انحراف رابطه ارائه شده در این تحقیق، رابطه (۱۵) و روش Kucukali and Cokgor (2009) نسبت به مقادیر اندازه گیری شده، به صورت متوسط به ترتیب برابر 0.42 و 1 ppm می باشد.

ارزیابی روابط موجود جهت تخمین اکسیژن محلول

با استفاده از داده های برداشت شده در این پژوهش به ارزیابی روش های مختلف تخمین افزایش اکسیژن محلول ناشی از جهش هیدرولیکی پرداخته می شود. برای این منظور رابطه ارائه شده توسط Kucukali and Cokgor (2009)، رابطه (۳) و فرمول ارائه شده در این تحقیق، رابطه (۱۵)، مورد ارزیابی قرار گرفته اند. توجه شود که اکسیژن محلول بالادست دریچه در عمل همواره مقداری معلوم است، به طوری که در یک ایستگاه تصفیه فاضلاب می تواند مقدار اکسیژن محلول ورودی به ایستگاه باشد. از طرفی با استفاده از پدیده های هیدرولیکی نظیر جهش کلاسیک باید مقدار اکسیژن محلول بعد از جهش به عنوان مقدار مجهول مسئله در نظر گرفته شود.

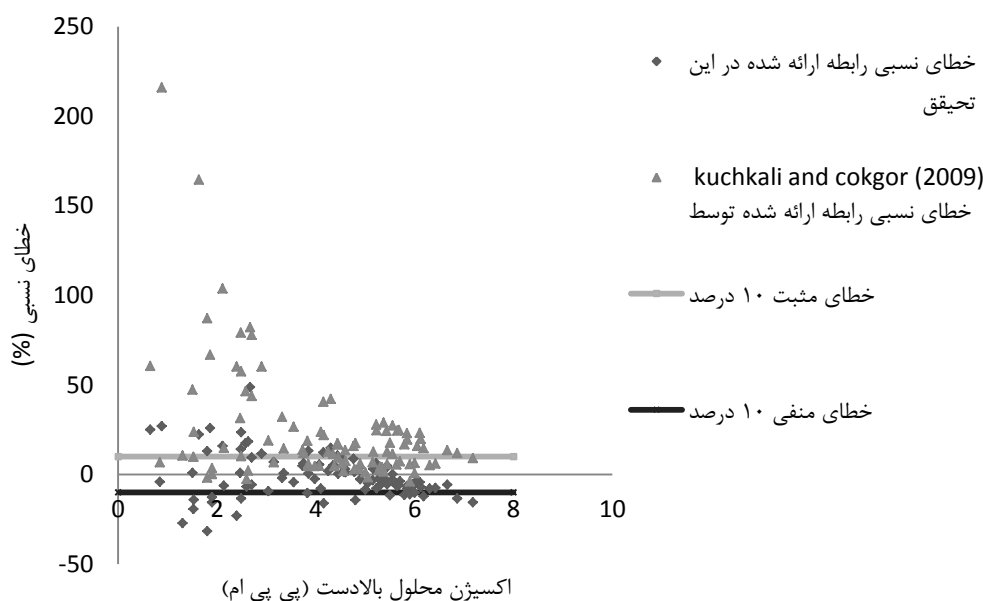


شکل ۱۰- اکسیژن محلول پایاب محاسبه شده در مقابل مقادیر مشاهده شده

مقدار اکسیژن محلول پایین دست یکبار با استفاده از رابطه ارائه شده توسط Kucukali and Cokgor (2009) و یکبار با استفاده از رابطه ارائه شده در این تحقیق، رابطه (۱۵)، محاسبه شد. مقادیر اکسیژن محلول پایاب محاسبه شده و مشاهده شده، برای این دو رابطه در مقابل هم رسم شد (شکل ۱۰). همان طور که در شکل (۱۰) مشاهده می شود برای رابطه ارائه شده در این تحقیق 70% داده ها در محدوده خطای $\pm 10\%$ قرار دارند، حال آنکه با استفاده از روش Kucukali and Cokgor (2009) تنها 39% درصد از داده ها در محدوده خطای $\pm 10\%$ قرار می گیرند.

جهت ارزیابی میزان خطای معادله استخراج شده در این تحقیق که بر اساس آنالیز ابعادی به دست آمده است و مقایسه آن با رابطه پیشنهاد شده توسط Kucukali and Cokgor (2009) مقادیر خطای نسبی با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$Error(\%) = \frac{C_{d(c)} - C_{d(m)}}{C_{d(m)}} \times 100 \quad (\text{رابطه } 19)$$



شکل ۱۱- خطای نسبی روش‌های مختلف در مقابل اکسیژن محلول بالادست

جدول ۱- مقایسه نتایج رابطه (۱۵) با رابطه Kucukali and Cokgor (2009)

معیار	رابطه (۱۵)	Kucukali and Cokgor (2009)
<i>MARE</i> (%)	۹/۰۹	۲۴
درصد داده‌هایی که در محدوده خطای نسبی ۱۰ درصد قرار دارند.	۷۰	۳۹
درصد داده‌هایی که در محدوده خطای نسبی ۱۵ درصد قرار دارند.	۸۴	۵۷
<i>RMSE</i> (ppm)	۰/۴۲	۱

و آزمایش‌های انجام‌شده برای اعداد فرود در محدوده ۲ الی ۴/۵ می‌توان نتیجه گرفت که مقدار اکسیژن محلول پایین‌دست به مشخصات کانال، شرایط جریان، همچنین مقدار اکسیژن محلول ورودی به سیستم و دمای آب بستگی دارد. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات بعدی آزمایش‌های بیشتری برای اعداد فرود بزرگ‌تر از ۴/۵ انجام شود.

- مقدار *MARE* و *RMSE* به‌دست‌آمده از رابطه آنالیز ابعادی در این پژوهش کمتر از مقدار *MARE* و *RMSE* حاصل از رابطه ککگور و کوچالی است. همچنین ۷۰ درصد کل داده‌های تخمین‌زده‌شده به‌وسیله رابطه (۱۵)، مقدار خطایشان کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد، این درحالی است که تنها ۳۹ درصد داده‌ها در رابطه ککگور و کوچالی (۲۰۰۹) مقدار خطایشان کمتر از ۱۰ درصد است.

۶- نمادها

B: عرض کانال،
C_d (ppm): غلظت اکسیژن محلول در پایین‌دست جهش،
C_s (ppm): غلظت اشباع اکسیژن محلول،

به‌صورت کلی با توجه به شکل (۹) که نشان می‌دهد راندمان افزایش اکسیژن محلول، E_{20} ، به ازای یک مقدار مشخص از نرخ اتلاف انرژی در طول جهش، می‌تواند مقادیر مختلفی را اختیار کنید و همچنین تحلیل خطای انجام‌شده در این تحقیق، می‌توان این‌طور نتیجه‌گیری کرد که مدل Kucukali and Cokgor (2009) برای محاسبه افزایش اکسیژن محلول در فرآیند جهش هیدرولیکی جامعیت کافی ندارد.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی و آنالیز ابعادی انجام‌شده در این تحقیق به‌صورت خلاصه نکات زیر حائز اهمیت می‌باشند:
 - با توجه به نتایج آزمایشگاهی، نشان داده شد که هراندازه اکسیژن محلول ورودی کمتر باشد تأثیر نسبی جهش هیدرولیکی در افزایش اکسیژن محلول بیشتر است.
 - با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی چنین نتیجه‌گیری شد که بازده هوادهی را نمی‌توان تنها به‌عنوان تابعی از افت ناشی از جهش هیدرولیکی در نظر گرفت.
 - با توجه به رابطه به‌دست‌آمده از آنالیز ابعادی (رابطه

y_t, y_0 : به ترتیب عمق آب در بالادست دریچه و پایاب،
 α و β : ضرایب تجربی،
 γ (N/m^3): وزن مخصوص آب،
 w (W/m): نرخ اتلاف انرژی در واحد عرض،
 ρ : چگالی سیال،
 ε : ضریب ثابت،
 μ : لزجت سیال.

C_u (ppm): غلظت اکسیژن محلول در بالادست جهش،
 E_{20} : راندمان اکسیژن محلول در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد،
 Fr : عدد فرود،
 g : شتاب گرانش،
 Q : دبی جریان،
 q (m^2/s): جریان در واحد عرض کانال،
 T : دما،
 w : بازشدگی دریچه،

REFERENCES

- Barenblatt, G.I. (1979). Similarity, self-similarity and intermediate asymptotics. New York: Consultants Bureau.
- Barenblatt, G.I. (1987). *Dimensional analysis*. Amsterdam The Netherlands: Gordon & Breach, Science Publishers Inc.
- Bostan, T. Coşar, A. Yetilmezsoy, K. Topçu, S. Ağaccioğlu, H. (2013). The effect of hydraulic jump on the aeration efficiency. 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, *BCCCE*, Epoka University, Tirana, Albania.
- Chanson, H. (2006). Air bubble entrainment hydraulic jumps: Similitude and scale effects. Report No. CH57/05 Dept. of Civil engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Chipongo, K. and Khiadani, M. (2016). Oxygen Transfer by Multiple Vertical Plunging Jets in Tandam. *Journal of hydraulic Engineering*, ASCE, ISSN 0733-9372.
- Gameson, A. L. H. (1957). Weirs and aeration of rivers. *Journal of water Engineering*, 11.
- Gulliver, J.S. and Wilhelms S. C. and Parkhill K.L. (1998). Predictive capabilities in oxygen transfer at hydraulic structures. *Journal of hydraulic Engineering*, ASCE, 124, pp. 664-671.
- Kucukali, S. and Cokgor, S. (2009). Energy Concept for Predicting Hydraulic Jump Aeration Efficiency. *Journal of Environmental Engineering*, 135:105-107.