
فصلنامه راهبردهای فنی در سامانه های آبی

تابستان ۱۴۰۲، دوره ۱، شماره ۱

شاپای الکترونیک: ۱۴۴۹-۲۹۸۱

۱-۱۴	بررسی عددی تأثیر پله غیر ممتد بر انرژی نسبی باقی مانده شیب شکن قائم سمیرا مزروعی، رضا میرزائی، شمس بصیرت، ودود حسن نیا
۱۵-۲۶	مدیریت هدررفت آب، اتلاف زمان و افزایش بهره‌وری صافی‌ها، توسط ته نشین کننده‌های لوله‌ای محسن معمارزاده، مژگان احمدی ندوشن، پیام نجفی، مهران هودجی
۲۷-۳۶	استهلاک انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه ای نوع C همراه با جامپ درکلیدهای خروجی آن کاظم جلوب مشالی، علی خوش فطرت، امیرحسین فتحی
۳۷-۵۴	کارایی مسیریاب AlpineQuest به‌عنوان جایگزین GPS در بازدیدهای میدانی مهندسی رودخانه (مطالعه موردی سیلاب مرداد ماه ۱۴۰۱ شهر رفسنجان) فرزانه قادری نسب گروهی، مریم احمدی
۵۵-۶۷	ارزیابی اثرات احداث بندهای اصلاحی آبخیزداری بر دبی پیک و حجم سیلاب رضا قضاوی، ابراهیم امیدوار
۶۸-۸۴	مرور روش‌های تحلیل و ارزیابی ایمنی لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی محمد رضا فدائی تهرانی، الهام یباره پور
۸۵-۱۰۰	هدررفت آب از شبکه‌های آبرسانی شهری و عوامل مؤثر بر آن سیدحمید علوی

Research Article



Numerical study of the effect of non-continuous step on the residual energy of a vertical drop

Samira Mazrouei^{1*}, Reza Mirzaee², Shamsa Basirat³, Vadoud Hasanniya⁴

¹ Department of Water Engineering and Hydraulic Structure, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

² Department of Water Engineering and Hydraulic Structure, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

³ Department of Civil Engineering, Islamic Azad University Najafabad, Isfahan, Iran.

⁴ Department of Water Engineering and Hydraulic Structure, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

*Corresponding Author email: samira.mazrooi@gmail.com

© The Author(s) 2023

Received: 03 July 2023

Accepted: 01 Aug 2023

Published: 04 Sept 2023

Abstract

In drainage and irrigation channels, vertical drop structures are commonly used to transfer water from a higher elevation to a lower one. At the downstream end of these structures, measures are taken to prevent channel bed erosion and reduce the destructive kinetic energy. In the present study, the effect of a non-extended step on the relative energy of the vertical drop structure was investigated using the FLOW-3D software and RNG turbulence model. Two relative heights and three relative widths for the step were considered, and the relative critical depth range was chosen between 0.2 and 0.5. The results indicate that the computed values of downstream relative depth show good agreement with experimental data. Additionally, both extended and non-extended step configurations yielded similar results, with an increase in the relative height of the step resulting in a reduction in the relative remaining energy. In other words, at a constant relative height of the step, for all critical relative depth values, the drop and turbulence generated in the plunge pool are the same for both extended and non-extended step models. Furthermore, employing a tranquility basin downstream reduced the wall height and length of the tranquility basin by more than 12% compared to the model without a step.

Keywords: Downstream depth, Energy loss, non-Extended step, Turbulence, Vertical drop.



بررسی عددی تأثیر پله غیر ممتد بر انرژی نسبی باقی‌مانده شیب‌شکن قائم

سمیرا مزروعی^{۱*}، رضا میرزائی^۲، شمس‌بصیرت^۳، ودود حسن‌نیا^۴

۱. گروه مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۳. گروه مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد نجف‌آباد، اصفهان، ایران.

۴. گروه مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

*ایمیل نویسنده مسئول: samira.mazrooi@gmail.com

© The Author(s) 2023

چاپ: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۲

چکیده

در کانال‌های زهکشی و آبیاری معمولاً برای انتقال آب از یک ارتفاع بالاتر به ارتفاع پایین‌تر از شیب‌شکن‌های قائم استفاده می‌شود. در پایین‌دست این سازه‌ها، جهت جلوگیری از فرسایش بستر کانال و کاهش انرژی جنبشی مخرب آن، تمهیداتی در نظر گرفته می‌شود. در تحقیق حاضر نیز تأثیر پله غیرممتد بر انرژی نسبی باقی‌مانده شیب‌شکن قائم به کمک نرم افزار FLOW-3D و مدل آشفتگی RNG بررسی شد. انرژی نسبی باقی‌مانده تابعی از ارتفاع نسبی پله، عرض نسبی پله و عمق بحرانی نسبی در نظر گرفته شد. دو ارتفاع نسبی و سه عرض نسبی برای پله در نظر گرفته شده و محدوده عمق بحرانی نسبی نیز بین ۰/۲ تا ۰/۵ انتخاب شد. نتایج حاکی از آن است که مقادیر عمق نسبی پایین‌دست حاصل از نتایج عددی تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. همچنین به‌کارگیری پله به‌صورت ممتد و غیر ممتد نتایج مشابهی را داشته و با افزایش ارتفاع نسبی پله انرژی نسبی باقی‌مانده کاهش می‌یابد. به عبارتی، در یک ارتفاع نسبی پله ثابت، به‌ازای تمامی مقادیر عمق بحرانی نسبی، افت و تلاطم ایجاد شده در پشت جت ریزشی در مدل با پله ممتد و غیرممتد یکسان است. علاوه‌براین، در صورت به‌کارگیری حوضچه آرامش در پایین‌دست، مدل دارای پله در مقایسه با مدل بدون پله، ارتفاع دیواره و طول حوضچه آرامش را بیش از ۱۲ درصد کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آشفتگی، انرژی نسبی باقی‌مانده، پله غیرممتد، شیب‌شکن قائم، عمق پایین‌دست.

۱-مقدمه

گاهی در بخشی از مسیر انتخابی برای احداث کانال و زمانی که شیب طبیعی زمین از شیب لازم برای طراحی کف کانال تندتر است؛ معمولاً برای انتقال آب از سطح بالاتر به پایین‌تر از سازه شیب‌شکن قائم استفاده می‌گردد. این سازه‌ها علاوه بر کنترل شیب، سبب کاهش حجم عملیات خاکی نیز می‌شوند. آزمایش‌ها و مطالعات زیادی در خصوص تأثیر پارامترهای عدد شیب‌شکن و زاویه ریزش جت بر هیدرولیک جریان عبوری از روی شیب‌شکن قائم با رژیم جریان زیر بحرانی در بالادست انجام شده است (Rand, 1995; Gill, 1997; Rajaratnam & Chamani, 1995; Chamani et al., 2008).

Esen et al. (2004) با انجام آزمایش‌هایی بر روی شیب‌شکن قائم به تأثیر وجود پله ممتد در عرض کانال با ابعاد مختلف پی بردند. در انتها روابطی را برای عمق نسبی پایین‌دست برای حالت بدون پله و با پله و عمق نسبی استخر ارائه نمودند. نشان دادند که وجود پله سبب افزایش اتلاف انرژی می‌شود. (Hong et al. (2010 نشان دادند که با افزایش شیب بستر پایین‌دست شیب‌شکن، نیروی برخورد و طول شیب‌شکن افزایش می‌یابد. (Farouk & Elgamal (2012 نیز با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت به بررسی شیب‌شکن قائم پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش دبی سبب افزایش عمق استخر و عمق پایین‌دست می‌گردد. (Mansouri & Ziaei (2014 با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت نشان دادند که شیب‌شکن قائم با آستانه انتهایی در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده، اتلاف انرژی بیشتری دارد.

Liu et al. (2014) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر شیب بالادست شیب‌شکن قائم پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش دبی و شیب بستر بالادست، عمق استخر و زاویه برخورد جت کاهش می‌یابد. (Kabiri-Samani et al. (2017 به بررسی شیب‌شکن قائم مجهز به مستهلک کننده‌های افقی شبکه‌ای و شیار در لبه شیب‌شکن قائم پرداختند. نتایج این محققین نشان داد که استفاده از این مستهلک کننده‌ها، اتلاف انرژی جریان و عمق پایین‌دست را افزایش می‌دهد. (Ghaderi et al. (2019 با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D تأثیر تنگ‌شدگی‌های قائم ورودی بر روی مشخصات هیدرولیکی شیب‌شکن قائم را بررسی کردند. نتایج نشان داد که وجود تنگ‌شدگی قائم ورودی باعث افزایش سرعت در لبه شیب‌شکن می‌شود و با افزایش تلاطم جریان در اثر سقوط جت‌های تقسیم شده جریان و ایجاد ناحیه بیشتری از اختلاط آب و هوا باعث کاهش انرژی جنبشی پایین‌دست می‌شود. تأثیر شیب قرارگیری صفحات مشبک افقی در لبه شیب‌شکن قائم نیز توسط Daneshfaraz et al. (2020a) به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. این محققین نشان دادند که شیب صفحات مشبک افقی با این که در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده افزایش اتلاف انرژی را به دنبال دارد، ولی در مقایسه با صفحه مشبک افقی بدون شیب، تأثیری بر اتلاف انرژی جریان ندارد.

Daneshfaraz et al. (2020b) با بررسی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی دوبل، نشان دادند که انرژی نسبی باقی‌مانده در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده افزایش چشم‌گیری می‌کند در مطالعه‌ای دیگر Mirzaee et al. (2021) با بررسی عددی شیب‌شکن قائم با لبه‌های دندان‌دانه‌ای نشان دادند که دندان‌دار کردن لبه شیب‌شکن سبب افزایش اتلاف انرژی شیب‌شکن قائم می‌گردد. به دنبال آن، (Bagherzadeh et al. (2022 با استفاده از یک بررسی

عددی و هوش مصنوعی نشان دادند که شیب‌شکن قائم با لبه‌های دندانه‌ای در شرایطی که تعداد دندانه‌ها ۳ عدد باشد، در مقایسه با تعداد دندانه ۲ و ۴، اتلاف انرژی به مراتب بیشتری ایجاد می‌کند. (Younesi et al. (2023) نشان دادند که به موجب ایجاد حداکثر اتلاف انرژی جریان در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی، زبر نمودن بستر پایین‌دست در مقایسه با بستر صاف، تأثیری بر اتلاف انرژی جریان نداشته و تنها سبب افزایش تداخل آب و هوا می‌گردد.

به کارگیری پله ممتد هم‌عرض کانال، چسبیده به دیواره شیب‌شکن قائم مطابق مطالعه Esen et al. (2004) باعث افزایش تلاطم در پشت جت ریزشی و افزایش اتلاف انرژی در مقایسه با مدل بدون پله می‌شود. از آنجایی که در نظر گرفتن پله به صورت غیرممتد می‌تواند هم به لحاظ اقتصادی به صرفه باشد و هم این که بر روی تلاطم در پشت جت ریزشی و اتلاف انرژی شیب‌شکن قائم مؤثر واقع گردد؛ لذا در تحقیق حاضر بررسی شیب‌شکن قائم با پله غیرممتد در پایین‌دست پیشنهاد گردیده و سعی شده است تا اثر غیر ممتد بودن پله در پایین‌دست شیب‌شکن قائم به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D مورد بررسی قرار گیرد.

۲- مواد و روش

۲-۱- آنالیز ابعادی

مطابق شکل (۱)، پارامترهای مؤثر شیب‌شکن قائم با پله غیرممتد در پایین‌دست به صورت رابطه (۱) است.

شکل ۱. شماتیک شیب‌شکن قائم با پله غیرممتد در پایین‌دست

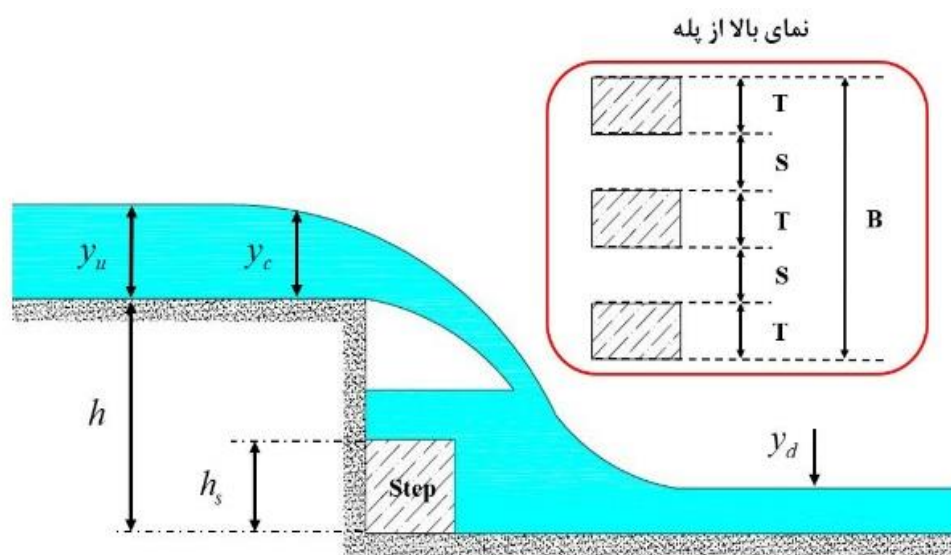


Fig 1. Schematic view of a vertical drop with a downstream non-continuous step

$$\left(\frac{y_d}{h}, \frac{E_d}{E_u}\right) = f(h, h_s, q, y_c, B, \mu, \rho, S, T) \quad (1)$$

در این رابطه، h ارتفاع شیب شکن، h_s ارتفاع پله، q دبی در عرض واحد، y_c عمق بحرانی، y_d عمق پایین دست شیب شکن، B عرض فلوم، μ لزجت دینامیکی آب، ρ چگالی آب، E_d و E_u انرژی مخصوص در پایین دست و بالادست، S فاصله عرضی پله های غیرممتد و T عرض پله های غیرممتد هستند. با انتخاب h ، ρ و q به عنوان پارامترهای تکراری و استفاده از تئوری پی باکینگهام، پارامترهای بی بعد به صورت رابطه (۲) به دست آمد:

$$\left(\frac{y_d}{h}, \frac{E_d}{E_u}\right) = f\left(\frac{h_s}{h}, \frac{y_c}{h}, \frac{B}{h}, \frac{S}{h}, \frac{T}{h}, \frac{\rho h^2 q}{\mu}\right) \quad (2)$$

در رابطه بالا، $\frac{\rho h^2 q}{\mu}$ بیانگر عدد رینولدز (Re_u) است. از تأثیر پارامتر بدون بعد B/h به دلیل ثابت بودن عرض و ارتفاع شیب شکن، صرف نظر شد. با توجه به این که برای سادگی و کاهش تعداد پارامترهای بی بعد، در تحلیل های ابعادی، می توان پارامترهای حاصل را با هم ترکیب نمود؛ از این رو:

$$\left(\frac{y_d}{h}, \frac{E_d}{E_u}\right) = f\left(\frac{h_s}{h}, \frac{y_c}{h}, \frac{S}{B}, \frac{T}{B}, Re_u\right) \quad (3)$$

در تحقیق حاضر، فاصله عرضی پله غیرممتد برابر عرض پله در نظر گرفته شده است ($S=T$). با توجه به این که محدوده عدد رینولدز بیش از ۲۰۰۰ است؛ لذا می توان از تأثیر آن نیز صرف نظر کرد (Sumer & Fredsoe, 1991).

$$\left(\frac{y_d}{h}, \frac{E_d}{E_u}\right) = f\left(\frac{h_s}{h}, \frac{y_c}{h}, \frac{S}{B} = \frac{T}{B} = \beta\right) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، y_c/h عمق بحرانی نسبی، h_s/h ارتفاع نسبی پله و β عرض نسبی پله غیرممتد است. مقادیر مربوط به پارامترهای مستقل در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. محدوده متغیرهای مستقل تحقیق حاضر

Table 1. The range of independent variables of the current study

پارامترهای مستقل	محدوده
عمق بحرانی نسبی	۰/۵ تا ۰/۲
ارتفاع نسبی پله	۰/۳ و ۰/۴
عرض نسبی پله	۰/۲، ۰/۱۴۳ و ۰/۱۱

۲-۲- معرفی نرم افزار و مدل آشفتگی منتخب

نرم افزار FLOW-3D یک مدل سه بعدی در حل مسائل مکانیک سیالات و هیدرودینامیک به شمار می رود. معادلات حاکم در این نرم افزار معادلات ناویر-استوکس و معادله بقای جرم هستند (Ghaderi et al., 2019). این نرم افزار برای تحلیل سه بعدی

جریان در حالت تراکم‌ناپذیر معادلات ناویر-استوکس رینولدزی را با استفاده از روش حجم محدود بر روی یک میدان شبکه‌بندی شده حل می‌کند.

شبیه‌سازی آشفتگی FLOW-3D با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی مورد استفاده توسط این نرم‌افزار صورت می‌گیرد. مدل‌های آشفتگی مورد استفاده توسط FLOW-3D عبارتند از: طول اختلاط پرانتل، مدل یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای $k - \varepsilon$ ، مدل گروه‌های نرمال شده (RNG) و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES). در این تحقیق برای شبیه‌سازی مشخصات جریان در شرایط جریان آشفتگی از مدل آشفتگی RNG به دلیل توانایی در شبیه‌سازی جریان با تعداد شبکه‌های محاسباتی بالا، نیاز به ثابت‌های تجربی کمتر در روابط خود و عملکرد خوب در شبیه‌سازی نواحی جداشدگی جریان، نتایج بهتری در مقابل کرنش و انحنای ناگهانی خطوط جریان و همچنین با توجه به نتایج مطالعه‌های عددی انتخاب گردیده است (Ghaderi et al., 2020).

۲-۳- مشخصات مدل شبیه‌سازی و شبکه محاسباتی

در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی عددی اثر پله غیرممتد در پایین‌دست شیب‌شکن قائم از آرایش‌های مختلف β استفاده گردید. مقادیر عرض پله‌های غیرممتد برابر ۶۷/۶، ۵۷/۸ و ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد ($\beta = 0.2, 0.11, 0.143$). شکل (۲) طرح سه‌بعدی شیب‌شکن قائم با پله ممتد و غیرممتد در مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد. در کل ۴۲ شبیه‌سازی بر روی شیب‌شکن قائم مجهز به پله غیرممتد در سه عرض و دو ارتفاع نسبی پله انجام گرفت.

برای صحت‌سنجی مدل شیب‌شکن قائم با پله ممتد در پایین‌دست از نتایج آزمایشگاهی (Esen et al., 2004) استفاده شد. ایشان در یک فلوم آزمایشگاهی به عرض ۰/۶ متر از سه ارتفاع شیب‌شکن و ۷ ارتفاع مختلف برای پله استفاده نمودند. در تحقیق حاضر، ارتفاع شیب‌شکن برابر ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و ارتفاع پله نیز ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر انتخاب شد. طول بالادست و پایین‌دست مورد نیاز برای شبیه‌سازی نیز ۳ متر در نظر گرفته شد (Ghaderi et al., 2019). از عمق نسبی پایین‌دست شیب‌شکن نیز برای صحت‌سنجی استفاده گردید. شکل (۳) مشخصات هندسی شیب‌شکن قائم و شرایط مرزی را با حضور پله غیرممتد نشان می‌دهد. جهت اعمال شرایط مرزی، در ورودی از شرط مرزی دبی مشخص^۱، در پایین‌دست به دلیل عدم تأثیرپذیری جریان در شبکه حل از شرط خروجی^۲، برای دیواره‌ها و کف از شرط مرزی دیواره^۳ و در مرز بالایی از شرط مرزی تقارن^۴ استفاده گردید. همچنین فشار به صورت هیدرواستاتیک در شرط اولیه جریان لحاظ شد. در ابتدا به منظور انجام شبیه‌سازی مدت زمان حل عددی ۳۰ ثانیه انتخاب شد و پس از بررسی‌های مربوطه و کنترل شرط پایداری جریان، زمان در نظر گرفته شده برای حل مدل عددی کفایت کرد. کنترل پایداری شرایط جریان نیز بر اساس اخطار نرم‌افزار مبنی بر این که در دو گام زمانی متوالی، اختلاف مقادیر محاسبه شده ناچیز است، صورت می‌گرفت. علاوه بر این با اندازه-

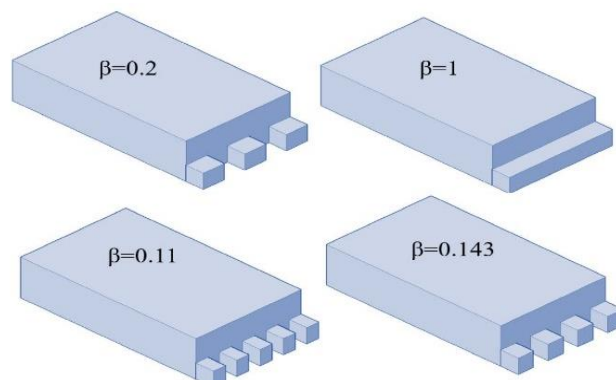
¹ Volume flow rate

² Outflow

³ Wall

⁴ Symmetry

شکل ۲. طرح سه بعدی از شیب شکن قائم مجهز به پله ممتد و غیر ممتد



شکل ۳. مشخصات هندسی شیب‌شکن قائم و شرایط مرزی با حضور پله غیر ممتد در تحقیق حاضر

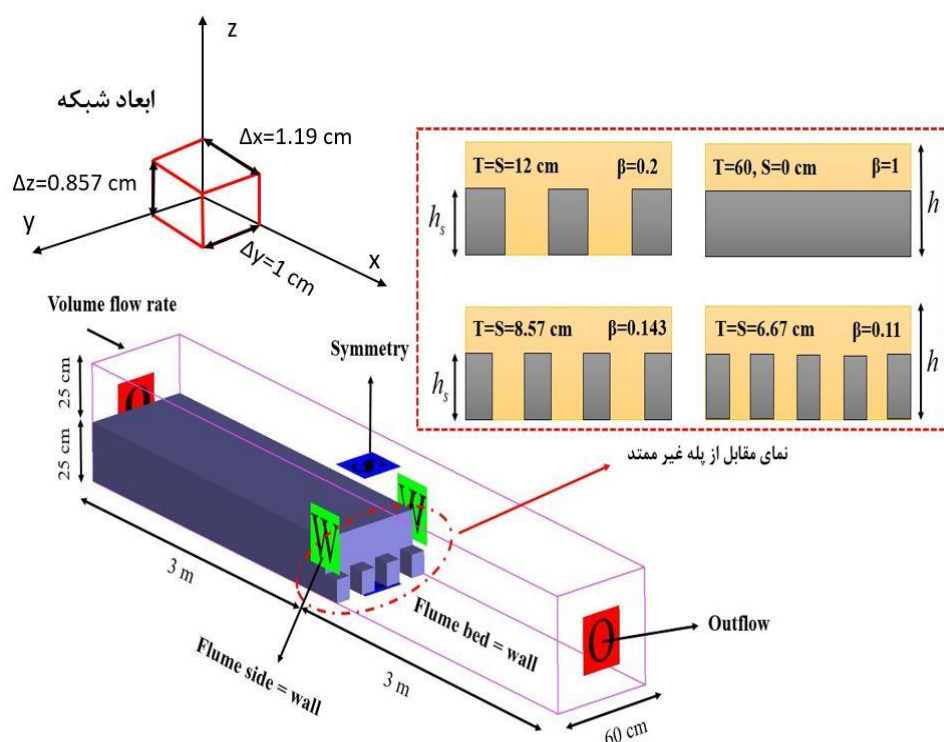


Fig 3. Geometric characteristics of vertical drop and boundary conditions with the presence of non-continuous step in the present study

۲-۴- صحت‌سنجی مدل فیزیکی

در تحقیق حاضر مدل‌های متفاوتی جهت انتخاب اندازه شبکه بهینه شبیه‌سازی گردید. همچنین آنالیز حساسیت اندازه شبکه تا رسیدن به نتایج ثابت و بدون تغییر و دارای اختلاف خطای کم بین نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی انجام شد. آنالیز حساسیت اندازه شبکه به همراه خطاها در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است که از شبکه‌های مستطیلی برای شبکه‌بندی مدل و میدان حل استفاده شده است که در آن برای تمامی حالات جدول (۲)، اندازه شبکه در راستای محور عرضی برابر یک سانتی‌متر لحاظ شده و در راستای محور طولی، اندازه شبکه بزرگ‌تر از راستای قائم انتخاب شده است.

جدول ۲. آنالیز حساسیت اندازه شبکه در تحقیق حاضر

Table 2. Mesh size sensitivity analysis in the present study

ردیف	کوچکترین اندازه شبکه (cm)	بزرگترین اندازه شبکه (cm)	تعداد کل شبکه	متوسط خطای نسبی (%)	خطای جذر میانگین مربعات
۱	۱/۳۹	۱/۸۲	۴۹۶۶۵۰	۱۴/۶۴	۰/۰۲۴
۲	۱/۲	۱/۵	۸۴۰۰۰۰	۱۰/۵	۰/۰۱۹
۳	۰/۸۵۷	۱/۱۹	۱۷۵۰۰۰۰	۳/۷	۰/۰۰۵۵
۴	۰/۶	۱	۳۰۰۰۰۰۰	۲/۹۷	۰/۰۰۴۹

در جدول (۲) همانگونه که ملاحظه می‌شود مدل با تعداد کل شبکه ۱۷۵۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰۰۰ دارای معیارهای ارزیابی قابل قبول و نزدیک به هم بوده و با دقت خوبی نتایج آزمایشگاهی را شبیه‌سازی می‌کند. از آنجایی که برای تعداد اندازه شبکه ۳۰۰۰۰۰۰ زمان شبیه‌سازی بسار طولانی و زمان‌بر می‌شد؛ لذا جهت کاهش اثر شبکه محاسباتی در نتایج شبیه‌سازی، تعداد اندازه شبکه ۱۷۵۰۰۰۰ در میدان حل برای تمامی مدل‌های تحقیق حاضر در نظر گرفته شده است. نتایج اندازه شبکه منتخب در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق شکل (۴) ملاحظه می‌گردد که مقادیر عمق نسبی پایین‌دست مدل عددی با تعداد کل شبکه ۱۷۵۰۰۰۰ در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی دارای خطای نسبی، خطای جذر میانگین مربعات و ضریب تعیین مناسبی بوده و صحت و دقت مدل‌سازی انجام شده را نشان می‌دهد. محدوده داده‌های مربوط به شبیه‌سازی انجام شده نیز در جدول (۳) ارائه شده است. محدوده داده‌های مربوط به شبیه‌سازی انجام شده نیز در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳. محدوده داده‌های شبیه‌سازی تحقیق حاضر

Table 3. Range of simulation data of the present study

محدوده پارامترها				h_s / h
$y_d (cm)$	$y_c (cm)$	$y_u (cm)$	$q (m^3 / s.m)$	
۵/۸-۱/۹۲				۰/۳
	۱۲/۶-۵	۱۱/۴-۵/۵۲	۰/۱۳۸-۰/۰۳۵	
۶-۲				۰/۴

شکل ۴. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و عددی عمق نسبی پایین دست در اندازه شبکه منتخب

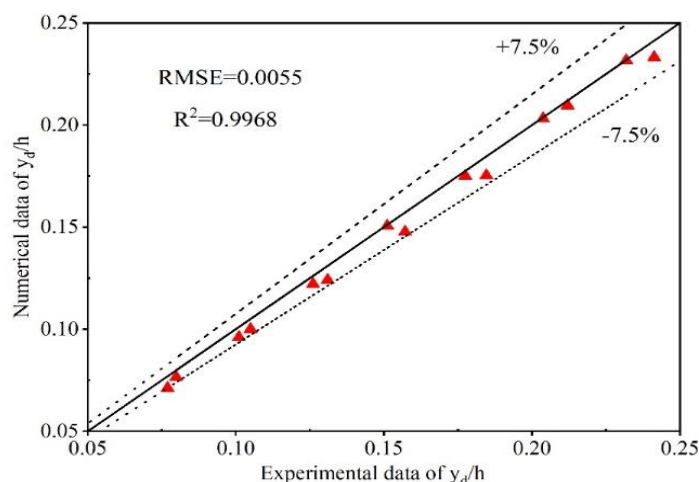
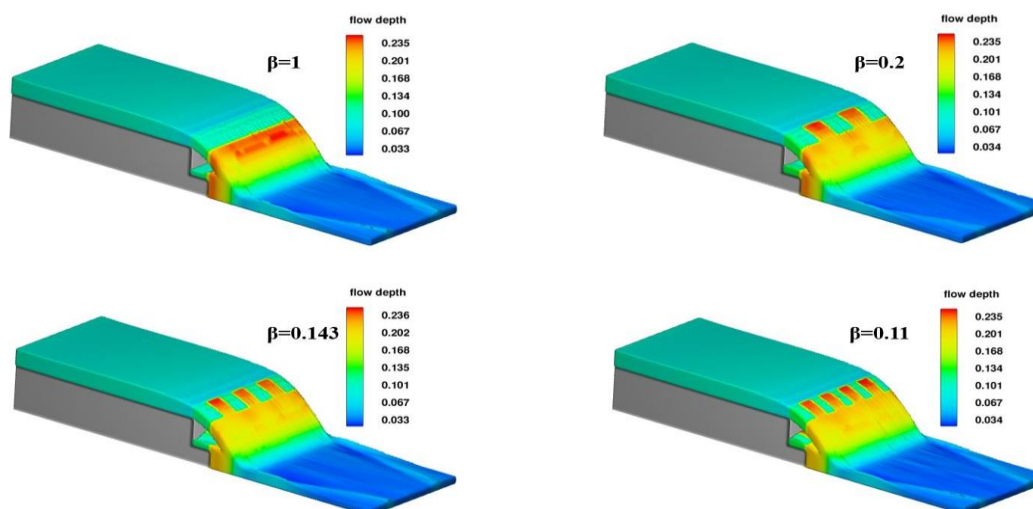


Fig 4. Comparison of experimental and numerical values of relative downstream depth in selected mesh size

۳- نتایج و بحث

۳-۱- پروفیل سطح آب

پروفیل سطح آب جریان بر روی شیب شکن قائم با پله غیر ممتد در پایین دست به ازای فواصل عرضی متفاوت پله در ارتفاع نسبی پله 0.4 و عمق بحرانی نسبی $0.3/4$ در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵) قابل توجه است که پس از سقوط جت ریزشی شیب شکن، مقداری از دبی جریان به سمت دیواره شیب شکن قائم برگشته و سبب ایجاد تلاطم و آشفتگی در پشت جت سقوطی شده و مقداری از دبی جریان در مابین و روی پله غیر ممتد قرار می گیرد. همچنین مشاهده می شود که در تمامی مدل ها، به ازای ارتفاع نسبی پله و عمق بحرانی نسبی ثابت، با تغییر عرض نسبی پله تغییری در پروفیل جریان بر روی مدل های دارای پله غیر ممتد در مقایسه با مدل با پله ممتد ایجاد نمی شود.

شکل ۵. جریان بر روی شیب شکن قائم با پله ممتد و غیر ممتد در شبیه سازی عددی برای $y_c/h=h/h_s=0.4$ Fig 5. Flow over vertical drop with continuous and non-continuous step in numerical simulation for $y_c/h=h/h_s=0.4$

۳-۲- عمق نسبی پایین دست

مقادیر عمق نسبی پایین دست به ازای دو ارتفاع و سه عرض نسبی پله در مقابل عمق بحرانی نسبی در شکل (۶) نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش عمق بحرانی نسبی، مقادیر عمق نسبی پایین دست برای تمامی مدل‌ها افزایش می‌یابد. برای هر دو ارتفاع نسبی پله در شکل (۶) مشاهده می‌شود که مقادیر عمق نسبی پایین دست حاصل از نتایج عددی تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. مشخص شد که غیر ممتد شدن پله در مقایسه با پله ممتد، تأثیری بر عمق نسبی پایین دست ندارد. چنانچه وجود پله و افزایش ارتفاع نسبی آن در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده، به دلیل افزایش تلاطم در پشت جت ریزشی، باعث افزایش ۸ و ۱۳ درصدی عمق نسبی پایین دست در دو ارتفاع نسبی ۰/۳ و ۰/۴ شده است.

شکل ۶. تغییرات عمق نسبی پایین دست در مقابل عمق بحرانی نسبی الف) $h_s/h = 0.4$ ب) $h_s/h = 0.3$

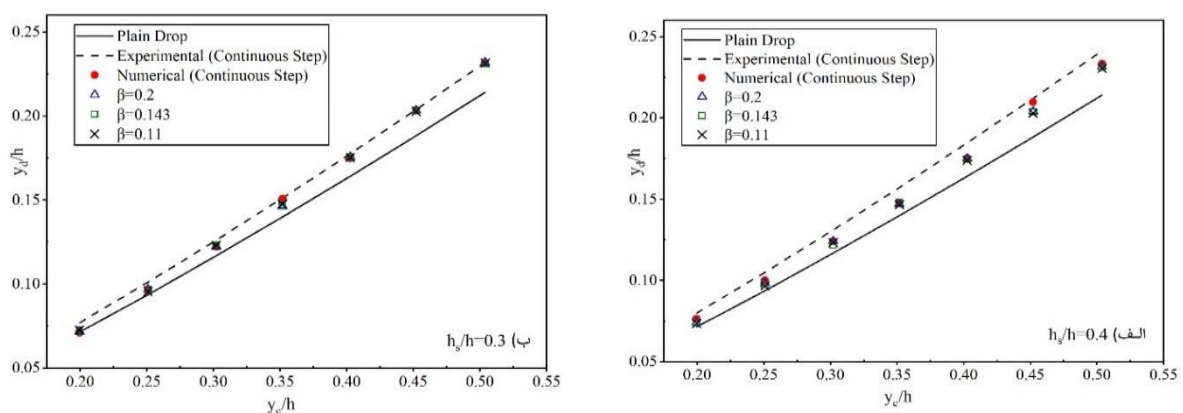


Fig 6. Changes in the relative downstream depth versus the relative critical depth a) $h_s/h=0.4$ b) $h_s/h=0.3$

استفاده از پله به صورت ممتد و غیر ممتد چسبیده به دیواره شیب‌شکن قائم، محدوده عدد فرود پایین دست را از ۳/۶ تا ۴/۷ در شیب‌شکن قائم ساده به محدوده ۳ تا ۴/۱۸ در شیب‌شکن قائم مجهز به پله در هر دو ارتفاع نسبی پله کاهش می‌دهد. در صورتی که در پایین دست شیب‌شکن‌های قائم جهت اتلاف انرژی از حوضچه‌های آرامش استاندارد نوع یک یا چهار (تفاوت تپ ۴ و ۱ در مقدار عمق ثانویه بوده که به میزان ۱۰ درصد بیشتر در نظر گرفته می‌شود) استفاده گردد، میزان کاهش عدد فرود در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به پله می‌تواند ابعاد حوضچه آرامش را نیز کاهش دهد. در جدول (۴) میزان کاهش ابعاد حوضچه آرامش نوع یک یا به عبارت دیگر کفبند (ارتفاع دیواره و طول حوضچه) در پایین دست شیب‌شکن قائم مجهز به پله در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده بیان شده است. لازم به ذکر است که برای محاسبه مقادیر جدول (۴) ابتدا با استفاده از رابطه بلانگر، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک محاسبه شده و به عنوان ارتفاع دیواره در نظر گرفته شد و طول حوضچه نیز ۶ برابر عمق ثانویه محاسبه گردید (Younesi et al., 2023). سپس از رابطه (۵) برای محاسبه مقدار کاهش ابعاد حوضچه استفاده شد. متوسط مقادیر بدست آمده برای هر مدل در جدول (۴) ارائه شدند.

$$\omega = \frac{|\psi_p - \psi_{sp}|}{\psi_p} \quad (5)$$

که در رابطه بالا، ω مقدار کاهش ابعاد حوضچه، ψ_p ابعاد حوضچه در شرایط بدون وجود پله و ψ_{sp} ابعاد پله در شرایط وجود پله است.

جدول ۴. کاهش ابعاد حوضچه آرامش در پایین دست شیب شکن قائم مجهز به پله ممتد و غیرممتد

Table 4. Decrease the dimensions of the downstream stilling basin of the vertical drop equipped with continuous and non-continuous steps

ارتفاع نسبی پله	کاهش ارتفاع دیواره (%)	کاهش طول حوضچه (%)
۰/۳	۱۲	۱۴/۵
۰/۴	۱۷/۴	۲۱

همانگونه که در جدول (۴) مشاهده می شود، در صورت استفاده از پله به صورت ممتد و غیر ممتد در دیواره شیب شکن قائم، ابعاد حوضچه آرامش نیز کاهش می یابد. به کارگیری پله در دیواره شیب شکن قائم برای ارتفاع نسبی پله بیش از ۰/۳، دیواره و طول حوضچه آرامش را بیش از ۱۲ درصد کاهش می دهد. نکته حائز اهمیت این است که از آنجایی که غیر ممتد بودن پله در مقایسه با پله ممتد مصالح کمتری برای ساخت نیاز دارد؛ لذا نسبت به آن صرفه اقتصادی داشته و می تواند در طراحی های مربوط به شیب شکن های قائم مدنظر مهندسین هیدرولیک قرار گیرد.

۳-۳- انرژی نسبی باقی مانده

در شیب شکن های قائم، نسبت انرژی مخصوص در پایین دست به انرژی در بالادست، انرژی نسبی باقی مانده گفته می شود. مقادیر مربوط به انرژی نسبی باقی مانده شیب شکن قائم ساده و شیب شکن با پله ممتد و غیر ممتد به ازای دو ارتفاع نسبی و سه عرض نسبی پله در شکل (۷) نسبت به عمق بحرانی نسبی نشان داده شده است. مشاهده می گردد که برای تمامی مدل های تحقیق حاضر و شیب شکن قائم ساده با افزایش عمق بحرانی نسبی، انرژی نسبی باقی مانده به صورت یک تابع لگاریتمی افزایش می یابد.

شکل ۷. تغییرات انرژی نسبی باقی مانده در مقابل عمق بحرانی نسبی الف) $h_s/h=0.4$ ب) $h_s/h=0.3$

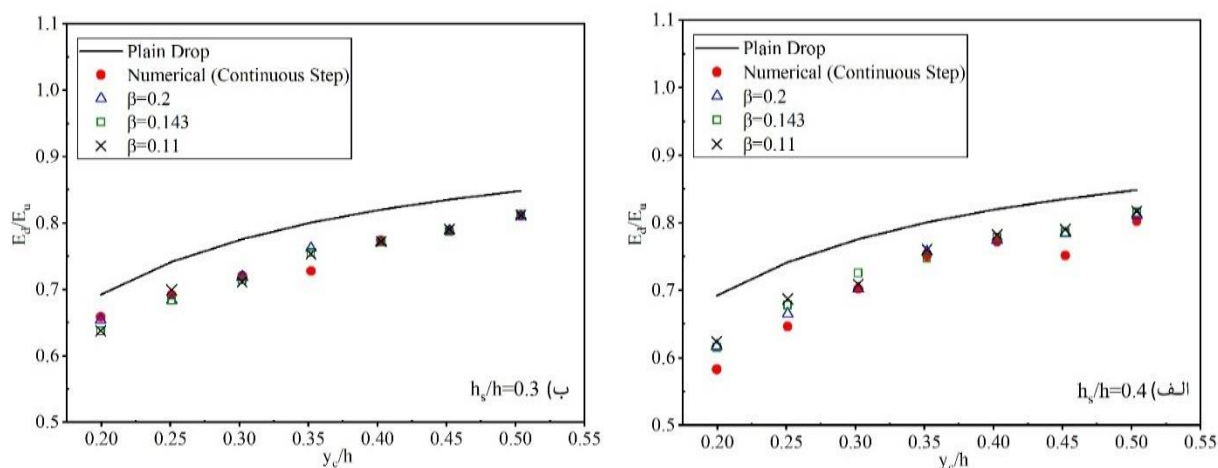


Fig 7. Changes in the relative residual energy versus the relative critical depth a) $h_s/h=0.4$ b) $h_s/h=0.3$

در شکل (۷) برای هر دو ارتفاع نسبی پله، انرژی نسبی باقی‌مانده در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده کاهش یافته است. این کاهش به دلیل افزایش عمق نسبی پایین‌دست در اثر افزایش تلاطم در پشت جت ریزشی اتفاق افتاده است. ملاحظه می‌گردد که تأثیر عرض نسبی پله بر انرژی نسبی باقی‌مانده در هر دو ارتفاع نسبی پله ناچیز است. به این معنی است که پله غیرممتد همان کارایی پله ممتد در دیواره شیب‌شکن قائم را انجام می‌دهد، با این تفاوت که در پله غیر ممتد مصالح کمتری جهت ساخت در نظر گرفته شده و اقتصادی‌تر است. در نظر گرفتن حوضچه نوع یک (کفبند) در پایین‌دست شیب‌شکن قائم مجهز به پله غیرممتد در ارتفاع نسبی پله $0/3$ و $0/4$ ، انرژی نسبی باقی‌مانده را در مقایسه با حالت بدون پله به ترتیب 4 و 6 درصد کاهش می‌یابد.

۳-۴- روابط رگرسیونی

در شکل (۸) تغییرات اتلاف آشفتگی در پشت جت ریزشی شیب‌شکن قائم با پله در پایین‌دست برای ارتفاع نسبی پله $0/4$ در مقابل عمق بحرانی نسبی نشان داده شده است. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که پله به صورت ممتد و غیر ممتد چسبیده به دیواره در تمامی مقادیر عمق بحرانی نسبی، اتلاف آشفتگی یکسانی در پشت جت ریزشی ایجاد می‌کند.

برای بررسی تأثیر پارامترهای مستقل و همچنین تخمین مقادیر عمق نسبی پایین‌دست و انرژی نسبی باقی‌مانده، روابط تجربی ارائه گردید. روابط در اکسل با استفاده از دستور Solver به دست آمد. برای ارائه رابطه، تعداد ۱۲ داده (حدود ۳۰ درصد داده‌ها) به صورت تصادفی برای آموزش در نظر گرفته شده و ۳۰ داده (حدود ۷۰ درصد داده‌ها) نیز به عنوان تست انتخاب شدند. روابط تجربی به همراه معیارهای ارزیابی در جدول (۵) ارائه شده است. روابط ارائه شده در جدول (۵) دارای معیارهای ارزیابی قابل قبولی بوده و می‌تواند تخمین درستی از داده‌های تحقیق حاضر را ارائه دهد. همچنین در هر دو روابط ارائه شده، پارامتر عرض نسبی پله دارای توانی نزدیک به صفر است؛ لذا تغییر این پارامتر تأثیری بر عمق نسبی پایین‌دست و انرژی باقی‌مانده نسبی ندارد.

شکل ۸. تغییرات اتلاف آشفتگی پشت جت ریزشی در مقابل عمق بحرانی نسبی

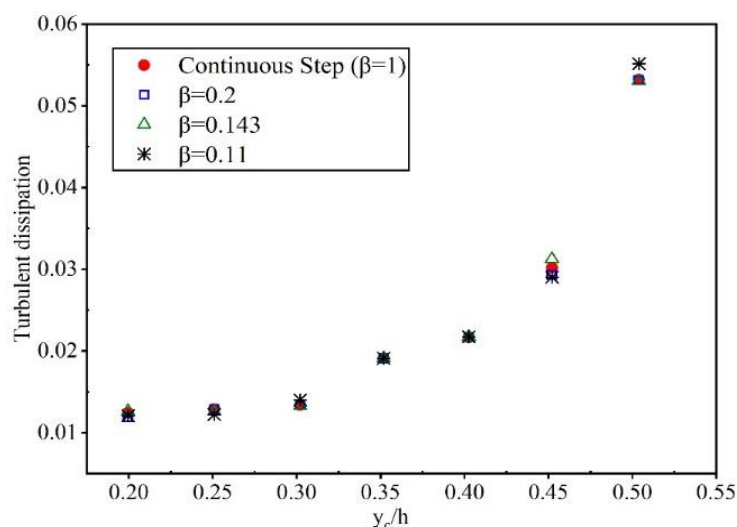


Fig 8. Changes of turbulence dissipation behind the falling jet versus relative critical depth

جدول ۵. روابط مربوط به عمق نسبی پایین دست و انرژی نسبی باقی مانده

Table 5. Downstream relative downstream depth and relative residual energy equations

روابط	معیارهای ارزیابی			پارامتر مستقل		
	ضریب تعیین	خطای جذر میانگین مربعات	y_c / h	h_s / h	β	
$\frac{y_d}{h} = 0.545 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{1.25} \left(\frac{h_s}{h}\right)^{0.05} \beta^{-0.0006}$	۰/۹۹۸	۰/۰۰۸	مؤثر	مؤثر	بی تأثیر	
$\frac{E_d}{E_u} = 0.955 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.26} \left(\frac{h_s}{h}\right)^{-0.035} \beta^{-0.0006}$	۰/۹۸	۰/۰۱۸	مؤثر	مؤثر	بی تأثیر	

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، تأثیر پله غیر ممتد بر روی انرژی باقی مانده نسبی شیب شکن قائم در دو ارتفاع و سه عرض نسبی پله به صورت عددی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق برای شبیه سازی سطح آزاد از روش VOF و برای مدل آشفتگی از RNG استفاده شد. نتایج نشان داد عمق نسبی پایین دست شیب شکن قائم مجهز به پله حاصل از نتایج عددی همبستگی مناسبی با داده های آزمایشگاهی دارد و کارایی پله به صورت غیر ممتد در مقایسه با پله ممتد در دیواره شیب شکن قائم یکسان بوده و عرض نسبی پله تأثیری بر عمق نسبی پایین دست و انرژی باقی مانده نسبی ندارد. همچنین افزایش ارتفاع نسبی پله سبب افزایش عمق نسبی پایین دست و کاهش انرژی نسبی باقی مانده می گردد. شیب شکن های قائم با پله غیر ممتد در مقایسه با حالت بدون پله، عمق نسبی پایین دست را افزایش داده و در پی آن، در صورت به کارگیری حوضچه آرامش، ارتفاع و طول حوضچه آرامش را بیش از ۱۲ درصد کاهش می دهند. از آنجایی که پله به صورت ممتد و غیر ممتد نتایج یکسانی را ارائه می دهد؛ لذا غیر ممتد بودن پله در مقایسه با پله ممتد مصالح کمتری برای ساخت نیاز دارد. بنابراین نسبت به پله ممتد از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بوده و قابل استفاده در پایین دست شیب شکن های قائم برای کاهش ابعاد حوضچه آرامش (کفبند) است.

۵- تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

۶- مراجع

- Bagherzadeh, M., Mousavi, F., Manafpour, M., Mirzaee, R., & Hoseini, K. (2022). Numerical simulation and application of soft computing in estimating vertical drop energy dissipation with horizontal serrated edge. *Water Supply*, 22(4), 4676-4689. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.127>
- Chamani, M. R., Rajaratnam, N., & Beirami, M. K. (2008). Turbulent jet energy dissipation at vertical drops. *Journal of hydraulic engineering*, 134(10), 1532-1535. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:10\(1532\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:10(1532))

- Daneshfaraz, R., Hasanniya, V., Mirzaei, R., & Bazayr, A. (2020a). Experimental investigation of the effect of positive slope of the horizontal screen on hydraulic characteristics of vertical drop. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(10), 2499-2509. (In Persian)
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Razmi, S., Norouzi, R., & Abraham, J. (2020b). Experimental investigation of the effect of dual horizontal screens on the hydraulic performance of a vertical drop. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 2927-2936. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02622-x>
- Esen, I. I., Alhumoud, J. M., & Hannan, K. A. (2004). Energy loss at a drop structure with a step at the base. *Water international*, 29(4), 523-529. <https://doi.org/10.1080/02508060408691816>
- Farouk, M., & Elgamal, M. (2012). Investigation of the performance of single and multi-drop hydraulic structures. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 2(1), 48-74. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2012.045939>
- Ghaderi, A., Dasineh, M., & Abbasi, S. (2019). Impact of vertically constricted entrance on hydraulic characteristics of vertical drop (numerical investigation). *Journal of Hydraulics*, 13(4), 121-131. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1112-8>
- Blaisdell, F. W. (1980). Hydraulics of rectangular vertical drop structures: *Journal of Hydraulic Research*, 17(4), 289-302.
- Hong, Y. M., Huang, H. S., & Wan, S. (2010). Drop characteristics of free-falling nappe for aerated straight-drop spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 125-129. <https://doi.org/10.1080/00221680903568683>
- Kabiri-Samani, A. R., Bakhshian, E., & Chamani, M. R. (2017). Flow characteristics of grid drop-type dissipators. *Flow Measurement and Instrumentation*, 54, 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.11.002>
- Liu, S. I., Chen, J. Y., Hong, Y. M., Huang, H. S., & Raikar, R. V. (2014). Impact characteristics of free over-fall in pool zone with upstream bed slope. *Journal of Marine Science and Technology*, 22(4), 9.
- Mansouri, R., & Ziaei, A. (2014). Numerical modeling of flow in the vertical drop with inverse apron. *11 th International Conference on Hydroinformatics HIC 2014*, New York City, USA.
- Mirzaee, R., Hosseini, K., & Mousavi, F. (2021). Numerical investigation on energy loss in vertical drop with horizontal serrated edge. *Journal of Hydraulics*, 16(1), 23-36. (In Persian)
- Rajaratnam, N., & Chamani, M. R. (1995). Energy loss at drops. *Journal of Hydraulic Research*, 33(3), 373-384. <https://doi.org/10.1080/00221689509498578>
- Rand, W. (1955). Flow geometry at straight drop spillways. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 81(9), 1-13. ASCE.
- Sumer, B. M., & Fredsoe, J. (1991). Onset of scour below a pipeline exposed to waves. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-I). ISOPE.
- Yonesi, H. A., Daneshfaraz, R., Mirzaee, R., & Bagherzadeh, M. (2023). Maximum energy loss in a vertical drop equipped with horizontal screen with downstream rough and smooth bed. *Water Supply*, 23(2), 960-974. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.005>

Research Article



Managing water wastage, wasting time and increasing the efficiency of the filters using tube settlers

Mohsen Memarzadeh¹, Mozhgan Ahmadi Nadoushan^{2*}, Payam Najafi³, Mehran Hoodaji⁴

¹ Ph.D. Student of Environmental Pollution, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

² Department of Environment, Waste and Wastewater Research Center, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

³ Department of Water Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

⁴ Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

*Corresponding Author email: m.ahmadi1984@gmail.com

© The Author(s) 2023

Received: 09 July 2023

Accepted: 30 Aug 2023

Published: 04 Sept 2023

Abstract

The Isfahan water treatment plant, with a final capacity of 12.5 cubic meters per second, is one of the largest water treatment plants in the Middle East. It has 10 sedimentation basins with a retention time ranging from 1.91 to 2.75 hours; each basin has a volume of 9172 cubic meters and a surface load of 14.2 to 2.85 cubic meters per square meter per hour. This research was conducted to investigate the efficiency of the combined use of accelerator sedimentation basins equipped with tube settlers on a full and field scale. The goal was to achieve greater efficiency in improving the quality of output water and managing the reduction of water wastage, backwashing time wastage, as well as reducing the need for repairs and maintenance of treatment plant equipment. In this study, the accelerator sedimentation ponds related to two stream 1 clarifiers from the first phase of the treatment plant were equipped with rapid tubular settlers made of food-grade polypropylene. These settlers are hexagonal in shape with a hydraulic diameter of 50 to 80 mm; placed at a 60-degree angle to the surface, and have a length of 90 cm. Stream 2 was operated without the simultaneous use of rapid tube settlers in the circuit. The amount of backwashing's of filters, the number of times the aerators and backwashing pumps are engaged in the circuit, the amount of water wastage, and the time required for each wash in streams 1 and 2 were compared with each other. The results of this study showed that the number of times of reverse washing of filters was reduced by an average of 25% compared to stream 2. This action also reduced the amount of water used for backwashing the filters and consequently reduced the number of working hours of the electrical and mechanical equipment of the water treatment plant.

Keywords: Backwashing, Electromechanical equipment, Time wastage, Tube settlers, Water wastage



مدیریت هدررفت آب، اتلاف زمان و افزایش بهره‌وری صافی‌ها، توسط ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای

محسن معمارزاده^۱، مژگان احمدی ندوشن^{۲*}، پیام نجفی^۳، مهران هودجی^۴

۱. دانشجوی دکتری تخصصی آلودگی محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

۲. گروه محیط‌زیست، مرکز تحقیقات پسماند و پساب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

۳. گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

۴. گروه خاکشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

*ایمیل نویسنده مسئول: m.ahmadi@khuif.ac.ir

© The Author(s) 2023

چاپ: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸

چکیده

تصفیه‌خانه آب اصفهان با ظرفیت نهایی ۱۲/۵ متر مکعب در ثانیه، یکی از بزرگترین تصفیه‌خانه‌های آب خاور میانه است؛ که دارای ۱۰ حوض ته‌نشینی با زمان ماند ۱/۹۱ تا ۲/۷۵ ساعت که حجم هر کدام ۹۱۷۲ متر مکعب و بار سطحی ۲/۱۴ تا ۲/۸۵ متر مکعب بر متر مربع در ساعت هستند. این تحقیق با هدف بررسی میدانی کارایی استفاده ترکیبی از حوض‌های ته‌نشینی اکسیلاتور مجهز به ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای در مقیاس کامل و میدانی با هدف دستیابی به کارایی بیشتر در افزایش کیفیت آب خروجی و مدیریت کاهش هدررفت آب، اتلاف زمان شستشوی معکوس و کاهش تعمیرات و نگهداری تجهیزات تصفیه‌خانه انجام گردید. در این مطالعه، حوض‌های ته‌نشینی اکسیلاتور مربوط به دو زلال ساز استریم ۱ از فاز اول تصفیه‌خانه، به ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای از جنس پلی‌پروپیلن با درجه خوراکی و شکل شش گوشه با قطر هیدرولیکی ۵۰ تا ۸۰ میلی‌متر با زاویه ۶۰ درجه نسبت به سطح و طول ۹۰ سانتی‌متر نصب گردیدند. استریم ۲ بدون استفاده از همزمان از ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای در مدار بهره‌برداری بود. تعداد شستشوی معکوس صافی‌ها، تعداد دفعات در مدار قرارگرفتن هوادها و پمپ‌های شستشوی معکوس و میزان هدررفت آب و زمان مورد نیاز هر شستشو در دو استریم ۱ و ۲ با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که تعداد دفعات شستشوی معکوس فیلترها نسبت به استریم ۲، به‌طور میانگین ۲۵٪ کاهش یافت. این عمل همچنین باعث کاهش مقدار آب مصرفی شستشوی معکوس فیلترها و همچنین کاهش در تعداد ساعت کاری تجهیزات الکتریکی و مکانیکی تصفیه‌خانه آب گردید.

واژه‌های کلیدی: اتلاف زمان، تجهیزات الکترو مکانیکال، ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای، شستشوی معکوس، هدررفت آب

هنگامی که میزان آلودگی آب خام ورودی به‌طور منظم از آستانه طراحی واحدهای تصفیه‌خانه فراتر می‌رود، مدیران تصفیه‌خانه‌های آب، به‌منظور جلوگیری از کاهش کیفیت آب خروجی از تصفیه‌خانه بایستی منابع آبی جدیدی را جایگزین و یا تجهیزات جدیدی نصب و استفاده نمایند (Price & Heberling, 2018). فرآیندهای تصفیه آب معمولاً باعث تولید لجن در فرایندهای تهنشینی در حوض‌های تهنشینی^۱ و شستشوی معکوس صافی‌های شنی می‌شوند (Kim et al., 2010). علیرغم اینکه حجم و خصوصیات آب شستشوی معکوس ارتباط تنگاتنگی با فرآیند تصفیه آب دارد، تأسیسات تصفیه مورد نیاز به نوعی به عنوان موضوعی متفاوت با فرآیند تصفیه آب در نظر گرفته می‌شود (Cornwell, 1999). بااین‌حال، طی سال‌های اخیر، تصفیه آب شستشوی معکوس به تدریج به عنوان بخش مهمی از فرآیند تصفیه آب مورد نظر قرار گرفته است؛ زیرا با توجه به حجم بالای آن، هزینه‌های بسیار سنگینی را به تصفیه‌خانه آب وارد می‌نماید (Kim et al., 2010). در برخی از کشورها، اکثر تصفیه‌خانه‌های آب دارای حوض متعادل‌سازی برای بازگشت آب شستشوی معکوس و ترکیب آن با آب خام هستند (Cho et al., 2001). برای جلوگیری از رسوب زیستی صافی‌های ماسه‌ای، بر اساس یک برنامه از پیش تعریف شده یا زمانی که افت فشار عملیاتی موجود (۱/۸ تا ۳ متر) بیشتر شود، عملیات شستشوی معکوس باید انجام شود. آب شستشوی معکوس حاوی آلاینده‌های کلوئیدی، ارگانیک‌های زنده، مواد آلی طبیعی^۲ (NOM)، فلزات (خصوصاً آهن و آلومینیوم) است (Bukhary et al., 2019). نسبت حجم آب مصرفی در شستشوی معکوس به آب تولید شده توسط صافی‌ها تحت شرایط نرمال زیر ۳٪ است. اگر این نسبت به ۲٪ کاهش پیدا نماید، بسیار خوب و اگر به بیش از ۵٪ برسد، عملکرد بد یا ضعیف صافی‌ها را نشان می‌دهد (Reißmann et al., 2005). نگرانی‌هایی که در رابطه با کیفیت آب بازیافت شده وجود دارد شامل وجود مواد آلی طبیعی به عنوان پیش ساز برای محصولات جانبی گندزدایی و میکروارگانیسم هستند (Baruth & Edward, 2005)؛ لذا آب شستشوی معکوس عمدتاً برای آبیاری یا برای تخلیه به منابع آب سطحی و زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، چرخش مجدد آن در ابتدای سیستم تصفیه آب منطقی و قابل توجه است؛ زیرا می‌تواند منجر به کاهش هزینه آب مصرفی شود (Wolska & Urbańska-Kozłowska, 2023). معمولاً بستر صافی‌ها در طول یک دوره بهره‌برداری، دچار گرفتگی با مواد آلی، ذرات معلق و کلوئیدی و باکتری و میکروارگانیسم‌ها خواهند شد؛ لذا برای نگه داشتن عملکرد مناسب آنها لازم است هر از گاهی شستشوی معکوس انجام گردد. فیلتراسیون یکی از قدیمی‌ترین سیستم‌های تصفیه آب بوده که در حقیقت یک سیستم تصفیه طبیعی آب به شمار می‌رود در طی عمل فیلتراسیون آب از بین خلل و فرج بستر فیلتر (بستر دانه‌ای مثل شن آنتراسیت، کربن فعال و ...) ذرات معلق آن به دام افتاده و عمل تصفیه بر روی آن انجام می‌شود (AWWA, 1999). تفاوت بین این دو گروه مربوط به فشار لازم برای عبور آب از بین بستر فیلتر و نوع و ساختمان فیلتر می‌شود. صافی‌های تحت فشار به صورت سیستم‌های سربسته و تحت فشار ساخته می‌شوند. به دلیل بالا بودن هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، فیلترهای تحت فشار در مقیاس خیلی بزرگ، محدود به تصفیه‌خانه‌های کوچک هستند. اما سیستم‌های ثقلی برای هر دو نوع تصفیه‌خانه‌های کوچک و بزرگ استفاده می‌شوند (Walsh et al., 2008). درحال حاضر

¹ Clarifiers² Natural Organic Materials

مطالعات متعددی در خصوص تصفیه و بازچرخانی آب شستشوی معکوس در حال انجام است. در تصفیه‌خانه‌هایی که از فرایندهای فیلتراسیون غشایی استفاده می‌کنند، نسبت بازیافت را در تصفیه‌خانه آب افزایش می‌دهد و لجن غلیظ را با چگالی ثابت تر تخلیه می‌کنند (Denver, 1996). معمولاً فیلترها را بر اساس نیروهای فیلترکننده به دو دسته فیلترهای ثقلی و فیلترهای تحت فشار تقسیم‌بندی می‌کنند (Kim et al., 2010). تکنیک‌ها و پیشرفت‌های خاصی برای کاهش هزینه و اندازه واحدهای ته‌نشینی و فشار بار کمتر به صافی‌های تصفیه‌خانه آب توسعه یافته است. یک تکنیک پیشرفته جدید ته‌نشینی با سرعت بالا است که با کاهش فاصله ذرات لخته، زمان ته‌نشینی را کاهش می‌دهد (BRENTWOOD, 2011). ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای سریع از کانال‌های لوله‌ای متعدد با زاویه شیب مشخص و مرتبط با یکدیگر استفاده باعث ترکیب و افزایش سطح ته‌نشینی مؤثر می‌شوند (Gurjar et al., 2017). شکل (۱)، نمای این نوع ته‌نشین‌کننده‌ها را بر روی کلاریفایرهای تصفیه‌خانه نشان می‌دهد. ظرفیت تصفیه‌خانه آب اصفهان ۱۲/۵ متر مکعب در ثانیه است و از دو فاز مجزا تشکیل شده که فاز اول با ظرفیت ۵ متر مکعب در سال ۱۳۶۸ به بهره‌برداری رسید. فاز دوم نیز با ظرفیت ۷/۵ متر مکعب در سال ۱۳۸۶ به ظرفیت نهائی رسید و مورد بهره‌برداری قرار گرفت. شکل (۲)، نمای کلی تصفیه‌خانه را نشان می‌دهد. پس از ورود آب از سد چم‌آسمان که در فاصله ۸ کیلومتری تصفیه‌خانه آب قرار دارد، عملیات آشغالگیری توسط دستگاه آشغالگیر اتوماتیک در ابتدای ورود آب به تأسیسات تصفیه‌خانه انجام شده و اجسام شناور شاخ و برگ درختان و سایر مواد معلق از آب خام خارج می‌شود؛ سپس در واحدهای تقسیم‌کننده آب ماده منعقدکننده پلی آلومینیم کلراید (PAC) به آب اضافه و ازرنزی اولیه شده و توسط میکسرهای موجود به‌طور کامل مخلوط و وارد حوض‌های ته‌نشینی می‌شوند (BRENTWOOD, 2011). تعداد حوض‌های ته‌نشینی ۱۰ عدد با زمان ماند ۱/۹۱ تا ۲/۷۵ ساعت، حجم هر کدام ۹۱۷۲ متر مکعب و بار سطحی ۲/۱۴ تا ۲/۸۵ متر مکعب بر متر مربع در ساعت است. بعد از خروج آب از صافی‌های فاز اول ازرنزی نهایی صورت و سپس آب وارد صافی‌ها و در نهایت کلرزنی شده و وارد مخزن آب خروجی و به شبکه آبرسانی اصفهان بزرگ وارد می‌شود. مشخصات صافی‌های تصفیه‌خانه نیز در جدول (۱) نشان داده شده است.

شکل ۱. محل نصب ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای بر روی کلاریفایر

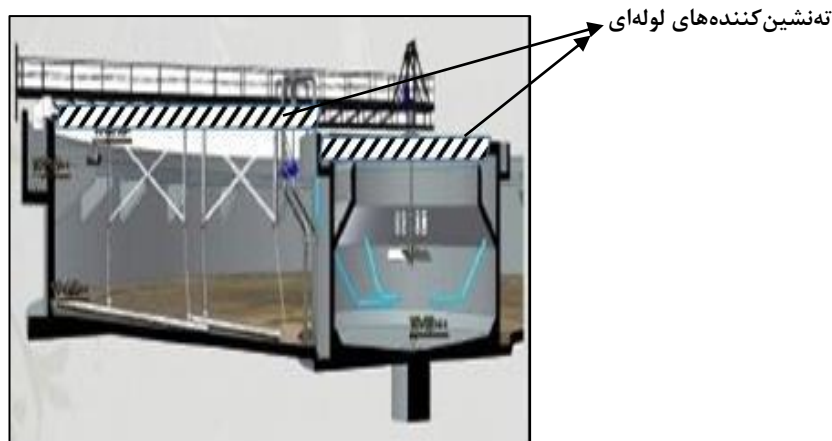


Fig 1. Location of installation of pipe settlers on clarifiers

شکل ۲. نمای واحدهای تصفیه‌خانه آب اصفهان

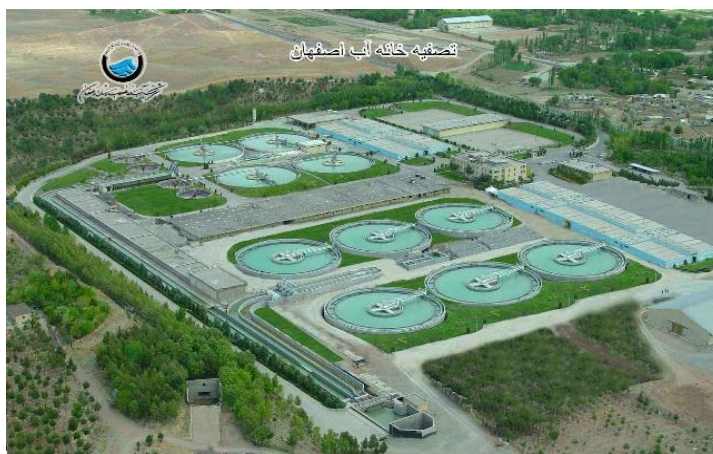


Fig 2. Views of water treatment plant units in Isfahan

جدول ۱. مشخصات صافی‌های شنی فاز اول تصفیه‌خانه آب اصفهان

Table 1. Specifications of sand filters in the first phase of Isfahan water treatment plant

پارامتر	اندازه	مقیاس	پارامتر	اندازه	مقیاس
تعداد	۴۸	عدد	ضخامت لایه کوارتز	۶۰	سانتی‌متر
ظرفیت	۷۲۰ - ۹۰۰	متر مکعب در ساعت	دانه‌بندی کوارتز	۰/۷ - ۱/۲	میلی‌متر
سطح کل	۵۵۹۲	متر مربع	ضخامت لایه آنتراسیت	۵۰	سانتی‌متر
سرعت آب	۶/۱۸ - ۷/۷۳	متر بر ساعت	دانه‌بندی آنتراسیت	۱/۴ - ۲/۵	میلی‌متر
ابعاد	۱۶/۶۴ × ۷	متر مربع	ضخامت لایه گارنت	۷/۵	سانتی‌متر
سطح	۱۱۶/۵	متر مربع	دانه‌بندی گارنت	۰/۲ - ۰/۷	میلی‌متر

۲- مواد و روش‌ها

این مطالعه به صورت تجربی و در مقیاس کامل بر روی فاز ۱ تصفیه‌خانه اصفهان که یکی از بزرگترین تصفیه‌خانه در ایران است، انجام شده است. دو زلال‌کننده دایره‌ای استریم ۱ (هر کدام ۲/۵ متر مکعب بر ثانیه) از فاز ۱ تصفیه‌خانه به دسته‌های تهنشین‌کننده‌های لوله‌ای مجهز شدند. مشخصات کلاریفایر-آکسیلاتورهای مورد مطالعه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. ویژگی‌های کلاریفایر-آکسیلاتورهای تصفیه‌خانه اصفهان

Table 2. Characteristics of clarifiers and accelerators in Isfahan water treatment plant

نوع ویژگی	اندازه	واحد
سطح	۱۶۸۳	متر مربع
حجم	۹۱۷۲	متر مکعب
بار سطحی ^۳	۲/۸۵-۲/۴	منر مکعب بر متر مربع در ساعت
زمان ماند	۱/۲-۹۱/۷۵	ساعت
متوسط ارتفاع	۵/۴۵	متر
ارتفاع جانبی	۴/۷۵	متر
ارتفاع مرکز	۶/۱۵	متر
قطر اسمی	۴۸	متر

۳: Surface Overload Rate

برای بهره‌برداری ایمن از صافی‌ها، در ابتدا کلکتورهای خروجی آب شستشو مربوط به استریم‌های هر فاز از طریق یک شیر پروانه‌ای به یکدیگر متصل گردیدند؛ به نحوی که در صورت خارج از سرویس بودن پمپ‌های آب شستشو یکی از استریم‌ها، قابلیت انجام شستشوی معکوس با پمپ‌های استریم مجاور امکان‌پذیر گردد. بر روی حلزونی این پمپ‌ها یک فشارسنج و یک شیر هواگیری نصب شده است. از آنجایی که کانال انتقال آب تصفیه شده از صافی‌ها بالاتر از حلزونی پمپ‌های آب شستشو قرار دارد، هواگیری این پمپ‌ها از طریق باز کردن شیر تخلیه هوای نصب شده بر روی حلزونی این پمپ‌ها به طور خود به خودی انجام می‌گردد. برای اطمینان از آماده به‌کار بودن بلوئر‌ها، به صورت روزانه باید از نظر ارتفاع روغن، ظرفیت، گرید روغن، برنامه تعمیر و نگهداری، آچارکشی اتصالات مکانیکی و الکتریکی و چک کردن تسمه‌های انتقال قدرت و ارتعاش‌سنجی کنترل می‌شدند. مراحل انجام شستشوی معکوس در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳. مراحل انجام شستشوی معکوس در تصفیه‌خانه آب اصفهان

Table 3. Steps of backwashing process in Isfahan water treatment plant

مراحل	اقدام	انرژی مصرفی (کیلووات ساعت)	زمان (دقیقه)
مرحله اول	روشن کردن بلوئر	۲۰۰	۲
	روشن کردن پمپ اول	۷۵	۲
	روشن کردن پمپ دوم	۷۵	۱
مرحله دوم	روشن کردن پمپ اول	۷۵	۱
	روشن کردن پمپ دوم	۷۵	۱
	روشن کردن پمپ دوم	۷۵	۱
مرحله سوم	روشن کردن پمپ اول	۷۵	۱
	روشن کردن پمپ دوم	۷۵	۱
	روشن کردن پمپ دوم	۷۵	۱

با توجه به استفاده از نصب تهنشین‌کننده‌های لوله‌ای در استریم اول از فاز اول تصفیه‌خانه و مقایسه پارامترهای هدررفت آب، تعداد عملیات شستشوی معکوس و تجهیزات الکتریکی و مکانیکی مورد استفاده در دو استریم فاز اول تصفیه‌خانه آب اصفهان با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۳- نتایج

با در نظر گرفتن تعداد ۴۸ صافی و دبی ۱۲/۵ متر مکعب در ثانیه، مقدار پساب تولیدی ناشی از هر بار شستشوی معکوس حجم آب مصرفی برای شستشوی هر بار یک صافی ۶۳۰/۷۲ مترمکعب محاسبه گردید. مساحت صافی‌ها (متر مربع) با توجه به ابعاد آن:

$$7 \times 16.64 = 116.48 \quad (1)$$

با توجه به ارتفاع آب بر روی سطح صافی از سرریز که ۱/۸ متر است. حجم صافی‌ها (متر مکعب) برابر است با:

$$1/8 \times 116.48 = 20.9/7 \quad (2)$$

برای هر شستشوی معکوس سه بار صافی پر و خالی می شود بنابراین:

$$20.9/7 \times 3 = 63.0/72 \quad (3)$$

مقدار کل آب تصفیه شده مصرفی برای حداقل یک شستشوی معکوس در شبانه روز برای مجموع ۴۸ صافی:

$$63.0/72 \times 48 = 30.27/6 \quad (4)$$

میزان هدررفت آب مصرفی برای شستشوی یک فیلتر در طول یکسال (متر مکعب):

$$30.27/6 \times 365 = 11050.214 \quad (5)$$

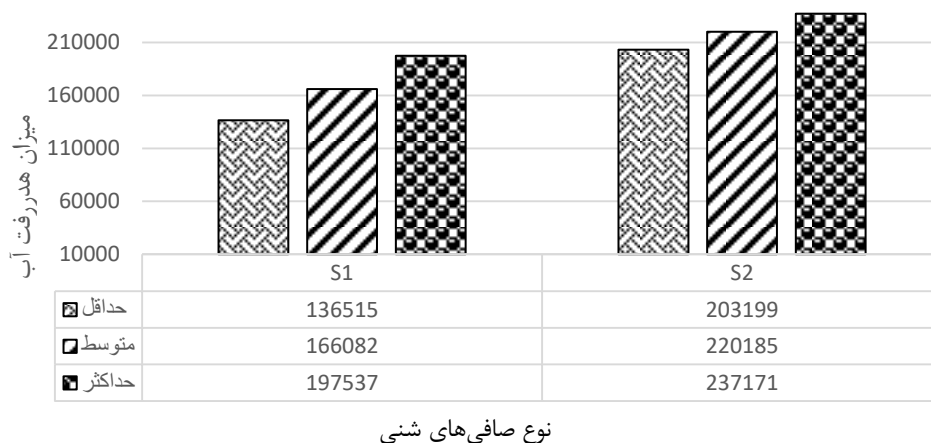
این عدد با این فرض است که هر صافی در طول سال تنها یک بار در روز شستشوی معکوس گردد. همانطور که در جدول (۴) نشان داده شده است، مقدار آب هدر رفته و تعداد شستشوی معکوس در صافی‌های بعد از کلاریفایر مجهز به تهنشین‌کننده‌های لوله‌ای (S_1) و صافی‌های بعد از کلاریفایر بدون تهنشین‌کننده‌های لوله‌ای (S_2) باهم مقایسه گردیدند. میزان هدررفت آب به ترتیب ۱۶۶۰۸۲ و ۲۲۰۱۸۵ متر مکعب در شش ماه محاسبه گردیده است.

به ازای هر شستشوی معکوس برای یک صافی در طول عملیات از سه پمپ ۷۵ کیلو وات ساعتی و جمعاً ۸ بار پمپ و برای ۴۸ صافی جمعاً ۳۸۴ بار برای هر شستشو درگیر بوده است. جدول (۵)، تعداد موارد استفاده از پمپ و بلوئر در طول شستشوی معکوس را نشان می‌دهد. همچنین به ازای هر شستشوی معکوس برای یک صافی در طول عملیات از یک بلوئر ۲۰۰ کیلووات ساعتی و جمعاً ۴۸ بار برای هر شستشو مورد استفاده قرار گرفته است. شکل (۳) میزان هدررفت آب و شکل (۴) تعداد شستشوی معکوس در دو فیلتر S_1 و S_2 نشان می‌دهد.

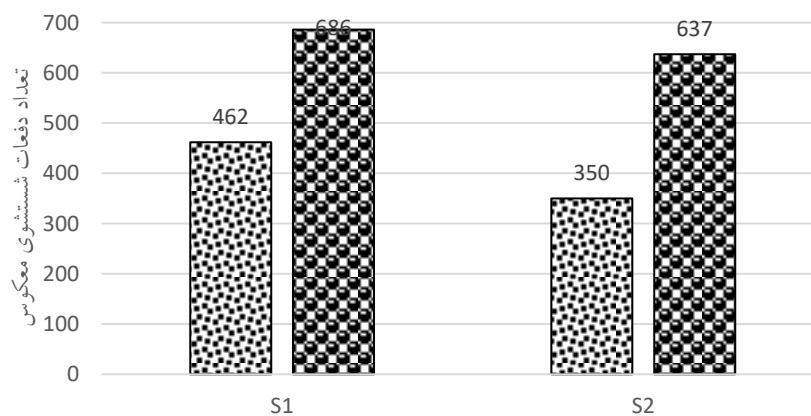
جدول ۴. حداقل، میانگین و حداکثر هدررفت آب و تعداد موارد شستشوی معکوس صافی‌ها

Table 4. Minimum, mean, and maximum water loss and the number of backwashing cases for filters

صافی شنی	هدررفت آب (متر مکعب)	شستشوی معکوس (تعداد در شش ماه)	شستشوی معکوس (تعداد در روز)
	حداقل	متوسط	حداکثر
S ₁	۱۳۶۵۱۵	۱۶۶۰۸۲	۱۹۷۵۳۷
S ₂	۲۰۳۱۹۹	۲۲۰۱۸۵	۲۳۷۱۷۱
راندمان نهایی	۲۴/۶	۲۴/۶	۲۴/۵
ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای			

شکل ۳. مقایسه میزان حداقل و متوسط و حداکثر هدررفت در عملیات شستشوی معکوس در صافی‌های S₁ و S₂

نوع صافی‌های شنی

Fig 3. Comparison of minimum, average, and maximum effluent loss in backwashing operation for S₁ and S₂ filtersشکل ۴. تعداد شستشوی معکوس صافی‌های S₁ و S₂

تعداد دفعات شستشوی صافی‌ها در یک سال □ تعداد دفعات شستشوی صافی‌ها در شش ماه □

Fig 4. Number of backwashing cycles for S₁ and S₂ filters

جدول ۵. تعداد موارد استفاده از پمپ و بلوئر در طول شستشوی معکوس

Table 5. Number of pump and blower utilizations during backwashing process

نوع صافی شنی	متوسط تعداد شستشوی معکوس در سال	تعداد موارد استفاده از پمپ در سال	تعداد موارد استفاده از بلوئر در سال
S ₁	۶۸۶	۲۶۳۴۲۴	۳۵۳۲۸
S ₂	۷۳۶	۵۰۴۸۹۶	۴۱۶۶۴

طبق برنامه تنظیم شده و اتوماسیون انجام شده زمان شستشوی معکوس هر صافی ۲۱ دقیقه است. با توجه به ۸۴۰ ساعت هدررفت زمان شستشوی معکوس در طول سال برابر ۳۵ ساعت بر روز است. با توجه به اینکه هر شیفت کاری در تصفیه‌خانه ۱۲ ساعت است، ۷۵ شیفت کاری یک نفر از بهره‌برداران تصفیه‌خانه بدون هیچ‌گونه توقیفی بایستی صرفاً مشغول عملیات شستشوی معکوس باشد که عملاً امکان‌پذیر هم نیست.

۴- بحث

ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای، جداکننده‌های جامدات از جریان آب هستند که دارای عناصر محصورکننده نزدیک و شیب‌دار هستند که در مقایسه با مخازن عمودی امکان افزایش ته‌نشینی قابل توجهی را فراهم می‌کنند (BRENTWOOD, 2011). تجزیه و تحلیل‌های مختلف نشان داده است که برای افزایش راندمان صافی‌ها و حداکثر ناخالصی‌ها کابرد تیوب ستلرها بسیار کمک‌کننده است (Gurjar et al., 2017). داده‌های محدودی در مورد مصرف انرژی و متغیرهایی که بر مصرف انرژی تأسیسات تصفیه آب تأثیر می‌گذارند، در دسترس است (Tam et al., 2007). این مطالعه مقطعی با ترکیب داده‌های موجود و تجربیات کسب شده در تصفیه‌خانه آب اصفهان با هدف تأثیر استفاده از تیوب ستلرها در کلاریفایرهای تصفیه‌خانه بر عملکرد صافی‌های شنی و تعداد موارد شستشوی معکوس آنها و همچنین انرژی مصرفی جهت عملیات شستشوی معکوس صافی‌ها انجام گردید. برای هر عملیات بک‌واش صافی‌ها در شبانه روز که سه‌بار صافی پر و خالی می‌شود حدود ۳۰۲۷۵ متر مکعب آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. این حجم آب مصرفی برای یکسال صافی‌ها حدود ۱۱ میلیون متر مکعب است. با دستیابی به راندمان ۲۴ درصدی کاهش هدررفت آب، ۷۲۶۶ متر مکعب آب در شبانه روز و ۲۶۴۰۰۰۰ متر مکعب در سال از هدررفت آب جلوگیری به عمل آمد. متوسط تعداد دفعات شستشوی معکوس صافی‌ها در سال از ۷۳۶ به ۶۸۶ بار کاهش پیدا کرد. تعداد موارد استفاده از پمپ در سال از ۵۰۴۸۹۶ به ۲۶۳۴۲۴ و تعداد موارد استفاده از بلوئر در سال از ۴۱۶۶۴ به ۳۵۳۲۸ کاهش پیدا کرد. در دنیا نیز تغییرات زیادی در مخزن ته‌نشینی برای کاهش هزینه و زمان ماند انجام گرفته است. Lekhak et al. (2021) در مطالعه‌ای با عنوان "مقایسه مکانیسم حذف جامدات معلق در ته‌نشین‌کننده لوله‌ای" دریافتند که استفاده از ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای سریع در مخازن ته‌نشینی آب مطابق یک مدل ریاضی باعث کاهش کدورت آب و رودی به فیلترها می‌گردد. Zielina et al. (2021) در مطالعه‌ای که با عنوان "صرفه‌جویی در انرژی و آب در هنگام شستشوی معکوس کارخانه‌های صافی سریع" در یک تصفیه‌خانه آب با اندازه متوسط واقع در قسمت شمالی اروپا انجام دادند، تقریباً

۱۰٪ صرفه‌جویی در آب را در سال برای شستشوی معکوس صافی‌های سریع و همچنین صافی‌های کربنی گرانول یا دانه‌ای^۳ (GAC) از طریق استفاده از کنترل شدت شستشو نشان به‌دست آوردند. میزان آب صرفه‌جویی شده در این روش با استفاده از صافی‌های سریع ۸۳۶۳۱۰ مترمکعب در سال و بسته به نوع GAC از ۴۵۷۰ تا ۷۵۱۱ متر مکعب بوده است. Bukhary et al. (2020) در مطالعه‌ای با عنوان "جنبه‌های طراحی، ارزیابی مصرف انرژی برای عملیات تصفیه آب آشامیدنی"، کل مصرف انرژی عملیاتی برای تصفیه‌خانه آب از جمله پمپ‌های توزیع آب ۵۶/۳ مگاوات‌ساعت در روز برآورد شد، در حالی که مصرف انرژی برای تصفیه‌خانه آب به استثنای پمپ‌های توزیع آب ۲۶۶۱ کیلووات‌ساعت در روز بود. نتایج مطالعه آنها نشان داد که بزرگترین مصرف‌کننده انرژی بعد از پمپ‌های توزیع آب (۱۵۸) فرآیندهای انعقاد (۱/۹۵) و لخته‌سازی (۱/۹۳) کیلووات‌ساعت بودند. Molinos-Senante & Guzmán (2018) طی مطالعه‌ای با عنوان "معیار سنجش بهره‌وری انرژی در تصفیه‌خانه‌های آب آشامیدنی، کمی‌سازی صرفه‌جویی‌های بالقوه" نشان دادند که برخی از متغیرهای ساختاری و مدیریتی موثر بر کارایی انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج نشان داد که اکثر تصفیه‌خانه‌های آب مورد تجزیه و تحلیل اندازه مناسبی دارند؛ اما می‌توانند از نظر صرفه‌جویی در انرژی بهبود زیادی داشته باشند. مشخص شد که سن تصفیه‌خانه به‌طور قابل توجهی بر مصرف انرژی آنها تأثیر می‌گذارد. Gurjar et al. (2017) در مطالعه‌ای با عنوان بررسی عملکرد مازول‌های ته‌نشین‌کننده لوله‌ای دریافتند که استفاده از ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای زمان ماند آب در حوض ته‌نشینی را ۱۵-۱۰ دقیقه کاهش می‌دهد که در مقایسه با مخزن ته‌نشینی معمولی بسیار کمتر است. همچنین متوسط راندمان حذف کدورت در حوض مجهز به ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای در مقایسه با واحد ته‌نشینی معمولی ۷۰ تا ۸۰ درصد بیشتر است. نتایج مطالعات بالا نشان می‌دهند که استفاده از ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای و سایر ته‌نشین‌کننده‌ها در حوض ته‌نشینی تصفیه‌خانه‌های آب، باعث کاهش کدورت، مواد معلق و سایر عوامل آلاینده در آب خام ورودی به تصفیه‌خانه می‌گردد و به تبع آن آب ورودی به فیلترها دارای کدورت و مواد جامد معلق کمتری است. این عمل باعث کاهش تعداد دفعات شستشوی معکوس و نهایتاً کاهش در کلیه اقدامات وابسته به شستشوی معکوس فیلترها می‌گردد که نتایج آنها با نتایج مطالعه حاضر هم‌خوانی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین فرآیندهای مهم در طراحی و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌های آب، استفاده از حوض‌های ته‌نشینی است. متداول‌ترین این حوض‌ها پولساتورها، اکسیلاتورها و استفاده از ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای و یا صفحات شیب‌دار لاملا است. طراحی اولیه حوض‌های ته‌نشین‌کننده از نوع اکسیلاتورها بوده که با توجه به هدف طرح استفاده همزمان و ترکیبی از حوض‌های ته‌نشین‌کننده اکسیلاتور و سریع لوله‌ای و مقایسه پارامترهای مورد نظر با ته‌نشین‌کننده اکسیلاتور به‌کار گرفته شده در طراحی اولیه است. در این مطالعه، استفاده از ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای در استریم اول از فاز اول تصفیه‌خانه و مقایسه پارامترهای هدررفت آب، اتلاف زمان مورد نیاز و تعداد عملیات شستشوی معکوس و کاهش در سرویس قرارگرفتن تجهیزات الکتریکی و مکانیکی مورد استفاده در دو استریم فاز اول تصفیه‌خانه آب اصفهان با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده همزمان و ترکیبی از ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای در حوض ته‌نشینی اکسیلاتور تصفیه‌خانه آب

³ Granola Activated Carbon

اصفهان، باعث کاهش آلاینده‌ها و در نتیجه افزایش کیفیت آب ورودی به صافی‌ها و در نتیجه باعث کاهش تعداد دفعات شستشوی معکوس به میزان حدود ۲۵ درصد و نهایتاً کاهش در کلیه مراحل فنی مهندسی و کیفی وابسته به شستشوی معکوس صافی‌ها گردیده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده طراحی، اجرا و بهره‌برداری ترکیبی و همزمان از دو مدول اکسیلاتور و ته‌نشین‌کننده‌های بالا (لوله‌ای) به کلیه شرکت‌های مهندسی مشاور، آب و فاضلاب، بهره‌برداران و سایر صنایع مرتبط پیشنهاد می‌گردد.

۶- تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

۷- مراجع

- Baruth, E. E. (2004). Water treatment plant design. ASCE.
- BRENTWOOD industries www.brentwood.com (August 2011) comparison between the tube settler and conventional settling
- Bukhary, S., Batista, J., & Ahmad, S. (2020). Design aspects, energy consumption evaluation, and offset for drinking water treatment operation. *Water*, 12(6), 1772.
- Bukhary, S., Batista, J., & Ahmad, S. (2019). An analysis of energy consumption and the use of renewables for a small drinking water treatment plant. *Water*, 12(1), 28.
- Cornwell, D. A., & Roth, D. K. (2011). Water treatment plant residuals management. *Water Quality & Treatment. A Handbook on Drinking Water*.
- Gurjar, A., Bhorkar, M., Bhole, A. G., & Baitule, P. (2017). Performance study of tube settler's module. *International Journal of Engineering Research and Application*, 7(3), 52-55.
- Kang, C. H., Ryu, J. O., & Lee, H. D. (2001). The improvement of flocculation basin in water treatment process. *Journal of Korea Water Resources Association*, 34.
- Kim, Y. H., Eom, J. Y., Kim, K. Y., Lee, Y. S., Kim, H. S., & Hwang, S. J. (2010). Applicability study of backwash water treatment using tubular membrane system with dead-end filtration operation mode. *Desalination*, 261(1-2), 104-110.
- Lekhakh, B., & Amatya, I. M. (2021). Suspended Solids Removal Mechanism Comparison in Tube Settler. *Proceedings of 10th IOE Graduate Conference*, 10, 220-224.
- Letterman, R. D. (1999). Water quality and treatment: a handbook of community water supplies, (AWWA).
- Molinos-Senante, M., & Guzmán, C. (2018). Benchmarking energy efficiency in drinking water treatment plants: Quantification of potential savings. *Journal of cleaner production*, 176, 417-425.
- Pizzi, N. G. (2011). Water Treatment Plant Residuals Pocket Field Guide. American Water Works Association.
- Price, J. I., & Heberling, M. T. (2018). The effects of source water quality on drinking water treatment costs: A review and synthesis of empirical literature. *Ecological Economics*, 151, 195-209.
- Reißmann, F. G., Schulze, E., & Albrecht, V. (2005). Application of a combined UF/RO system for the reuse of filter backwash water from treated swimming pool water. *Desalination*, 178(1-3), 41-49.
- Syed, R. Q., Edward, M. M. G. Z., & Zhu, G. (2000). Water works engineering planning, design and operation. PHI edition, New Delhi.

- Tam, L. S., Tang, T. W., Lau, G. N., Sharma, K. R., & Chen, G. H. (2007). A pilot study for wastewater reclamation and reuse with MBR/RO and MF/RO systems. *Desalination*, 202(1-3), 106-113.
- Walsh, M. E., Gagnon, G. A., Alam, Z., & Andrews, R. C. (2008). Biostability and disinfectant by-product formation in drinking water blended with UF-treated filter backwash water. *Water Research*, 42(8-9), 2135-2145.
- Wolska, M., & Urbańska-Kozłowska, H. (2023). Assessing the Possibilities of Backwash Water Reuse Filters in the Water Treatment System—Case Analysis. *Water*, 15(13), 2452.
- Zielina, M., & Dabrowski, W. (2021). Energy and Water Savings during Backwashing of Rapid Filter Plants. *Energies* 2021, 14, 3782.

Research Article



Analysis of energy loss in a C-type trapezoidal Piano key weir with outlet key jumps

Kadhim Challoob Mshali¹, Ali Khoshfetrat^{1*}, Amirhossein Fathi²

¹ Faculty of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

² Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author email: khoshfetrat@khuisf.ac.ir

© The Author(s) 2023

Received: 15 July 2023

Accepted: 05 Sept 2023

Published: 09 Sept 2023

Abstract

Piano key weirs are a type of long-crested weirs with a light foundation and a high discharge coefficient. Due to the high efficiency of these weirs, it is essential to find ways to increase their energy dissipation and ultimately reduce scour. This study investigated the energy dissipation of piano key weirs with a jump in their outlet keys. A laboratory experiment was conducted using a trapezoidal piano key weir with three discharges of 0.3, 0.35, and 0.4 cubic meters per second. Two jumps with radii of 0.21 and 0.15 meters and jump heights of 0.14 and 0.075 meters were also used. The results showed that the energy dissipation increased with increasing jump radius. The energy dissipation in the weir with a jump radius of 0.21 meters and in the weir with a jump radius of 0.15 meters is approximately 3.8% and 2.5% higher, respectively, than in the weir without a jump. The average energy dissipation in weirs with jump radii of 0, 0.15, and 0.21 meters was 54.1%, 55.4%, and 56.2%, respectively. With increasing jump radius and jump height, the discharge coefficient decreases. The discharge coefficient in piano key weirs with jump radii of 0.21 and 0.15 meters is reduced by 10.9% and 3.9%, respectively, compared to the weir without a jump. The use of a jump in the outlet keys of a weir can throw the flow forward of the weir toe. This can be effective in reducing scour.

Keywords: Energy loss, Jump, Output key, Piano Key Weir (PKW), The discharge coefficient.



استهلاک انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C همراه با جامپ در کلیدهای خروجی آن

کاظم جلوب مشالی^۱، علی خوش فطرت^{۱*}، امیرحسین فتاحی^۲

۱. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

۲. دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*ایمیل نویسنده مسئول: khoshfetrat@khuisf.ac.ir

© The Author(s) 2023

چاپ: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴

چکیده

سرریزهای کلیدپیانویی جزء سرریزهای تاج‌طولانی با پی سبک و دارای ضریب آبگذری بالایی هستند. به دلیل راندمان بالای این سرریزها؛ لذا راهکار برای افزایش استهلاک انرژی در آنها و در نهایت کاهش آبشستگی بسیار حیاتی است. در این تحقیق از یک سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای شکل همراه با جامپ در کلیدهای خروجی آن به صورت آزمایشگاهی و از سه دبی ۰/۰۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴ متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. همچنین از دو جامپ با شعاع ۰/۲۱ و ۰/۱۵ متر و ارتفاع لبه جامپ برابر ۰/۱۴ و ۰/۰۷۵ متر استفاده شد. نتایج نشان که با افزایش شعاع جامپ، میزان استهلاک انرژی در سرریز با شعاع جامپ ۰/۲۱ متر و در سرریز با شعاع جامپ ۰/۱۵ متر نسبت به سرریز بدون جامپ، به ترتیب حدود ۳/۸ درصد و ۲/۵ درصد بیشتر است. همچنین میانگین استهلاک انرژی در سرریزهای با شعاع جامپ برابر ۰، ۰/۱۵ و ۰/۲۱ متر، به ترتیب برابر ۵۴/۱، ۵۵/۴ و ۵۶/۲ درصد است. با افزایش شعاع جامپ و ارتفاع لبه آن، ضریب آبگذری کاهش می‌یابد. میزان کاهش ضریب آبگذری در سرریز با شعاع جامپ ۰/۲۱ و ۰/۱۵ متر نسبت به سرریز بدون جامپ، برابر ۱۰/۹ درصد و ۳/۹ درصد است. همچنین در ادامه روابطی برای میزان استهلاک انرژی در سرریزهای معرفی شده، ارائه شد. استفاده از جامپ در کلیدهای خروجی سرریز، چنانچه باعث استهلاک انرژی زیادی نمی‌شود؛ اما جریان را به جلوتر از پنجه سرریز پرتاب می‌کند که در بررسی میزان آبشستگی و کاهش آن، می‌تواند موضوع حائز اهمیتی باشد.

واژه‌های کلیدی: استهلاک انرژی، جامپ، کلید خروجی، سرریز کلیدپیانویی، ضریب آبگذری.

سرریزهای کلیدپیانویی دارای تاج بیشتر در یک عرض محدود هستند و این امر باعث افزایش ضریب آبگذری در آنها می‌شود. همچنین سرریزهای کلیدپیانویی از بالا به صورت مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی شکل و دارای چهار نوع A، B، C و D هستند. نوع A دارای لبه آویزان در بالا و پایین دست سرریز، نوع B دارای لبه آویزان در بالادست سرریز، نوع C دارای لبه آویزان در پایین دست سرریز و نوع D بدون لبه آویزان است. تفاوت سرریزهای کنگره‌ای با سرریز کلیدپیانویی نوع آخر، در وجود و عدم وجود شیب در کلیدهای خروجی آن است. اولین سرریز کلیدپیانویی روی بدنه‌ی یکی از سدهای فرانسه ساخته شد (Crookston et al., 2019). افراد زیادی مانند (Ribeiro et al., 2007)، (Khanh et al., 2010)، (Bieri et al., 2011) و (Erpicum et al., 2013) روی سرریزهای کنگره‌ای و کلیدپیانویی تحقیقات ارزشمندی انجام دادند. (Sajadi et al., 2017) با مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی روی استهلاك انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A، دریافتند که وجود بلوک در کلیدهای خروجی باعث استهلاك انرژی بیشتری می‌شود. آن‌ها از دو سرریز با تعداد بلوک متفاوت اما هندسه ثابت استفاده کردند. سرریز اول دارای ردیف‌های سه‌تایی و دوتایی و سرریز دوم دارای ردیف‌های دوتایی اما با آرایش زیگزاکی است. محدوده‌ی دبی‌های مورد بررسی در کار ایشان بین ۵ تا ۱۳۵ لیتر بر ثانیه است. عرض سرریز ۰/۹ متر، عرض کلید خروجی و ورودی ۲۱/۴ و ۳۱/۸ متر، ضخامت ۰/۰۱ متر و ارتفاع ۰/۷۴ متر است.

(Al-Shukur & Al-Khafaji, 2018) با مطالعه‌ی آزمایشگاهی روی استهلاك انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B، به این نتیجه رسیدند که با کاهش شیب‌های کلیدهای خروجی، استهلاك انرژی بیشتر می‌شود. ایشان از چهار سرریز با مشخصات ثابت اما شیب‌های متفاوت استفاده کردند. محدوده H_0/P در کار ایشان بین ۰/۲۵ تا ۰/۷ است. H_0 عمق جریان به‌علاوه انرژی جنبشی در بالادست سرریز و P ارتفاع سرریز است. ایشان همچنین رابطه‌ای برای ضریب آبگذری سرریز ارائه دادند که ضریب همبستگی در آن ۰/۹۸۴ است.

(Naghibzadeh et al., 2020) با مطالعه عددی و آزمایشگاهی روی استهلاك انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A، دریافتند که وجود بلوک و پله، باعث افزایش استهلاك انرژی بیشتری می‌شود. دبی‌های مورد بررسی در کار ایشان بین ۱۰ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه و ارتفاع سرریز ۰/۲ متر است. ایشان تأثیر عدد وبر بر استهلاك انرژی را نیز در نظر گرفتند که محدوده آن بین ۳۵ تا ۱۵۰۰ است. میزان استهلاك انرژی در موانع بافل به میزان ۸/۷۵ درصد بیشتر از میزان استهلاك انرژی در موانع پلکانی و ۱۵/۲۱ درصد بیشتر از میزان استهلاك انرژی در حالت بدون مانع است.

(Eslinger & Crookston, 2020) با مطالعه‌ی آزمایشگاهی روی استهلاك انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع A، دریافتند که با افزایش دبی، مقدار استهلاك انرژی کاهش می‌یابد. در سرریزهای با ارتفاع بیشتر، مقدار استهلاك انرژی کمتر می‌شود و عرض کلید خروجی و وردی تأثیر زیادی بر استهلاك انرژی ندارد. محدوده H_0/P مورد بررسی در کار ایشان بین ۰/۱ تا ۰/۶ است. (Singh & Kumar, 2022) با مطالعه آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B دریافتند که وجود پله باعث استهلاك انرژی بیشتر می‌شود. محدوده دبی‌های مورد بررسی کار ایشان بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۵ متر مکعب بر

ثانیه هستند. در دبی‌های کمتر، استهلاك انرژی با وجود پله تا ۸۵ درصد است. ایشان از دو سرریز با ارتفاع‌های ۰/۱۵ تا ۰/۱۸۵ متر استفاده کردند. ایشان همچنین استهلاك انرژی در سرریز بدون پله را هم مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش دبی، مقدار استهلاك انرژی کاهش می‌یابد.

Fathi et al. (2023) با مطالعه آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A دریافتند که وجود پله باعث افزایش استهلاك انرژی بیشتر می‌شود. همچنین ایشان سرریزهای کلیدپیانویی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ پله‌ای را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که میزان استهلاك انرژی در سرریزهای ۵، ۱۰ و ۱۵ پله‌ای نسبت به سرریز بدون پله حدود ۱۵/۷۳، ۲۴/۹۳ و ۱۸/۵۲ درصد بیشتر است. همچنین ایشان سرریز کلیدپیانویی ۱۰ پله‌ای را سرریز بهینه معرفی کردند. با توجه به تحقیقات انجام شده بر استهلاك انرژی سرریزهای کلیدپیانویی؛ لذا بررسی وجود جامپ در کلیدهای خروجی این سرریز قابل بررسی است و تا کنون بررسی استهلاك انرژی با وجود جامپ در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C، مورد بررسی قرار نگرفته است. می‌دانیم که با افزایش استهلاك انرژی جریان، میزان آبستگي کاهش می‌یابد. به همین دلیل هدف از این تحقیق استفاده از یک سرریز کلیدپیانویی، دو جامپ با شعاع ۰/۲۱ و ۰/۱۵ متر و ارتفاع لبه ۰/۱۴ و ۰/۰۷۵ متر است.

۲- آنالیز ابعادی

رابطه (۱)، محاسبه استهلاك انرژی جریان را نشان می‌دهد که در آن g نیروی گرانش، V_1 و V_2 سرعت متوسط جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز، h_u و h_d میزان عمق جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز، P ارتفاع سرریز، E_{Loss} میزان استهلاك انرژی، E_1 میزان انرژی در بالادست سرریز و E_2 میزان انرژی در پایین‌دست سرریز است.

$$E_{Loss} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = \frac{(h_u + P + \frac{V_1^2}{2g}) - (h_d + \frac{V_2^2}{2g})}{(h_u + P + \frac{V_1^2}{2g})} \quad (1)$$

رابطه (۲) پارامترهای موثر بر میزان استهلاك انرژی را نشان می‌دهد. ρ چگالی آب، σ ضریب کشش سطحی، μ لزجت دینامیکی، H_u عمق جریان به علاوه انرژی جنبشی در بالادست سرریز، R شعاع جامپ و h ارتفاع لبه جامپ‌ها است.

$$E_{Loss} = f(\rho, \sigma, \mu, V_1, H_u, P, R, h) \quad (2)$$

با توجه به تئوری پی باکینگهام و در نظر گرفتن سه متغیر تکراری چگالی آب، سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز و ارتفاع جریان سرریز در بالادست سرریز به علاوه انرژی جنبشی، استهلاك انرژی تابع پارامترهای زیر می‌شود.

$$E_{Loss} = f(We, Re, \frac{H_u}{P}, \frac{H_u}{R}, \frac{H_u}{h}) \quad (3)$$

به دلیل آشفتگی زیاد جریان و به دلیل بیشتر از 0.3 متر بودن عمق جریان روی تاج سرریز؛ لذا از عدد رینولدز و وبر صرف نظر خواهد شد (Sumer and Fredsoe 1991, Novák and Čabelka 1981). همچنین با ترکیب دو پارامتر $\frac{H_u}{h}$ و $\frac{H_u}{R}$ پارامتر $\frac{R}{h}$ حاصل می‌شود که تابع شعاع و ارتفاع لبه جامپ‌ها است.

$$E_{Loss} = f\left(\frac{H_u}{p}, \frac{R}{h}\right) \quad (4)$$

۳- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آیت‌الله اشرفی اصفهانی، در یک کانال آزمایشگاهی به طول 10 متر، عرض 0.6 متر و ارتفاع 0.8 متر انجام شد. جریان از طریق دو مخزن سطحی و پس از طی 0.5 متر در داخل فلوم، به سرریز می‌رسید (شکل ۱). پس از روشن کردن پمپ، دبی مورد نظر توسط یک شیر و مانیتور با خطای ± 0.01 درصد تنظیم می‌شد. عمق جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز توسط عمق‌سنج سوزنی با خطای ± 1 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. از سه دبی 0.3 ، 0.35 و 0.4 متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. عمق پایاب توسط دریچه انتهایی و به صورت مصنوعی تنظیم نشد. جدول (۱) و شکل (۲)، مشخصات سرریز مورد بررسی در این تحقیق را نشان می‌دهد که در آن W عرض سرریز، W_0 عرض کلید خروجی، W_i عرض کلید ورودی، B طول دیواره جانبی سرریز، B_0 طول لبه آویزان در پایین‌دست سرریز، L طول تاج سرریز، T_s ضخامت لبه سرریز و P ارتفاع سرریز هستند. همچنین جدول (۲)، مشخصات هیدرولیکی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد که در آن Q دبی جریان است.

جدول ۱. مشخصات سرریز مورد بررسی

Table 1. Characteristics of the studied spillway

P (m)	Ts (m)	L(m)	Bo (m)	B (m)	W _i (m)	W _o (m)	W(m)
0.2	0.1	2.6	0.13	0.5	21.5	0.075	0.6

شکل ۱. فلوم آزمایشگاهی



Fig 1. Laboratory flume

شکل ۲. مشخصات سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C

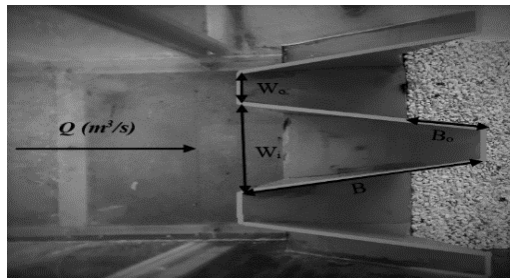


Fig 2. C-type trapezoidal piano key weir specifications

جدول ۲. مشخصات هیدرولیکی جریان

Table 2. Hydraulic properties of the flow

Row	Q (m ³ /s)	R (m)	h (m)	H _u (m)	E _{Loss}
۱	۰/۰۳	۰	۰	۰/۰۳۲	۰/۰۷۰
۲	۰/۰۳۵	۰	۰	۰/۰۳۷	۰/۰۳۸
۳	۰/۰۴	۰	۰	۰/۰۴۲	۰/۰۱۵
۴	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۰۷۵	۰/۰۳۳	۰/۰۸۶
۵	۰/۰۳۵	۰/۱۵	۰/۰۷۵	۰/۰۳۸	۰/۰۵۳
۶	۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۰۷۵	۰/۰۴۳	۰/۰۲۴
۷	۰/۰۳	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۰۳۵	۰/۰۹۶
۸	۰/۰۳۵	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۰۴۰	۰/۰۶۱
۹	۰/۰۴	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۰۴۵	۰/۰۲۹

۴- نتایج و بحث

شکل (۳)، جریان عبوری از روی سرریز همراه با جامپ را نشان می‌دهد. جریان از کلیدهای ورودی به صورت جت ریزشی آزاد از روی کلیدهای ورودی به پایین دست و در کلیدهای خروجی می‌ریزد. همچنین جریان از داخل کلیدهای خروجی به صورت جت مایل به پایین دست منتقل می‌شود. در کلیدهای خروجی ناحیه استغراق به وجود نیامده است؛ اما به دلیل عدم وجود لبه آویزان در بالادست سرریز، در جریان بالادست کلیدهای خروجی، فرورفتگی ایجاد شد.

ارتفاع بیشتر لبه جامپ، باعث افزایش عمق جریان در کلیدهای خروجی و در نهایت باعث کاهش ضریب آبگذری (C_d) می‌شود. در پایین دست سرریز اصلی یک پرش هیدرولیکی و در نزدیکی پنجه سرریز مشاهده شد؛ اما با وجود جامپ، بر قدرت پرش هیدرولیکی افزوده شده و فاصله ایجاد آن از پنجه سرریز دورتر می‌شود. جریان خروج یافته از جامپ‌ها و کلیدهای خروجی سرریز، در فاصله‌ای دورتر از سرریز فرود می‌آید. در سرریز با شعاع جامپ بیشتر، این فاصله دورتر از سرریز با شعاع کمتر مشاهده شد. با افزایش دبی جریان، بر قدرت این جت پرتابی و فاصله آن از پنجه سرریز، افزوده شد. همچنین افزایش دبی جریان، باعث کاهش ضریب آبگذری و کاهش استهلاک انرژی گردید.

شکل (۴)، مقدار ضریب آبگذری سرریز را بر حسب نسبت عمق جریان به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی در بالادست سرریز به ارتفاع سرریز نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیدا است، با افزایش این نسبت و به طبع با افزایش سرعت متوسط جریان و دبی جریان، مقدار ضریب آبگذری کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش شعاع جریان و افزایش لبه جامپ، مقدار ضریب آبگذری کاهش می‌یابد.

شکل ۳. نمایی از جریان روی سرریز

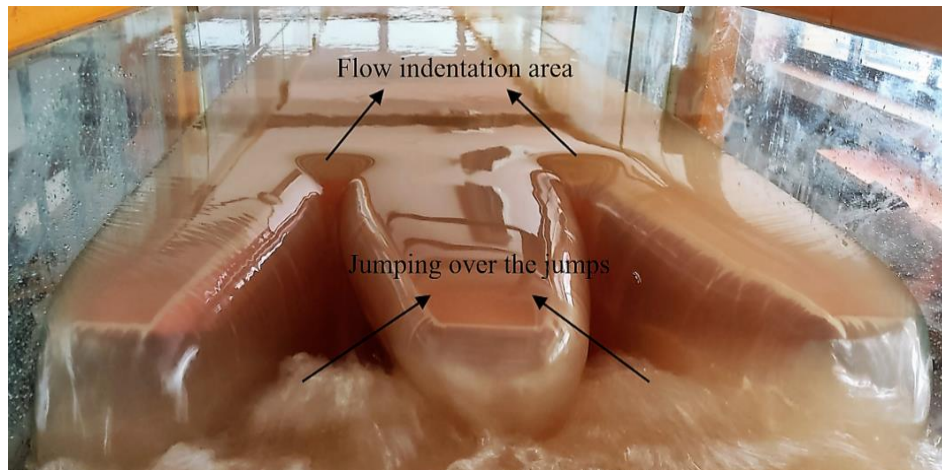


Fig 3. View of the flow over the weir

شکل ۴. ضریب آبگذری بر حسب H_u/P

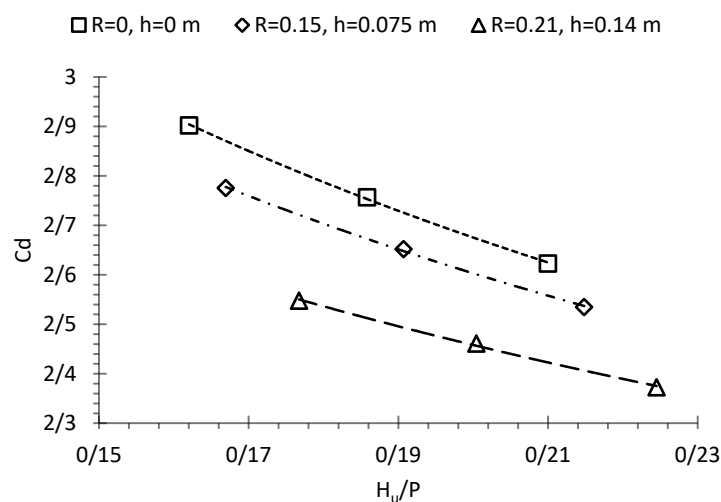


Fig 4. Flow rate coefficient in terms of H_u/P

پس از برداشت عمق جریان در بالادست سرریز (در فاصله ۴ برابر عمق جریان روی لبه سرریز) و عمق جریان در پایین دست سرریز (در فاصله ۱۰ برابر ارتفاع سرریز)، نتایج نشان داد که میانگین ضریب آبگذری در سرریزهای با شعاع جامپ بیشتر و شعاع جامپ کمتر نسبت به سرریز بدون جامپ، به ترتیب برابر $10/9$ و $3/9$ درصد کمتر است. همچنین میانگین ضریب آبگذری در سرریزهای بدون جامپ، جامپ با شعاع کمتر و جامپ با شعاع بیشتر، به ترتیب برابر $2/76$ ، $2/65$ و $2/46$ است.

شکل (۵)، تأثیر دبی در واحد عرض جریان را بر روی میزان استهلاک انرژی نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیدا است، با افزایش دبی در واحد عرض، مقدار استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. دلیل آن می‌تواند افزایش عمق و سرعت متوسط جریان در سرریزهای جامپ‌دار باشد.

شکل ۵. تأثیر دبی در واحد عرض بر استهلاک انرژی

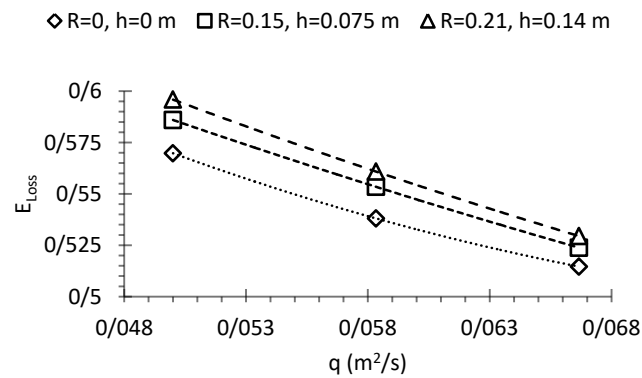


Fig 5. The effect of flow per unit width on energy loss

شکل (۶)، میزان استهلاک انرژی را بر حسب نسبت عمق جریان به علاوه ارتفاع معادل انرژی جنبشی در بالادست سرریز به ارتفاع سرریز نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیدا است و با افزایش این نسبت، مقدار استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. همچنین رابطه (۵)، برای محاسبه مقدار استهلاک انرژی در سرریز بدون جامپ و در سرریزهای جامپ‌دار، ارائه شده است که در آن مقدار K_1 و K_2 بستگی به نسبت R/h دارد و در جدول (۳) به آن پرداخته شده است.

شکل ۶. میزان استهلاک انرژی بر حسب H_u/P

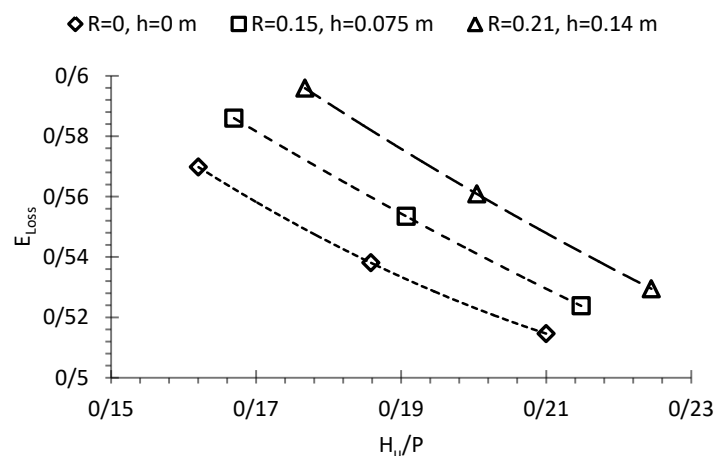


Fig 6. The amount of energy loss in terms of H_u/P

$$E_{Loss} = -k_1 \frac{H_u}{P} + k_2 \quad (5)$$

شکل (۷)، مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده‌ی استهلاك انرژی جریان را نشان می‌دهد که با توجه به به رابطه (۵) با خطای قابل قبولی (حدود ۱ درصد)، مورد پذیرش است.

جدول ۳. محاسبه ضرایب K و ضریب همبستگی

Table 3. Calculation of K and determination coefficient

Row	R/h	K_1	K_2	R^2
۱	۰	۱/۱۴۹۷	۰/۷۵۴۶	۹۹/۱۸
۲	۱/۵	۱/۳۹۰۵	۰/۸۴۱۰	۹۹/۸۷
۳	۲	۱/۲۹۷۶	۰/۸۰۲۰	۹۹/۹۰

شکل ۷. مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده استهلاك انرژی

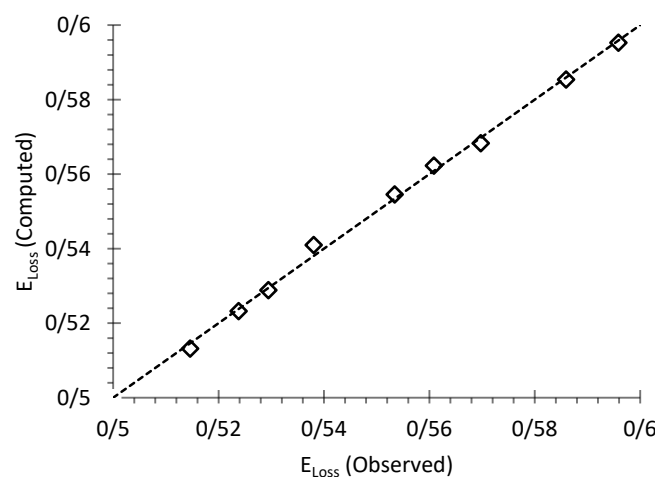


Fig 7. Observed and computed energy loss values

۵- نتیجه‌گیری

ضریب آبگذری با افزایش شعاع و لبه جامپ‌ها، کاهش می‌یابد. در سرریز با شعاع جامپ بزرگتر و در سرریز با شعاع جامپ کوچکتر، میزان ضریب آبگذری به ترتیب ۱۰/۹ و ۳/۹ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش دبی جریان، میزان استهلاك انرژی کاهش می‌یابد. در سرریز با شعاع جامپ بیشتر و در سرریز با شعاع جامپ کمتر نسبت به سرریز بدون جامپ، میزان استهلاك انرژی به ترتیب برابر ۳/۸ و ۲/۵ درصد بیشتر است. همچنین Fathi و همکاران (2023)، با بررسی آزمایشگاهی استهلاك انرژی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A همراه با تعداد پله‌ی متفاوت ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ در کلیدهای خروجی سرریز به این نتیجه رسیدند که میانگین میزان استهلاك انرژی در سرریزهای ذکر شده به ترتیب برابر ۵۰/۲، ۵۹/۵، ۶۶/۸ و ۶۱/۶ درصد است. در این تحقیق و با بررسی آزمایشگاهی استهلاك انرژی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C همراه با

شعاع متغیر جامپ در کلیدهای خروجی سرریز، نتایج نشان داد که در سرریز بدون جامپ، سرریز با شعاع جامپ کوچکتر و در سرریز با شعاع جامپ بزرگتر، میانگین میزان استهلاك انرژی به ترتیب برابر ۵۴/۱، ۵۵/۴ و ۵۶/۲ درصد است. در حالت سرریز بدون پله و جامپ، نتایج چنین است که میزان استهلاك انرژی در سرریز کلیدپیانویی نوع C حدود ۷/۲ درصد از میزان استهلاك انرژی در سرریز کلیدپیانویی نوع A بیشتر است. دلیل آن می‌تواند تعداد کلیدهای کمتر، عدم وجود لبه آویزان در بالادست سرریز و شیب بیشتر کلیدهای خروجی در سرریز کلیدپیانویی نوع C باشد. اما با این حال، وجود پله در کلیدهای خروجی سرریز، باعث استهلاك انرژی بیشتری نسبت به وجود جامپ در کلیدهای خروجی سرریز است.

۶- تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

۷- مراجع

- Al-Shukur, A. H. K., & Al-Khafaji, G. H. (2018). Experimental study of the hydraulic performance of piano key weir. *International Journal of Energy and Environment*, 9(1), 63-70.
- Bieri, M., Federspiel, M., Boillat, J. L., Houdant, B., Faramond, L., & Delorme, F. (2011). Energy dissipation downstream of Piano key weirs—Case study of Gloriettes Dam (France). *Labyrinth and Piano key weirs*, 123-130.
- Crookston, B. M., Erpicum, S., Tullis, B. P., & Laugier, F. (2019). Hydraulics of labyrinth and piano key weirs: 100 years of prototype structures, advancements, and future research needs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(12), 02519004.
- Erpicum, S., Laugier, F., Pfister, M., Piroton, M., Cicero, G. M., & Schleiss, A. J. (Eds.). (2013). *Labyrinth and piano key weirs II*. CRC Press.
- Eslinger, K., & Crookston, B. M. (2020). Energy dissipation of type a piano key weirs. *Water*, 12(5), 1253.
- Fathi, A., Abdi Chooiplou, C., & Ghodsian, M. G. (2023). An experimental study of flow energy loss in trapezoidal stepped piano key weirs (PKWs). *Modares Civil Engineering Journal*, 23(4), 0-0. (In Persian).
- Khanh, M. H. T., Hien, T. C., & Quat, D. S. Study and construction of PK Weirs in Vietnam (2004 to 2011).
- Naghbizadeh, S. M., Heidarneshad, M., Masjedi, A., & Bordbar, A. (2020). Experimental and numerical analysis of energy dissipation in piano key weirs with stepped and baffled barriers at downstream slop. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(10), 2431-2442. (In Persian)
- Novák, P., & Čabelka, J. (1981). Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications. *Monographs & Surveys in Water Resources Engineering*.
- Ribeiro, M. L., Boillat, J. L., Schleiss, A., Laugier, F., & Albalat, C. (2007). Rehabilitation of st-marc dam. experimental optimization of a piano key weir. In *Proc. of 32 nd Congress of IAHR*. Vince. Italy.
- Sajadi, S. M. (2017). Effect of baffled outlet keys at piano key weir on dissipating energy. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(69), 77-92. (In Persian)
- Singh, D., & Kumar, M. (2022). Gene expression programming for computing energy dissipation over type-B piano key weir. *Renewable Energy Focus*, 41, 230-235.
- Sumer, B. M., & Fredsoe, J. (1991, August). Onset of scour below a pipeline exposed to waves. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-I). ISOPE.

Research Article



Efficiency of AlpineQuest navigation application as an alternative for GPS in river engineering field surveying (Case study: Rafsanjan flood on July 2022)

Farzaneh Qaderi Nasab Gorouhi^{1*}, Maryam Ahmadi²

¹ PhD in Water Science and Engineering, Department of Protection and Exploitation of Water Resources, Kerman Regional Water Company, Kerman, Iran.

² Zenderood Environmental Research Center, Iran.

*Corresponding Author email: ghaderifarzane@gmail.com

© The Author(s) 2023

Received: 09 July 2023

Accepted: 06 Sept 2023

Published: 09 Sept 2023

Abstract

Advancements in technology have significantly facilitated fieldwork for engineers and researchers by providing new tools and methods. Utilizing tools and software designed for routing, orientation, and traffic management has proven highly efficient and effective in field surveys, particularly in river engineering. One such software is AlpineQuest. This application is easily installable on both Android and iPhone devices, granting users access to topographic maps, Google Earth imagery, slope maps, and more for any location on Earth. Additionally, AlpineQuest aids in determining the optimal route efficiently in terms of cost and time. This software offers various capabilities, including sketching, data collection in different formats, compatibility with other engineering software, and geometry calculations. In this study, AlpineQuest was used during a field visit to investigate the causes of the July 2022 flood in Rafsanjan. The software was used to register the accident locations, critical intersection structures, and the entrance to the floodway. The flood polygon was mapped and point data were defined within the application. Initial analyses of the field sites were conducted using Google Earth maps, Google Hybrid, and AlpineQuest slope maps. Subsequently, all data collected during the field visit were exported from AlpineQuest in GIS format. The findings indicate that factors such as long-term precipitation, urban development in the downstream alluvial fan, critical intersection structures near accident locations, and the presence of unregulated flood control structures upstream from Rafsanjan airport were responsible for the flood in Rafsanjan City.

Keywords: AlpineQuest, Navigation application, Rafsanjan flood, River engineering.



کارایی مسیریاب AlpineQuest به عنوان جایگزین GPS در بازدیدهای میدانی مهندسی رودخانه (مطالعه موردی سیلاب مرداد ماه ۱۴۰۱ شهر رفسنجان)

فرزانه قادری نسب گروهی^{۱*}، مریم احمدی^۲

۱. دکتری علوم و مهندسی آب، معاونت حفاظت و بهره برداری شرکت سهامی آب منطقه ای کرمان، کرمان، ایران.

۲. مرکز تحقیقات زیست محیطی زنده رود، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: ghaderifarzane@gmail.com

© The Author(s) 2023

چاپ: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۵

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸

چکیده

با پیشرفت تکنولوژی، توسعه ابزارها و به کارگیری روش‌های نوین، بازدیدهای میدانی مهندسان، کارشناسان و محققان آسان‌تر شده است. استفاده از ابزارها و برنامه‌هایی که با هدف اصلی مسیریابی، جهت‌یابی و کاهش ترافیک ارائه شده، در زمینه بازدیدهای میدانی خصوصاً بازدید از رودخانه‌ها بسیار کارآمد و موثر واقع شده است. AlpineQuest یکی از این برنامه‌های کارآمد در این زمینه است. کاربر با استفاده از این برنامه می‌تواند به طیف زیادی از نقشه‌های توپوگرافی دسترسی پیدا کرده، به آسانی آنها را دانلود کند و در زمانی که به اینترنت دسترسی ندارد به راحتی به فراخوانی نقشه بپردازد. در بازدید میدانی که جهت بررسی دلایل ورود سیلاب مرداد ماه ۱۴۰۱ به شهر رفسنجان صورت پذیرفت، از این نرم‌افزار استفاده شد. بدین صورت که محل نقاط حادثه‌خیز و سازه‌های تقاطعی بحرانی به صورت نقطه‌ای و مسیرهای ورودی سیلاب به داخل شهر به صورت نقشه خطی در نرم‌افزار ثبت شدند. همچنین برای محدوده‌های درگیر سیل پلیگون ترسیم شد. برای هر کدام از عارضه‌های ثبت شده اطلاعات توصیفی مورد نظر نیز وارد شد. در تحلیل‌های اولیه در محل بازدید از نقشه‌های گوگل‌ارث، گوگل هبیرید و همچنین نقشه‌های شیب موجود در AlpineQuest استفاده شد. پس از پایان بازدید میدانی، نهایتاً تمامی اطلاعات جهت بررسی نهایی با فرمت مناسب از AlpineQuest به نرم افزار GIS منتقل شد. نتایج کلی نشان داد وقوع بارش با دوره بازگشت بالا، توسعه شهر در پایین‌دست مخروطه افکنه، سازه‌های تقاطعی بحرانی، نقاط حادثه‌خیز و طرح سیل‌بند غیر اصولی در بالادست فرودگاه رفسنجان از دلایل وقوع سیلاب در شهر رفسنجان هستند.

واژه‌های کلیدی: AlpineQuest، مسیریاب، سیل رفسنجان، مهندسی رودخانه.

۱- مقدمه

گرچه GPS امکان ارسال و دریافت داده به نرم افزار GIS نصب شده در رایانه را فراهم می‌کند، اما سیستم سنتی ثبت اطلاعات در GPS و ورود آنها به GIS و همچنین عدم دسترسی به اطلاعات توصیفی (ثبت شده در GIS نصب شده بر روی رایانه) در بازدیدهای میدانی یکی از چالش‌های اصلی کاربران محسوب می‌شود. بنابراین در شرایطی که تلفن همراه هوشمند در بسیار از موارد، نیاز کاربران را مرتفع نموده است، نرم‌افزارهای گوناگونی با هدف ارائه مختصات جغرافیایی، ترسیم کروکی، محاسبه سطوح و ... توسعه پیدا کرده است که هر کدام قابلیت مجزایی دارند؛ لذا اگر بتوان نرم‌افزاری را معرفی کنیم که تمامی نیازهای ما را به صورت همزمان فراهم کند و به عبارت دیگر هم قادر به دریافت داده‌های مکانی همراه با اطلاعات توصیفی باشد، هم بتواند فرمت‌های مختلف دریافتی (یا ارسالی) از نرم‌افزارهای (به نرم‌افزارهای) گوناگون را پشتیبانی کند، همچنین قابلیت نمایش تصاویر گوگل‌ارث را به صورت آفلاین فراهم کند، مختصات جغرافیایی را ارائه کند، کروکی ترسیم نماید، زمان رسیدن به محل مورد نظر را تخمین بزند و ... بسیار کارآمد خواهد بود. یکی از این نرم‌افزارها که می‌تواند بسیاری از نیازهای مهندسی را در زمینه ثبت اطلاعات مکانی تامین کند نرم‌افزار مسیریاب AlpineQuest است. قابل ذکر است این نرم‌افزار با هدف مسیریابی، کاهش ترافیک و ... توسعه یافته است که تجربه کسب شده توسط نگارندگان مقاله نشان داد این برنامه در زمینه بازدیدهای مهندسی رودخانه‌ها عملکرد بسیار موثری دارد.

محققان و پژوهشگران، شرکت‌های مهندسی مشاور و همچنین کارشناسان شرکت‌های سهامی آب منطقه‌ای، شرکت‌های آب و فاضلاب، اداره جهاد کشاورزی، اداره منابع طبیعی، اداره محیط زیست و ... که در پروژه‌ها و بررسی‌های کارشناسی نیاز به بازدید میدانی از محدوده مورد استعلام دارند، برای ثبت اطلاعات مکانی و ورود آنها به نرم‌افزارهای پردازش اطلاعات مکانی (از جمله GIS) به ابزارهای کمکی زیادی نیاز دارند که مهم‌ترین آنها GPS است. شاید چند دهه پیش بود که استفاده از GPS‌های دستی در بازدیدهای کارشناسی کارآمد و موثر واقع شد. در ابتدا GPS به منظور برداشت مختصات جغرافیایی و احیاناً نشان دادن جهت شمال، ساعت و تاریخ مورد استفاده قرار گرفت و استفاده از آن بین کارشناسان رایج شد. بعداً ثبت مسیر بازدید شده، ترسیم کروکی، پیدا کردن محدوده مورد نظر که گاهی برای اولین بار مورد بازدید قرار می‌گرفت، مورد توجه کارشناسان قرار گرفت. با این وجود افزایش قیمت GPS‌های دستی، حمل و نقل و عدم دسترسی همیشگی به آنها، سرعت پایین و کاربردوست نبودن آنها، محدودیت استفاده از این وسیله شد.

گرچه هدف اصلی از توسعه نرم‌افزار AlpineQuest در زمینه مسیریابی بوده است اما بررسی منابع نشان داد در مطالعات دیگری نیز توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته است از جمله Hamarashid et al. (2022) در مطالعه‌ای در منطقه کردستان عراق که به منظور بررسی تأثیر زیست محیطی کارخانه فولاد بر ژئوشیمی خاک انجام دادند، جهت تولید نقشه‌ها و ثبت اطلاعات از AlpineQuest استفاده کردند. Green et al. (2019) در مطالعه‌ای به منظور کشف مجدد مناظر باستانی در شمال غربی هند برای دسترسی به مکان‌های از پیش تعیین شده انجام دادند، از این نرم‌افزار استفاده کردند. همچنین آنها برای پشتیبانی گرفتن از داده‌ها، ثبت اطلاعات از این نرم‌افزار استفاده کردند. Singh et al. (2018) جهت بررسی تغییرات پویایی سکونتگاه‌های شمال غربی هند برای پشتیبانی گرفتن از داده‌های میدانی از این نرم‌افزار استفاده کردند.

Deak et al. (2021) در مطالعه‌ای به منظور کشف و مبارزه با حوادث مسمومیت حیات وحش با بازدارندگی مجرمان احتمالی و تسهیل تحقیقات پلیس از طریق بازیابی شواهد و مدارک، جهت جانمایی مکان‌های مورد نظر از این برنامه استفاده کردند. در مطالعه دیگری که توسط Gyltshen et al. (2021) به منظور بررسی تغییرات کاربری اراضی در پروژه مدیریت پایدار زمین در بوتان انجام شد از AlpineQuest جهت جمع‌آوری داده‌ها استفاده کردند در مطالعه آنها در مجموع ۵۰۰ نقطه مرجع به صورت تصادفی جمع‌آوری شده و محل آنها در برنامه AlpineQuest ثبت شد که در نهایت نقاط با فرمت مناسب به نرم‌افزار Arc GIS وارد شدند. قابل ذکر است علاوه بر نرم‌افزار معرفی شده در این مطالعه می‌توان به برنامه‌های GPX viewer، Measure Map و GPS Essentials اشاره کرد که از لحاظ توسعه و تکامل در درجه پایین‌تری از AlpineQuest قرار دارند به عنوان مثال GPX viewer در مطالعه Röscher (2021) جهت بازدید از نقاط مورد نظر مورد استفاده قرار گرفت. در مطالعه دیگری که با هدف یافتن مسیر و مکان‌های امن در مناطق آسیب دیده (سیل، زلزله و ...) انجام شد، پیشنهاد شد از نرم‌افزارهای مسیریابی از جمله gpx viewer استفاده شود (Karasi & Rathod 2016). در مطالعه Akbar et al. (2022) که به منظور بررسی آلودگی آب زیرزمینی انجام شد جهت ثبت مختصات جغرافیایی مکان‌های برداشت نمونه از برنامه GPS Essentials استفاده شد.

۲- مواد و روش

۲-۱- معرفی نرم‌افزار AlpineQuest

نرم‌افزار AlpineQuest یک ابزار مسیریاب قدرتمند ویژه سیستم عامل اندروید بوده که جهت بازدیدهای میدانی توسعه یافته است. این برنامه در بازدید میدانی به کاربر کمک کرده تا با دیدن نقشه، مسیرها را با جزئیات کامل پیدا کند. کاربر با استفاده از این برنامه می‌تواند به طیف زیادی از نقشه‌های توپوگرافی دسترسی پیدا کرده، به آسانی آنها را دانلود کند و در زمانی که به اینترنت دسترسی ندارد به راحتی به فراخوانی نقشه بپردازد. این برنامه با داشتن GPS و حسگر مغناطیسی سبب شده در هر جایی از بازدید میدانی، موقعیت را در روی نقشه دیده و به آسانی جهت‌های جغرافیایی را در روی نقشه پیدا کند. با این برنامه کاربرد قادر به ذخیره کردن نقطه‌های مهم در روی نقشه است. به طور کلی ویژگی‌های این برنامه عبارتند از:

دسترسی به نقشه‌ها به صورت کاملاً آنلاین

دسترسی به نقشه‌های ماهواره‌ای

نمایش جزئیات دقیق بر روی نقشه‌ها

توانایی دانلود نقشه‌ها برای دسترسی به صورت آفلاین

ذخیره‌سازی نقشه‌ها به صورت منطقه‌ای

نشانه‌گذاری بر روی نقشه‌های موجود

نمایش موقعیت لحظه‌ای بر روی نقشه‌ها

دسترسی به جزئیاتی دقیق از مسیر طی شده

هشدار در هنگام ترک مسیر اصلی

پشتیبانی از فشارسنج

در بازدیدهای میدانی مهندسی رودخانه، در شرایطی که کاربر بر روی سطح زمین قرار دارد، گاهی لازم می‌شود، دید کلی از وضعیت توپوگرافی منطقه داشته باشد. در چنین شرایطی دسترسی به خطوط تراز ارتفاعی بسیار کارآمد است. علاوه بر این، کاربر به طیف وسیعی از نقشه‌های توپوگرافی به صورت آنلاین دسترسی دارد و می‌تواند آنها را به صورت محلی ذخیره کند. چنین نقشه‌های در شرایط آفلاین و یا شرایطی که کاربر در محل قرار ندارد نیز در دسترس خواهند بود. نقشه‌های مدل رقومی ارتفاع^۱ (DEM) موجود در این مسیریاب شامل DEM Height, DEM Terrain, DEM hillshade Layer, DEM Slops Layer و DEM Heights(sensitive) هستند. این نرم‌افزار با استفاده از GPS و سنسور مغناطیسی دستگاه گوشی همراه (با نمایشگر قطب نما)، می‌تواند تمامی مسیرهایی که توسط کاربر پیمایش شده را ثبت کند، به عبارت دیگر نمایش مکان‌های قبلی بازدید شده، نمایش موقعیت کنونی کاربر بر روی نقشه و همچنین نمایش فاصله باقیمانده تا رسیدن به مقصد نهایی از قابلیت‌های این نرم‌افزار است. در شکل (۱) قسمت الف screenshot گرفته شده از تلفن همراه در یکی از بازدید میدانی نشان داده شده است. در این شکل نقشه حدود بستر مصوب روستای "دره در" در شهرستان رفسنجان نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است دسترسی به تصاویر گوگل ارث، مختصات محلی که کاربر در آن قرار گرفته، نقاط مهم ثبت شده در بازدید میدانی و ... از قابلیت‌های این نرم‌افزار است. همچنین در قسمت ب همین شکل پراکنش کلی چاه‌های کشاورزی شهرستان رفسنجان، خطوط بستر رودخانه مصوب، حریم کیفی چاه‌های آب شرب مربوط به شهر رفسنجان نشان داده شده است.

۲-۲- محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی رفسنجان با کد ۴۹۰۲ یکی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز کویر درانجیر-ساغند است. در شکل (۲) موقعیت محدوده سیاسی شهرستان رفسنجان و محدوده مطالعاتی رفسنجان نسبت به حوضه آبریز کویر درانجیر-ساغند و همچنین موقعیت مسیل‌ها و رودخانه‌های این حوضه آبریز نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است شهرستان رفسنجان به لحاظ موقعیت توپوگرافی در پایین دست مخروطه افکنه و عموماً در قسمت کم‌شیب حوضه قرار دارد و در

¹ Digital Elevation Model

نتیجه اکثر شهرها و روستاهای این شهرستان در مسیر عبور جریان ورودی از ارتفاعات، پهنه‌های سیلابی و آبراهه‌های پخش سیلاب قرار دارند. محدوده مطالعاتی رفسنجان با وسعت ۱۲۵۱۴ کیلومتر مربع بین طول‌های جغرافیایی ۵۴ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۳۴ دقیقه و عرض‌های جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۳۱ دقیقه در باند ارتفاعاتی ۱۴۰۰ متر تا ۳۴۴۳ متر بالاتر از سطح دریای آزاد گسترده است. عمده تغذیه دشت رفسنجان مربوط به حوضه‌ها و مسیل‌های جنوب و جنوب شرق است.

شکل ۱. الف قابلیت برنامه AlpineQuest در بازدید میدانی ب: جانمایی نقشه‌های نقطه ای، خطی و پلیگونی در برنامه

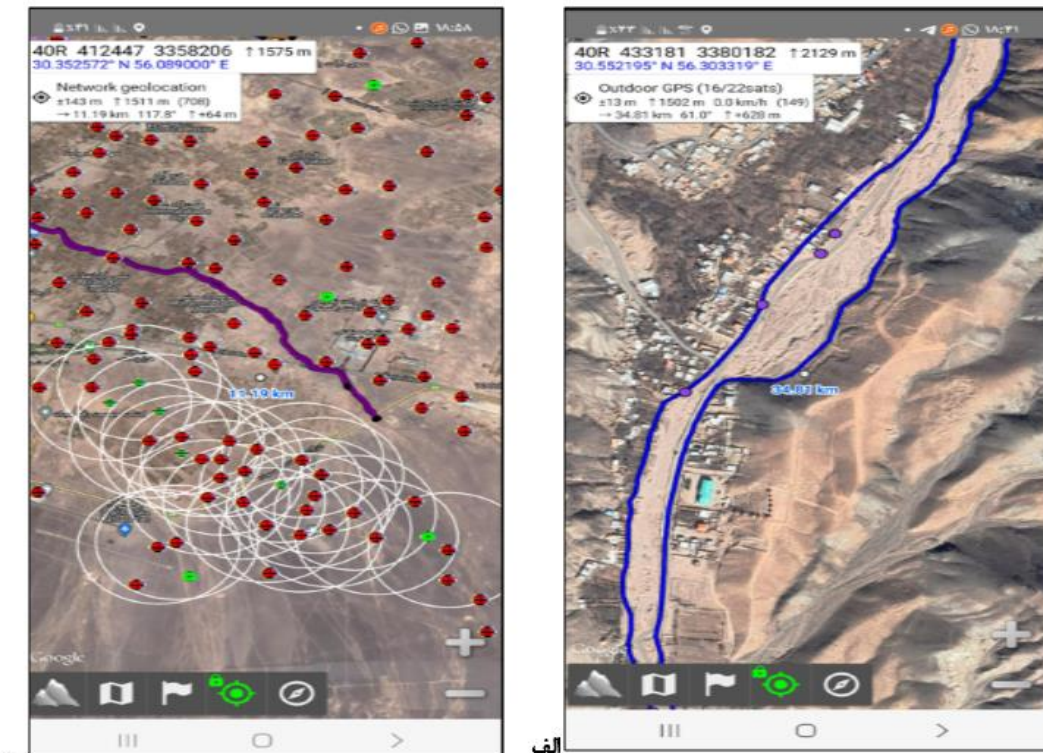


Fig 1. A - The capabilities of the AlpineQuest program in field visits B - Visualization of point, line, and polygon maps in the program

شکل ۲. موقعیت شهرستان رفسنجان نسبت به محدوده مطالعاتی رفسنجان و حوضه آبریز کویر درانجیر ساغند

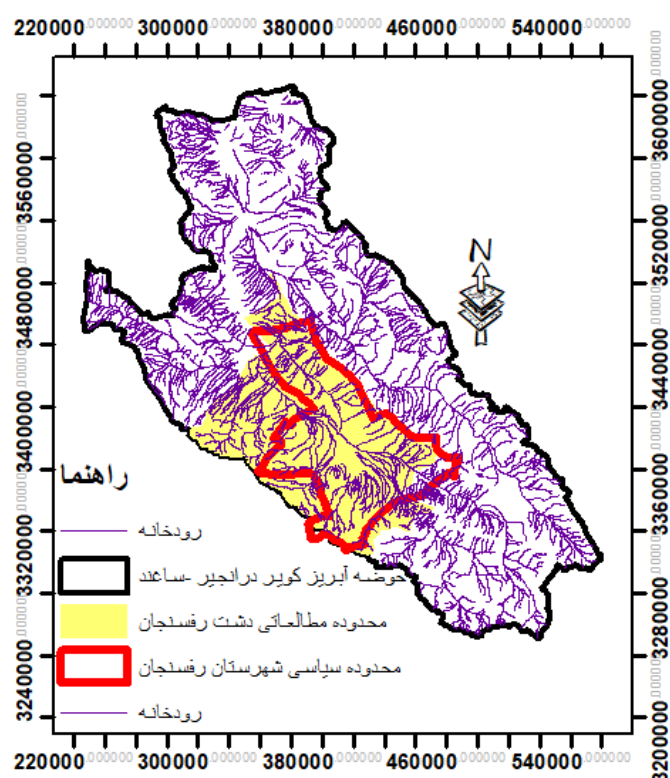


Fig 2. The Position of Rafsanjan county in relation to the study area and the Dasht-e Anjir Saghand watershed

۲-۳- بررسی بارش

به منظور بررسی دلایل ورود سیل مرداد ماه ۱۴۰۱ به شهر رفسنجان، بارش مونسون رخ داده طی دوره مورد مطالعه (۱۴۰۱/۵/۱۰ تا ۱۴۰۱/۵/۵) جدول شدت، مدت و فراوانی رگبار با دوره بازگشت‌های مختلف با بارش رخ داده در دوره مطالعه مقایسه شد. در جدول (۱) مقادیر شدت، مدت و فراوانی رگبارهای کوتاه مدت برای رفسنجان نشان داده شده است. مونسون به طوفانی گفته می‌شود که در اثر بارش‌های سنگین و معمولاً در فصل گرم یعنی تابستان رخ می‌دهد. علت اصلی پدیده مونسون در ایران، اقیانوس هند است که به دلیل اختلاف زیاد دمایی بین خشکی و اقیانوس اتفاق می‌افتد. آب و هوای ایران در تابستان گرم و خشک است اما در صورتی که شرایط مساعد باشد از سمت اقیانوس هند رطوبت وارد ایران شده و در مواجهه با توده هوای گرم، باران‌های سیل‌آسایی را در این فصل رقم می‌زند که به آن پدیده مونسون می‌گویند Khodam (et al. 2015).

جدول ۱. مقادیر شدت، مدت و فراوانی رگبارهای کوتاه مدت - میلی‌متر در ساعت - (منبع: شرکت مهندسين مشاور ایده‌پردازان توسعه، ۱۴۰۰)

Table 1. Values of short-term rainfall intensity, duration, and frequency (mm/hr) - (Source: Idepardazan Toseeh Engineering Consultants Company, 2021)

زمان	شدت رگبار - میلی‌متر در ساعت	ارتفاع رگبار (میلیمتر)												
(دقیقه)	دوره بازگشت سال						دوره بازگشت سال							
	100	50	25	10	5	2	100	50	25	10	5	2		
15	7.6	6.8	5.7	4.8	3.9	2.4	30.4	27.2	22.8	19.3	15.5	9.7		
30	8.8	8	6.9	6	5.1	3.5	17.7	16.1	13.9	12.1	10.1	7		
45	10.7	9.8	8.5	7.5	6.3	4.4	14.3	13.1	11.4	10	8.4	5.9		
60	12.7	11.6	10.1	8.8	7.4	5.2	12.7	11.6	10.1	8.8	7.4	5.2		
90	15.7	14.3	12.5	10.9	9.3	6.5	10.4	9.6	8.3	7.3	6.2	4.4		
120	18.5	16.9	14.7	12.9	10.9	7.7	9.2	8.4	7.3	6.4	5.5	3.9		
180	24.4	22.2	19.1	16.7	14	9.6	8.1	7.4	6.4	5.6	4.7	3.2		
240	30	27.2	23.3	20.2	16.8	11.4	7.5	6.8	5.8	5.1	4.2	2.8		
300	34.9	31.6	26.9	23.2	19.2	12.8	7	6.3	5.4	4.6	3.8	2.6		
360	40.3	36.3	30.7	26.3	21.4	13.9	6.7	6.1	5.1	4.4	3.6	2.3		

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌ها (منبع واحد مطالعات اداره منابع آب رفسنجان)

Table 2. Station specifications - (Source: Water Resources Directorate of Rafsanjan)

ردیف	نام ایستگاه	مختصات جغرافیایی	طی دوره مونسون (mm) بارش تجمعی (از تاریخ ۱۴۰۱/۵/۵ تا تاریخ ۱۴۰۱/۵/۱۰)
1	راویز	348704 3360744	117.5
2	شاهزاده عباس	409494 3321927	71.5
3	داوران	422632 3384011	70
4	دهوئیه	401281 3341053	69.5
5	رفسنجان	402578 3363577	28.5
6	جهان آباد نوق	389043 3404302	4.5

در جدول (۲) مشخصات ایستگاه‌های موجود در شهرستان رفسنجان و بارش کل ثبت شده طی دوره مونسون ۱۴۰۱/۵/۵ تا ۱۴۰۱/۵/۱۰ که منجر به سیلاب و وقوع خسارت مالی به زیرساخت‌های شهر رفسنجان شده است نشان داده شده است. همچنین در جدول ۳ مقدار بارش ۶ ساعته ثبت شد در هر ایستگاه طی دوره مورد مطالعه نشان داده شده است.

جدول ۳. بارش ۶ ساعته ثبت شده در ایستگاه‌ها طی دوره مورد مطالعه (منبع واحد مطالعات اداره منابع آب رفسنجان)

Table 3. 6-Hour precipitation recorded at stations during the study period - (Source: Water Resources Directorate of Rafsanjan)

ردیف	نام ایستگاه	1401/5/5		1401/5/6		1401/5/7		1401/5/8		1401/5/9		1401/5/10	
		18:30	06:30	18:30	06:30	18:30	06:30	18:30	06:30	18:30	06:30	18:30	06:30
1	راویز	9	11	24	9.5	26	35	3					
2	شاهزاده عباس						17	25		5			
3	داوران	22	18	5			5	20					
4	دهوئیه	14	0.5	20	4	2	14	15					
5	رفسنجان	2.5	6.5	2	5.5		10.5			1.5			
6	جهان آباد نوق	1	3										

از مقایسه آمار و ارقام در جدول ۱ و ۳ مشخص می‌شود که بارش رخداد داده در دوره مورد مطالعه، قطعاً بارش با دوره بازگشت بیش از ۱۰۰ سال است. لذا توجه به اینکه رودخانه‌های عبوری از داخل شهر رفسنجان ظرفیت عبور چنین جریانی را ندارند (با توجه به اینکه حریم و بستر رودخانه‌های رفسنجان بر اساس سیل با دوره بازگشت ۲۵ سال طراحی شده‌اند) با باید انتظار داشت شهر دچار آبگرفتگی و خسارات مالی فراوان شود.

۲-۴- معرفی مناطق درگیر سیلاب‌های مورخ ۱۴۰۱/۰۵/۰۵ تا ۱۴۰۱/۰۵/۰۹

۲-۴-۱- محدوده شهر رفسنجان

ورود سامانه مونسون از مورخ ۱۴۰۱/۰۵/۰۵ به منطقه رفسنجان منجر به وقوع بارش‌های رگباری و سیل‌آسا در ارتفاعات سرچشمه (ارتفاعات بالادست و مجاور روستاهای کهن‌ترش، علی آباد، آلاچیق، گورچوپان، اوراف و همچنین ارتفاعات منطقه گرو، آبگرم و ...) شد. این بارش‌ها منجر به جاری شدن سیل شدید در رودخانه آلاچیق (رودخانه صادق آباد-اسد آباد در محدوده شهر رفسنجان) و همچنین جاری شدن آب در آبراهه‌های واقع در پهنه سیلابی بالادست فرودگاه رفسنجان گردید. تجمع آب حاصل از سیلاب رودخانه آلاچیق و آب جاری شده در آبراهه‌ای واقع در پهنه سیلابی بالا و همچنین آب

حاصل از بارش‌های شدید رخ داده در محدوده شهر منجر به ورود آب قابل توجهی به محدوده شهر (شهرک جهاد، بلوار امام علی، بلوار کوثر، بلوار طالقانی، بلوار جمهوری و .. میدان حاج قاسم سلیمانی و ... گردید. این مسئله باعث آبگرفتگی معابر و منازل مسکونی مناطق ذکر شده در بالا شد.

در شکل (۳) نمایی کلی از کمربندی رفسنجان، جاده رفسنجان سرچشمه، فرودگاه و جهت حرکت آبراهه‌های ناشی پخش سیلاب نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، جریان‌های سیلابی در قالب آبراهه‌های متعدد کوچک به سمت شهر رفسنجان در جریان است. بخشی از این آبراهه‌ها در پشت سیل‌بندی که به منظور از حفاظت از فرودگاه احداث شده است جمع شده و سپس در مجاورت جاده سرچشمه-شهربابک حرکت کرده و در محل پل دسترسی شرکت نفت به خط انتقال نفت (در زیر جاده رفسنجان-سرچشمه) به عنوان یک نقطه حادثه خیز عمل کرده است. به عبارت دیگر جریان از این نقطه وارد باغات پسته، شهرک جهاد، بلوار امام علی، میدان کوثر و بلوار کوثر شده است.

شکل ۳. موقعیت شهر رفسنجان نسبت به آبراهه‌های پخش سیلاب



Fig 3. The Position of Rafsanjan city in relation to flood discharge routes

همان‌طور که تصاویر بازدید میدانی نشان می‌دهد (شکل ۴)، ورود حجم زیادی از آب در این نقطه (که در واقع مجرای عبور جریان نبوده) سبب فرونشست باند سمت راست جاده رفسنجان-سرچشمه شده و مسیر جدیدی برای حرکت آب ایجاد شده است.

شکل ۴. بازدید میدانی مورخ ۱۴۰۱/۰۵/۱۱ از محل تخریب شده جاده رفسنجان سرچشمه و نقطه ورودی آب به سمت شهرک جهاد و بلوار امام علی (ع) $x=407352$; $y=3357783$ UTM (منبع نویسندگان)



Fig 4. Field Visit on 05/01/1401 to the location of the damaged Rafsanjan-Sarcheshmeh road and the entry point of water into Jihad Town and Imam Ali boulevard ($x=407352$; $y=3357783$ UTM) - (Source: Authors)

در شکل (۵) مسیری که جریان برای خروج از شهر انتخاب کرده است در نرم افزار گوگل ارث نشان داده شده است. در این شکل آبراهه های پخش سیلاب، رودخانه های دارای نقشه مصوب و همچنین خیابان ها و بزرگراهایی که همانند یک زهکش (رودخانه) جریان سیلابی منشعب از ارتفاعات بالادست را از داخل شهر به بیرون هدایت کردند با رنگ زرد نشان داده شده است همچنین در شکل (۶) تعدادی تصویر از بازدید میدانی خیابان ها (بعد از وقوع سیل) نشان داده شده است.

شکل ۵. خیابان های مسیر حرکت سیلاب

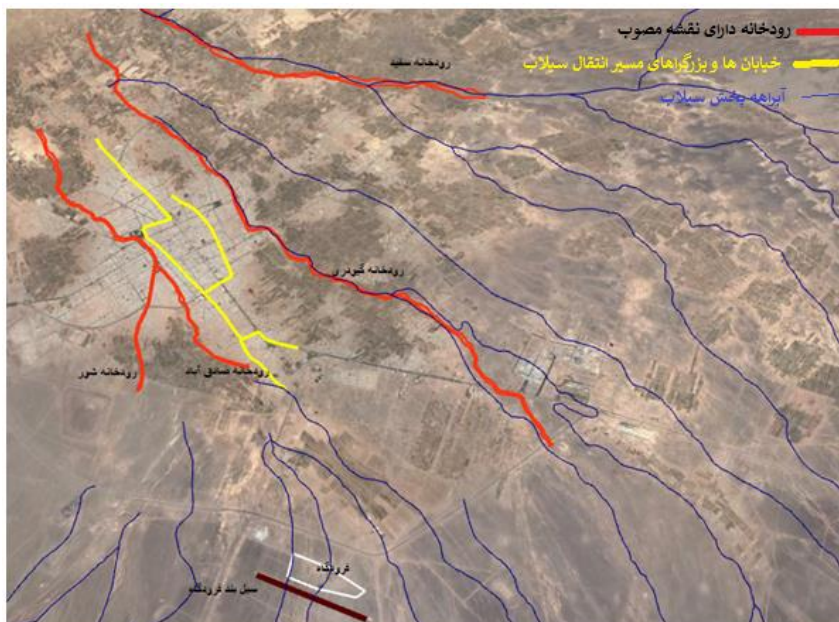


Fig 5. Streets along the flood path

همان طور که مشخص است آب از بالادست در مسیر بلوار امام علی و از مجاور شهرک جهاد عبور کرده و پس از میدان کوثر وارد بلوار کوثر شده است. در ادامه سیلاب وارد بلوار طالقانی شده و در نهایت در زیرگذر شهدا کاملاً تبدیل به یک استخر آب شده، نهایتاً آب در ادامه در بلوار مدرس شمالی در جهت شیب عمومی زمین حرکت کرده و از طریق خیابان

عدالت به سمت میدان حسینی حرکت کرده و در سپس وارد خیابان مصطفی خمینی شده است. همچنین در مسیر خیابان شهید عابدینی در محله‌های تاج آباد و اسماعیل آباد سبب آبگرفتگی معابر و ورود آب به منازل مسکونی شده است.

شکل ۶. بازدید تاریخ ۰۹/۰۵/۱۴۰۱ از مناطق درگیر سیل (منبع: نویسندگان)



Fig 6. Field visit on 09/01/1401 to flood-affected areas - (Source: Authors)

۲-۴-۲- بررسی سیلاب‌های عبوری از رودخانه‌های واقع در محدوده شهر رفسنجان

قابل ذکر است که از محدوده شهر رفسنجان سه (۳) رودخانه اصلی (رودخانه‌های گیودری، شور و صادق آباد-اسد آباد) عبور می‌نماید که در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. در این شکل رودخانه‌های اصلی عبوری داخل شهر رفسنجان و حومه آن به رنگ قرمز و مسیل‌های فرعی به رنگ آبی نشان داده شده است.

رودخانه شور

منشأ آن ارتفاعات سرچشمه است. جریان به صورت کنترل شده از سد سرچشمه (جنوب شرق به سمت شمال غرب) حرکت کرده و وارد شهر رفسنجان می‌شود. قابل ذکر است در سیلاب مرداد ماه ۱۴۰۱ هیچ گونه خروجی از سد به سمت رودخانه شور جاری نشد و آبی که در رودخانه شور قابل مشاهده بود، روناب ناشی از حوزه زیر سد سرچشمه بود. قابل ذکر است آبگرفتگی معابر در شهر رفسنجان هیچ ارتباطی به آورد رودخانه شور نداشت. همچنین قابل ذکر است در بازدید

میدانی از این رودخانه یک سازه تقاطعی در موقعیت UTM: x= 402585; y= 3361634 در تقاطع با بلوار امام حسین شناسایی شد.

شکل ۷. بررسی وضعیت رودخانه‌های عبوری داخل شهر در سیلاب مرداد ماه ۱۴۰۱

Fig 7. Assessment of the status of intra-city rivers during the August 2022 Flood



رودخانه صادق آباد-اسد آباد

منشأ آن ارتفاعات سرچشمه در بالادست روستاهای کهن‌ترش و آلاچیق است که در پایین‌دست و بعد از روستای اوراف همراه با آبراهه‌های مجاور سرچشمه گرفته از ارتفاعات منطقه اوراف به سمت شهر رفسنجان جاری می‌شود. این رودخانه نرسیده به شهر رفسنجان در قسمت پایین کمربندی رفسنجان حالت پخشیدگی پیدا کرده و به چندین آبراهه پخش سیلاب تبدیل می‌شود. آنچه که در حال حاضر به عنوان رودخانه صادق آباد در داخل شهر رفسنجان قابل مشاهده است یکی از این شاخه‌های پخش سیلاب است. مطابق بررسی تصاویر هوایی دهه ۴۰ و عکس‌های موجود در آرشیو لندست عموماً بعد از آبراهه‌های پخش سیلاب، در روستای صادق آباد باغات پسته و زمین‌های کشاورزی قرار داشتند که به مرور زمان باغات تبدیل به منازل مسکونی شده‌اند. یکی از دلایل ایجاد سیلاب در منطقه همین مسئله است. زیرا با تبدیل اراضی از کشاورزی به مسکونی عملاً نفوذپذیری ناچیز بوده و ثانیاً مسیر عبور جریان کاملاً محو شده است.

همان‌طور که در بالا گفته شد بخشی از رواناب سطحی که انتظار می‌رفت از طریق رودخانه صادق آباد زهکشی شود و به دلیل شیب عمومی زمین از طریق بلوار امام علی، خیابان طالقانی، عدالت و ... به سمت پایین‌دست و بخشی کمی از سیلاب در رودخانه صادق آباد جاری شد. اما همین آب اندک در محل سازه‌های تقاطعی باعث پس‌زدگی جریان و وارد شدن آب

وارد معابر شد و با توجه به ورود حجم قابل توجه آب به بلوار جمهوری، شهرداری مجبور به تخریب دو پل احداث شده بر روی این رودخانه شد که در شکل (۸) نشان داده شده است.

شکل ۸. وضعیت پل رودخانه صادق‌آباد ابتدای بلوار امام حسین UTM: $x=402799$; $y=3363045$ (منبع: نویسندگان)



بعد از سیلاب و تخریب توسط شهرداری مورخ ۱۴۰۱/۰۵/۹

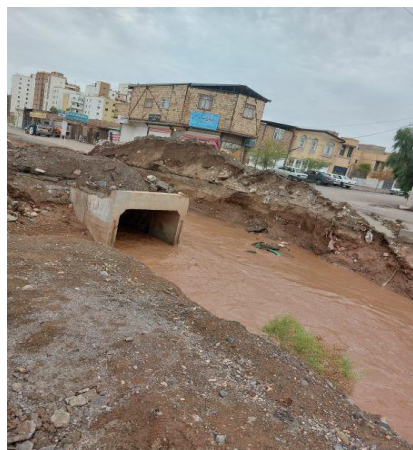


قبل از سیلاب مورخ ۱۴۰۱/۰۳/۲۰

Fig 8. Status of the Sadeghabad river bridge at the beginning of Imam Hussein boulevard ($x=402799$; $y=3363045$ UTM) - (Source: Authors)

در شکل (۹) وضعیت پل تعبیه شده بر روی رودخانه صادق‌آباد ابتدای خیابان موسی ابن جعفر قبل و بعد از سیلاب نشان داده شده است با توجه به عدم عبور ایمن جریان توسط باکس تعبیه شده اقدام به تخریب بخشی از پل شده است

شکل ۹. وضعیت پل تعبیه شده بر روی رودخانه صادق‌آباد ابتدای خیابان موسی ابن جعفر UTM: $x=402799$; $y=3363045$ (منبع: نویسندگان)



بعد از سیلاب (تخریب پل توسط شهرداری به منظور افزایش ظرفیت آبگذری



قبل از سیلاب

Fig 9. Status of the bridge installed on the Sadeghabad river at the beginning of Musa Ibn Ja'far Street ($x=402799$; $y=3363045$) - (Source: Authors)

رودخانه گیودری

منشأ جریان ورودی به این رودخانه ارتفاعات شاهزاده عباس و دره راگه است این رودخانه با توجه به عرض و عمق مناسب و همچنین ظرفیت آبگذری کافی پل‌های احداث شده بر روی آن (در محدوده شهر)، بدون هیچگونه خسارتی، سیلاب را به پایین دست هدایت کرد.

۳- بحث و نتایج

در این مطالعه جهت بازدید میدانی و بررسی دلایل سیل مرداد ماه ۱۴۰۱ شهر رفسنجان از برنامه AlpineQuest استفاده شد. قابلیت‌های ویژه این نرم‌افزار از جمله ثبت مسیرهای بازدید شده، اشتراک اطلاعات ثبت شده با دیگران، کاربر دوست بودن، برخورداری از نقشه‌های گوناگون، پشتیبانی از فرمت‌های گوناگون داده در این مطالعه به وضوح احساس شد. چنین مزایایی در مطالعات بسیاری از محققان از جمله (Mantellini (2019 نیز اشاره شده است. علاوه بر این، می‌توان داده‌های مورد نظر را در AlpineQuest فراخوانی کرد که در این صورت موقعیت آنها در لایه نقشه پایه Google Satellite و Google نشان داده خواهد شد. این فرایند چند پلتفرمی یکپارچه این امکان را به کاربر خواهد داد تا مسیری را برای هر مکان در منطقه شناسایی کرده و آن را ارزیابی کند. برای تولید، تجزیه و تحلیل و تهیه نسخه پشتیبان از داده‌های میدانی با سرعت بالا از این نرم‌افزار استفاده خواهد شد. لازم به ذکر است این مسیر یاب در مطالعات مهندسی رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است از جمله می‌توان به مطالعات (Alhamdi & Thamiry (2023 اشاره کرد در مطالعه Alhamdi & Thamiry (2023 که به منظور افزایش ظرفیت آبگذری رودخانه Al Butera انجام شد، جهت کنترل طول و سطح مقطع رودخانه از این مسیر یاب استفاده شد.

مطابق با بازدید میدانی و بررسی‌های صورت گرفته می‌توان دلایل ورود سیلاب به شهر رفسنجان به شرح ذیل بیان کرد:

۱. وقوع سیلاب با دوره بازگشت بالا یکی از دلایل اصلی ورود سیل به شهر رفسنجان است. با توجه به اینکه عموماً مطالعات تعیین حریم و بستر رودخانه‌ها بر اساس سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله صورت می‌پذیرد، در صورت وقوع سیلاب با دوره بازگشت زیاد، با توجه به اینکه رودخانه‌های عبوری از داخل شهر ظرفیت انتقال حجم سیلاب به پایین دست را ندارند، مشکلات آبگرفتی شهر و بروز خسارت وجود خواهد داشت. چنین مسئله‌ای در مطالعات (Tarnian et al. (2022; Faghihi Rad (2015; Heydari et al.(2016; Mehdi Nesab (2019 نیز مورد بررسی قرار گرفته و تایید شده است. لذا پیشنهاد می‌شود طرح جامع آبخیزداری و مهار و زمین گیر کردن سیل در بالادست شهر رفسنجان صورت پذیرد.

۲. قرارگیری شهر رفسنجان در پایین دست مخروطه افکنه و آبراه‌های پخش سیلاب یکی دیگر از دلیل وقوع سیلاب است. قابل ذکر است این مسئله در مطالعات محققانی از جمله (Imeni et al. (2021 و همچنین Jamali et al. (2016 نیز اشاره شده است. بدیهی است کنترل سیلاب و مدیریت بحران ناشی از آن در چنین محیط‌هایی به

مراتب سخت‌تر است زیرا بستر جریان در این محیط‌ها همواره در حال تغییر بوده است و عدم قطعیت آن بسیار بالاست. با این وجود ناگزیر به ارائه راهکارهایی جهت حفاظت از جان و مال مردم هستیم. در طرح‌های کوتاه مدت کنترل سیلاب، انحراف سیلاب در بالادست و قبل از ورود به شهر به عنوان یکی از گزینه‌ها پیشنهاد می‌گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود تورکنیست‌های سیل و رسوب‌گیر و تغذیه مصنوعی در بالادست شهر اجرا شود. در صورت اجرا شدن چنین طرح‌هایی، استفاده بهینه از روناب و تعذیه آبخوان رفسنجان نیز حاصل خواهد شد.

۳. ساخت و سازه‌های غیر مجاز و تصرف بستر رودخانه در بستر رودخانه که گاهی ساختمان‌های دولتی و عام‌المنفعه نیز در بستر رودخانه قرار دارند، فرایند رفع تصرف را سخت‌تر نموده است. چنین مواردی در مطالعات مشابه نیز بیان شده است که به عنوان مثال می‌توان به مطالعات (Jamali et al. (2016 و Rostami et al. (2020 اشاره نمود.

۴. کمبود نیروی انسانی و پلیس رودخانه‌ها به منظور گشت‌زنی مستمر در حریم رودخانه و جلوگیری از تصرف حریم و بستر با توجه به اینکه تخلیه نخاله‌های ساختمانی در وهله اول سبب کاهش ظرفیت ابگذری شده و در گام بعدی زمینه تصرف بستر رودخانه را توسط افراد سودجو فراهم خواهد کرد پیشنهاد می‌شود بحث پلیس رودخانه‌ها فعال شود.

۵. طراحی غیر اصولی سازه‌های تقاطعی (عدم ظرفیت آبگذری کافی، طرح نایمن، زاویه استقرار نامناسب) یکی از دلایل سیل رفسنجان و ورود آب به داخل شهر است. لذا پیشنهاد می‌گردد بازنگری در طرح سازه‌های تقاطعی صورت پذیرد.

۶. سیل بند احداث شده به منظور حفاظت فرودگاه به عنوان یک ابزار تشدید کننده و هدایت جریان به داخل شهر رفسنجان عمل کرده است. لذا پیشنهاد می‌گردد سازه‌هایی که به عنوان ابزار تشدید کننده سیل عمل می‌کنند اصلاح شوند.

۴- نتیجه‌گیری

شاید در گذشته‌ای نه چندان دور جهت انجام یک بازدید میدانی ساده ابزار و امکانات زیادی لازم می‌شد. امروزه توسعه فناوری و دسترسی عموم مردم به تلفن همراه هوشمند، بسیاری از این نیازها را مرتفع نموده است. نرم‌افزارهای زیادی با اهداف گوناگونی توسعه پیدا کرده‌اند. این در حالی است بسیاری از کارشناسان و مهندسان از این قابلیت‌ها بی‌اطلاع بوده و همچنان از GPSهای قدیمی استفاده می‌کنند. در شرایطی که عموماً بازدیدهای میدانی مهندسی رودخانه‌ها در مناطق کوهستانی و صعب‌العبور قرار دارد و علاوه بر ناشناخته بودن مسیر بازدید، داشتن دید کلی از منطقه، عوارض، راه‌ها و سازه‌های پیش‌رو کمک شایانی به کاربر خواهد کرد. خوش‌بختانه آنچه که یک مهندس در بازدید میدانی نیاز پیدا خواهد کرد از جمله تخمین مسیر رسیدن به محل، بررسی کلی توپوگرافی و شیب منطقه، عوارض، جهت و ... با نصب آسان این نرم-

افزار بر روی گوشی همراه امکان پذیر خواهد شد. در این مطالعه پس از رخداد سیلاب مرداد ماه ۱۴۰۱ در شهر رفسنجان با استفاده از مسیر یاب AlpineQuest و بازدید میدانی، نقاط بحرانی ورود سیلاب، مسیرها و خیابانهای متقل کننده جریان و محدوده های درگیر سیل مشخص شدند. پس از انتقال اطلاعات این برنامه به رایانه و همچنین تحلیل نتایج بررسی تصاویر گوگل ارث و ... دلایل ورود سیل به شهر مشخص شد و راهکارهای پیشنهادی ارائه شد.

۵- تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

۶- مراجع

- Akbar, T. A., Javed, A., Ullah, S., Ullah, W., Pervez, A., Akbar, R. A., ... & Mohamed, A. M. (2022). Principal Component Analysis (PCA)–Geographic Information System (GIS) modeling for groundwater and associated health risks in Abbottabad, Pakistan. *Sustainability*, 14(21), 14572.
- Alhamdi, H. M., & Al Thamiry, H. A. (2023). Improving the discharge capacity of the Al Butera River. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1222, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.
- Deak, G., Arvay, M., & Horvath, M. (2021). Using detection dogs to reveal illegal pesticide poisoning of raptors in Hungary. *Journal of Vertebrate Biology*, 69(3), 20110-1.
- Faghihi Rad, S., Amir Yazdani, F., Sharifi Manesh, H., & Idi, Z. (2015). Experiences and lessons learned from the Ilam flood. The fourth national conference on flood management and engineering with an approach to urban floods, Tehran. <https://civilica.com/doc/624282>. (In Persian)
- Green, A. S., Orenge, H. A., Alam, A., Garcia-Molsosa, A., Green, L. M., Conesa, F., ... & Petrie, C. A. (2019). Re-discovering ancient landscapes: Archaeological survey of mound features from historical maps in northwest India and implications for investigating the large-scale distribution of cultural heritage sites in South Asia. *Remote Sensing*, 11(18), 2089.
- Gyeltsen, P., Dorji, T., Tashi, D., Pradhan, S., Tshering, C., & Wangdi, T. (2021) Understanding the dynamics of land use changes: assessment of sustainable land management project sites in Bhutan.
- Hamarashid, R. A., Fiket, Ž., & Mohialdeen, I. M. (2022). Environmental impact of sulaimani steel plant (Kurdistan Region, Iraq) on soil geochemistry. *Soil Systems*, 6(4), 86.
- Heydari, K., Qaradaghi, H., & Javaheri, A. (2018) Investigating the causes and factors of floods in Shiraz city (case study: Koran gate flood in Shiraz in 2018), The second national conference on natural resources and sustainable development in Zagros, Shahrekord. <https://civilica.com/doc/941728>. (In Persian)
- Idepardazan Toseeh Engineering Consultants Company (2021). Consulting, calculation and technical studies of the project of building a retaining wall to organize the rivers inside the city of Rafsanjan (Shor rivers, Sadegh Abad). (In Persian)
- Imeni, S., Sadough, H., Bahrami, S., Mehrabian, A., & Nosrati, K. (2021). Geomorphological controls on vegetation changes: a case study of alluvial fans in southwest of Miami City, Northeastern Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-17.
- Jamali, M., Moghimi, E., Jafarpour, Z., & Kardovani, P. (2016). Effects of physical development and urban land use change on riparian areas (Case Study: Khoshk River in Shiraz City, Iran). *Human Geography Research*, 48(3), 591-602. <https://doi.org/10.22059/jhgr.2016.57372>. (In Persian)

- Kain, C. L., Rigby, E. H., & Mazengarb, C. (2018). A combined morphometric, sedimentary, GIS and modelling analysis of flooding and debris flow hazard on a composite alluvial fan, Caveside, Tasmania. *Sedimentary Geology*, 364, 286-301.
- Karasi, A., & Rathod, A. P. S. (2016). Finding safe path and locations in disaster affected area using Swarm Intelligence. In *2016 International Conference on Emerging Trends in Communication Technologies (ETCT)* (pp. 1-5). IEEE.
- Khoddam, N., Irannejad, P., & Ahmadi-Givi, F. (2015). A study of the impact of Indian Monsoon on summer climate of Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 9(2).
- Mantellini, S. (2019). Survey Around Banbhore. *PATRON-IN-CHIEF*, 65.
- Mehdi Nesab, M. (2019). Investigation of the flood of April 12 in Kashkan watershed in Lorestan province and providing solutions. <https://civilica.com/doc/1472323>. (In Persian)
- Mollaie, Z., Davary, K., Ansary, H., Faridhosseini, A., & Hashminia, S. M. (2019). Preparing flood hazard mapping by using hydraulic model and geomorphologic data set-case study "Ferizy Alluvial fan". *Iranian Water Researches Journal*, 13(1), 19-28.
- Röscher, R. (2021). Training on climate-smart soil and land-use management. *Agriprobe*, 18(4), 46-47.
- Rostami Fathabadi, M., Moghimi, E., & Jafar Biglo, M. (2020). Development of residential areas and flood hazards increasing in present and future (Case study: Nurabad, Lorestan). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9(2), 225-241. <https://doi.org/10.22067/geo.v9i2.87671>. (In Persian)
- Singh, R. N., Green, A. S., Green, L. M., Ranjan, A., Alam, A., & Petrie, C. A. (2018). Between the hinterlands: preliminary results from the Two Rains survey in northwest India 2017. *Man and Environment*, 43(2), 84-102.
- Tarnian, F. A., Arzani, H., & Mirzaei Mosivand, A. (2022). An analysis of the floods of April 2018 in Lorestan province with an emphasis on the role of vegetation and soil in its control. The third national conference of natural resources and sustainable development in Zagros, Shahrekord. <https://civilica.com/doc/1670253>. (In Persian)



Evaluation of the effects of constructed rehabilitation dams on maximum and volume of watershed discharge

Reza Ghazavi*, Ebrahim Omidvar

Faculty of Natural Resources, University of Kashan, Isfahan, Iran.

*Corresponding Author email: ghazavi@kashanu.ac.ir

© The Author(s) 2023

Received: 10 July 2023

Accepted: 30 Aug 2023

Published: 09 Sept 2023

Abstract

In this study, the hydrological processes of Khaveh Watershed located in Markazi province, Iran were simulated and the effect of check dams on floods in this basin was evaluated. To assess the impact of watershed management structures on floods, flood volume and peak discharge with different return periods were calculated. In order to estimate the irrigation rate of Khaveh Watershed, in this study, the method of Justin was studied. Then, flooding situation of Khaveh Watershed was simulated using HEC-HMS model. For this purpose, the flood hydrographs resulting from the design storms with different return periods in the pre- and post-construction states of watershed management structures were compared with each other. The results showed that the constructed dams clearly reduced the peak discharge and flood volume of the region. Based on the results, the construction of corrective structures has reduced the peak flow, increased the base time of the hydrograph and increased the time to the peak of the hydrograph in different return periods. For the 5, 10, 20, 50, and 100-year return periods, the peak is 0.6 to 3.3, 4.9 to 2.7, 9.4 to 1.5, and 6, hours respectively. Discharge decreased to 0.8 and 22.4 to 12.4 cubic meters per second. Also, the base time of the hydrograph for the mentioned return periods increased from 6.8 to 11.2, 9.3 to 0.16, 2/10 to 17.5, 5/10 hours to 18.5 and 10.10 to 29.3 hours. The latency in time-to-peak for hydrographs due to the construction of structures was approximately 3.5 h.

Keywords: Check dams, Discharge peak, Flood, Khaveh



ارزیابی اثرات احداث بندهای اصلاحی آبخیزداری بر دبی پیک و حجم سیلاب

رضا قضاوی^{*}، ابراهیم امیدوار

دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، اصفهان، ایران

^{*}ایمیل نویسنده مسئول: ghazavi@kashanu.ac.ir

© The Author(s) 2023

چاپ: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۹

چکیده

مهار سیلاب‌ها از طریق احداث سدهای اصلاحی یکی از روش‌های تامین آب شیرین است. در این مطالعه، تأثیر سدهای اصلاحی بر روی سیل در حوضه آبخیز خاوه واقع در استان مرکزی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی اثرات احداث سازه‌های آبخیزداری، حجم سیلاب و دبی اوج با دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه شد. به منظور برآورد میزان آب‌دهی حوضه آبخیز خاوه، در این مطالعه روش‌های تورک، انجمن کشاورزی هند و جاستین بررسی شد. سپس با استفاده از مدل HEC-HMS وضعیت سیل‌خیزی حوضه آبخیز خاوه شبیه‌سازی شد. بدین‌منظور هیدروگراف سیل حاصل از رگبارهای طراحی با دوره بازگشت‌های مختلف در حالت‌های قبل و بعد از اجرای سازه‌های آبخیزداری با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که بندهای اصلاحی احداث شده به وضوح دبی پیک و حجم سیلاب‌های منطقه را کاهش داده است. بر اساس نتایج حاصل احداث سازه‌های اصلاحی باعث کاهش دبی اوج، افزایش زمان پایه هیدروگراف و افزایش زمان تا اوج هیدروگراف در دوره بازگشت‌های مختلف شده است. به‌طوری‌که برای دوره بازگشت‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله دبی اوج به‌ترتیب از ۰/۶ به ۰/۳، ۰/۳ به ۴/۹ به ۲/۷، ۹/۴ به ۵/۱، ۱۴/۶ به ۸/۰ و ۲۲/۴ به ۱۲/۴ متر مکعب بر ثانیه کاهش یافته است. همچنین زمان پایه هیدروگراف برای دوره بازگشت‌های ذکر شده به ترتیب از ۶/۸ به ۱۱/۲، ۹/۳ به ۱۶/۰، ۱۰/۲ به ۱۷/۵، ۱۰/۵ به ۱۸/۵ و ۱۰/۸ به ۲۹/۳ ساعت افزایش یافته است. میزان تأخیر در زمان تا اوج برای هیدروگراف‌ها در اثر احداث سازه‌ها نیز حدود ۳/۵ ساعت بوده است. میزان آورد کل حوضه مورد مطالعه بر اساس محاسبات معادل ۱/۵۱ میلیارد مترمکعب و حجم رواناب مازاد بر ظرفیت خالی مخزن‌ها در شرایط کنونی معادل ۱/۳۲ میلیارد مترمکعب برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: سدهای اصلاحی، دبی پیک، سیلاب، خاوه

۱-مقدمه

با توجه به محدودیت و ثابت بودن میزان آب شیرین تجدیدپذیر در مناطق مختلف کره زمین، با افزایش جمعیت میزان سرانه آب شیرین قابل دسترس کاهش یافته است (Mirzavand et al., 2015). از طرفی با توسعه صنعت و تمدن بشر، میزان نیاز آبی انسان‌ها نیز افزایش چشم‌گیری داشته است. از سوی دیگر، با وجود خشکسالی‌های شدید و کمبود جدی آب شیرین در کشور، هر ساله شاهد سیلاب‌های ویران‌گر غیرطبیعی ناشی از تغییر کاربری اراضی و به‌خصوص توسعه مناطق شهری هستیم که آثار زیان‌بار فراوانی در بخش‌های مهم عمرانی و اقتصادی کشور، از قبیل کشاورزی، دامداری، آب و برق، راه و ارتباطات، مسکن و منابع طبیعی و ... به جای می‌گذارد (Sayyad et al., 2021). در ۴۰ سال گذشته بیشتر از ۳۷۰۰ واقعه سیل در کشور به ثبت رسیده است که از این بین ۵۲ درصد آن مربوط به ۱۰ سال اخیر است (Saraie et al., 2020). ایران در سیل سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ از بین ۳۱ استان در کشور، ۲۵ استان دچار سیل شده و ۲۳۵ شهر خسارت دیده‌اند (Zayyari et al., 2020). بیشترین تعداد سیل در بین شهرستان‌های استان اصفهان مربوط به شهرستان‌های اصفهان، اردستان و کاشان بوده است. در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت و نتیجتاً با افزایش درخواست برای آب، میزان برداشت از منابع آب موجود در حوضه‌های آبخیز افزایش یافته و این امر موجب کاهش کمیت و کیفیت منابع آب، تخریب سرزمین و کاهش کیفیت آب و هوا شده است (Gain & Wada 2014)، ولی با گذشت زمان و حادث شدن شرایط، همه مردم و دولت‌ها خواستار توقف روند تخریب هستند (Werner, 2013). در کشورهای توسعه یافته و به طور کم رنگ‌تر در کشورهای در حال توسعه، بسیاری از ساکنان حوضه‌های آبخیز با ایجاد تشکلهای مردمی به سازمان‌هایی جهت محافظت از منابع طبیعی تبدیل شده‌اند و در پاسخ به فعالیت‌های عمومی، دولت‌ها نیز در حمایت از تلاش‌های محلی برای حفاظت از منابع طبیعی تلاش می‌کنند. در این بین سازمان‌دهی تلاش‌ها در بخش‌های دولتی و مردمی نقش حیاتی در موفقیت فعالیت‌ها دارد و این مهم از طریق مدیریت استراتژیک حوضه‌های آبخیز، استفاده از متخصصان علمی و فنی موجود در ارگان‌های دولتی و غیردولتی و استفاده صحیح و به‌جا از منابع محقق می‌شود (Alemu, 2016).

اجرای طرح‌های آبخیزداری نقطه شروع حفاظت از منابع طبیعی هستند که ضمن تعدیل اثرات تغییرات اقلیمی و کنترل رواناب‌های حاصل از بارندگی‌های شدید، باعث اصلاح خصوصیات هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز و جلوگیری از تخریب منابع ملی می‌شوند (Ahmadipour & Yasi 2014). با ارزیابی کمی این طرح‌ها می‌توان میزان بازدهی این عملیات را در حوضه‌های آبخیز بررسی نمود. بنابراین به منظور درک میزان اثربخشی طرح‌های آبخیزداری اجرا شده در حوضه، باید این عملیات مورد ارزیابی قرار گیرد تا بتوان بر اساس نتایج به دست آمده ضمن تعیین راندمان این عملیات، در خصوص اجرای طرح‌های مشابه در سایر حوضه‌های آبخیز نیز تصمیم‌گیری نمود. در مورد تأثیر احداث سدهای اصلاحی^۱ بر بیلان آبی حوضه‌های آبخیز مطالعات مختلفی در سطح جهان انجام شده است. (Gain & Wada (2014) در مطالعه‌ای تأثیر سد فاراککا^۲ را بر آستانه رژیم جریان هیدرولوژیک حوضه رودخانه گنگ^۳ مورد ارزیابی قرار دادند. آنها آستانه جریان را با استفاده از

¹ check dams

² Farakka

³ Ganges

بیست و دو پارامتر محدوده تغییرپذیری^۴ محاسبه نمودند. در ادامه با مقایسه پارامترهای آستانه در دوره قبل از احداث سد (از سال ۱۹۳۴ تا ۱۹۷۴) و دوره پس از احداث سد (۱۹۷۵-۲۰۰۵) تأثیر سد بر جریان رودخانه را محاسبه نمودند. نتایج نشان داد که با توجه به انحراف آب توسط سد، پارامترهای آستانه مختلف از جمله میانگین ماهانه فصل خشک و حداقل جریان سالانه، به طور قابل توجهی تغییر یافته‌است. (Li et al. (2017 تغییرات رژیم جریان حاصل از ساخت سدها را در حوضه رودخانه مکونگ^۵ مورد بررسی قرار دادند. آنها داده‌های جریان را به سه دوره تقسیم کردند. دوره قبل از تأثیر (۱۹۶۰ - ۱۹۹۱)، دوره انتقال (۱۹۹۲ - ۲۰۰۹) و دوره پس از تأثیر (۲۰۱۰ - ۲۰۱۴). رژیم جریان را با استفاده از معیارهای eco-flow و شاخص‌های تغییر هیدرولوژیک مورد بررسی قرار دادند. بر طبق نتایج این تحقیق ساختن و پر شدن سدهای بالادست، جریان سالیانه را در ایستگاه چیانگ سائ^۶ کاهش داد، در حالی که هیچ اثر مشخصی در ایستگاه پایین دست ترنگ^۷ نداشت. ساخت سدها جریان رودخانه را در فصول مرطوب کاهش داده و در فصل‌های خشک افزایش داده‌است، که منجر به تغییرات فصلی جریان رودخانه در ایستگاه هیدرومتری چیانگ^۸ در سال ۲۰۱۰ تا سال ۲۰۱۴ می‌شود. در دوره انتقال تغییرات آب و هوایی جریان سالیانه را ۲۸/۲۹ درصد تغییر داده در حالی که فعالیت‌های انسانی در دوره پس از تأثیر جریان سالیانه را ۶۱/۸۸ درصد تغییر داده‌است (Sultan et al. (2017 اثر احداث سدهای اصلاحی بر کاهش دبی اوج سیلاب در حوضه آبخیز منشاد یزد را مورد مطالعه قرار دادند و بیان نمودند که نتایج شبیه سازی تأثیر سازه‌ها بر کاهش دبی اوج به طور متوسط ۹/۸۲ درصد و بر حجم سیل ۷/۷۵ درصد بوده‌است. از طرفی با افزایش دوره بازگشت سیلاب، تأثیر سازه‌ها بر کاهش دبی اوج و حجم سیلاب کاهش یافته‌است.

(Lu et al. (2018 برای بررسی اثرات ساخت سدهای کوتاه بر روی تغییرات هیدرولوژیک دو رودخانه در حوضه جیولونگ^۹ از مدل هیدرولوژیک GBHM و روش post bias correction method استفاده کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که در رودخانه غربی شاخص‌هایی همچون جریان پایه، حداقل جریان چند روزه و زمان دبی‌های حداکثر افزایش یافته و حداکثر جریان چند روزه و تعداد دبی‌های کم کاهش یافته‌است. همچنین در رودخانه شمالی تعداد دبی‌های کم افزایش و شاخص‌های حداقل جریان چند روزه و زمان دبی‌های کم کاهش یافته‌است. (Sultan et al. (2017 به منظور بررسی تأثیر عملیات حفاظت آب و خاک بر میزان رواناب در اتیوپی حوضه‌های جفتی کاسیری (با عملیات حفاظتی) و آکوستی (بدون عملیات حفاظتی) را در نظر گرفتند. سپس به منظور بررسی اثر سناریوهای مختلف عملیات حفاظتی بر میزان رواناب در حوضه کاسیری از مدل شماره منحنی استفاده کردند. نتایج نشان داد که رواناب دو حوضه متفاوت است. از سوی دیگر، نتایج پیش‌بینی مدل نشان داد که تحت عملیات حفاظتی فعلی در کاسیری، میزان رواناب فصلی ۵/۲ درصد کاهش می‌یابد. آنها نتیجه گرفتند که اگر باندهای خاکی در زمین‌های تحت کشت و ترانشه‌ها بر روی چراگاه‌ها و زمین‌های کشت شده نصب

⁴ RVA

⁵ Mekong

⁶ Saen

⁷ Treng

⁸ Chiang

⁹ Jiulong

شود، رواناب حوضه آبخیز کاسیری می‌تواند به میزان ۳۴ درصد کاهش یابد. در مقابل، اجرای اقدامات حفاظتی در زمین‌های بوته‌کاری و جنگل‌های طبیعی تأثیر کمی در کاهش رواناب دارد.

به‌طور کلی هدف از فرآیند مدیریت حوضه‌های آبخیز این است که به مردم محلی و بهره‌برداران اطمینان داده شود که منابع آب و منابع مرتبط به آن به شکلی مدیریت می‌شود که در نهایت ضمن تأمین سلامت محیط زیست، منافع اجتماعی و اقتصادی ذی‌نفعان را نیز فراهم خواهد کرد (Mengistu et al. 2022). در فرآیند مدیریت راهبردی تلاش می‌شود تا با شناسایی نقاط ضعف و نقاط قوت موجود در سیستم، از فرصت‌های موجود استفاده کرده، تهدیدها را به حداقل رسانده و در نهایت در حد امکان تهدیدها نیز به فرصت تبدیل شوند (Salehpour Jam et al. 2021). از جمله عوامل انسانی موثر بر فرایندهای هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز، اجرای طرح‌های مختلف مدیریتی و اصلاحی آبخیزداری است. هدف از انجام این مطالعه ارزیابی اثرات هیدرولوژیک سدهای اصلاحی احداث شده در حوضه آبخیز خاوه واقع در استان مرکزی بر سیل-خیزی حوضه مورد مطالعه است.

۲- مواد و روش

۲-۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز مورد مطالعه

حوضه آبخیز خاوه در مرکز ایران، جنوب استان مرکزی و شمال غربی شهرستان کاشان واقع شده است. این حوضه، از نظر مختصات جغرافیایی در حد فاصل $50^{\circ} 54' 17''$ تا $50^{\circ} 58' 35''$ طول شرقی و $34^{\circ} 03' 28''$ تا $39^{\circ} 09' 02''$ عرض شمالی واقع شده است. مساحت، محیط و طول حوضه آبخیز خاوه به ترتیب برابر با $2819/30$ هکتار، $38/80$ کیلومتر و $11/12$ کیلومتر است. لذا با توجه به تقسیم‌بندی‌های متداول، حوضه آبخیز خاوه جزء حوضه‌های کوچک محسوب می‌شود. میزان بارش در فصل‌های پاییز، زمستان، بهار و پاییز در منطقه به ترتیب برابر $24/9$ ، $38/49$ ، $33/88$ و $2/73$ درصد بوده است. در منطقه مورد مطالعه بیشترین بارش در فروردین ماه و کمترین میزان بارش در مرداد ماه ثبت شده است.

۲-۲- روش تحقیق

در این مطالعه جهت برآورد میزان آبدهی حوضه آبخیز مورد مطالعه از رویکرد منطقه‌ای و روش جاستین استفاده شد. بر اساس تعریف در رویکرد منطقه‌ای، پیش‌بینی رواناب در حوضه‌های فاقد آمار از طریق انتقال اطلاعات از حوضه دارای آمار به حوضه فاقد آمار انجام می‌شود. در این روش فرض بر این است حوضه‌های با خصوصیات فیزیکی مشابه پاسخ هیدرولوژیکی مشابهی دارند. بنابراین این کار، با انتقال پارامترهای بهینه از حوضه دارای آمار به حوضه فاقد آمار و بر اساس شباهت فیزیکی بین دو حوضه صورت می‌گیرد.

روش تجربی جاستین، یکی از روش‌هایی است که برای تخمین آورد سالانه در حوضه‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری استفاده می‌شود. این روش بر پیش‌فرض عملکرد مشابه حوضه‌ها استوار است. در این روش ابتدا در منطقه مجاور محدوده مطالعاتی، حوضه‌ای که دارای ایستگاه هیدرومتری باشد در نظر گرفته می‌شود و بر اساس داده‌های آن حوضه، ضریب منطقه‌ای K

می‌شود. سپس با فرض نمودن ضریب منطقه‌ای K برای حوضه فاقد آمار، ارتفاع رواناب سالانه آن حوضه نیز به دست می‌آید. با توجه به بررسی‌های انجام شده، ایستگاه هیدرومتری بن‌رود در منطقه دارای آمار کامل بود و طول دوره آماری داده‌های موجود برای این ایستگاه نیز در برگیرنده طول دوره آماری داده‌های هواشناسی استفاده شده در این مطالعه بود. بنابراین، این ایستگاه به عنوان ایستگاه مبنا برای محاسبه آورد حوضه آبخیز خاوه با استفاده از روش جاستین انتخاب شد. با قرار دادن مشخصات زیرحوضه‌های حوضه آبخیز خاوه و ضریب K به دست آمده در رابطه جاستین با استفاده از آمار ایستگاه بن رود، ارتفاع رواناب حوضه آبخیز خاوه به دست آمد و بر اساس آن حجم رواناب و دبی متوسط سالانه محاسبه شد. برآورد مقدار سیلاب حداکثر حوضه‌های آبخیز، بخش مهمی از مطالعات هیدرولوژی در بررسی عملکرد فعالیت‌های آبخیزداری است. در این ارتباط لازم است تأثیر اجرای عملیات آبخیزداری به خصوص فعالیت‌های سازه‌ای بر تغییرات هیدروگراف سیل برای دوره‌های بازگشت‌های مختلف در قبل و بعد از انجام عملیات آبخیزداری، مشخص شود. به منظور برآورد تغییرات دبی پیک سیل و شکل هیدروگراف می‌توان از مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده کرد.

در مطالعه حاضر با استفاده از مدل HEC-HMS وضعیت سیل‌خیزی حوضه آبخیز خاوه شبیه‌سازی شد. بدین منظور هیدروگراف سیل حاصل از رگبارهای طراحی با دوره بازگشت‌های مختلف در حالت‌های قبل و بعد از اجرای سازه‌های آبخیزداری با یکدیگر مقایسه شد. بر اساس مطالعات انجام شده وقتی سدهای حادثی روی آبراهه‌ها از رسوب پر شود، شیب آبراهه اصلی به شیب حد (معادل یک دوم شیب آبراهه قبل از احداث سازه) می‌رسد و با عنایت به این‌که تقریباً همه سدهای احداث شده روی دو آبراهه موجود در حوضه خاوه تقریباً از رسوب پر شده‌اند، در این مطالعه نیز زمان تمرکز برای حالتی که شیب آبراهه به نصف رسیده است محاسبه و هیدروگراف سیلاب بر اساس این شیب شبیه‌سازی شد. در این حالت زمان تاخیر حوضه دو برابر حالت قبل از احداث سازه‌ها شده است. مقادیر زمان تاخیر محاسبه شده برای زمان قبل و بعد از اجرای عملیات اصلاحی در جدول (۱) ارائه شده است. برای آماده‌سازی داده‌های ورودی مدل HMS-HEC، شماره منحنی (CN) متوسط وزنی زیرحوضه‌ها، با تلفیق نقشه کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک و با استفاده از جدول تعیین شماره منحنی به دست آمد. همچنین مقادیر CN هر یک از زیرحوضه‌ها و حوضه آبخیز خاوه نیز در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. شماره منحنی، زمان‌های تمرکز و تاخیر حوضه آبخیز خاوه در قبل و بعد از احداث سازه‌ها

Table 1. Curve number, concentration times, and lag times of Khavveh watershed before and after construction of structures

نام واحد کاری	CN	زمان تاخیر (دقیقه)	
		قبل از احداث سازه‌ها	بعد از احداث سازه‌ها
Kh1	۸۰/۶۲	۹۷/۹۳	۱۹۵/۸۴
Kh2	۸۰/۶۶	۵۴/۹۴	۱۰۹/۸
Khint	۸۳/۳۹	۳۱/۹۷	۵۳/۳۸
کل حوزه آبخیز	۸۰/۸۲	۱۱۸/۷۴	۲۷۳/۴۶

برای تعیین میزان بارش طرح در زمانی معادل زمان تمرکز حوضه برای دوره بازگشت‌های مختلف از منحنی‌های شدت مدت فراوانی استفاده شد و مقدار بارش طرح با توجه به تداوم آن و دوره بازگشت آن مشخص گردید. با توجه به نتایج بررسی‌های فیزیوگرافی، زمان تمرکز حوضه و زیرحوضه‌های خاوه معادل مقدار محاسبه شده از روش برانسی - ویلیامز در نظر گرفته شد تا همه حوضه را پوشش دهد. میزان بارش در دوره بازگشت‌های مختلف و برای زمان تمرکز ۳/۲۹۸ ساعت برای کل حوضه آبخیز خاوه در نظر گرفته شد (جدول ۲).

جدول ۲. بارش با دوره بازگشت‌های مختلف در زمانی معادل زمان تمرکز حوضه آبخیز خاوه

Table 2. Precipitation with different return periods at times equivalent to concentration times of Khavveh watershed

دوره بازگشت (سال)	۵	۱۰	۲۰	۵۰	۱۰۰
ارتفاع بارش (mm)	۱۶/۱۹	۲۴/۳۷	۲۹/۷۶	۳۴/۹۱	۴۱/۵۳

پس از به‌دست آوردن ارتفاع بارش با تداوم برابر با زمان تمرکز در دوره بازگشت‌های مختلف، به‌منظور توزیع زمانی بارش طرح از الگوی توزیع زمانی بارش مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده شد و بر این اساس هایتوگراف بارش برای ورود به مدل تهیه گردید. سپس با استفاده از مقادیر به‌دست آمده بارش طرح، مدل HEC-HMS اجرا شد و هیدروگراف سیل در دوره بازگشت‌های ۵ تا ۱۰۰ سال برای هر یک از شرایط قبل و بعد از انجام اقدامات آبخیزداری حاصل شد و میزان تغییر دبی اوج و حجم سیلاب و در نتیجه اثربخشی اقدامات صورت گرفته بر هیدروگراف سیل حوضه مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- برآورد حجم رواناب سالانه

دبی متوسط زیرحوضه‌های Kh1، Kh2 و Khint (شکل ۱) بر اساس روش جاستین به ترتیب برابر ۳۶/۱۵، ۹/۱۶ و ۲/۴۳ لیتر بر ثانیه و حجم رواناب سالانه زیر حوضه‌ها به ترتیب برابر ۱/۱۴، ۰/۲۹ و ۰/۰۸ میلیون متر مکعب برآورد شده است. حجم رواناب سالانه کل حوضه آبخیز خاوه برابر با ۱/۵۱ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود. دبی متوسط سالانه برای کل حوضه آبخیز خاوه معادل ۴۷/۵۰ لیتر بر ثانیه برآورد شده است.

شکل ۱. زیر حوضه‌های حوضه آبخیز خاوه

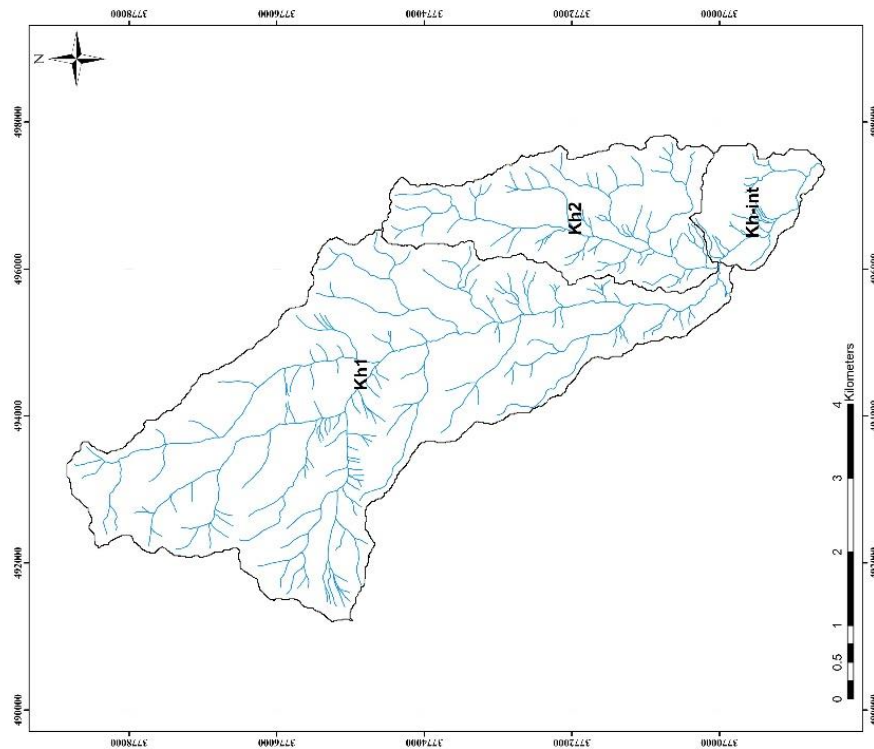


Fig 1. Sub-basins of the Khaveh watershed

۳-۲- برآورد دبی پیک سیلاب

پس از محاسبه دبی پیک سیلاب زیرحوضه‌های حوضه آبخیز خاوه، هیدروگراف سیل هر زیر حوضه و کل حوضه آبخیز خاوه بر اساس بارش طرح با دوره بازگشت‌های مختلف، از روش SCS با استفاده از مدل HEC-HMS شبیه‌سازی شد. شکل (۲) خروجی مدل حوضه آبخیز خاوه برای بارش طرح با دوره بازگشت ۵۰ سال (۳۴/۹۱ میلی‌متر) در وضعیت کنونی (بعد از احداث سازه‌ها) را نشان می‌دهد.

شکل ۲. هیدروگراف سیل خروجی حوضه آبخیز خاوه برای دوره بازگشت ۵۰ سال با وجود سدهای اصلاحی

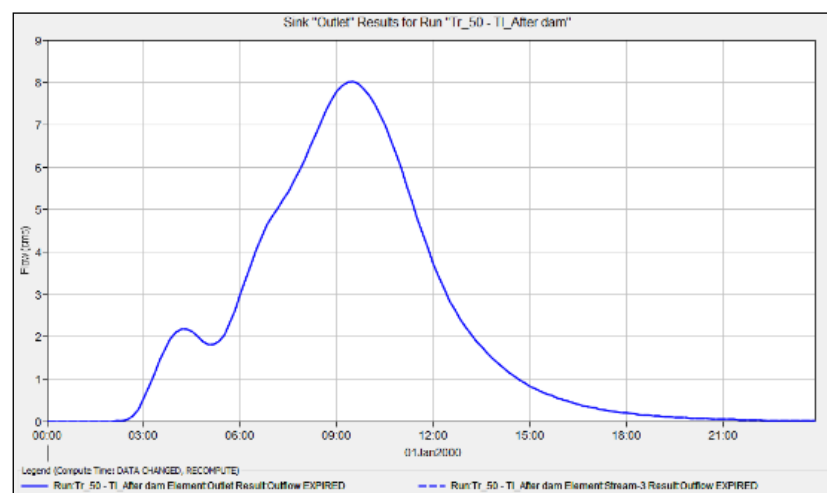


Fig 2. Flood hydrograph for a 50-year return period in Khaveh watershed with existing corrective dams

بر اساس نتایج حاصل، برای یک بارش ۳۴/۹۱ میلیمتری (بارش طرح در دوره بازگشت ۵۰ سال)، حجم کل رواناب حاصل از این بارش ۹۸۴ هزار مترمکعبی برابر ۱۷۷/۵ هزار مترمکعب برآورد شده که معادل ۶/۳ میلیمتر است. بنابراین ضریب رواناب نیز برای کل حوضه ۱۸ درصد به دست آمد.

۳-۳- بررسی تأثیر سدهای اصلاحی بر بیلان

با توجه به ظرفیت ذخیره‌سازی موقت آب توسط سدهای اصلاحی و کاهش شیب در آبراهه‌هایی که روی آن سدها احداث شده‌اند، دبی در هیدروگراف سیل در نقطه خروجی حوضه‌ها کاهش می‌یابد. به‌منظور ارزیابی تأثیر سدهای اصلاحی، هیدروگراف سیل برای بارش‌های با تداومی برابر با زمان تمرکز حوضه در دوره بازگشت‌های مختلف در حالت قبل و بعد از احداث سازه‌ها (با فرض زمان تاخیر دو برابر حالت قبل از احداث)، با استفاده از مدل HEC-HMS شبیه‌سازی شد. شکل (۳) هیدروگراف‌های خروجی مدل برای دوره بازگشت‌های ۱۰۰ ساله را در حالت‌های قبل و بعد از احداث سازه‌ها را نشان می‌دهد.

شکل ۳- هیدروگراف سیل برای حالت قبل و بعد از احداث سدهای اصلاحی

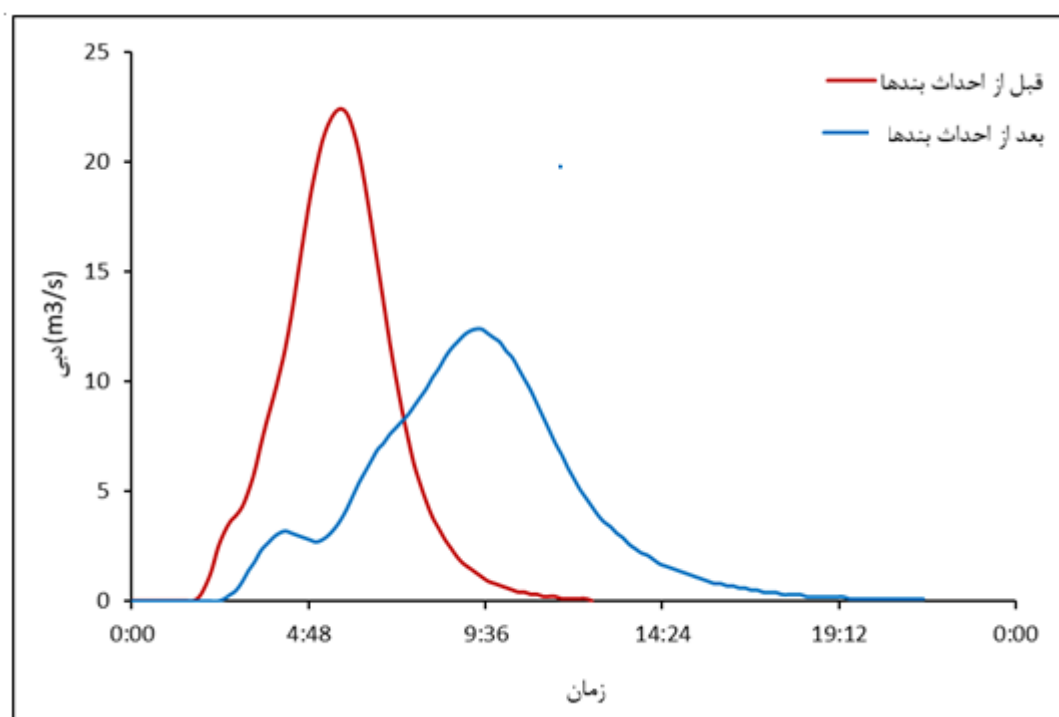


Fig 3. Flood hydrograph comparison for pre- and post-construction states of corrective dams

بر اساس نتایج حاصل احداث سازه‌های اصلاحی باعث کاهش دبی اوج، افزایش زمان پایه هیدروگراف و افزایش زمان تا اوج هیدروگراف در دوره بازگشت‌های مختلف شده است. به‌طوری‌که برای دوره بازگشت‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله دبی اوج به‌ترتیب از ۰/۶ به ۳/۳، ۴/۹ به ۲/۷، ۹/۴ به ۵/۱، ۱۴/۶ به ۸/۰ و ۲۲/۴ به ۱۲/۴ متر مکعب بر ثانیه کاهش یافته است. همچنین زمان پایه هیدروگراف برای دوره بازگشت‌های ذکر شده به ترتیب از ۶/۸ به ۱۱/۲، ۹/۳ به ۱۶/۰، ۱۰/۲ به ۱۷/۵، ۱۰/۵ به ۱۸/۵ و ۱۰/۸ به ۲۹/۳ افزایش یافته است (شکل‌های ۴ و ۵). میزان تأخیر در زمان تا اوج برای هیدروگراف‌ها در اثر

احداث سازه‌ها حدود ۳/۵ ساعت بوده است. این نتایج با نتایج (Sultan et al. (2017 مبنی بر اثر احداث سدهای اصلاحی بر کاهش دبی اوج سیلاب در حوضه آبخیز منشاد یزد همخوانی دارد.

شکل ۴- تغییرات دبی اوج هیدروگراف سیل حوضه آبخیز خاوه برای دوره بازگشت‌های مختلف قبل و بعد از احداث سدهای اصلاحی

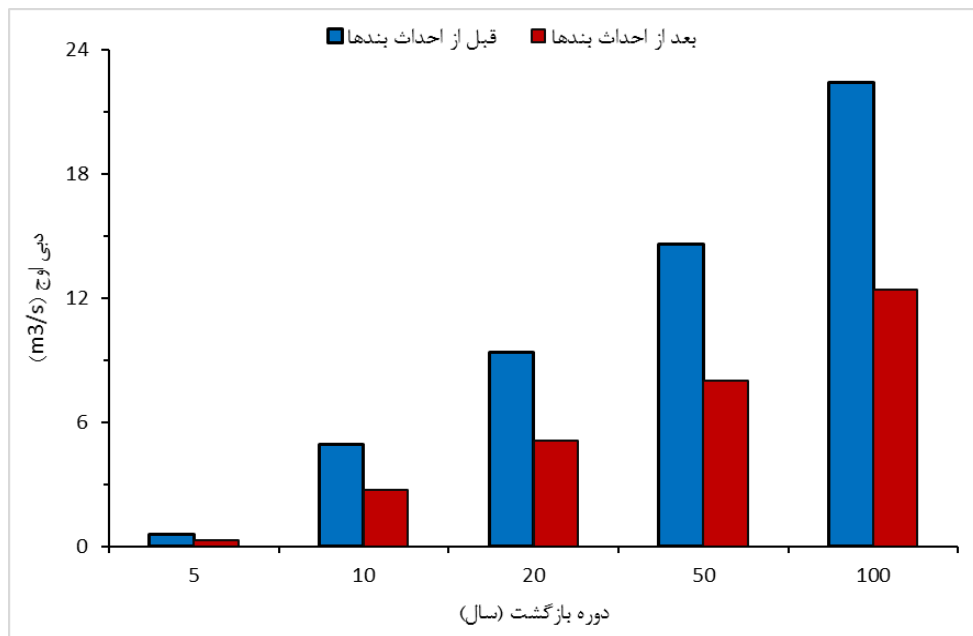


Fig 4. Peak flow changes in flood hydrograph of Khaveh watershed for different return periods before and after construction of corrective dams

شکل ۵- تغییرات زمان پایه برای دوره بازگشت‌های مختلف قبل و بعد از احداث سدهای اصلاحی

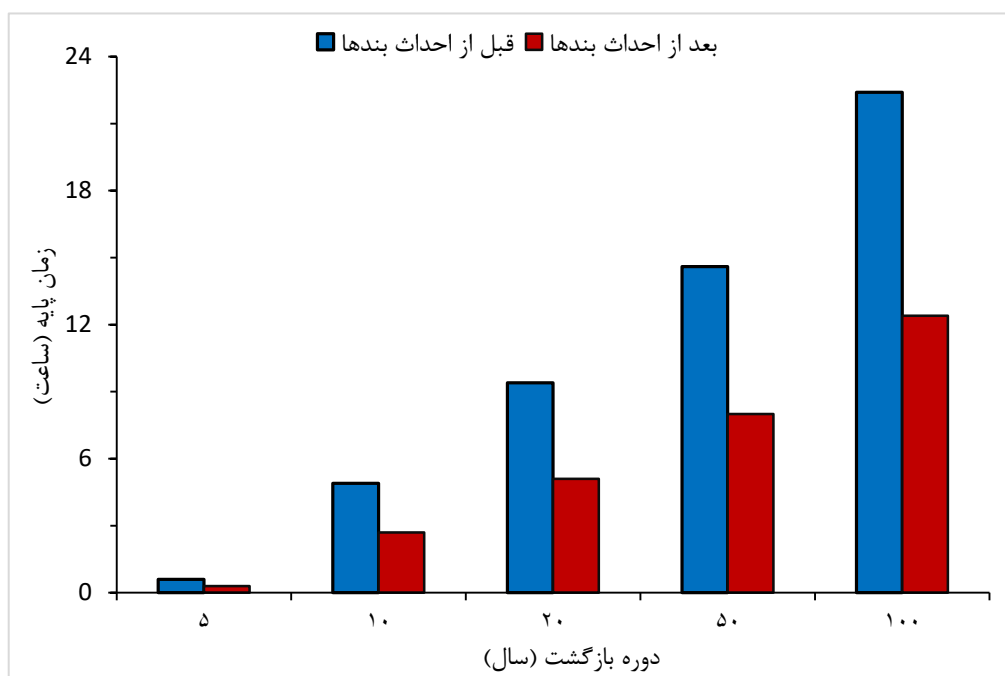


Fig 5. Base time changes for different return periods before and after construction of corrective dams

۳-۴- تأثیر سدهای اصلاحی روی حجم سیلاب

به منظور بررسی تأثیر احداث سدهای اصلاحی در حوضه آبخیز خاوه حجم مخزن سدها در دو سناریو خالی بودن کامل سدها و وضعیت کنونی (رسوب‌گیری شده) مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور حجم آورد ماهانه هر یک از زیرحوضه‌ها محاسبه شد و با فرض این‌که تا ماه بعد رواناب ذخیره شده پشت سد نفوذ کرده یا تخلیه شده است، حجم سیلاب خروجی هر یک از زیرحوضه‌ها محاسبه شد (حجم آورد ماهانه حوضه منهای مجموع حجم مخزن سدها). بر اساس محاسبات فصل سوم در گزارش شماره ۲ حجم کل مخزن سدهای احداث شده روی آبراهه ۱ (زیرحوضه Kh1) در حالتی که هیچ رسوبی تله‌اندازی نشده بود (زمان احداث) برابر ۱۹/۹۹ هزار مترمکعب و در وضعیت کنونی رسوب‌گیری شده (۰/۷۷ هزار متر مکعب محاسبه شد. برای آبراهه شماره ۲ (زیرحوضه Kh2) حجم مخزن خالی پشت سدها برابر ۴۶/۹۸ هزار مترمکعب و در وضعیت فعلی برابر ۱۲/۵۲ هزار مترمکعب محاسبه شد. با توجه به این‌که روی آبراهه شماره ۳ (زیرحوضه Khint) هیچ‌گونه سد اصلاحی احداث نشده است، کل آورد آن به عنوان دبی خروجی از این زیرحوضه در نظر گرفته شد (جدول ۳).

جدول ۳. آورد ماهانه زیر حوضه‌های حوضه آبخیز خاوه (هزار مترمکعب)

Table 3. Monthly discharge of sub-basins in Khavesh watershed (Thousand cubic meters)

ماه‌ها	Kh1			Kh2		Kh _{int}	
	حجم مازاد بر ظرفیت مخازن		حجم رواناب	حجم مازاد بر ظرفیت مخازن		حجم رواناب	وضعیت کنونی
	سناریو خالی بودن مخزن	وضعیت کنونی		سناریو خالی بودن مخزن	وضعیت کنونی		
مهر	۶۸/۳۵	۴۸/۳۶	۶۷/۵۸	۱۷/۳۹	-۲۹/۵۹	۴/۸۰	۴/۸۷
آبان	۹۸/۴۶	۷۸/۴۷	۹۷/۶۹	۲۵/۰۵	-۲۱/۹۳	۶/۹۱	۱۲/۵۳
آذر	۱۳۵/۶۳	۱۱۵/۶۴	۱۳۴/۸۶	۳۴/۵۰	-۱۲/۴۸	۹/۵۲	۲۱/۹۸
دی	۱۸۱/۵۳	۱۶۱/۵۴	۱۸۰/۷۶	۴۶/۱۸	-۰/۸۰	۱۲/۷۴	۳۳/۶۶
بهمن	۱۶۰/۳۳	۱۴۰/۳۴	۱۵۹/۵۶	۴۰/۷۹	-۶/۱۹	۱۱/۲۵	۲۸/۲۷
اسفند	۹۴/۴۸	۷۴/۴۹	۹۳/۷۱	۲۴/۰۴	-۲۲/۹۴	۶/۶۳	۱۱/۵۲
فروردین	۷۰/۳۸	۵۰/۳۹	۶۹/۶۱	۱۷/۹۰	-۲۹/۰۸	۴/۹۴	۵/۳۸
اردیبهشت	۶۴/۱۱	۴۴/۱۲	۶۳/۳۴	۱۶/۳۱	-۳۰/۶۷	۴/۵۰	۳/۷۹
خرداد	۶۲/۴۹	۴۲/۵۰	۶۱/۷۲	۱۵/۹۰	-۳۱/۰۸	۴/۳۹	۳/۳۸
تیر	۶۹/۸۰	۴۹/۸۱	۶۹/۰۳	۱۷/۷۶	-۲۹/۲۲	۴/۹۰	۵/۲۴
مرداد	۵۳/۸۴	۳۳/۸۵	۵۳/۰۷	۱۳/۷۰	-۳۳/۲۸	۳/۷۸	۱/۱۸
شهریور	۵۹/۷۶	۳۹/۷۷	۵۸/۹۹	۱۵/۲۰	-۳۱/۷۸	۴/۱۹	۲/۶۸
مجموع	۱۱۱۹/۱۵	۸۷۹/۲۷	۱۱۰۹/۹۱	۲۸۴/۷۰	-۲۷۹/۰۶	۷۸/۵۴	۱۳۴/۴۶

بر اساس نتایج حاصل از جدول ۳ حجم کل آورد زیرحوضه Kh1 برابر با ۱/۲ میلیون مترمکعب بوده است که از این میزان حدود ۲۴۰ هزار متر مکعب به وسیله سدهای اصلاحی در سناریو خالی بودن مخزن کنترل شده و حدود ۸۷۹ هزار

مترمکعب از این زیرحوضه به پایین‌دست تخلیه شده است. در وضعیت کنونی که تقریباً کلیه سدهای احداثی روی این آبراهه از رسوب پر شده است حجم مخازن خالی باقی‌مانده در مجموع ۹/۲۴ هزار متر مکعب برآورد شده و بنابراین خروجی این زیرحوضه در حالت کنونی حدود ۱/۱ میلیون مترمکعب است. (Li et al., 2017) در مطالعه‌ای اثر احداث سدهای اصلاحی بر روی رواناب و بار رسوبی حوضه هوانگ فوچوان^{۱۰} در میانه رودخانه زرد را مورد بررسی قرار دادند. برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه و بار رسوبی در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۲ از مدل SWAT استفاده کردند. نتایج نشان داد که در طول دوره ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۹ رواناب و رسوب سالانه به ترتیب ۲۴/۸ و ۲۷/۷ درصد کاهش یافته است در حالی که در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ رواناب ۶۵/۲ درصد و رسوب ۷۸/۳ درصد کاهش داشته‌است.

در زیرحوضه Kh2 حجم کل آورد سالانه زیرحوضه معادل ۲۸۴/۷۰ هزار متر مکعب و حجم مخازن سدها در حالت خالی بودن برابر ۵۶۳/۷۶ هزار مترمکعب برآورد شده است و بنابراین در حالت خالی بودن مخازن حجمی معادل ۲۷۹/۰۶ هزار مترمکعب مازاد بر آورد حوضه وجود دارد. حجم آورد این زیرحوضه در حالت کنونی که تقریباً مخازن بیشتر سدها پر شده است معادل ۱۳۴/۴۶ هزار مترمکعب برآورد شده است. حجم کل آورد زیرحوضه Khint نیز که هیچ سدی روی آن احداث نشده معادل ۷۸/۵۴ هزار مترمکعب برآورد شده است.

میزان آورد کل حوضه بر اساس محاسبات معادل ۱/۵۱ میلیون مترمکعب و حجم رواناب مازاد بر ظرفیت خالی مخزن‌ها در شرایط کنونی معادل ۱/۳۲ میلیون مترمکعب برآورد گردید. به عبارتی ۰/۲ میلیون مترمکعب از رواناب کل حوضه می‌تواند در پشت مخازن سدها ذخیره شود. باید توجه داشت که اگرچه ظرفیت حجمی مخازن به دلیل پر شدن بیشتر سدها ناچیز است ولی سدها در تعدیل جریان و کاهش دبی پیک نقش اصلاحی خود را به طور کامل ایفا می‌کنند.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل، احداث سازه‌های اصلاحی باعث کاهش دبی اوج، افزایش زمان پایه هیدروگراف و افزایش زمان تا اوج هیدروگراف در دوره بازگشت‌های مختلف شده است. به‌طوری‌که برای دروه بازگشت‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله دبی اوج به ترتیب از ۰/۶ به ۳/۴، ۴/۹ به ۲/۷، ۹/۴ به ۵/۱، ۱۴/۶ به ۸/۰ و ۲۲/۴ به ۱۲/۴ متر مکعب بر ثانیه کاهش یافته است. همچنین زمان پایه هیدروگراف برای دوره بازگشت‌های ذکر شده به ترتیب از ۶/۸ به ۱۱/۲، ۹/۳ به ۱۶/۰، ۱۰/۲ به ۱۷/۵، ۱۰/۵ به ۱۸/۵ و ۱۰/۸ به ۲۹/۳ افزایش یافته است. میزان تأخیر در زمان تا اوج برای هیدروگراف‌ها در اثر احداث سازه‌ها حدود ۳/۵ ساعت بوده است.

۵- تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

¹⁰ Huangfuchuan

۶- مراجع

- Ahmadipour, Z., & Yasi, M. (2014). Evaluation of Eco-hydrology-hydraulics methods for environmental flows in rivers (Case study: Nazloo River, Urmia Lake Basin). *Journal of Hydraulics*, 9(2), 69-82. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2014.8561>. (In Persian)
- Alemu, M. M. (2016). Integrated watershed management and sedimentation. *Journal of Environmental Protection*, 7(4), 490-494.
- Gain, A. K., & Wada, Y. (2014). Assessment of future water scarcity at different spatial and temporal scales of the Brahmaputra River Basin. *Water Resources Management*, 28, 999-1012.
- Li, D., Long, D., Zhao, J., Lu, H., & Hong, Y. (2017). Observed changes in flow regimes in the Mekong River basin. *Journal of Hydrology*, 551, 217-232.
- Lu, W., Lei, H., Yang, D., Tang, L., & Miao, Q. (2018). Quantifying the impacts of small dam construction on hydrological alterations in the Jiulong River basin of Southeast China. *Journal of Hydrology*, 567, 382-392.
- Mengistu, F., & Assefa, E. (2022). Local perception of watershed degradation in the upper Gibe basin, southwest Ethiopia: implications to sustainable watershed management strategies. *International Journal of River Basin Management*, 20(2), 235-254.
- Mirzavand, M., Ghasemich, H., Sadatinejad, S., Akbari, M. (2015). Comparison of artificial neural network (ANN) and multi variable regression analysis (MRA) models to predict ground water quality changes (Case study: Kashan Aquifer. *Water and Soil Science*, 25(2), 207-220. (In Persian)
- Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J., & Tabatabaei, M. R. (2021). Management responses for Chehel-Chay watershed health improvement using the DPSIR framework. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 23(4), 797-811.
- Saraie, B., Talebi, A., Mazidi, A., & Parvizi, S. (2020). Prioritization of Sardab-Rood watershed from flooding viewpoint using the SWAT model. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 9(23), 85-98. <https://doi.org/10.22111/jneh.2019.29033.1500>. (In Persian)
- Sayyad, D., Ghazavi, R., & Omidvar, E. (2021). Preparation and analysis of flood risk map using HEC RAS and RAS MAPPER hydraulic model (Case study: Sok Cham river of Kashan). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(3), 19-37. <https://doi.org/10.22067/geoch.2021.69554.1038>. (In Persian)
- Sultan, D., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Adgo, E., Tsubo, M., Meshesha, D. T., .. & Ebabu, K. (2017). Analyzing the runoff response to soil and water conservation measures in a tropical humid Ethiopian highland. *Physical Geography*, 38(5), 423-447.
- Werner, A. D., Bakker, M., Post, V. E., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., ... & Barry, D. A. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, 51, 3-26.
- Zayyari, K., Ebrahimipoor, M., Pourjafar, M. R., & salehi, E. (2020). Explaining strategies for increasing physical resilience against flood case study: Cheshmeh Kile River, Tonekabon River. *Sustainable City*, 3(1), 89-105. <https://doi.org/10.22034/jsc.2019.186626.1014>. (In Persian)



Reviewing methods of analysis and evaluation of seismic safety of arched concrete dams

Mohammadreza Fadaei-Tehrani^{1*}, Elham Ybarehpour²

¹ Niro Research Institute (NRI), Tehran, Iran.

² Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

*Corresponding Author email: mfadaei@nri.ac.ir

© The Author(s) 2023

Received: 12 July 2023

Accepted: 05 Sept 2023

Published: 09 Sept 2023

Abstract

Arched concrete dams are three-dimensional structures that, in terms of their special shape resembling a huge shell, transfer the water pressure from the tank to their stone supports. Besides the forces of weight, hydrostatic pressure and thermal stresses, another significant force that the dam's structural system must withstand is the dynamic forces generated by earthquakes. In such dams, there is a possibility of non-linear behavior due to the change in the location of the two faces of the contraction joints, cracking, corrosion, or non-linear behavior of the concrete of the dam body depending on the intensity of the earthquake. Dynamic analysis of time history, assuming that the dam body is an integrated structure with elastic behavior, usually leads to the creation of significant tensile arch stresses in the upper levels of the dam, which is not in accordance with reality. Since the arch dams are built as ridge blocks, due to the opening and closing of the contraction joints during the earthquake, the released tensile stresses and internal forces are redistributed from the arch performance mode to the ridge performance. As a result, by reducing the level of tensile stresses and energy consumption as a result of joint closure, the risk of concrete cracking and dam destruction is greatly reduced.

Keywords: Seismic analysis, Arched concrete dam, Contraction seams, Earthquake.



مرور روش‌های تحلیل و ارزیابی ایمنی لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی

محمد رضا فدائی تهرانی^{۱*}، الهام یباره‌پور^۲

۱. پژوهشگاه نیرو، وزارت نیرو، تهران، ایران.

۲. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

*ایمیل نویسنده مسئول: mfadaei@nri.ac.ir

© The Author(s) 2023

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۱

چکیده

سدهای بتنی قوسی، سازه‌های سه بعدی بوده که به لحاظ شکل خاص خود به عنوان یک پوسته عظیم، فشار آب مخزن را به تکیه‌گاه‌های سنگی خود منتقل می‌نمایند. نیروی عمده دیگری که علاوه بر وزن، فشار هیدرواستاتیک و تنش‌های حرارتی باید توسط سیستم سازه‌ای یک سد تحمل گردد، نیروهای دینامیکی ناشی از زمین لرزه است. در این گونه سدها، امکان بروز رفتار غیرخطی ناشی از تغییر مکان دو وجه درزهای انقباض، ترک خوردگی، خوردشدگی و یا رفتار غیرخطی بتن بدنه سد بسته به شدت زمین‌لرزه وجود دارد. آنالیزهای دینامیکی تاریخچه زمانی با فرض اینکه بدنه سد، سازه‌ای یکپارچه با رفتار الاستیک باشد، معمولاً منجر به ایجاد تنش‌های قوسی کششی قابل توجهی در ترازهای فوقانی سد می‌گردد که منطبق بر واقعیت نیست. از آنجائیکه سدهای قوسی به صورت بلوک‌های طره‌ای ساخته می‌شوند، به لحاظ باز و بسته شدن درزهای انقباضی طی زلزله، تنش‌های کششی رها و نیروهای داخلی از حالت عملکرد قوسی به عملکرد طره‌ای بازتوزیع می‌گردند. در نتیجه، با کاهش سطح تنش‌های کششی و استهلاک انرژی در اثر باز و بسته شدن درز، ریسک ترک‌خوردگی بتن و تخریب سد تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل لرزه‌ای، سد بتنی قوسی، درزهای انقباض، زلزله.

۱- مقدمه

تأمین آب به عنوان مهمترین نیاز حیات، در هر عصر مورد توجه انسان بوده است. این مقوله در دوران کنونی به لحاظ وضعیت بحرانی تأمین آب برای نیازهای مختلف بشر در طرح سیاست زمامداران کشورهای مختلف، نمود برجسته‌تری پیدا کرده است. به طوری که متخصصین ژئوپلیتیک، جنگ‌های آینده را جنگ‌هایی برای دستیابی به منابع آب می‌دانند (Fadaei Tehrani, 2023a). سدها از جمله مهمترین سازه‌های آبی در زندگی صنعتی امروز است که به منظورهای مختلفی نظیر تولید انرژی برقابی، ذخیره‌سازی آب برای استفاده‌های کشاورزی، صنعتی، آشامیدنی، کنترل و مهار سیلاب‌ها احداث می‌شوند. بنابراین این سازه‌ها از اهمیت بسزایی در توسعه و آبادانی کشورها برخوردار بوده و روند احداث آنها در مناطق مختلف، از جمله کشور ما، همواره مورد توجه بوده است (Fadaei Tehrani & Rahimzade Rofooei, 2005a).

طبق گزارش بولتین آب کشور، متوسط بارندگی سالیانه در ایران در حدود ۲۵۲ میلی‌متر است که حدود یک چهارم متوسط بارندگی در جهان و یک سوم متوسط بارندگی در آسیا است، لذا ایران یکی از مناطق خشک در دنیا شناخته می‌شود (Fadaei Tehrani, 2023b). بنابراین گزارش، از ۱۳۷ میلیارد متر مکعب حجم آب روان کشور فقط ۳۹ میلیارد متر مکعب (۲۸ درصد) قابل ذخیره‌سازی توسط سدهای موجود کشور است. لذا دولت در تدوین برنامه‌های توسعه کشور، سدسازی را به عنوان یکی از محورهای توسعه معرفی کرده و توجه خاصی به این بخش معطوف نموده است. به عنوان مثال، در سه رودخانه مهم کشور (کارون، دز و کرخه) بیست سد بزرگ در دست مطالعه و یا در فاز اجرا قرار گرفته که به همراه دو سد موجود در حوضه‌های کارون و دز جمعاً ۲۲ سد بر روی این سه رودخانه احداث خواهد شد که از این تعداد ۱۴ سد از نوع بتنی قوسی است. این موضوع به خوبی اهمیت و جایگاه تحقیقات بیشتر بر روی مقوله ایمنی سدهای بتنی قوسی را به عنوان یکی از نیازهای روز مهندسی کشور نشان می‌دهد (Fadaei Tehrani & Rahimzade Rofooei, 2005b).

سدهای بتنی قوسی به لحاظ مکانیزم انتقال بارها به تکیه‌گاه و همچنین نحوه عملکرد و اثرات درزهای انقباض بر پاسخ سد، یکی از مسائل پیچیده در مهندسی سازه است. در کنار هم بودن چند محیط مختلف که اثرات اندرکنشی زیاد و موثری را بر روی هم دارند، بررسی رفتار چنین سیستمی را پیچیده‌تر کرده است. در زمان وقوع زمین‌لرزه، اثرات متقابل و اندرکنش بدنه سد با سنگ بستر و مخزن به همراه غیریکنواختی موج ورودی زلزله، تشکیل چنان سیستم به هم پیوسته و پیچیده‌ای را می‌دهد که تاکنون حل کامل آن میسر نشده است (Buffi et al., 2020).

در حل هر مسئله، فرضیات ساده‌کننده‌ای در ابتدا مطرح بوده که در طی پیشرفت دانش بشری، به فرضیات منطقی‌تر و یا در مواردی به حذف فرضیات قبلی منجر شده است. بدیهی است که هرچه سیستم پیچیده‌تر باشد، به فرضیات بیشتری برای حل مهندسی آن نیاز است که سیستم سازه‌ای سدهای بتنی قوسی نیز از این امر مستثنی نیست. عوامل متعددی بر واکنش و رفتار سدهای بتنی قوسی تحت بارهای دینامیکی زلزله موثر است که از جمله این عوامل می‌توان به اندرکنش بین مخزن و

سد، اندرکنش بین پی و سد و اثر درزهای انقباض^۱ اشاره کرد (Ahmadi et al., 2001; Alembagheri & Ghaemian, 2013).

در این پژوهش به روش‌های تحلیل و ارزیابی ایمنی سدهای بتنی قوسی پرداخته خواهد شد و ضمن بیان پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر پاسخ لرزه‌ای این سازه عظیم به بررسی تأثیر اندرکنش مخزن-بدنه سد و پی-بدنه سد پرداخته خواهد شد. همچنین شرایط مرزی حاکم بر معادلات پاسخ لرزه‌ای مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در حقیقت سوال اصلی این پژوهش تعیین پارامترهای موثر و میزان تأثیر آنها در پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی است.

۲- مروری بر یافته‌های موجود

(Niwa & Clough 1982) مجموعه‌ای آزمایش‌ها با استفاده از میز لرزان بر روی مدل فیزیکی قوسی متشکل از قطعات متصل به هم انجام داده‌اند. هدف از انجام این آزمایش‌ها بررسی اثر تغییر مکان نسبی در محل درزهای قائم سدهای بتنی قوسی بر پاسخ آنها در طی زلزله بود. در این مطالعه مشخص شد که با باز شدن درزهای قائم تنش‌های کششی در جهت قوس به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این باز شدن این درزها باعث کاهش سختی قوس شده و در نتیجه باعث افزایش پیروید طبیعی ارتعاشی آن می‌شود و ممکن است که پیروید سازه را به بخش دیگری از طیف پاسخ منتقل کرده و لذا میزان پاسخ حداکثر را تغییر دهد. همچنین به علت باز شدن ناقص درزها، سطح تماس موثر بلوک‌ها با یکدیگر کاهش یافته و در نتیجه تنش‌های فشاری و قوسی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این تنش‌های فشاری بزرگ سبب خرد شدن بتن در محل تماس بلوک‌های مجاور شده و باعث ناپایداری و شکست قوس می‌گردد (Lotfollahi-Yaghin & Hesari, 2008).

(Dowling & Hall 1987) در یک مطالعه مشابه، از مدل فوق‌الذکر برای بررسی اثر باز و بسته شدن درزهای انقباض قائم و درزهای اجرایی افقی بر رفتار یک سد بتنی قوسی استفاده کردند. در این مطالعه آب، تراکم ناپذیر و پی، بدون جرم فرض شده و درزهای اجرایی افقی به صورت صفحات ضعیفی که از قبل مشخص شده‌اند، در نظر گرفته شد. همچنین از اثرات غیر خطی ناشی از رفتار غیر خطی بتن در فشار و همچنین لغزش سطوح درز و ایجاد شدن ترک‌های مایل در بدنه سد صرف نظر شده و ترک‌ها فقط می‌توانند در محل‌های از پیش تعیین شده (درزهای اجرایی افقی و درزهای انقباضی قائم) ایجاد شوند. پس از تحلیل سد Pacoma با استفاده از این مدل، آنها نتیجه گرفتند که تنش‌های فشاری در سطوح باقیمانده تماس، پس از باز شدن ناقص درزهای قائم افزایش می‌یابند و این افزایش تنش فشاری ممکن است آنقدر بزرگ باشد که فرض رفتار الاستیک خطی بدنه سد را نقض کند. علاوه بر این بازشدگی‌های بزرگ در محل درزهای انقباض و درزهای افقی در تراز فوقانی سد می‌تواند فرض عدم لغزش در درزها را مخدوش نماید، بخصوص در درزهای فاقد کلید برشی که دارای مقاومت برشی کافی نیستند. حتی در درزهایی که دارای کلید برشی شیبدار هستند، در اثر جداشدگی کلی سطوح، احتمال لغزش وجود خواهد داشت. همچنین در اثر باز شدن درزهای انقباضی قائم و باز توزیع نیروها، نیروها به

¹ Contraction Joints

طره‌ها منتقل می‌شوند و اگر تنش‌های اضافی ایجاد شده در طره‌ها در اثر این بازتوزیع نیروها بیشتر از تحمل طره‌ها باشد، طره‌های سد دچار ترک خوردگی خواهند شد. به هر حال، عدم توانایی این مدل در ملاحظه لغزش درزها کاربرد نتایج این تحلیل را محدود می‌سازد (Lotfollahi-Yaghin & Hesari, 2008).

Taskov & Jurukovski (1988) رفتار طره مرکزی یک سد قوسی را که با دو طره مجاور محصور شده بود، مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه اصطکاک سطوح تماس در مدل در نظر گرفته شد. با استفاده از این مدل که نتایج آن با نتایج فیزیکی مطابقت داشته، چنین نتیجه‌گیری شد که لغزش در سطوح تماس، خرد شدن بتن در مناطق تماس و باز شدن درزها، بر پاسخ دینامیکی سد قوسی اثر قابل توجهی دارند. همچنین مطالعات انجام شده نشان دهنده آن بود که تنش‌های طره‌ای در ترازهای فوقانی سد ممکن است به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابند که این امر خود می‌تواند باعث ترک خوردن طره‌ها شود.

Fenves et al. (1984-1992) با استفاده از المان درز میان لایه‌ای با ضخامت صفر، پدیده باز و بسته شدن درزهای انقباض را مدل کردند. در این مطالعات اثر لغزش در درزها و رفتار غیر خطی بتن در نظر گرفته نشده بود. در این تحقیق از روش پیشنهاد شده توسط Row & Schricker (1984) برای مدل کردن اثرات غیر خطی موضعی درزهای انقباض به وسیله روش زیر سازه‌ها استفاده شده است. لذا استفاده از این روش باعث کاهش چشمگیر حجم محاسبات تحلیلی گردید. در این تحلیل، پی سد انعطاف پذیر در نظر گرفته شده و به وسیله المان‌های ۸ گرهی تا عمق دلخواهی مدل شد، همچنین آب مخزن تراکم ناپذیر (با مفهوم جرم افزوده) و از اثر جذب انرژی توسط رسوب کف مخزن صرف نظر شده بود. بدنه سد توسط مجموعه‌ای از المان‌های حجمی ۸ گرهی، المان‌های پوسته ضخیم و المان‌های پوسته ضخیم سه بعدی مدل شده است. این تحقیق، درک خوبی از رفتار درزهای انقباض در سدهای قوسی ایجاد کرد و بعضی از مشاهدات انجام شده توسط محققین قبلی را مورد تایید قرار داد (Lotfollahi-Yaghin & Hesari, 2008).

Weber et al. (1991) رفتار غیر خطی سدهای قوسی به علت وجود درزها و ترک‌های از پیش تعیین شده را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه با فرض کلیدهای برشی در درزها از لغزش طره‌ها جلوگیری به عمل آمد. همچنین پی سد، صلب و مخزن خالی در نظر گرفته شد. در این تحلیل شتاب زلزله در راستای رودخانه اعمال گردید تا امکان واژگونی طره‌ها تحت اثر تحریکات زلزله بررسی شود. نتایج این تحلیل نشان داد که افزایش باز شدن درزها باعث می‌شود که طره‌ها تحت اثر خمش و پیچش قرار گیرند. به هر حال فرض وجود کلید برشی در درزها باعث جلوگیری از اختلاف فاز در حرکت طره‌ها و سبب پایدار شدن آنها و جلوگیری از ایجاد تنش‌های خمشی بحرانی شده است.

Hohberg (1992) در یک بررسی جداگانه، همان سد تحلیل شده توسط Weber را با فرضیاتی مشابه در مورد مخزن و پی، مورد مطالعه قرار داد. در این مطالعه، او از یک مدل درز نسبتاً مفصلی استفاده کرد که قادر به در نظر گرفتن لغزش اصطکاکی و لغزش ناشی از جدا شدگی سطوح بود. همچنین ناهمواری‌های سطوح تماس نیز در این مدل در نظر گرفته شد. سد به وسیله مجموعه‌ای از المان‌های حجمی ۲۰ گرهی مدل شده و کلیدهای برشی به وسیله افزایش ارتفاع ناهمواری-

های سطوح در مدل وارد شده بود. نتایج این مطالعه با نتایج مطالعات قبلی مبنی بر این که باز شدن درزها باعث کاهش تنش‌های کششی در جهت قوس می‌شود، تطبیق داشت (Hohberg, 1992).

Bolognini et al. (1992) یک مدل اصطکاکی را برای در نظر گرفتن اثر لغزش در درزها توسعه دادند. آنها از این مدل برای تحلیل یک سد قوسی با مخزن خالی استفاده کردند. در این تحلیل، تنها درزهای ترازهای پایین سد فعال در نظر گرفته شدند. به علت این فرض و صرف نظر کردن از اثر مخزن، آنها نتیجه گرفتند که اثر حرکت نسبی درزهای انقباض بر رفتار سد ناچیز است (Lotfollahi-Yaghin & Hesari, 2008).

Norozian (1995) پس از اصلاح و توسعه برنامه ADAP-88، رفتار غیرخطی ناشی از شکست کششی-برشی درزها در تحلیل اجزاء محدود سد قوسی را مورد بررسی قرار داد. او معیار شکست دو بعدی موهر-کلمب را برای شکست برشی و معیار مقاومت کششی را برای شکست کششی درزها استفاده کرده و اثرات متقابل جابجایی‌های برشی و نرمال درز را با توجه به ارتفاع کلیدهای برشی در مدل المان وارد نمود. در این مطالعه نتایج عددی برای مقادیر تنش قوسی و تنش طره‌ای در دو حالت استفاده از مقادیر ضرائب سختی مماسی و نرمال درز با اختلاف بزرگی ۱۰۰ برابر، مقایسه گردید. این مقایسه نشان داد، کاهش ضریب سختی به اندازه دو مرتبه بزرگی، اثر مهمی بر توزیع و مقدار تنش‌های حداکثر در سازه سد نداشته و از طرفی، روند همگرایی در محاسبات عددی را هموارتر می‌کند و نوسانات نادرستی که در محاسبه پاسخ درزها در تحقیقات متعدد مشاهده شده، منتفی می‌شود (Norozian, 1995).

کاربرد اولیه روش ترک گسترده در آنالیز دینامیکی غیر خطی سدهای بتنی قوسی به مدلسازی درزهای انقباض اختصاص دارد. در این مورد Kuo (1982) نسبت به ارائه یک مدل المان میان لایه‌ای دو بعدی (قابل تعمیم به سه بعدی) به نام مدل ترک گسترده میان لایه‌ای^۲ اقدام نموده است. همچنین Norozian (1995)، برای نواحی فشاری از مدل سطح مرزی^۳ و برای نواحی کششی از روش ترک گسترده استفاده کرده است. مدل ایشان بر اساس داده‌های جدید آزمایشگاهی، اصلاح شده و موارد جدیدی به منظور مدلسازی ترک خوردگی و بررسی رفتار پس از ترک خوردگی به مدل اضافه شده است. در وضعیت تنش‌های فشاری از یک رفتار نرم شوندگی کامل کرنش بصورت صرفنظر کردن از صلبیت مصالح در نقطه انتگرال گیری (گوس) و عدم تحمل تنش پس از رسیدن وضعیت تنش به سطح خرابی، استفاده شده است. همچنین ایشان با ترکیب مدل ترک گسترده و سطح مرزی، به یک نوع مدلسازی ترکیبی برای بتن دست یافت که قادر است رفتار مصالح را در وضعیت‌های مختلف تنش برآورد کند. ایشان در کاربرد این مدل‌ها در سدهای قوسی با انتخاب سد ماروپوینت نسبت به بررسی پاسخ لرزه‌ای آن اقدام کرد. نتایج بدست آمده حاکی از این است که ترک خوردگی در سدهای قوسی در رقوم بالای سازه ایجاد می‌گردد. همچنین توزیع مجدد تنش‌های فشاری بر کاهش تنش کششی بتن اثر مهمی دارد. لذا لازم است تنش‌های کششی و فشاری در چنین سازه‌ای تا حد ممکن دقیق حساب شود. احتمال انهدام بتن تحت تنش‌های فشاری در مناطق نزدیک به درزهای انقباض خیلی ناچیز است (Norozian, 1995).

² Interface Smeared Crack Model

³ Boundary Surface

(Karimi Shahi Farm, 1996) رفتار غیر خطی سد بتنی قوسی کارون IV در ایران را مورد بررسی قرار دادند. برای انجام این مطالعه از برنامه PADAP^۴ (Persian ADAP) استفاده گردید. آنها از این مطالعه نتیجه گرفتند که با توجه به سطح تنش‌های کششی ایجاد شده در بدنه سد در آنالیز خطی، ترک خوردن بتن تحت اثر زلزله حتمی بوده و انجام آنالیز دینامیکی غیر خطی به منظور بررسی رفتار و واکنش سدهای بتنی قوسی در این حالت ضروری خواهد بود. به علاوه استفاده از تکنیک هائی نظیر افزایش مقاومت مجاز کششی و ضریب میرائی در آنالیز خطی، تنها تقریبی واقعی تر از واکنش حداکثر سازه بدست می‌دهد و ارزیابی پایداری بدنه سد تحت اثر بار زلزله بر اساس نتایج آنالیز خطی، بطور کامل و مطمئن امکان پذیر نخواهد بود. همچنین با توجه به نتایج آنالیزهای دینامیکی غیر خطی انجام شده در این تحقیق، مقادیر بازشدگی درزها و ترک‌های ایجاد شده در بدنه سد بطور کلی قابل توجه بوده و امکان وقوع لغزش نیز در امتداد درزها وجود خواهد داشت (Karimi Shahi Farm, 1996).

(Dowling & Hall, 1987) نسبت به استفاده از یک مدل ترک گسترده ساده به منظور مدلسازی درزهای انقباض و اجرایی اقدام کرد. در واقع در این کار تحقیقاتی درزهای انقباض بصورت المان‌های مستقل دیده نشده اند بلکه مدل ترک گسترده در دو جهت عمود بر هم، یکی جهت عمود بر مدلسازی درزهای انقباض و دیگری در جهت افقی به منظور مدلسازی درزهای اجرایی بکار گرفته شده است. لذا مدل ترک گسترده بکار رفته، مدلی با جهت‌های از پیش تعیین شده است که فقط قادر به ایجاد دو ترک در هر نقطه انتگرالگیری است. همچنین از نرم شوندگی کرنشی پس از ایجاد ترک صرف‌نظر شده است. بعبارت دیگر تنش کششی به یکباره از مقاومت کششی مصالح به صفر کاهش داده خواهد شد. گزینه‌ای در برنامه وجود دارد که می‌تواند درز قائم را برای المان‌های مشخص حذف کند. برای شبیه سازی کلیدهای برشی، گزینه دیگری تعبیه شده است که اجازه بازشدگی به ترک را می‌دهد ولی اجازه لغزش داده نخواهد شد. به جهت بررسی رشد ترک، پس از اینکه یکی از نقاط انتگرالگیری ترک خورد، مقاومت کششی نقاط دیگر انتگرالگیری یک المان به یک مقدار مشخص کاهش می‌یابد (Dowling & Hall, 1987).

(Izadinia, 2008) با ارائه مدل بنیادی از المان درز سه بعدی با ضخامت صفر، با در نظر گیری پدیده‌های باز و بسته شدن و لغزش اصطکاکی، به بررسی اثرات شکست کششی-برشی درزها پرداخت. همچنین اثرات هیدرودینامیک سد و مخزن را با فرض آب تراکم پذیر بر اساس معادله انتشار امواج فشار در مخزن، مورد بررسی قرار داد. ایشان مطالعه خود را به بررسی پاسخ لرزه‌ای سد قوسی ماروپوینت تحت رکورد زلزله تفت متمرکز کرد. مدل بنیادی درز تدوین شده، قادر به در نظر گرفتن اثرات غیر خطی باز و بسته شدن درز، لغزش اصطکاکی در وضعیت بسته یا نیمه باز و لغزش آزاد در وضعیت کاملاً باز درز، اثرات کلیدهای برشی، درگیری جابجایی‌های برشی و نرمال و غیر همبسته بودن رفتار غیر خطی است. با توجه به نتایج پاسخ دینامیکی سد ماروپوینت و تحلیل پارامتریک آن، هر دو پدیده باز شدگی و لغزش درزهای انقباض قائم (متناظر مودهای اول و دوم شکست) تغییرات مهمی در میدان‌های جابجایی و تنش سد در مقایسه با تحلیل الاستیک خطی خواهند داشت و همچنین کلیدهای برشی با مقاومت کافی، نقش مهمی در یکپارچگی و پایداری سد در برابر زمین لرزه دارند،

^۴ نسخه اصلاح شده برنامه ADAP توسط شرکت مهندسین مشاور مهتاب قدس ایران

بطوری که این عناصر، چسبندگی مربوط به درزهای انقباض را نیز تامین می‌کنند. درزهای انقباض بدون کلید برشی، قادر به تامین مقاومت برشی هنگام وقوع بازشدگی یا شکست کششی درز نبوده و مستعد لغزش برشی بیشتری در مقایسه با درزهای با کلیدهای برشی است. در این زمینه طراح سد، با شناخت میزان لغزش برشی و عواقب آن بر تنش‌ها و ایمنی سد، قادر به توجیه اقتصادی سد و هزینه‌های اجرای کلیدهای برشی در درزهای انقباض خواهد بود (Izadinia, 2008).

Lotfi (2000) ضمن تهیه برنامه کامپیوتری با عنوان MAP76 که با استفاده از روش اجزاء محدود قادر به مطالعه اثرات غیر خطی درزها و مصالح بتنی بدنه سد بر پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی است، با مطالعه جامع و پارامتریک بر روی سد شهید رجایی (تجن) نسبت به ارزیابی تغییرات سطح تنش و تغییر مکان‌ها در حالات مختلف اقدام کرد. برنامه ایشان قادر به در نظر گیری درزهای موجود در سد مشتمل به درزهای انقباض، درزهای اجرایی، درزهای پیرامونی سد است. اثرات مخزن بصورت جرم افزوده در نظر گرفته شده است. مدل درز ایشان قادر به مدلسازی رفتارهایی نظیر بازشدگی اولیه، باز و بسته شدن مکرر درز و در عین حال رفتار غیر خطی در برش برای درزهای پیرامونی بصورت ساده شده، است (Lotfi, 2000).

Radin (2008) ضمن تهیه برنامه کامپیوتری با نام SNAP که با استفاده از روش اجزاء محدود اثرات غیر خطی درزها و مصالح بتنی بدنه سد را بر پاسخ لرزه‌ای سد بتنی قوسی در نظر می‌گیرد. او با مطالعه موردی سد شهید رجایی (تجن)، نسبت به بررسی رفتار غیر خطی دینامیکی سدهای قوسی اقدام کرد. مدل درز او قادر به مدلسازی باز و بسته شدن درز با در نظر گیری مقاومت کششی اولیه است. ایشان مطالعات پارامتریک وسیعی نسبت به تعداد درزهای انقباض، وجود یا عدم وجود درزهای پیرامونی در مدل و مقادیر مختلف سختی درزها انجام داد. همچنین پی صلب فرض شده و برای اثرات مخزن از مفهوم جرم افزوده استفاده گردیده است (Radin, 2008).

Lotfi (2000) با استفاده از کاربرد المان حجمی ۲۰ گرهی با گزینه‌های رفتاری خطی، ترک گسترده تک راستا، ترک گسترده چند راستای غیر عمود و الاستوپلاستیک نسبت به بررسی پاسخ لرزه‌ای سد شهید رجایی (تجن) اقدام کردند. ایشان نتایج کار تحقیقاتی خویش را با مطالعه پارامتریک روی مدل‌های ترک گسترده و الاستوپلاستیک ارائه کرده‌اند (Lotfi, 2000).

Omidi & Rahimzadeh (2001) رفتار درزهای انقباض در پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با مطالعه موردی سد ماروپوینت دریافتند که وجود درزهای انقباض باعث کاهش مقادیر حداکثر تنش‌های کششی و فشاری در سدهای بتنی قوسی می‌گردد. همچنین طی این مطالعه آنها به این نتیجه رسیدند که برای مطالعه رفتار درز در سدهای بتنی قوسی نیاز به مدلسازی تمام درزها نخواهد بود و با مدلسازی سه درز، یکی در وسط و دوتا در کنار، می‌توان اثر درزها را در مدل ایجاد کرد. همچنین آنها دریافتند استفاده از المان‌های حجمی ۸ گرهی و ۲۰ گرهی در مدلسازی بدنه سدهای بتنی قوسی، به نتایج نسبتاً مشابهی منجر می‌گردد.

(Rahimzadeh & Omid, 2002) در ادامه مطالعات خود با کاربرد مدل غیر خطی بتن در نرم افزار ANSYS، مبتنی بر معیار گسیختگی ویلیام و وارنکه (المان SOLID65 نرم افزار ANSYS) پاسخ لرزه‌ای سد بتنی قوسی کرج را مورد بررسی قرار دادند. کاهش سطح تنش‌های کششی به حد مقاومت کششی بتن بدلیل ترک خوردن نقاطی از بدنه سد که پتانسیل ترک خوردگی را داشته اند و همچنین عدم امکان شکست فشاری بتن در سطح تحریک زلزله، از نتایج این بررسی بوده است. در ضمن، ایشان با ترکیب مدل درز گسسته (CONTAC52) و مدل بتنی با معیار ویلامز و وارنکه (SOLID65) کارایی این مدل ترکیبی در کاهش سطح تنش‌های کششی که با کاهش سطح خرابی نسبت به کاربرد مدل بتنی بصورت تنها همراه است، را نشان دادند (Rahimzadeh & Omid, 2002). این نتایج در مطالعات بعدی رحیم زاده و فدائی نیز مورد تأیید قرار گرفت.

(Sohrabi Gilani & Ghaemian, 2004) اثر درزهای اجرائی قائم بر رفتار دینامیکی سدهای بتنی با احتساب اندرکنش سد و دریاچه را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در مطالعه خود یک مدل ریاضی برای بیان رفتار درزهای قائم ارائه دادند و بر اساس آن یک زیربرنامه به برنامه جامع آنالیز سدهای بتنی NSAD-DRI اضافه نمودند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که ضرائب سختی المان درز بر مقدار و توزیع تنش‌ها در بدنه سد، تأثیر بسزائی دارد (Sohrabi Gilani & Ghaemian, 2004). این نتایج در مطالعات بعدی قائمیان و فدائی در محدوده رفتار غیرخطی نیز بررسی و مورد تأیید قرار گرفت.

۳- مواد و روش‌ها

سدهای بتنی قوسی مانند گنبدها و سایر سازه‌های پوسته‌ای بلحاظ شکل هندسی خاص، مکانیزم انتقال بار مناسبی را برای بارهای اعمالی ناشی از عوامل خارجی ایجاد می‌کنند. بنابراین به نظر می‌رسد با توجه به اهمیت نیروهای غشایی و خمشی در قسمت‌های مختلف آن، کاربرد المان‌های مناسب پوسته می‌تواند گزینه مناسبی برای بررسی رفتار سدهای بتنی قوسی باشد. این امر سبب شد تا محققینی نظیر (Dowling, Fenves et al. (1989 و دیگران به سمت استفاده از این نوع المان برای مدلسازی بدنه سدهای قوسی بروند. Dowling بطور مستقیم المان‌های پوسته را بوسیله یک سری المان‌های درز با ضخامت صفر (شامل فنر چرخشی و انتقالی) به یکدیگر متصل نمود (Gomes & Lemos, 2020).

روش دیگر مدل کردن بدنه سدهای قوسی، استفاده از المان‌های سه بعدی حجمی است. در این حالت از یک یا چند ردیف المان سه بعدی ۸ گرهی و یا المان‌هایی با درجات آزادی بالاتر نظیر المان‌های حجمی ۲۰ گرهی، برای مدل کردن بدنه سد استفاده می‌شود. البته تعداد معادلات در المان ۲۰ گرهی نسبت به المان پوسته بیشتر بوده و همچنین در المان‌های حجمی، نیاز به ریز کردن مش در برخی مناطق نیز احساس می‌شود (Hesari et al., 2015).

۴- نتایج و بحث

مقوله تامین ایمنی سدها در برابر زلزله، با وجود اثرات عوامل مختلف، یکی از زمینه‌های تخصصی و پیچیده‌ای است که سالهای متمادی ذهن محققین را به خود مشغول کرده است. در دو دهه اخیر با توجه به بالا رفتن توانایی کامپیوترها و ابداع

و اصلاح روش‌های مکانیک محاسباتی، پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در حل چنین سیستم‌های پیچیده‌ای حاصل شده است (Liang et al., 2020).

با توجه به اینکه آسیب دیدن سدها در اثر بروز زلزله، سیل، یا هر دلیل دیگری می‌تواند موجب بروز یا تشدید خسارت و زیان‌های جانی و مالی گسترده و جبران ناپذیر گردد، ضرورت توجه به روش‌های تحلیل، طراحی و مقاوم سازی سدها در برابر بارهای وارده بخصوص بارهای ناشی از زمین لرزه، مشخص می‌شود. به علاوه با توجه به واقع شدن کشور ایران در مناطق با پتانسیل زلزله خیزی بالا توجه به این موضوع اهمیت بیشتری می‌یابد. لذا بررسی مجدد رفتار این سازه‌ها با استفاده از دانش روز بشری لازم به نظر می‌رسد، چرا که مطالعات انجام شده نشان داده که روش‌های قبلی طراحی بر خلاف انتظار محافظه کارانه نبوده و علاوه بر این، تعداد زیادی از سدها در مناطق با زلزله خیزی بالا، بعلت دوره بازگشت طولانی زلزله‌های بزرگ، هنوز زمین لرزه‌های پیش بینی شده توسط مطالعات لرزه خیزی را تجربه نکرده اند (Rezaiee-Pajand et al., 2021; Sani & Lotfi, 2010; Xu et al., 2020).

۴-۱- عوامل موثر بر رفتار دینامیکی سدهای قوسی

به‌طور کلی عوامل موثر در رفتار یک سد بتنی قوسی در برابر بارهای دینامیکی ناشی از زمین لرزه، به شرح زیر است (Dehghani & Aghajanzadeh, 2019; Monteiro Azevedo, 2015):

۱. تغییرات شدت و مشخصات حرکت زمین در امتداد پی سد (در امتداد عرض دره)
 ۲. امواج ناشی از آب موجود در مخزن که سبب تشدید فشارهای وارد بر بدنه سد می‌شود.
 ۳. اندرکنش بدنه سد و مخزن
 ۴. اندرکنش بدنه سد و مخزن با پی
 ۵. تغییر مشخصات مصالح بدنه سد و پی در اثر بارهای دینامیکی
 ۶. ترک خوردن یا باز و بسته شدن درزهای بدنه سد
- علاوه بر موارد فوق، با توجه به ویژگی‌های منحصر بفرد هر سد و ساختگاه آن، عوامل خاصی نیز وجود دارند که بر رفتار سدهای بتنی قوسی تأثیر گذار هستند.
- مکانیسم‌های خرابی یا انهدام یک سد بتنی قوسی در هنگام وقوع زلزله را بر اساس مشاهدات و تجربیات بدست آمده، می‌توان به صورت زیر تقسیم بندی نمود (شکل ۱):

۱. باز شدن درزهای قائم بین بلوک‌های مجاور بدنه سد (و یا ترک خوردن بدنه سد)، که سبب از دست رفتن یکپارچگی بدنه سد و تشدید عملکرد وزنی بخش جدا شده آن می‌گردد و در صورتیکه این بلوک‌های جدا شده تحمل بارهای اضافی وارد شده را نداشته باشند، دچار گسیختگی شده و می‌تواند موجب آسیب دیدگی کلی یا موضعی سد گردد.

شکل ۱. مکانیزم‌های خرابی سد بتنی قوسی (Rezaiee-Pajand et al., 2021)

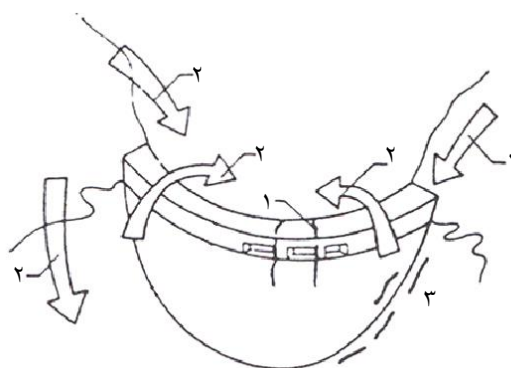


Fig 1. Failure mechanisms of arch concrete dam (Rezaiee-Pajand et al., 2021)

۲. لغزش توده‌های سنگ طرفین دره بر روی بدنه سد و یا داخل مخزن که می‌تواند موجب انهدام بخشی از بدنه سد، سرریز شدن آب مخزن از روی تاج سد، انهدام سرریزها و سایر سازه‌های کناری سد شده و در نهایت سبب انهدام کلی آن گردد.

۳. ترک خوردن و گسیختگی پی سنگی سد که می‌تواند موجب صدمه دیدن بخشی از پرده تزریق و در نتیجه افزایش فشار آب منفذی در پی شده (افزایش فشار برکنش) و نهایتاً موجب لغزش و انهدام بدنه سد بدلیل عدم کفایت پی گردد.

تحت بارهای لرزه‌ای، تنش‌های کششی در بعضی از نقاط بدنه سد، بسیار فراتر از حدود مجاز و قابل تحمل بتن می‌رود و در نتیجه آن ترک‌هایی در بدنه سد ایجاد شده و یا درزهای افقی قائم موجود در بدنه سد باز می‌شوند. این فرایند می‌تواند موجب انهدام کلی و یا موضعی بدنه سد بشود (مکانیسم ۱). بررسی همه عوامل موثر بر واکنش سدهای بتنی قوسی در برابر بارهای دینامیکی ناشی از زلزله، نیازمند زمان و فرصت زیادی بوده و در این رساله به آن پرداخته نخواهد شد.

سدهای بتنی قوسی تحت اثر زمین لرزه‌های مختلف می‌توانند رفتاری غیرخطی داشته باشند. رفتار غیرخطی بدنه سد ناشی از تغییر مکان دو وجه درزهای انقباضی و یا رفتار غیرخطی بتن در کشش یا فشار است. آنالیز دینامیکی خطی با فرض اینکه سد، سازه‌ای یکپارچه با رفتار الاستیک باشد، معمولاً منجر به ایجاد تنش‌های قوسی کششی می‌گردد که مقدار آن از مقاومت کششی بتن فراتر می‌رود. از آنجائیکه سدهای قوسی بصورت بلوک‌های طره‌ای ساخته می‌شوند، درزهای بین بلوک‌ها نمی‌توانند تنش‌های کششی پیش‌بینی شده از آنالیز خطی را انتقال دهند. چرا که به لحاظ باز و بسته شدن درزهای انقباضی

در طی زلزله، تنش‌های قوسی کششی رها شده و نیروهای داخلی ناشی از عملکرد قوسی بدنه سد به نیروهایی متأثر از رفتار طره‌ای بلوک‌ها بازتوزیع می‌شوند.

نتایج مطالعات قبلی نشان می‌دهد که باز شدگی درزهای انقباض اثر قابل ملاحظه‌ای روی تغییر مکان و تنش‌های سد در پاسخ به حداکثر زلزله باور کردنی^۵ دارد. بر پایه مطالعات انجام شده، وقتی درزها باز شده و بلوک‌های طره‌ای سد به سمت بالادست حرکت می‌کنند، رفتار قوسی سد از بین رفته و در اثر خم شدن طره‌ها بطرف بالادست شاهد کاهش تنش‌های کششی قوسی و افزایش تنش کششی طره‌ای در وجه پایین دست سد خواهیم بود (Alembagheri & Ghaemian, 2013; Fadaei Tehrani & Rahimzade Rofooei, 2005a).

۴-۲- درزهای اجرائی، درزهای انقباضی و درزهای طراحی شده در بدنه سد

به علت حرارت‌های ناشی از واکنش هیدراتاسیون سیمان، در ساعات اولیه پس از بتن ریزی، و نیز ملاحظات و محدودیت‌های اجرایی، امکان اجرای بتن ریزی و ساخت بدنه سد بصورت پیوسته و همگن وجود ندارد. بنابراین بتن ریزی بدنه سد در بلوک‌های قائم جداگانه، که عرض هر بلوک بطور معمول بین ۱۰ تا ۲۰ متر است، انجام می‌گیرد. بعلاوه در هر بلوک بدنه سد نیز در هر مرحله، به ضخامت مشخصی، معمولاً حدود ۱/۵ تا ۳ متر، عملیات بتن ریزی اجرا می‌گردد. بنابراین با توجه به نحوه اجرای عملیات بتن ریزی و ساخت بدنه سد، یک سری درزهای اجرائی افقی^۶ و تعدادی درزهای انقباضی قائم^۷ در بدنه سد وجود خواهند داشت. درزهای انقباضی قائم بدنه سد در حین ساخت بدنه سد و پس از اتمام آن، در چندین مرحله تزریق می‌شوند تا یکپارچگی نسبی بدنه سد تامین گردد (Gomes & Lemos, 2020).

در هنگام بروز هر یک از عوامل ایجاد ترک در بدنه سد، احتمال بازشدگی و ترک خوردن بتن در امتداد این درزهای افقی و قائم در بدنه سد، که بصورت صفحات ضعیف عمل می‌کنند، بسیار زیاد خواهد بود و با باز شدن این درزها، تنش‌های کششی موجود در آن محدوده از بدنه سد رها شده و در نتیجه باز توزیع تنش‌ها در بدنه سد صورت خواهد گرفت.

نکته قابل ذکر اینکه نتیجه بعضی تحقیقات انجام شده در مورد اثر درزهای بدنه در پاسخ لرزه‌ای نشان داده اند که باز شدن درزهای قائم و افقی (و یا ترک خوردن بتن بدنه سد) در حین وقوع زمین لرزه، بشرطی که پایداری کل سازه را تهدید نکند، می‌تواند با افزایش میرایی و شکل پذیری سازه، موجب افزایش قابلیت جذب انرژی و در نتیجه کاهش اثرات ایجاد شده در بدنه سد (تنش‌های بدنه سد) گردد. بعلاوه باز شدن درزهای بدنه سد از وقوع برخی ترک‌های احتمالی نامناسب که می‌تواند موجب انهدام کلی سد نیز گردد، جلوگیری می‌کند (MahinKhaki et al., 2015).

⁵ MCE

⁶ Construction Joint

⁷ Constriction Joint

با توجه به مطالب فوق بعضی طراحان در شرایط معینی با در نظر گرفتن درزهای مناسب در بعضی قسمت‌های بدنه سد، رفتار سد را بطور دلخواه و مطلوب تغییر داده و ایمنی بیشتری را برای بدنه سد بوجود می‌آورند که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Fadaei Tehrani & Ghaemian, 2008):

الف) در بعضی سدها، بدلیل ضعیف بودن پی در قسمت‌های فوقانی دره، درزهای انقباضی بدنه سد در بخش فوقانی با نظم مشخصی باز باقی مانده و تزریق نمی‌شوند، این درزها هیچگونه نیرویی را در سطح خود انتقال نمی‌دهند و بنابراین از اعمال فشار به تکیه‌گاه‌های سد در بخش‌های مورد نظر جلوگیری بعمل می‌آید (مانند سد شهید رجائی).

ب) در بعضی سدهایی که از سرریز بر روی تاج سد استفاده شده، بمنظور کاهش تمرکز تنش در کناره‌های سرریز، درزهای انقباضی قائم سد در محدوده کناره‌های سرریز با نظم مشخصی تزریق نشده و باز باقی می‌مانند (مانند سد کارون III).

ج) نوع دیگری از درزهای طراحی شده در بدنه سد، درز پیرامونی^۸ است. این نوع درزها سد را به دو قسمت تقسیم می‌کنند، یک قسمت بدنه سد اصلی سد و بخش دیگر زینچه سد^۹ است (شکل ۲). از جمله این سدها می‌توان سد دز در ایران، سد Osiglietta، سد Ponteracchi و سد Vajont در ایتالیا را نام برد. این نوع درزها تأثیرات مفید و مهمی در رفتار سازه‌ای سد دارند که در ادامه مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت.

در این نوع سد، بدنه اصلی در محل این درزها، متکی بر زینچه بوده و در واقع زینچه سد را می‌توان به‌عنوان بخشی از پی سد به شمار آورد. این امر به طراح اجازه می‌دهد که سد را بدون توجه به مشکلاتی که معمولاً در حین حفاری پی سد ایجاد می‌گردد (که موجب لزوم تغییر در طراحی بدنه سد می‌شود) طراحی کند. بعلاوه در مواردیکه شکل دره نامنظم و پیچیده است، می‌توان با استفاده از زینچه شکل دره را اصلاح نمود. کاربرد زینچه در مواردیکه ذکر گردید، این امکان را به وجود می‌آورد که با ایجاد تقارن، توزیع تنش‌ها در بدنه سد یکنواخت تر شده و در نتیجه از مقادیر حداکثر آنها کاسته شود (Fadaei Tehrani & Ghaemian, 2008).

شکل ۲. استفاده از درز پیرامونی به منظور ایجاد تقارن در سد Ponte Racli کشور ایتالیا (Fadaei Tehrani & Ghaemian, 2008)

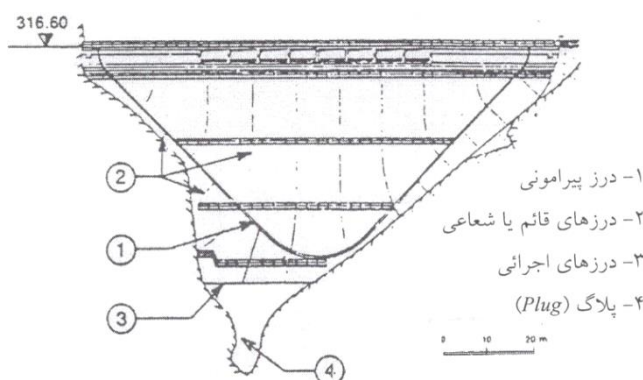


Fig 2. Utilizing surrounding joints to create symmetry in the Ponte Racli dam in Italy

⁸ Peripheral Joint

⁹ Pulvino

وجود درز پیرامونی علاوه بر اصلاح شکل سد و بهبود کلی توزیع تنش در بدنه سد، موجب رها شدن تنش‌های کششی ایجاد شده در مرزهای بدنه اصلی سد (بر اثر بارهای اعمال شده به سد و نیز نشست‌های تکیه گاهی) می‌شود و از بروز ترک‌های نامنظم در بدنه سد جلوگیری خواهد کرد.

مجموعه مطالب فوق بیانگر اهمیت درزهای طراحی شده و ترک‌های ایجاد شده در بدنه ناشی از رفتار طره‌ای سد است. در واقع در اثر وجود این درزها که به منزله عوامل کنترل کننده تنش در بدنه سد عمل می‌کنند، بدنه سد در محل این درزها بصورت موضعی رفتار غیر خطی داشته و قابلیت جذب انرژی به سبب افزایش انعطاف پذیری سازه، افزایش می‌یابد.

از دیدگاه آنالیز و مدلسازی بدنه سد، باید رفتارهای موضعی غیر خطی ناشی از باز و بسته شدن درزها و ترک‌های بدنه سد را در نظر گرفت. نکته قابل ذکر اینکه این رفتار غیر خطی فقط در بخش‌های محدودی از بدنه سد (محل درزها و یا ترک‌ها) وجود داشته و رفتار سایر قسمت‌های سازه خطی باقی می‌ماند و این امر بطور کلی موجب ساده تر شدن آنالیز و پرهیز از انجام آنالیزهای غیر خطی کلی که وقت و هزینه زیادی را نیاز دارد، می‌گردد.

۴-۳- روش‌های تحلیل سدهای بتنی قوسی

با نگاه گذرا به روند پیشرفت روش‌های آنالیز سدهای بتنی قوسی، چنین به نظر می‌رسد که در آغاز، آنالیزها با استفاده از روابط بسیار ساده محاسبه تنش برای یک رینگ تحت فشار و با در نظر گرفتن قوس‌های سد بصورت مستقل و منفرد انجام می‌شد و سپس با گذشت زمان روش‌های مناسب تری که عملکرد سه بعدی سد را با در نظر گرفتن توام قوس‌های افقی و طره‌های قائم سد و تامین شرایط سازگاری تغییر مکان‌ها برای آنها، در تحلیل وارد می‌کردند، مورد استفاده قرار گرفتند. از جمله این روش‌ها می‌توان روش معروف بار آزمون^{۱۰} را نام برد که توسط USBR نیز در سال ۱۹۷۷ توصیه و بسط داده شد. نتایج حاصل از این روش نسبت به روش‌های قبلی دقیق تر است. با پیشرفت روش اجزاء محدود^{۱۱} در آنالیز سازه‌ها و با توجه به توانایی‌های این روش در مدل کردن شکل‌های هندسی پیچیده و شرایط مرزی مختلف، از این روش‌ها در آنالیز سدهای بتنی قوسی نیز استفاده شد (Lotfollahi-Yaghin & Hesari, 2008). روش اجزاء محدود یک روش عددی است که می‌توان آنرا برای حل مسائل متعدد و متنوع مهندسی در حالات مختلف پایدار، گذرا، خطی و یا غیر خطی مانند تحلیل تنش، انتقال حرارت و جریان سیال بکار گرفت. این روش که ریشه‌های آن به سال‌های اولیه ۱۹۰۰ میلادی بر می‌گردد، عملاً در دهه ۶۰ میلادی به صورت کلاسیک مدون و داخل مباحث مهندسی بخصوص مهندسی عمران و مکانیک گردید و در دو دهه پایانی هزاره دوم همزمان با توسعه پردازشگرهای کامپیوتری، به طور شگفت آوری در مراکز علمی و صنعتی جهان رسوخ نمود. از جمله برنامه‌های اجزاء محدود برای آنالیز سدهای بتنی قوسی، می‌توان به برنامه ADAP^{۱۲} که توسط دانشگاه کالیفرنیا به درخواست موسسه USBR، تهیه شده است، اشاره کرد. روند توسعه و پیشرفت روش‌های آنالیز سدها، فاصله بین رفتار واقعی سازه و مدل‌های تحلیلی و محاسباتی مورد استفاده در آنالیز طراحی سدها را به تدریج کاهش داده

¹⁰ Trial-load method

¹¹ Finite Element

¹² Arch Dam Analysis Program

است. ولی هنوز پدیده‌هایی وجود دارد که به طور مطلوب در مدل‌های تحلیلی آنالیز وارد نشده‌اند. از این جمله می‌توان به رفتار غیر خطی مصالح بدنه سد و پی (نظیر پدیده ترک خوردن بتن) و نیز تأثیرات متقابل اجزاء مختلف سازه (بدنه سد-پی و مخزن) اشاره کرد. از آنجا که روش المان محدود از قابلیت انعطاف پذیری لازم برای وارد کردن تمهیدات و تکنیک‌های جدید در آنالیز برخوردار است، می‌توان با استفاده از آن در مدلسازی سازه، ناپیوستگی‌هایی نظیر ترک خوردگی را در آنالیزها وارد کرد (Ahmadi et al., 2001; Monteiro Azevedo, 2015).

۵- نتیجه‌گیری

در خصوص تعیین پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی تاکنون مطالعات بسیار گسترده و متنوعی صورت گرفته است. اما به دلیل پیچیدگی و زیاد بودن متغیرهای تأثیر گذار بر رفتار این گونه سازه‌ها هنوز موضوعات متعدد دیگری باقی مانده که می‌تواند زمینه انجام مطالعات جدید در آینده باشند. از این جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- بررسی جامع تر پدیده ترک خوردن بتن بدنه سد تحت اثر تنش‌های کششی
- مطالعه و توسعه مدل‌های رفتار غیر خطی برای بتن با استفاده از تئوری مکانیک شکست
- بررسی لغزش در امتداد درزها یا ترک‌های باز شده بدنه سد
- مطالعه و بررسی اثر کلیدهای برشی بر رفتار المان درز
- تعیین ضرائب سختی نرمال و برشی المان درز با انجام مطالعات تجربی
- مطالعه میرایی مصالح و تأثیر آن بر پاسخ لرزه‌ای سد
- بررسی جامع تر رفتار سدهای بتنی قوسی تحت تأثیر انواع رکوردهای نزدیک گسل و دور از گسل و مقایسه نتایج

۶- تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

۷- منابع

- Ahmadi, M., Izadinia, M., & Bachmann, H. (2001). Discrete crack joint model for nonlinear dynamic analysis of concrete arch dam. *Computers & Structures*, 79, 403-420. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(00\)00148-6](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(00)00148-6)
- Alembagheri, M., & Ghaemian, M. (2013). Damage assessment of a concrete arch dam through nonlinear incremental dynamic analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 44, 127-137. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.09.010>
- Buffi, G., Manciola, P., De Lorenzis, L., Cavalagli, N., Comodini, F., Gusella, V., Mezzi, M., Niemeier, W., Tamagnini, C., & Gambi, A. (2020). Dynamic analysis of concrete arch-gravity dams: the case of Ridracoli.

- Dowling, M. J. A. Hall., J.F. (1987). Nonlinear Seismic Analysis of Arch Dams, *Journal of Engineering Mechanics. ASCE*, 115(4), 768-789.
- Dehghani M., & Aghajanzadeh H. M. (2019). Seismic response of concrete arch dams due to different non-uniform ground motion models Document Type : Case study. *Numerical Methods in Civil Engineering*, 4(2). <https://doi.org/10.52547/NMCE.4.2.55>
- Dowling, M.J. & Hall, J.F. (1987). Nonlinear seismic analysis of arch dams, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE. 115(4): 768-789.
- Fadaei Tehrani, M. R., & Rahimzade Rofooei, F. (2005a). Evaluation of the seismic response of concrete arch dam including the foundation mass. *ICOLD*.
- Fadaei Tehrani, M. R., & Rahimzade Rofooei F. (2005b). Investigating the seismic response of the concrete arch dam subjected to near field earthquake. *ICOLD*.
- Fadaei Tehrani, M. R., & Ghaemian M. (2008). Seismic analysis of arched concrete dams considering the foundation mass under the influence of earthquakes near the fault, PhD thesis., Sharif University of Technology, Faculty of Civil Engineering.
- Fadaei Tehrani, M.R. (2023a). Analysis and evaluation of water governance in Iran based on the suggested principles of OECD. *Iranian Dam and Hydroelectric Poweplant*, Under press.
- Fadaei Tehrani, M. R. (2023b). Analysis and stratification of hydropolitic challenges of Iran's border rivers. *Iranian Dam and Hydroelectric Poweplant*, Under press.
- Fenves, G., & Chopra, A.K. (1984). Earthquake analysis of concrete gravity dams including reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction. *Earthquake Engineering and Structured Dynamics*. 12(5): 663-680.
- Fenves, G., & Chopra, A.K. (1985). EAGD-84 : A computer program for earthquake analysis of concrete gravity dams", Report No. UCB/EERC 84-11, *University of California, Berkeley*.
- Fenves, G. L., Mojtahedi, S., & Reimer, R. B. (1989). ADAP88: A computer program for nonlinear earthquake analysis of concrete arch dams. Report No. EERC 89-12. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
- Fenves G.L., & Mojtahedi (1992). Effects of contraction joints on earthquake response of an arch dam. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 118(4).
- Gomes, J., & Lemos, J. (2020). Characterization of the dynamic behavior of a concrete arch dam by means of forced vibration tests and numerical models. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49. <https://doi.org/10.1002/eqe.3259>
- Hesari, M., Ghaemian, M., & Shamsai, A. (2015). Advanced nonlinear dynamic analysis of arch dams considering joints effects. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 587263-587263. <https://doi.org/10.1155/2014/587263>
- Hohberg, J. M. (1992). A joint element for the nonlinear dynamic analysis of arch dams. *Report No. 186*, Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, Switzerland.
- Izadinia, M. (2008). Nonlinear dynamic analysis of arched concrete dam considering tensile-shear failure of joints. *Ph.D. Thesis*, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University.
- Karimi Shahi Farm, G. A. (1375). Dynamic analysis of arched concrete dams (Case study of Karoon III Dam). Sharif University of Technology, Faculty of Civil Engineering.
- Kuo, J. S. H. (1982). Joint opening nonlinear mechanism: Interface smeared crack model. University of California, College of Engineering, Earthquake Engineering Research Center.

- Liang, H., Tu, J., Guo, S., Liao, J., Li, D., & Peng, S. (2020). Seismic fragility analysis of a high arch dam-foundation system based on seismic instability failure mode. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 130, 105981. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105981>
- Lotfi, V. (2000). Investigation of nonlinear dynamic behavior of arched concrete dams. Scientific Research Council of the country, National Research Program, Faculty of Civil Engineering, Amir Kabir University of Technology.
- Lotfollahi-yaghin, M., & Hesari, M.A. (2008). Dynamic analysis of the arch concrete dam under earthquake force with ABAQUS. *Journal of Applied Sciences*, 8. <https://doi.org/10.3923/jas.2008.2648.2658>
- MahinKhaki, N., Hoseyni, S. M., & Fadaei Tehrani, M. R. (2015). Estimation of the seismic response of concrete dams using support vector machine [Research]. *Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant*, 2(6), 12-19.
- Monteiro Azevedo, N. (2015). Dynamic analysis of concrete dams: fluid structure displacement based interaction models. *Dam Engineering, Vol XXV*, 1-20.
- Norozian, B. (1995). Nonlinear seismic analysis of concrete arch dams. Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University.
- Niwa, A., & Clough, R.W. (1982). Non-linear seismic response of arch dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10, 267-281.
- Omidi O., & Rahimzadeh, F. (2008). Investigation of the behavior of contraction joints in the seismic response of arched concrete dams. Master's Thesis, Faculty of Civil Engineering, Sharif University of Technology.
- Radin, E. (2008). Investigation of nonlinear dynamic behavior of arched concrete dams. PhD thesis, Faculty of Civil Engineering, Amir Kabir University of Technology.
- Rahimzadeh, F., & Omidi, O. (2002). Investigation of the effects of non-linear behavior of concrete on the seismic response of arched concrete dams. The first conference on safety and improvement of structures, Tehran. <https://civilica.com/doc/629>
- Rezaiee-Pajand, M., Kazemiyan, S., & Sani, A. (2021). A literature review on dynamic analysis of concrete gravity and arch dams. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09564-z>
- Sani, A., & Lotfi, V. (2010). Dynamic analysis of concrete arch dams by ideal-coupled modal approach. *Engineering Structures*, 32, 1377-1383. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.01.016>
- Sohrabi Gilani., M. & Ghaemian, M.(2004). Effect of vertical joints on the dynamic behavior of concrete dams including dam-lake interaction. Sharif University of Technology, Faculty of Civil Engineering.
- Taskov, L., & Jurukovski, D. (1988). Analytical studies of non-linear behaviour of arch dams using shaking table test results of an arch dam fragment. In *9th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 385-390).
- Weber, B., Hohberg, J. M., & Bachmann, H. (1991). Earthquake analysis of arch dams including joint nonlinearity and fluid-structure interaction. In *International conference on earthquake resistant construction and design* (pp. 349-358).
- Xu, Q., Xu, S., Chen, J., & Li, J. (2020). Investigation of stochastic seismic response and index correlation of an arch dam using endurance time analysis method. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 8862869. <https://doi.org/10.1155/2020/8862869>



Water loss from urban water supply networks and the factors affecting it

Seyed Hamid Alavi

Water Engineering and Hydraulic Structure, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author email: Seyedhamidalavi@modares.ac.ir

© The Author(s) 2024

Received: 17 July 2023

Accepted: 02 Sept 2023

Published: 09 Sept 2023

Abstract

Water loss is a significant issue that leads to substantial damage to water resources, civil infrastructure, the environment, and water distribution companies. Urban water supply networks, particularly in regions with scarce water resources, face challenges related to water loss. Leakage from these networks constitutes a major portion of the overall water loss. Factors contributing to leakage include the aging of water supply systems, pipe damage due to soil stresses and urban traffic, fluctuations in water pressure, improper urban plumbing practices, and inadequate embankments. Examining factors such as pressure, pipe type, soil environment, and temperature can help identify the causes of leakage and effectively manage and mitigate its volume. Laboratory and field investigations have revealed that the leakage power, contrary to the pressure-leakage relationship, falls within the range of 0.5 to 2.79, with values exceeding 0.5 due to variations in pipe types, dimensions, and the type of cracks. Reducing the D_{50} (median grain size) of the soil and selecting an appropriate soil granulation around the pipes can effectively reduce the leakage flow rate. This article provides an overview of water wastage, its types, and underlying causes, followed by a discussion on the fundamentals of leakage calculation.

Keywords: leakage management, leakage flow, Water supply network, Pressure, Crack.



هدررفت آب از شبکه‌های آبرسانی شهری و عوامل مؤثر بر آن

سیدحمید علوی

گروه مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*ایمیل نویسنده مسئول: Seyedhamidalavi@modares.ac.ir

© The Author(s) 2024

چاپ: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۱

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۶

چکیده

هدررفت آب سالانه خسارات بسیاری به منابع آب، زیرساخت‌های عمرانی، محیط‌زیست و شرکت‌های توزیع آب وارد می‌کند. هدررفت آب از شبکه‌های آبرسانی شهری، به‌ویژه در مناطقی که منابع آب کمیاب هستند، یک مسئله مهم است. نشت از سامانه‌های آبرسانی شهری که بخشی از هدررفت آب را تشکیل می‌دهد، بخش عمده‌ای از آن را در بر می‌گیرد. این موضوع به دلایل بسیاری چون قدیمی شدن شبکه آبرسانی، آسیب رسیدن به لوله‌ها به دلیل تنش‌های سربار خاک و ترافیک شهری و همچنین افت و خیز فشار شبکه آبرسانی، اجرای نادرست لوله‌کشی شهری و خاکریز نامناسب است. با بررسی مؤلفه‌های تأثیرگذار در دبی نشت مثل فشار، جنس لوله، محیط خاکی پیرامون لوله و دما، می‌توان میزان رخداد نشت را کاهش داد و حجم نشتی را مدیریت کرد. با بررسی‌های آزمایشگاهی و میدانی انجام شده بر خلاف رابطه‌ی روزنه فشار-نشت، توان نشت در بازه‌ی ۰/۵ تا ۲/۷۹ قرار گرفته و بیشتر از ۰/۵ است که تفاوت در جنس لوله، تفاوت ابعاد و نوع ترک در تغییر توان در بازه‌ی گفته شده مؤثر است. با انتخاب مناسب دانه‌بندی خاک پیرامون لوله و کاهش D_{50} خاک می‌توان دبی نشت را کاهش داد. در مقاله‌ی حاضر ابتدا کلیاتی از هدررفت آب، انواع آن و دلایل آن مطرح می‌شود سپس به مبانی محاسبه‌ی نشت پرداخته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مدیریت نشت، دبی نشت، شبکه آبرسانی، فشار، ترک

۱- مقدمه

طی قرن بیستم جمعیت جهانی رشدی ناگهانی از ۴ میلیارد نفر در سال ۱۹۷۴ میلادی به ۶ میلیارد نفر در سال ۲۰۰۰ میلادی داشت. این افزایش جمعیت نشان از تأمین بودن هوای پاک، غذا، آب سالم و بهداشت مناسب بود. بشر در طول نیمه‌ی دوم قرن بیستم دریافت که منابع محدود زمین جوابگوی این رشد نیست و نمی‌توان به صورت قبل ادامه داد (Thornton et al., 2008). دسترسی به آب یکی از مؤلفه‌های مهم رشد جمعیت است و بشر نیازمند است جهت حفظ بقای خود با روش‌های مهندسی به برداشت، تصفیه و انتقال آب بپردازد. در کشورهای در حال توسعه، مشکل تأمین آب بهداشتی وجود دارد و در کشورهای توسعه‌یافته مشکل شکل دیگری نیز دارد. در این کشورها به دلیل هدررفت آب، خطر ناپایداری منابع آب در درازمدت وجود دارد. این کشورها در انتقال آب با حجم و کیفیت بالا موفق عمل کرده‌اند اما به میزان زیادی هدررفت آب دارند (Thornton et al., 2008).

سامانه‌های توزیع آب در سراسر جهان در حال زوال هستند، در حالی که تقاضا برای این سامانه‌ها و در نتیجه منابع آب طبیعی، روزبه‌روز در حال افزایش است. تلفات ناشی از سامانه‌های توزیع آب در بسیاری از شهرها در سراسر جهان به سطوح هشدار دهنده‌ای رسیده است. تلفات آب شامل مؤلفه‌های مختلفی از جمله تلفات فیزیکی (نشتی)، استفاده غیرقانونی، استفاده بدون اندازه‌گیری و ناشی از عدم ثبت کنتور آب است. نشت بخش بزرگی را از تلفات آب تشکیل می‌دهد، گاهی اوقات تا بیش از ۷۰٪ از کل تلفات آب گزارش شده است (Van Zyl & Clayton, 2007).

نشت آب در سیستم‌های توزیع آب جهانی چالش مهمی است، تخمین هدررفت بسته به مکان از ۱۰٪ تا ۵۵٪ از حجم ورودی آب به شبکه متغیر است (Ávila et al., 2021). انجمن بین‌المللی آب^۱ (IWA) در سال ۱۹۹۱ نشان داد که تلفات آب کشورهای توسعه‌یافته ۸-۲۴ درصد است، کشورهای تازه صنعتی شده با تلفات ۱۵-۲۴ درصد و کشورهای در حال توسعه نرخ بسیار بالاتری از ۲۵-۴۵ درصد داشته‌اند (Farley et al., 2001). هزینه‌ی سالانه آب بدون درآمد^۲ (NRW) برای شرکت‌های آب در سراسر جهان تقریباً ۱۴ میلیارد دلار است که یک سوم این هزینه بر کشورهای در حال توسعه تأثیر می‌گذارد. نشت در کشورهای در حال توسعه منجر به از دست دادن حدود ۴۵ میلیون مترمکعب آب در روز می‌شود که برای تأمین آب ۲۰۰ میلیون نفر کافی است (Kingdom et al., 2006). تحقیقات اخیر توسط Liemberger & Wyatt (2018) نشان می‌دهد که برآوردهای قبلی NRW محافظه‌کارانه بوده است، با برآورد NRW جهانی ۳۴۶ میلیون مترمکعب در روز یا ۱۲۶ میلیارد مترمکعب در سال، که منجر به هزینه سالانه آب از دست رفته بالغ بر ۳۹ میلیارد دلار آمریکا می‌شود حتی با قیمت محافظه‌کارانه ۰/۳۱ دلار در هر متر مکعب.

¹ International Water Association

² Non-Revenue Water

نشت آب از سامانه‌های آبرسانی شهری تأثیرات مخربی نیز در زیرساخت‌های شهری دارد و باعث شسته‌شدن و روان‌شدگی خاک می‌شود. در این موارد لوله‌ها آسیب‌های بیشتری می‌بینند (Mohsin & Majid, 2014) و با ایجاد فرونشست، باعث آسیب به جاده‌ها و ساختمان‌ها نیز می‌شود (Pike, 2016).

همه‌ی موارد ذکر شده نشان از اهمیت مدیریت نشت و بررسی مؤلفه‌های مؤثر بر آن می‌دهد. در ادامه کلیاتی از هدررفت آب، انواع آن و دلایل آن گفته می‌شود سپس به روش‌های متداول محاسبه‌ی نشت پرداخته می‌شود و یکی از فرمول‌های بنیادی نشت در آن توضیح داده می‌شود.

۲- انواع هدررفت آب

تلفات آب در یک سیستم توزیع آب شامل تلفات ظاهری^۳ و واقعی^۴ است. تلفات واقعی عمدتاً ناشی از نشت از لوله‌ها، اتصالات سرویس و سرریز در مخازن ذخیره‌سازی است، در حالی که تلفات ظاهری ناشی از مصرف غیرمجاز، عدم دقت اندازه‌گیری و خطاهای پردازش داده است (Karadirek & Aydin, 2022). انجمن بین‌المللی آب (IWA) دو نوع از هدررفت آب که تولیدکنندگان با آن مواجه هستند را شرح داده است (Thornton et al., 2008):

هدررفت حقیقی (واقعی): نشت از سامانه‌های توزیع، اتصالات، تبدیل‌ها، نشت از مخازن هوایی و زمینی، سرریز مخازن، کانال‌های روباز و شیرهای تخلیه هدررفت حقیقی نام دارد. همه‌ی سامانه‌های آب در جهان مقداری هدررفت حقیقی دارند. کارکنان نشت‌یابی معتقدند که هدررفت حقیقی را نمی‌توان به صورت کامل از بین برد؛ در شبکه‌های تازه تأسیس نیز مقدار حداقلی از هدررفت حقیقی وجود دارد ولی تجربه نشان داده است که می‌توان هدررفت حقیقی را چنان مدیریت کرد تا در یک محدوده‌ی اقتصادی مناسب قرار گیرد.

هدررفت مجازی (ظاهری): آبی است که به صورت غیرفیزیکی از دست می‌رود و درآمدی نیز ندارد. دلیل این امر می‌تواند خطای سامانه‌های اندازه‌گیری، داده‌های آماری و یا هرگونه آبدزدی و استفاده‌ی غیرقانونی از آب باشد. این بخش از هدررفت، هدررفت مجازی نام دارد.

طبق روش ارائه شده توسط انجمن بین‌المللی آب مجموع هدررفت حقیقی و مجازی به اضافه‌ی مقدار مصرف مجاز و ثبت نشده، آب به حساب نیامده نام دارد.

هدررفت حقیقی از سه بخش، که در شکل (۱) نشان داده شده است، تشکیل شده است (Thornton et al., 2008).

³ Apparent
⁴ Real

شکل ۱. انواع هدررفت حقیقی و روش‌های مقابله (Thornton et al., 2008)

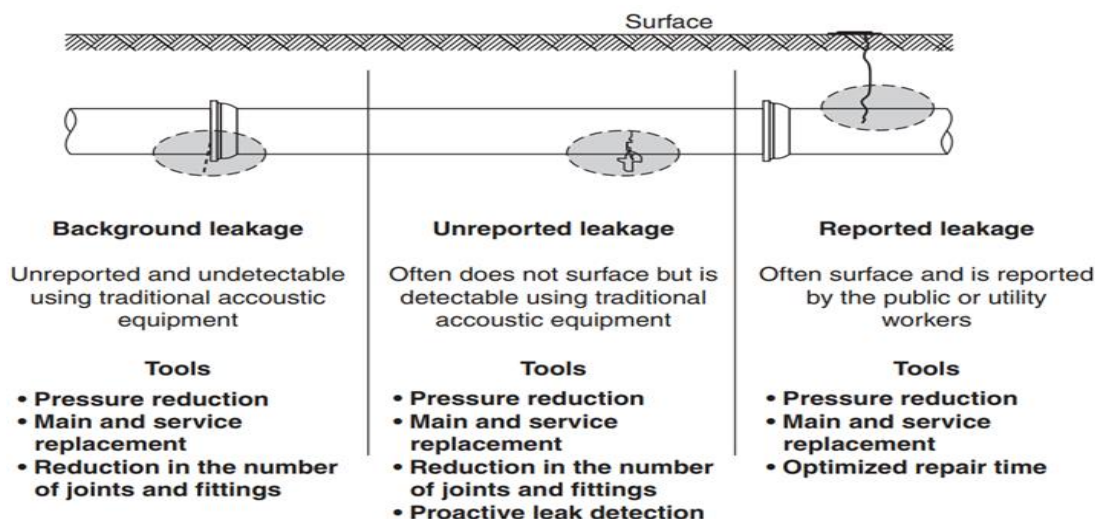


Fig 1. Types of real water loss and coping methods (Thornton et al., 2008)

الف) نشت و شکست‌های گزارش‌شده: این نوع نشت‌ها قابل رؤیت، مشکل‌ساز، با دبی زیاد بوده و زمان کمی طول می‌کشد تا مشتریان و یا پرسنل آب و فاضلاب به دلیل کاهش فشار یا قطعی، متوجه آن شوند.

ب) نشت و شکست‌های گزارش‌نشده: این نوع نشت‌ها قابل رؤیت نبوده ولی دارای دبی زیاد هستند. همچنین زمان زیادی طول می‌کشد تا مشتریان و یا پرسنل آب و فاضلاب به دلیل کاهش فشار یا قطعی، متوجه آن شوند.

ج) نشت پس‌زمینه: تراوش‌های به هم پیوسته‌ای است که در زانویی‌ها و اتصالات وجود دارند. دبی در این نوع نشت آن‌قدر پایین است که با دستگاه‌های نشت‌یاب آکوستیک معمولی قابل تشخیص نیست. این نشت آن‌قدر ادامه پیدا می‌کند تا زیاد شده و قابل شناسایی شود تنها راه کاهش آن مدیریت فشار و جایگزینی زیرساخت‌ها است.

تصور اشتباه رایج این است که شکست در شاه‌لوله‌ها، چون زود به سطح می‌رسد و منجر به اختلال در آبرسانی می‌گردد، اصلی‌ترین عامل هدررفت آب در لوله‌ها است. اغلب تصور می‌شود که حجم زیادی آب در اثر خرابی ناگهانی لوله‌ها در مدتی کوتاه از دست می‌رود ولی در اثر نشت‌ها و شکست‌های پنهان که سال‌ها ادامه می‌یابد تا تعمیر شود حجم بیشتری آب از دست می‌رود (Thornton et al., 2008).

هدررفت و نشت آب از شبکه‌های توزیع آب^۵ (WDN) در ایران که منابع آبی کمیاب است و کشور با بحران آب مواجه است، موضوع مهمی است. بر اساس مطالعاتی، میانگین سطح آب محاسبه‌نشده^۶ (UFW) در ایران از سال ۱۹۹۷ تا اوایل دهه ۲۰۰۰، ۴۰/۶٪ و ناشی از تلفات حقیقی و مجازی به ترتیب ۵۴ و ۴۵٪ بوده است (Boudaghpour & Sabooteh, 2020).

^۵ Water Distribution Network

^۶ Unaccounted for Water

در بسیاری از موارد، نشتی گزارش نشده در خطوط لوله WDN، به ویژه WDN های قدیمی، باعث نسبت بالایی از کل تلفات سالانه می‌شود. بیش از ۳۰ درصد هدررفت آب شرب از طریق سیستم‌های توزیع آب در ایران باعث نگرانی عمده شرکت‌های آب ایران شده است که در منطقه‌ای نیمه‌خشک واقع شده است (Mahdavi et al., 2011).

۳- دلایل هدررفت حقیقی

هدررفت آب در شبکه‌های توزیع آب به دلایل مختلفی می‌تواند رخ دهد. برخی از دلایل رایج عبارتند از نشت گزارش نشده، خرابی یا شکستگی لوله، و فشار بالا (Ribeiro et al., 2018) (Iwanek & Suchorab, 2017) (Kourbasis et al., 2020). نشت‌های گزارش نشده، به‌ویژه در لوله‌های پلاستیکی، قطره‌های بزرگ و شرایط فشار کم، به سختی قابل یافتن هستند و می‌توانند به‌طور قابل توجهی در تلفات آب نقش داشته باشند (Kanakoudis & Tsitsifli, 2019). خرابی یا شکستگی لوله می‌تواند منجر به جریان آب به سطح خاک شود که منجر به از دست دادن آب قابل مشاهده می‌شود (Ociepa et al., 2018). درک و پرداختن به این دلایل هدررفت واقعی آب برای مدیریت کارآمد و پایدار منابع آب در سیستم‌های توزیع آب بسیار مهم است.

بر اساس مقاله‌ای از آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده سیستم‌های توزیع آب شبکه‌های پیچیده‌ای از لوله‌ها، پمپ‌ها و تأسیسات ذخیره‌سازی هستند که آب تمیز را به خانه‌ها و مشاغل می‌رسانند. با بالا رفتن سن این سیستم‌ها، زوال می‌تواند به دلیل خوردگی، فرسایش مواد و فشارهای خارجی رخ دهد. خراب شدن سیستم‌های توزیع آب می‌تواند منجر به شکستگی در لوله‌ها و تأسیسات ذخیره‌سازی شود (US EPA, 2015). در کتاب کنترل هدررفت آب در شبکه‌های توزیع دلایل خرابی لوله‌ها آب در شکل (۲) ارائه شده است (Thornton et al., 2008):

شکل ۲. دلایل خرابی لوله‌ها در شبکه‌های توزیع

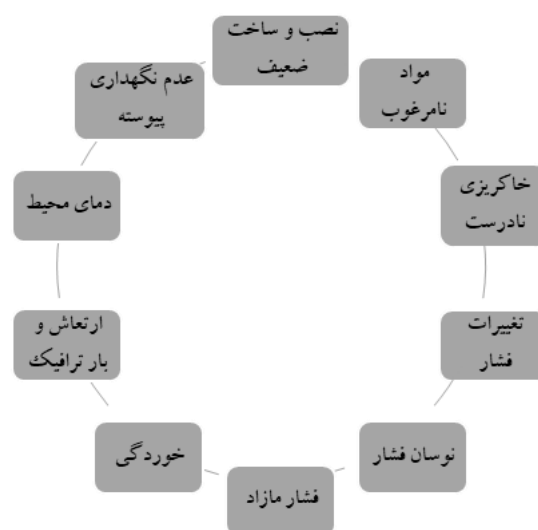


Fig 2. Reasons for pipe failure in distribution networks

در ادامه به شرح مؤلفه‌های مؤثر در دبی نشت پرداخته شده است.

۴ - عوامل مؤثر در حجم نشت

مؤلفه‌های مؤثر در حجم نشت که محققان به آن پرداخته‌اند فشار، دما، جنس لوله، نوع و اندازه‌ی ترک و مصالح پیرامون ترک است. آن‌ها تلاش داشته‌اند نقطه‌ای بهینه در انتخاب فشار، نوع لوله و خاکریز مناسب دبی نشت را معرفی کنند. با کنترل این عوامل می‌توان هدررفت آب را به حداقل رساند. موارد زیر یافته‌های پژوهشگران در این زمینه است.

۱-۴ - فشار

از گذشته تاکنون، رفتار هیدرولیکی روزنه‌ها به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است و عکس‌العمل آن‌ها را با درجاتی از اطمینان می‌توان پیش‌بینی کرد. یکی از عوامل اصلی مؤثر بر نشت، فشار در سامانه‌های توزیع است. در گذشته، دیدگاه مرسوم این بود که نشت از سامانه‌های توزیع آب، نسبتاً غیرحساس به فشار است، همان‌طور که توسط معادله‌ی روزنه به‌صورت زیر نشان داده شده است (Van Zyl & Clayton, 2007).

$$q = AC_d \sqrt{2gh} \quad (۱)$$

که در آن q دبی جریان، C_d ضریب تخلیه، A مساحت روزنه، g شتاب گرانش و h اختلاف فشار روی دهانه است. معادله‌ی روزنه (۱) برای روزنه‌ای در کنار مخزن به‌دست آمد و تبدیل تمام انرژی پتانسیل را به انرژی جنبشی توصیف می‌کند. ضریب تخلیه برای اعمال تلفات انرژی و کاهش قطر جت در پایین‌دست روزنه، ضرب شده‌است. برای اعمال این معادله برای نشت در لوله‌ها می‌توان آن را به شکل کلی‌تر زیر نوشت.

$$q = ch^\alpha \quad (۲)$$

که در آن c به عنوان ضریب نشت و α توان نشت تعریف می‌شود. تعدادی از مطالعات میدانی نشان داده است که α می‌تواند به طور قابل توجهی بزرگتر از ۰/۵ باشد و معمولاً بین ۰/۵ و ۲/۷۹ با میانگین ۱/۱۵ متغیر است (Van Zyl & Clayton, 2007). این بدان معنی است که نشت در سامانه‌های توزیع آب نسبت به فشار بسیار حساس‌تر از آنچه تصور می‌شود، است. محدوده توان‌های مشاهده شده منعکس کننده تفاوت‌های اساسی در تأثیر فشار بر میزان نشت است. به عنوان مثال، کاهش فشار به نصف در یک لوله منجر به کاهش دبی ۲۹٪، ۵۰٪ و ۸۲٪ برای توان‌های ۰/۵، ۱/۰ و ۲/۵ می‌شود.

May (1994) دریافت که توان فشار α به جنس لوله و شکل ناحیه نشتی بستگی دارد، زیرا در لوله‌های تغییرشکل‌پذیر افزایش فشار لوله می‌تواند منجر به افزایش سطح مقطع نشتی شود:

$$A = A_0 + mh \quad (۳)$$

که در آن A_0 مساحت نشت اولیه و m شیب معادله فشار-مساحت است. این موضوع مبنای تئوری دبی مساحت ثابت و متغیر (FAVAD^۷) قرار گرفت. با تلفیق نظریه FAVAD با شکل نمایی معادله فشار-نشت ($\alpha = 0.5$)، Cassa et al. (2010) معادله نشتی را در قالب معادله (۴) ارائه کردند:

$$q = C_d \sqrt{2g} (A_0 h^{0.5} + m h^{1.5}) \quad (۴)$$

مدیریت فشار در سامانه‌های آبرسانی شهری می‌تواند تأثیر مستقیمی بر نشت و آسیب‌های لوله‌ها داشته باشد. بر اساس تحقیق (Tabesh & Vaseti (2006) مدیریت فشار معمولاً بهینه‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر از روش‌های دیگر کاهش نشت است. آن‌ها روشی جهت کاهش نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری از طریق کمینه نمودن مجموع مربعات فشار اضافی در گره-های سیستم ارائه کردند و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از شیرهای فشارشکن در نقاط مناسب و بهینه نمودن مقدار فشار خروجی شیرآلات، فشار تک‌تک گره‌های شبکه به حداقل مقدار در محدوده استاندارد، کاهش می‌یابد.

۴-۲- دما

دما در ویسکوزیته سینماتیکی یک سیال، تأثیرگذار است، عدد رینولدز برای یک بازشدگی یا روزنه را می‌توان به صورت زیر نوشت. از معادله (۵) نتیجه می‌شود که دبی نشتی برای Re ثابت، (مثلاً برای حداکثر جریان آرام یا انتقالی) متأثر از دمای سیال است. به طور مثال، ویسکوزیته آب زمانی که دمای آن از ۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد تقریباً نصف می‌شود، به این معنی که حداکثر جریان آرام یا متلاطم تقریباً دو برابر می‌شود (Van Zyl & Clayton, 2007).

$$Re = \frac{4vR}{v} = \frac{4q}{vP} \quad (۵)$$

که در آن v سرعت، v ویسکوزیته سینماتیکی سیال و R شعاع هیدرولیکی روزنه است (به عنوان مساحت جریان A تقسیم بر محیط خیس شده P تعریف می‌شود).

(Sadr-Al-Sadati & Jalili Ghazizadeh (2019) به بررسی تأثیر دما در نشت پرداختند. در این مطالعه، میزان آب نشتی از یک شکاف طولی در لوله HDPE به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها و نتایج عددی ایشان نشان داد که دما باید به عنوان یک پارامتر مهم در نشت شبکه‌های توزیع آب، WDN در نظر گرفته شود. افزایش دما نه تنها نرخ نشت را افزایش می‌دهد، بلکه تنش تسلیم لوله‌های HDPE را کاهش می‌دهد که ممکن است باعث تغییر شکل پلاستیک شکاف‌های طولی در شبکه‌های توزیع آب شود. در نتیجه، میزان توان نشت می‌تواند بالاتر از مقدار پیشنهادی ۱/۵ باشد که به عنوان حداکثر توان نشتی در فاز الاستیک در نظر گرفته می‌شود. افزون بر این، رفتار پلاستیکی و خواص ویسکوالاستیک لوله‌های HDPE باعث تغییر دائمی ناحیه‌ی اولیه دهانه نشتی می‌شود. در جدول (۱) ضریب اصلاح

⁷ Fixed and Variable Area Discharge

الاستیسیته لوله متناسب با تغییرات دما آورده شده است. بنابراین اگر شبکه‌های توزیع آب در معرض فشار قرار گیرند، توان نشی (α) و ضریب نشت (C_d) تغییر خواهند کرد. این تغییر رفتار به ویژه در مناطق گرمسیری، که آب با درجات بالاتر در خطوط لوله جریان دارد، از اهمیت بیشتری برخوردار است، به طوری که اجتناب از نوسانات فشار و مدیریت بهینه فشار در شهرهای گرمسیری ضروری است.

جدول ۱. ضریب اصلاح الاستیسیته بر اساس تغییرات دما

Table 1. Elasticity correction factor based on temperature changes

Temperature (°C)	Elasticity correction factor (k)
10	1.32
16	1.18
23	1
27	0.93
32	0.82
38	0.73
43	0.64

۴-۳- جنس لوله

Van Zyl و Clayton (2007) نشان دادند که جنس لوله نقش مهمی در رفتار نشی لوله‌ها دارد. فشار آب در لوله توسط تنش‌های موجود در دیواره‌ی لوله گرفته می‌شود و بنابراین ممکن است عاملی در شکست و رفتار نشی باشد. اثرات زیر را می‌توان به افزایش فشار داخلی لوله مرتبط کرد.

(الف) ترک‌ها یا شکستگی‌های کوچکی که در فشار کم نشت نمی‌کنند، باعث ایجاد بازشدگی‌های جدید می‌شود.

(ب) مساحت دهانه‌های موجود در لوله به دلیل افزایش تنش در دیواره‌ی لوله، افزایش می‌یابد.

(ج) ترکیب لوله‌ها افزایش می‌یابد (Thornton & Lambert, 2005) و (Farley & Trow, 2003) همراه با افزایش متناظر در هزینه‌های نگهداری.

Greyvenstein & Van Zyl (2007) به صورت آزمایشگاهی میزان توان نشت از لوله‌های آسیب‌دیده در صحرا و لوله‌های مصنوعی آسیب‌دیده را مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه شامل سوراخ‌های گرد، ترک‌های طولی و محیطی در لوله‌های uPVC، فولاد و آذبت سیمان بود. همه‌ی جریان‌ها متلاطم بودند و نشت‌ها در معرض جو بودند. توان‌های نشت حاصل بین ۰/۴۱ و ۲/۳۰ متغیر بود. یافته‌های اصلی مطالعه‌ی Van Zyl & Clayton (2007) به شرح زیر بود:

(الف) توان‌های نشت یافت‌شده در مطالعات میدانی غیرواقعی نیستند.

(ب) بیشترین توان‌های نشت در لوله‌های فولادی زنگ‌زده رخ داده است، احتمالاً به دلیل خوردگی که باعث کاهش مواد حفاظت‌کننده در اطراف سوراخ می‌شود. این برخلاف تصور است که لوله‌های پلاستیکی به دلیل مدول الاستیسیته پایینی، نشت بیشتری دارند.

(ج) سوراخ‌های گرد دارای توان‌های نشت نزدیک به مقدار نظری ۰/۵ بودند و تفاوت معناداری بین لوله‌های فولادی و uPVC برای سوراخ‌های گرد مشاهده نشد.

(د) علاوه بر سوراخ‌های دچار خوردگی، بزرگترین توان‌های نشت برای ترک‌های طولی یافت شد. به دلیل این که تنش‌های محیطی در لوله‌ها معمولاً به طور قابل توجهی بیشتر از تنش‌های طولی است.

(ه) توان‌های نشت برای ترک‌های محیطی در لوله‌های uPVC گاهی کمتر از ۰/۵ بود، که نشان می‌دهد که بازشدگی ممکن است با افزایش فشار منقبض شود. این حالت به این شکل توضیح داده می‌شود که تجهیزات آزمایشگاهی اجازه نمی‌دهد تنش‌های طولی قابل توجهی در لوله ایجاد شود. تصور می‌شود که تنش‌های محیطی باعث کشیده شدن ترک‌ها و در عین حال کاهش سطح آن شده است. این نتایج متعاقباً از طریق تحلیل اجزای محدود تأیید شده است (Cassa, 2005).

Ferrante (2012) فرمولی با توان متغیر برای h به جای ۱/۵ پیشنهاد کرد. Cassa & Van Zyl (2013) نشت یک ترک به طول ۶۰ میلی‌متر را روی یک لوله ۱۱۰ میلی‌متری uPVC مطالعه کردند و با استفاده از یک مدل اجزاء محدود، معادلاتی را برای پیش‌بینی شیب معادله فشار-مساحت (m) به عنوان تابعی از ویژگی‌های لوله همچون جنس لوله پیشنهاد کردند.

۴-۴- نوع و اندازه ترک

در تحقیقی که Van Zyl & Clayton (2007) انجام دادند، به بررسی سوراخ‌های گرد، ترک‌های طولی و محیطی در لوله‌های uPVC، فولاد و آزیست سیمان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که توان‌های نشت بین ۰/۴۱ و ۲/۳۰ متغیر است و سوراخ‌های گرد دارای توان‌های نشت نزدیک به مقدار نظری ۰/۵ بوده و تفاوت معناداری بین لوله‌های فولادی و uPVC برای سوراخ‌های گرد مشاهده نشده است. علاوه بر سوراخ‌های دچار خوردگی، بزرگترین توان‌های نشت برای ترک‌های طولی یافت شد. توان‌های نشت برای ترک‌های محیطی در لوله‌های uPVC گاهی کمتر از ۰/۵ بود، که نشان می‌دهد بازشدگی ممکن است با افزایش فشار منقبض شود. جدول (۲) نشان می‌دهد که دهانه‌های نشتی با محیط‌های خیس‌شده‌ی کشیده (مانند ترک‌ها) می‌توانند دبی بسیار بزرگتری را برای جریان آرام یا انتقالی نسبت به دهانه‌های مدور با همان مساحت عبور دهند (Van Zyl & Clayton, 2007).

جدول ۲. توان‌های نشت آزمایشگاهی برای تعدادی از شکست‌ها و لوله‌ها (Van Zyl & Clayton, 2007)

Table 2. Laboratory leakage exponents for a number of failures and pipes (Van Zyl & Clayton, 2007)

Failure type	Leakage exponent		
	uPVC	Asbestos cement	Mild steel
Round hole	0.52	—	0.52
Longitudinal crack	1.38–1.85	0.79–1.04	—
Circumferential crack	0.41–0.53	—	—
Corrosion cluster	—	—	0.67–2.30

Cassa & Van Zyl (2013) در مطالعه عددی خود در تعیین شیب معادله فشار-مساحت، تأثیر نوع و اندازه‌ی ترک را در نظر گرفتند و برای ترک طولی، محیطی و مارپیچی معادلاتی به دست آوردند. آن‌ها شیب معادله فشار-مساحت به شکل معادلات (۶) تا (۸) را به ترتیب برای ترک طولی، مارپیچی و محیطی به دست آوردند.

$$m = \frac{2.93157 \cdot d^{0.3379} \cdot L_c^{4.80} \cdot 10^{0.5997(\log L_c)^2} \cdot \rho \cdot g}{E \cdot t^{1.746}} \quad (۶)$$

$$m = \frac{3.7714 \cdot d^{0.178569} \cdot L_c^{6.051} \cdot \sigma_1^{0.0928} \cdot 10^{1.05(\log L_c)^2} \cdot \rho \cdot g}{E \cdot t^{1.6795}} \quad (۷)$$

$$m = \frac{1.64802 \times 10^{-5} \cdot L_c^{4.87992662} \cdot \sigma_1^{1.09182555} \cdot 10^{0.82763163(\log L_c)^2} \cdot \rho \cdot g}{E \cdot t^{0.33824224} \cdot d^{0.186376316}} \quad (۸)$$

که در آن d قطر داخلی لوله، L_c طول ترک، σ_1 تنش طولی (برای ترک‌های مارپیچی و محیطی)، t ضخامت جدار لوله و E مدول الاستیسیته جنس لوله است. آن‌ها نتیجه گرفتند که شیب معادله فشار-مساحت مستقل از عرض اولیه ترک است و برای ترک‌های طولی بیشترین حساسیت به تغییرات فشار دارند بعد از ترک‌های مارپیچی و سپس ترک‌های محیطی.

۴-۵- مصالح پیرامون لوله

Noack & Ulanicki (2008) نشت ایده‌آل از یک روزنه‌ی دایره‌ای را با استفاده از معادله‌ی داریسی - وایسباخ و مدل خاک ۲ بعدی، با معادله‌ی انتشار استاندارد، مدل‌سازی کردند. آن‌ها با ترکیب معادلات ذکر شده، در قالب یک مدل پایدار، تأثیر

نفوذپذیری خاک بر مشخصات نشت از لوله را تعیین کردند. آن‌ها همچنین توان α را برای خاک‌های مختلف پیدا کردند. مقدار توان به‌دست آمده برای نفوذپذیری بسیار کم، نزدیک به ۱ بود؛ یعنی خروجی از قانون جذر پیروی نمی‌کرد. با این حال، با افزایش نفوذپذیری، توان تا رسیدن به ۰/۵ کاهش یافت؛ یعنی خروجی لوله از قانون ریشه مربع پیروی می‌کرد. آن‌ها چندین آزمایش را روی مدل آزمایشگاهی با خاک رس و خاک معمولی انجام دادند. مقادیر توان برای خاک معمولی ۰/۳ و برای خاک رسی ۰/۵ بود و همچنین نتایج با مقادیر مدل عددی متفاوت بود.

van Zyl (2014) پیش‌بینی کرد که خاک‌های اطراف یک نشتی ممکن است بر رابطه‌ی فشار-نشت تأثیر بگذارند، بعید است که هر خاکی ظرفیت فشارهایی را که معمولاً در سامانه‌های توزیع آب یافت می‌شود، داشته باشد؛ بنابراین، خاک کمی بر فشار-نشت تأثیر می‌گذارد.

Walski et al. (2004) با ارائه معادلات نظری به این نتیجه رسیدند که هر دو تلفات خاک و روزنه با غلبه اولی در برخی موارد، در نشت تأثیرگذار بودند. آن‌ها یک عامل بدون بعد، OS را به صورت معادله (۹) تعریف کردند که نشان‌دهنده‌ی تسلط خاک یا روزنه است. هنگامی که OS در حدود مرتبه ۱ است، افت خاک و روزنه به یک اندازه موثر است. در مورد OS بسیار کوچک ($OS < 0.01$)، تلفات خاک غالب است و زمانی که OS بسیار بزرگ است ($OS > 100$)، افت روزنه غالب است.

$$OS = \frac{h}{h_s} = \frac{KA_s q}{2gL} \left(\frac{1}{C_d A} \right)^2 \quad (9)$$

Latifi et al. (2018) نیز به تحقیق درباره‌ی پارامترهای جنس خاک بر میزان نشت از لوله‌ها پرداختند. آن‌ها با انتخاب چند نمونه خاک، نشت از لوله در حضور خاک در آزمایشگاه را شبیه‌سازی کردند. برای حذف اثر تغییرات فشار، بر میزان نشت از خاک‌های مختلف، یک توان واحد برای فشار در رابطه‌ی نشت-فشار برای تمامی خاک‌ها محاسبه شد؛ سپس با لحاظ نمودن پارامترهای D_{10} ، D_{50} ، شاخص خمیری (PI) و ضریب هدایت هیدرولیکی خاک (k)، روابط زیر بین دبی نشت و هر یک از پارامترهای جنس خاک به‌دست آمد. ضرایب R^2 خوبی با توجه به پیچیدگی رفتار خاک به‌دست آمده است و نشان می‌دهد روابط در پیش‌بینی دبی نشت برای شرایط محیطی این آزمایش مناسب هستند.

$$Q = 13.33 D_{50}^{0.1133} P^{0.5745} \quad R^2 = 0.74 \quad (10)$$

$$Q = 0.202 \ln(4.2k) D_{50}^{0.1133} P^{0.5745} \quad R^2 = 0.69 \quad (11)$$

$$Q = 17.105 PI^{-0.155} P^{0.5745} \quad R^2 = 0.63 \quad (12)$$

در این روابط، تأثیر مشخصات خاک و تغییرات آن‌ها بر میزان دبی نشت به خوبی ملاحظه گردید. به نحوی که در خاک‌های درشت‌دانه‌تر مقدار نشت از لوله بیشتر از خاک‌های ریزدانه‌تر به‌دست آمد. همچنین در خاک‌های دارای شاخص خمیری بالاتر، مقدار نشت کمتری به‌دست آمد که می‌تواند ناشی از افزایش مقدار ریزدانه‌ها در خاک و مقاومت خاک ریزدانه در زهکشی نشتاب باشد. براساس نتایج به‌دست آمده افزایش چسبندگی در خاک‌های دانه‌ای یا بخش ریزدانه خاک موجود یا به عبارتی افزایش سهم رس نسبت به سیلت در بخش ریزدانه‌ی خاک می‌تواند موجب کاهش نشت شود. همچنین ملاحظه گردید که در خاک‌های دارای ضریب هدایت هیدرولیکی بالاتر، مقدار نشت بیشتری اندازه‌گیری شده‌است.

(Latifi et al. (2022) به بررسی اثرات خواص مختلف خاک اطراف لوله بر دبی نشتی پرداختند. بدین منظور نشت از لوله‌های پلی‌اتیلن در شرایط آزمایشگاهی با ترک‌های طولی در پنج نوع خاک مختلف و با ترک‌های محیطی در پنج نوع خاک دیگر شبیه‌سازی شد و میزان نشت اندازه‌گیری شد. سپس برای هر نوع خاک رابطه دبی- فشار به دست آمد. نتایج نشان داد که خواص خاک بر میزان نشت از ترک‌های طولی و محیطی مؤثر است. همچنین مشاهده شد که در خاک، میزان نشت از تئوری FAVAD پیروی می‌کند. با مقایسه ویژگی‌های مختلف خاک، مشخص شد که بین پارامترهای اندازه ذرات خاک، حد خمیری و نفوذپذیری هیدرولیکی خاک‌ها و دبی نشتی همبستگی وجود دارد. با بررسی این همبستگی مشخص شد که پارامتر D_{50} خاک، نفوذپذیری هیدرولیکی و وزن واحد خشک شاخص‌های بهتری برای معرفی خصوصیات خاک در اطراف ترک‌ها هستند.

۵- نتیجه‌گیری

هدررفت آب با توجه به توسعه‌یافتگی کشورها از ۱۰٪ تا ۵۵٪ است که می‌تواند پاسخگوی نیاز حدود ۲۰۰ میلیون نفر باشد. با توجه به این میزان هدررفت و خطر بالفعل کاهش منابع آب قابل بهره‌برداری، مدیریت نشت و بررسی عوامل تأثیرگذار در هدررفت آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نتایج مطالعات میدانی مدیریت فشار نشان داده است که توان نشتی اغلب به طور قابل توجهی بالاتر از مقدار ۰/۵ است. با توجه به تأثیر بالای فشار در دبی نشت، یکی از مناسب‌ترین روش‌های در کاهش نشت، کاهش فشار در سیستم‌های آبرسانی شهری با استفاده از شیرهای فشارشکن است. محققین به شناسایی و تجزیه و تحلیل عواملی پرداختند که ممکن است مسئول توان‌های نشت بالاتر باشند. یک عامل مهم رفتار جنس لوله است رفتار مواد لوله می‌تواند بازه‌ی توان‌های نشت مشاهده شده در محیط را تغییر دهد. جنس لوله، نوع و اندازه ترک در شیب معادله فشار-مساحت تأثیرگذار است. شیب معادله فشار-مساحت نسبت به تغییرات فشار نسبت به ترک‌های محیطی بیشترین حساسیت را نشان می‌دهد. همچنین دما علاوه بر تغییر هیدرولیک جریان می‌تواند مدول الاستیسیته لوله را تغییر داده و ابعاد ترک تحت تأثیر آن قرار گیرد. پیچیدگی اندرکنش بین یک لوله نشتی و خاک اطراف آن مورد بحث قرار گرفته است و نتیجه‌گیری شد که رابطه‌ی بین فشار و نشت خطی نیست. با افزایش D_{50} خاک دبی نشت افزایش می‌یابد. نفوذپذیری هیدرولیکی و وزن واحد خشک شاخص‌های مناسبی در تعیین خصوصیات خاک است. میزان نشت از سامانه‌های آبرسانی شهری در ایران مربوط به مطالعات قبل از سال ۲۰۰۰ میلادی است و با توجه گذشت زمان و پیشرفت فناوری

در سیستم‌های اندازه‌گیری نشت، لازم است بررسی‌های بیشتری در حجم نشت در ایران صورت گیرد. تحقیقات بیشتری برای ارزیابی تأثیر پارامترهای دما بر روی خواص ویسکوالاستیک لوله‌های HDPE و تأثیر آن‌ها بر رفتار WDNs مورد نیاز است. مطالعات انجام شده در بخش تأثیر نوع ترک در معادله شیب-مساحت به صورت عددی بوده است و نیاز است مطالعات تجربی نیز به بررسی آن پردازد. نیاز است در مطالعات مقدار مدول الاستیسیته لوله و نسبت پواسون ذکر شود تا در مطالعات عددی جهت مقایسه نتایج از آن‌ها بهره‌برداری شود. در پژوهش‌های انجام شده تأثیر خاک‌های حل‌شونده چون آهک در خرابی لوله و در نتیجه در دبی نشت بررسی نشده است. با توجه به این که سامانه‌های آبرسانی شهری ممکن است در این محیط‌ها قرار گیرند پیشنهاد می‌شود به این موضوع نیز پرداخته شود. درباره‌ی دبی نشت در اتصالات نیز نیاز به تحقیقات بیشتری است.

۶- تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

۷- مراجع

- Ávila, C. A. M., Sánchez-Romero, F.-J., López-Jiménez, P. A., & Pérez-Sánchez, M. (2021). Leakage management and pipe system efficiency. Its influence in the improvement of the efficiency indexes. *Water*, 13(14), 1909. <https://doi.org/doi: 10.3390/W13141909>
- Boudaghpour, S., & Sabooteh, S. (2020). Environmental leakage pollutions evaluations in urban water distribution network using unaccounted water principles (shokuhieh industrial town in Iran). *Stavební Obzor - Civil Engineering Journal*, 29(2), 219–228. <https://doi.org/10.14311/CEJ.2020.02.0019>
- Cassa, A. M. (2005). A numerical investigation into the behaviour of leak openings in pipes under pressure. University of Johannesburg
- Cassa, A. M., & Van Zyl, J. E. (2013). Predicting the head-leakage slope of cracks in pipes subject to elastic deformations. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 62(4), 214–223. <https://doi.org/10.2166/aqua.2013.094>
- Cassa, A. M., Van Zyl, J. E., & Laubscher, R. F. (2010). A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes. *Urban Water Journal*, 7(2), 109–120.
- Farley, M., & Trow, S. (2003). Losses in water distribution networks. IWA publishing.
- Farley, M., Water, S., Supply, W., Council, S. C., & World Health Organization. (2001). Leakage management and control: A best practice training manual. World Health Organization.
- Ferrante, M. (2012). Experimental investigation of the effects of pipe material on the leak head-discharge relationship. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(8), 736–743.
- Greyvenstein, B., & Van Zyl, J. E. (2007). An experimental investigation into the pressure-leakage relationship of some failed water pipes. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 56(2), 117–124.
- Iwanek, M., & Suchorab, P. (2017). The assessment of water loss from a damaged distribution pipe using the FEFLOW software. 15, 03006. <https://doi.org/10.1051/ITMCONF/20171503006>
- Kanakoudis, V., & Tsitsifli, S. (2019). Water networks management: New perspectives. *Water*, 11(2), 239. <https://doi.org/10.3390/W11020239>

- Karadirek, I. E., & Aydin, M. E. (2022). Water losses management in urban water distribution systems. In M. Bahadir & A. Haarstrick (Eds.), *Water and wastewater management: Global problems and measures* (pp. 53–65). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95288-4_6
- Kingdom, B., Liemberger, R., & Marin, P. (2006). The challenge of reducing non-revenue water in developing countries—How the private sector can help: A look at performance-based service contracting.
- Kourbasis, N., Patelis, M., Tsitsifli, S., & Kanakoudis, V. (2020). Optimizing water age and pressure in drinking water distribution networks. *Environmental Sciences Proceedings*, 2(1), 51. <https://doi.org/10.3390/ENVIRONSCIPROC2020002051>
- Latifi, M., Naeeni, S. T. (Omid), & Mahdavi, A. (2018). Experimental assessment of soil effects on the leakage discharge from polyethylene pipes. *Water Supply*, 18(2), 539–554. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.134>
- Latifi, M., Parvaneh, R., & Naeeni, S. T. (Omid). (2022). Investigating the influence of surrounding soil properties on leakage discharge from cracks in polyethylene pipes. *Engineering Failure Analysis*, 141, 106676. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106676>
- Liemberger, R., & Wyatt, A. (2018). Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Science and Technology: Water Supply*, 19, ws2018129. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.129>
- Mahdavi, M., Hosseini, K., Behzadian, K., Ardehsir, A., & Jalilsani, F. (2011). Leakage control in water distribution networks by using optimal pressure management: A case study. *Water Distribution Systems Analysis*, 1110–1123. [https://doi.org/10.1061/41203\(425\)101](https://doi.org/10.1061/41203(425)101)
- May, J. (1994). Pressure dependent leakage, world water and environmental engineering. Water Environment Federation: Washington DC, USA.
- Mohsin, R., & Majid, Z. (2014). Erosive failure of natural gas pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 5(4), 04014005.
- Noack, C., & Ulanicki, B. (2008). Modelling of soil diffusibility on leakage characteristics of buried pipes. *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 1–9.
- Ociepa, E., Molik, R., & Lach, J. (2018). Assessment of water loss level on the example of selected distribution systems. 10th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK 2018, 44, 00131. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/20184400131>
- Pike, S. (2016). Experimental investigation of leakage-induced pipe erosion outside of pipe leaks. University of Cape Town.
- Ribeiro, L., Sousa, J., Muranho, J., & Marques, A. S. (2018). Locating unreported leaks with modelling tools and pressure monitoring: A case study. *EPiC Series in Engineering*, 3, 1758–1765. <https://doi.org/10.29007/79RG>
- Sadr-Al-Sadati, S. A., & Jalili Ghazizadeh, M. (2019). The experimental and numerical study of water leakage from High-Density Polyethylene pipes at elevated temperatures. *Polymer Testing*, 74, 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.014>
- Tabesh, M., & Vaseti, M. M. (2006). Leakage reduction in water distribution networks by minimizing the excess pressure. *Iran-Water Resources Research*, 2(2), 53–0. (In Persian)
- Thornton, J., & Lambert, A. (2005). Progress in practical prediction of pressure: Leakage, pressure: Burst frequency and pressure: Consumption relationships. *Proceedings of IWA Special Conference 'Leakage*, 12–14.
- Thornton, J., Sturm, R., & Kunkel, G. (2008). Water loss control. McGraw-Hill Education.
- US EPA, O. (2015, August 19). Drinking water distribution systems [Overviews and Factsheets]. <https://www.epa.gov/dwsixyearreview/drinking-water-distribution-systems>

van Zyl, J. E. (2014). Theoretical modeling of pressure and leakage in water distribution systems. *Procedia Engineering*, 89, 273–277.

Van Zyl, Je., & Clayton, C. R. I. (2007). The effect of pressure on leakage in water distribution systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 160(2), 109–114.

Walski, T., Bezts, W., Posluszny, E. T., Weir, M., & Whitman, B. (2004). Understanding the hydraulics of water distribution system leaks. In *Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management* (pp. 1–10).

Technical Strategies in Water Systems

Summer2023, Volume 1, issue 1

e-ISSN: 2981-1449

Numerical study of the effect of non-continuous step on the residual energy of a vertical drop	1-14
Samira Mazrouei, Reza Mirzaee, Shamsa Basirat, Vadoud Hasanniya	
Managing water wastage, wasting time and increasing the efficiency of the filters using tube settlers	15-26
Mohsen Memarzadeh, Mozhgan Ahmadi Nadoushan, Payam Najafi3, Mehran Hoodaji	
Analysis of energy loss in a C-type trapezoidal Piano key weir with outlet key jumps	27-36
Kadhim Challob Mshali, Ali Khoshfetrat, Amirhossein Fathi	
Efficiency of AlpineQuest navigation application as an alternative for GPS in river engineering field surveying (Case study: Rafsanjan flood on July 2022)	37-54
Farzaneh Qaderi Nasab Gorouhi, Maryam Ahmadi	
Evaluation of the effects of constructed rehabilitation dams on maximum and volume of watershed discharge	55-67
Reza Ghazavi, Ebrahim Omidvar	
Reviewing methods of analysis and evaluation of seismic safety of arched concrete dams	68-84
Mohammadreza Fadaei-Tehrani, Elham Ybarehpour	
Water loss from urban water supply networks and the factors affecting it	85-100
Seyed Hamid Alavi	
