فصلنامه راهبردهای فنی در سامانه های آبی

شاپای الکترونیک: ۱۴۴۹-۲۹۸۱ **تابستان ۱۴۰۳، دوره ۲، شماره ۲**

به‌کارگیری و مقایسه روش‌های عددی FDM ، DQو RBF-DQ د ر مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در سفره‌های محصور **۱۱۳-۱۰۳**
آتنا نقی پورکاردر، علی خوش‌فطرت

تحلیل عددی هیدرولیک جریان در سیستم کالورت-سرریز تاج دایره‌ای همراه با دریچه **۱۲۶-۱۱۴**
دنیا حیدری، الهام ایزدی‌نیا

تحلیل و ارزیابی شاخص‌های اساسی در راهبردهای فنی و مدیریتی در سامانه‌های آبی با تأکید بر مدیریت پایدار منابع آب **۱۴۰-۱۲۷**
صدرالدین اعتصامی

بررسی آثار اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی سازه‌های آبی (مطالعه موردی سد مخزنی کلارود) **۱۵۳-۱۴۰**
مجتبی فرهادزاده، حیدر داوودیان، ملیحه اکبری، فاطمه تمجید، پریسا ملکی

کاربست اصول طراحی مسیرهای سبز اسفنجی در مدیریت منابع آب در شهرهای کویری (موردپژوهی: مادی‌های شهری اصفهان) **۱۷۳-۱۵۴**
مژده جمشیدی

بررسی روند شکست سد و خطرات ناشی از آن درصورت وقوع (مطالعه موردی سد درودزن) **۱۸۵-۱۷۴**
روزبه آقامجیدی

Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Summer 2024: Vol 2, Issue 2, 103-113
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1187653

Research Article

Applying and comparing finite difference, differential quadrature, and radial basis function-based differential quadrature numerical methods in confined aquifers

Atena Naghipour Karder [1], Ali Khoshfetrat [2]*

1 Department of Civil Engineering, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran

2 Department of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

Corresponding Author email: khoshfetrat@khuisf.ac.ir

© The Author(s) 2024

Received: 20 Oct 2024 Accepted: 07 Dec 2024 Published: 24 Dec 2024

Abstract

The Differential Quadrature (DQ) method is a high-order numerical approach known for its remarkable accuracy and low computational cost, making it an attractive option for numerical modeling. However, a notable limitation of this method is its lack of geometric flexibility in modeling domains. The Radial Basis Function-based Differential Quadrature (RBF-DQ) method addresses this limitation by combining the DQ method's direct derivative estimation with the flexibility of mesh-free numerical techniques, making it suitable for both regular and irregular domains. This study compares the performance of the DQ, RBF-DQ, and Finite Difference (FD) methods — an established numerical technique in solving groundwater flow equations in confined aquifers for both steady-state and unsteady-state conditions. Exact solutions for these problems are derived using the Thiem and Theis methods. The results demonstrate the high accuracy of both the DQ and RBF-DQ methods in modeling groundwater flow in confined aquifers. Additionally, the DQ method outperforms the RBF-DQ method in terms of both accuracy and computational efficiency.

Keywords: DQ Method, RBF-DQ Method, Unsteady Flow, Steady Flow, Groundwater Equations, Confined aquifers

مجله راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
شاپا الکترونیکی: ۱۴۴۹-۲۹۸۱
تابستان ۱۴۰۳، دوره دو، شماره۲، ۱۱۳-۱۰۳
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1187653

مقاله پژوهشی

به‌کارگیری و مقایسه روش‌های عددی FDM، DQ و RBF-DQ در مدلسازی جریان آب زیرزمینی در سفره‌های محصور

آتنا نقی پورکاردر[۱] و علی خوش فطرت[۲*]

۱. دانش آموخته گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان، ایران.
۲. گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

ایمیل نویسنده مسئول: khoshfetrat@khuisf.ac.ir
© The Author(s) 2024

دریافت:۱۴۰۳/۰۷/۲۹ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷ چاپ: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴

چکیده

روشDQ (Differential Quadrature) یکی از روش‌های عددی جدید مرتبه بالا با دقت زیاد می‌باشد که هزینه محاسباتی بسیار پایین از مزایای این روش است اما ایراد این روش، فقدان انعطاف‌پذیری هندسی در دامنه مدل‌سازی است. در روش RBF-DQ (Radial Basis Function-based Differential Quadrature) علاوه بر بهره‌بردن از ویژگی‌های روش DQ در تخمین مستقیم مشتق، با بکارگیری توابع پایه‌ی شعاعی، از مزایای روش‌های عددی بدون شبکه نیز می‌توان بهره برد ضمن آنکه می‌توان این روش را در مسائل با دامنه منظم و نامنظم به‌کارگرفت. در این تحقیق برای اولین بار از این دو روش برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی در سفره‌های تحت‌فشار در دو حالت دائمی و غیردائمی استفاده شده و کارآیی آنها در حل این معادلات از طریق مقایسه با حل دقیق به دست آمده از روش‌های تیم و تیس با روش تفاضل محدود که یک روش سنتی می‌باشد، مقایسه شده است. نتایج این تحقیق حاکی از دقت بالای روش‌های DQ و RBF-DQ در مدلسازی عددی جریان آب زیرزمینی در سفره‌های محصور است و روش DQ از نظر دقت و زمان محاسبات بر روش RBF-DQ برتری دارد.

واژه‌های کلیدی: روش DQ، روش RBF-DQ، جریان غیرماندگار، جریان ماندگار، معادلات آب‌های زیرزمینی، سفره‌های محصور

۱- مقدمه

رویکردهای عددی به عنوان ابزاری کارآمد در شبیه‌سازی مسائل آب‌های زیرزمینی شناخته شده است. با این حال، تاکنون بیشتر از روش‌های عددی سنتی مانند تفاضل‌محدود (FDM)[1] و المان‌محدود (FEM)[2] برای این منظور استفاده شده است. در این گونه روش‌ها به‌منظور تخمین مشتق تابع از چند جمله‌ای‌های مرتبه‌ی پایین[3] استفاده می‌گردد که به همین دلیل به آنها روش‌های مرتبه پایین گفته می‌شود. از جمله تحقیقاتی که در آنها از این روش‌ها برای شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی استفاده شده است می‌توان به مطالعات (Ghosh & Chakraborty, 2011)اشاره کرد که در آن جریان آلاینده‌ها در محل دفن زباله‌ها بصورت یک بُعدی و به روش تفاضل محدود مدل‌سازی شده است. همچنین (Rahman & Bhuiyan 2012) شبیه‌سازی جریان دوبعدی آب زیرزمینی به روش عناصر محدود در سیستم چند چاهی را در شرایط پیچیده هیدروژئولوژیکی شهر داکا در بنگلادش مورد بررسی قرار دادند و موفق به مدل‌سازی شرایط مرزی ترکیبی در این مسئله شدند. (Zhang et al., 2013) برای پیش‌بینی جریان آلاینده‌ها و واکنش آبخوان آلوده به شیرابه زباله در شرق چین از روش تفاضل محدود استفاده کردند و گزینه‌هایی برای کنترل آلودگی‌ها پیشنهاد نمودند. (Zhang et al., 2014) برای شبیه‌سازی اندرکنش جریان آب سطحی و زیرزمینی در حالت سه‌بُعدی از روش تفاضل‌محدود استفاده کردند ولی نتایج حاصل مطلوب نبوده است.

(Meenal & Eldho., 2012) بهینه‌سازی پمپاژ آب‌های زیرزمینی توسط روش‌های عناصرمحدود و تفاضل محدود را شبیه‌سازی نمودند.

(Xie et al., 2015)به بررسی جریان آب زیرزمینی در محیط‌های متخلخل توسط روش عناصرمحدود پرداختند. آنها یک مدل ساده و موثر برای اصلاح آلودگی آب‌های زیرزمینی از طریق ترکیب روش عناصر محدود با الگوریتم ژنتیک طراحی نمودند.

(Eldho & Boddula, 2016) نشان دادند که استفاده از دو روش عناصرمحدود و تفاضل محدود به همراه روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای شبیه سازی طرح‌های رفع آلودگی آب‌های زیرزمینی دارای کارآیی می باشد. همچنین مسئله جریان آب زیرزمینی و تثبیت لایه‌های زمین توسط دو روش عناصر محدود و لایه محدود، در مقاله (Zhou et al., 2017) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان دادند که قابلیت انعطاف‌پذیری آب موجود در منافذ، تأثیر مهمی بر روند فرونشست ناشی از پمپاژ دارد.

لازمه‌ی دستیابی به دقّت بالا در روش‌های عددی سنتی به دلیل مرتبه پایین آنها، شبکه‌بندی ریز و تعداد گره‌های شبکه‌ی زیاد است به نحوی که بتوان رفتار مشتق را به خوبی پایش کرد. این کاستی سبب شد محققین روش‌هایی را پیشنهاد کنند که قادر باشند تا با استفاده از تعداد اندکی از گره‌ها در شبکه، نتایج دقیقی را ارائه دهند (Shen, 2010). این روش‌ها، به روش‌های مرتبه‌ی بالا[4] موسوم می‌باشند. در همین راستا (Bellman & Casti, 1971) روش DQ[5] را ارائه کردند. از میان تحقیقاتی که در آنها با موفقیت از روش DQ برای حل معادلات استفاده شده، می‌توان به (Kaya, 2010) در مورد آب‌های سطحی، (Raj & Pradhan, 2013) در مورد معادلات جذب سطحی، (Abdollahian t al., 2014) در مورد مسئله انتشار موج، (Hatami & Ganji, 2014) در مورد معادلات کوپل جنبشی ذره اشاره کرد. همچنین (Behroozi &Vaghefi, 2022) روش TPS-DQ[6] را به عنوان یک روش غیروابسته به شبکه برای حل معادلات جریان دائمی و غیردائمی در آب‌های زیرزمینی با هندسه پیچیده به کار بردند. از سوی دیگر با ترکیب توابع پایه شعاعی[7] (RBF) که توسط Hardy (1971) برای درون‌یابی پیشنهاد شده بودند با روش DQ، روش عددی بدون شبکه RBF – DQ توسط (Shu & Wu, 2002) توسعه یافت و توسط افرادی همچون (Hung et al., 2007) برای حل مسائل مقدار مرزی،(Soleimani et al., 2011) برای حل معادلات ناویر استوکس در سیال تراکم‌ناپذیر، (Hashemi & Hatam, 2011) برای آنالیز نفوذپذیری در محیط نامنظم، (Dehghan & Mohammadi, 2015) برای حل معادله دوبعدی و سه‌بعدی چان هیلارد، (Soleimani et al., 2011) برای مطالعه عددی فشار منفذی خاک به طور موفق

[1] Finite Difference Method
[2] Finite Element Method
[3] Low Order
[4] High order
[5] Different Quadrature Method
[6] Thin Plates Spline-based Differential Quadrature Method
[7] Radial Basis Functions

مورد استفاده قرار گرفت. (Chaabelasri et al., 2019) روش RBF را برای حل معادلات آب‌های کم عمق در توپوگرافی نامنظم و با وجود اصطکاک به کار بردند. همچنین (Boujoudar et al., 2024) روش LRBF[1] را برای پیش‌بینی توزیع رطوبت در خاک‌های غیراشباع استفاده کردند.

(Khoshfetrat & Abedini, 2011) از هر دو روش DQ و RBF – DQ برای مدل‌سازی آب‌های کم عمق ساحلی در تنگه اوریسوند استفاده نمودند و کارآیی بالای این روش‌ها را نشان دادند. با توجه به تجارب موفق استفاده از این دو روش برای مدل‌سازی عددی پدیده‌های مختلف فیزیکی که به آنها اشاره شد، در تحقیق حاضر از این روش‌ها برای مدل‌سازی عددی معادلات آب‌های زیرزمینی در سفره‌های تحت‌فشار در دو حالت ماندگار و غیرماندگار استفاده شد و کارآیی این دو روش با یکدیگر و همچنین با روش عددی سنتی FDM مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

روش DQ

اگر تابع $f = f(x,y)$ روی دامنه مستطیلی $0 \le y \le b$ و $0 \le x \le a$ تعریف شده باشد و یک شبکه از نقاط با تعداد Nx نقطه در جهت x و Ny نقطه در جهت y روی دامنه درنظر گرفته شود، مشتق مرتبه n ام f در نقطه (x_i, y_j) در جهت x توسط روش DQ به صورت معادله (۱) تقریب زده می‌شود:

$$f_x^{(n)}(x_i, y_j) = \sum_{k=1}^{Nx} wx_{ik}^{(n)} f(x_k, y_j) \quad (۱)$$

در این رابطه $wx_{ik}^{(n)}$ معرف ضرایب وزن مرتبه nام در جهت x است که به سادگی با استفاده از فرمول‌های صریح انجام می‌شود. مشتق مرتبه n ام f در نقطه (x_i, y_j) در جهت y نیز به طرز مشابهی تقریب زده می‌شود.

روش RBF-DQ

در این روش مشتق جزئی یک تابع در یک نقطه به وسیله یک ترکیب وزنی از مقادیر تابع در کلیه نقاط یا برخی از نقاط در همسایگی آن نقطه تقریب زده می‌شود. به‌عنوان نمونه تخمین مشتق مرتبه n ام f در جهت x در روش RBF-DQ به‌شکل زیر صورت می‌پذیرد (معادله ۲).

$$f_x^{(n)}(x_k, y_k) = \sum_{l=1}^{N} wx_{kl}^{(n)} f(x_l, y_l) \quad (۲)$$

که در آن $wx_{kl}^{(n)}$ ضرایب وزن مرتبه n در جهت x تعیین شده به روش RBF-DQ و $f(x_l, y_l)$ مقدار تابع در نقطه (x_l, y_l) می‌باشد. اگر N برابر تعداد کل نقاط دامنه محاسباتی باشد، روش، Global RBF-DQ یا به اختصار RBF-DQ خوانده می‌شود و اگر N برابر تعدادی از نقاط همسایگی نقطه (x_k, y_k) در نظرگرفته شود، روش، Local RBF-DQ یا به اختصار LRBF-DQ نامگذاری می‌گردد.

در روش‌های RBF-DQ و LRBF-DQ برای بدست آوردن ضرایب وزن از تابع آزمون RBFs استفاده می‌شود که بهترین آنها MQ RBF به صورت رابطه (۳) است.

$$\varphi_j(X) = \varphi(\|X - X_j\| = \varphi(r) = \sqrt{r^2 + c^2} \quad (۳)$$

که در آن $X = (x,y)$ و $r = \|X\text{-}X_j\|$ فاصله اقلیدسی و c پارامتر شکل است. با قرار دادن تابع شعاعی MQ در معادله (۲) رابطه (٤)

[1] Local Radial Basis Functions

ایجاد می‌شود.

$$\frac{\partial^n \varphi_j(x_k,y_k)}{\partial x^n} = \sum_{l=1}^{N} wx_{kl}^{(n)} \varphi_j(x_l, y_l) \quad (٤)$$

$$\text{for } j = 1,2,\dots,N$$

سیستم معادلات فوق باید حل شود تا ضرایب وزن $wx_{kl}^{(n)}$ بدست آیند. همچنانکه مشاهده می‌شود برای حل این سیستم‌های معادلات باید در هرنقطه، از یک ماتریس $N \times N$ وارون‌گیری انجام شود.

مسئله عددی اول

در مسئله عددی اول، سفره آب زیرزمینی تحت‌فشار در حالت ماندگار و در خاک همگن و هموژن که معادله حاکم بر آن به صورت معادله ۵ است، در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (۵)$$

در این مسئله، مقادیر ضریب انتقال (T)، شعاع تاثیر چاه (r_i)، ارتفاع (عمق، هد) اولیه سفره (h_i)، دبی پمپاژ (Q) و ضریب هدایت هیدرولیکی (K) برابر مقادیر زیر در نظر گرفته شده‌اند.

$$T = 4.63 * 10^{-3}\ \frac{m^2}{s} \qquad r_i = 79\ m \quad h_i = 50\ m \qquad Q = 0.314\ \frac{m^3}{s}\ \frac{m}{s} \qquad K = 1.54 * 10^{-4}$$

دامنه حل در این مسئله و همچنین مسئله بعدی در شکل (۱) نشان داده شده است.

شکل ۱- توزیع گره‌ها در مسئله اول

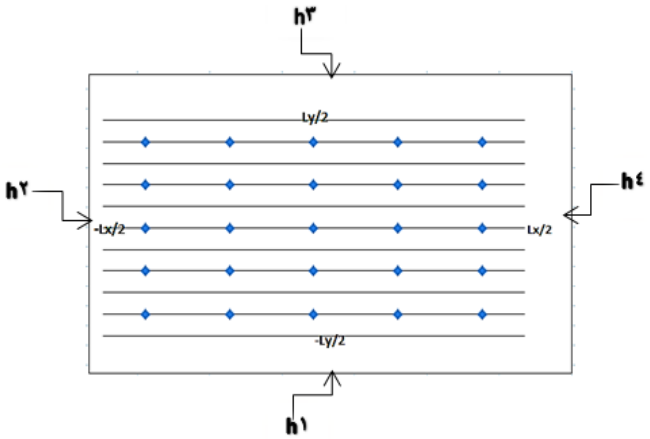

Fig 1. Nodes distribution in the first problem

شرایط مرزی این مسئله از حل تحلیلی موجود در پمپاژ از چاه در حالت ماندگار که به رابطه تیم مشهور می‌باشد گرفته شده است. همچنین حل تحلیلی مسئله برای محاسبه خطای روش‌های عددی از این رابطه به دست آمده است. رابطه تیم به صورت رابطه (٦) می باشد.

$$h = h_i + \frac{Q \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2T\pi} \quad (٦)$$

در اینجا h هد هیدرولیکی پس از افت، r_1 شعاع اولیه و r_2 ارتفاع پس از افت می‌باشد ((Safavi, 2006).

معادله حاکم در مسئله اول در نقطه(x_i, y_i) به وسیله روش DQ به صورت رابطه (۷) تقریب زده شده است.

$$\sum_{k=1}^{Nx} wx_{ik}^{(2)} * h(x_k, y_j) + \sum_{l=1}^{Ny} wy_{jl}^{(2)} * h(x_i, y_l) = 0 \quad (۷)$$

همچنین تقریب این معادله با روش RBF-DQ در نقطه (x_i, y_i) به صورت رابطه (۸) نوشته شده است.

$$\sum_{k=1}^{N} wx_{ik}^{(2)} * h(x_k, y_k) + \sum_{k=1}^{N} wy_{ik}^{(2)} * h(x_k, y_k) = 0 \quad (۸)$$

مسئله عددی دوم

در مسئله دوم، سفره آب زیرزمینی تحت‌فشار در حالت غیردائمی و در خاک همگن و هموژن که معادله حاکم بر آن به صورت رابطه (۹) است، در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{S}{T}\frac{\partial H}{\partial t} - \frac{R}{T} \quad (۹)$$

در این مسئله، مقادیر پمپاژ (R)، ضریب انتقال (T)، ضریب ذخیره (S) و دبی پمپاژ (Q) و طول زمان شبیه‌سازی (t) برابر مقادیر زیر در نظر گرفته شده است:

R=31.4(l/day) $t = 10000\ s$ $T = 0.1 * 10^{-7}\ \frac{m^2}{min}$ $S = 0.00001$ $Q = 1500\,\frac{m^3}{day}$

شرایط مرزی این مسئله از حل تحلیلی موجود در پمپاژ از چاه در حالت غیرماندگار که به رابطه تیس مشهور می‌باشد گرفته شده است. همچنین حل تحلیلی مسئله برای محاسبه خطای روش‌های عددی از رابطه (۱۰) به دست آمده است. رابطه تیس به صورت زیر می‌باشد (Safavi, 2006):

$$H = Hi - \frac{Q}{4\pi T}\left[\ln\left(\frac{0.562}{u}\right) + u - \frac{u^2}{2*2!} + \frac{u^3}{3*3!} - \frac{u^4}{4*4!} + \cdots\right] \quad (۱۰)$$

که در آن Hi مقدار هد هیدرولیکی و u که عدد ثابت معادله تایس در تابع چاه است، به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود.

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (۱۱)$$

معادله حاکم در مسئله دوم در نقطه(x_i, y_i) به وسیله روش DQ به صورت رابطه (۱۲) تقریب زده شده است.

$$\sum_{k=1}^{Nx} wx_{ik}^{(2)} * h^{n+1}(x_k, y_j) + \sum_{l=1}^{Ny} wy_{jl}^{(2)} * h^{n+1}(x_i, y_l) = \frac{S}{T}\frac{h^{n+1}(x_i,y_j) - h^n(x_i,y_j)}{\Delta t} - \frac{R(x_i, y_j)}{T} \quad (۱۲)$$

همچنین تقریب این معادله با روش RBF-DQ در نقطه (x_i, y_i) به صورت رابطه (۱۳) نوشته شده است.

$$\sum_{k=1}^{N} wx_{ik}^{(2)} * h^{n+1}(x_k, y_k) + \sum_{k=1}^{N} wy_{ik}^{(2)} * h^{n+1}(x_k, y_k) = \frac{S}{T}\frac{h^{n+1}(x_i, y_i) - h^{n}(x_i, y_i)}{\Delta t} - \frac{R(x_i, y_i)}{T} \quad (۱۳)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود در معادله مسئله دوم که وابسته به زمان است، مشتق زمانی به‌صورت کاملا ضمنی تخمین زده شده‌است.

نحوه محاسبه خطای روش‌های عددی

در این تحقیق، مقدار متوسط خطا برای روش‌های عددی مختلف در کل دامنه از فرمول (۱٤) محاسبه شد.

$$\text{Error} = \frac{1}{N}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(H - \bar{H})^2}{\sum_{i=1}^{N}(\bar{H})^2}} \quad (۱٤)$$

که در آن H هد هیدرولیکی بدست آمده به‌روش عددی، $\bar{H}$ هد هیدرولیکی بدست آمده به‌روش تحلیلی است که روش محاسبه آن در معرفی مسائل عددی و در روابط ٦ و ۱۰ آمد و N تعداد کل گره‌های مورد استفاده است.

۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از مدلسازی عددی مسئله اول به روش‌های DQ، RBF-DQ و FD به ترتیب در جداول ۱، ۲ و ۳ آورده شده است. در این جداول، مقادیر متوسط خطا (Error) به ازاء مقادیر مختلف تعداد نقاط (N) و طول دامنه مدل‌سازی (L) گزارش شده است. البته در مورد روش RBF-DQ با توجه به وابستگی مقدار خطا به مقدار انتخاب شده برای پارامتر شکل، مقادیر حداقل خطا به ازای مقادیر مختلف پارامتر شکل آورده شده است که بعدا مورد بحث قرار می‌گیرد.

جدول ۱- مقادیر متوسط خطا به ازای مقادیر مختلف N و L در حل مسئله اول با روش DQ

Table 1. Average error values for different N and L in solving the first problem using the DQ method

N	L (m)									
	۱۰	۲۰	۳۰	٤۰	٥۰	٦۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
٥	٤e-۱/۸۹٦٦	٤ e -۱/۸۷٤۱	٤e-۱/۸٦۷	٤ e -۱/۸٦	٤ e -۱/۸٦۱	٤ e -۱/۸٥۹	٤e-۱/۸٥۸	٤e-۱/۸٥٦۷	٤e-۱/۸٥٦۱	٤e-۱/۸٥٥
٦	٤e -۱/۱٤۰٦	٤ e -۱/۱٤٤۱	٤e-۱/۱٤٥۲	٤e -۱٤٥ ۱/	٤ e -۱/۱٤٤۷	٤ e -۱/۱٤٤٦	٤e-۱/۱٤٤۲	٤e-۱/۱٤٤۱	٤e-۱/۱٤۳۹	٤e-۱/۱٤۳۷
۹	٤e -۳/٤۳٦۹	٤ e -۳/۳٦٥	٤ e -۳/۳۳۱	٤ e -۳/۳۱	٤ e -۳/۲۹	٤ e -۳/۲۷٦	٤e-۳/۲٦۲	٤e-۳/۲٥٥۱	٤e-۳/۲٤٤	٤e-۳/۲۳٥۲

جدول ۲- مقادیر حداقل متوسط خطا به ازای مقادیر مختلف N و L در حل مسئله اول با روش RBF-DQ

Table 2 .Minimum average error values for different N and L in solving the first problem using the RBF-DQ method

N	L (m)									
	۱۰	۲۰	۳۰	٤۰	٥۰	٦۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
٥	۳e-۳/۱۳۲۹	۳e-۲/۸۰۱۷	۳e-۲/٦۸٤٦	۳e-۲/٦۲٥٤	۳e-۲/٥۸۹۸	۳e-۲/٥٦٦۱	۳e-۲/٥٤۹۲	۳e-۲/٥۳٦٦	۳e-۲/٥۲٦۷	۳e-۲/٥۱۸۹
٦	۳e-۱/۷٦٦۹	۳e-۱/٥۳۷٤	۳e-۱/٤٦۰۷	۳e-۱/٤۲۱۷	۳e-۱/۳۹۸۱	۳e-۱/۳۸۲٥	۳e-۱/۳۷۱۳	۳e-۱/۳٦۳	۳e-۱/۳٥٦٥	۳e-۱/۳٥۱٤
۹	۳e-۳/۰٦۱۱	٤e-٥/٦۹۸٥	٤e-٥/۰۰٦۲	٤e-٤/۷٥۲٤	٤e-٤/٦۰۸۸	٤e-٤/٥۱٥۳	٤e-٤/٤٤۹٦	٤e-٤/٤۰۰۹	٤e-٤/۳٦۳٤	٤e-٤/۳۳۳٦

جدول ۳- مقادیر متوسط خطا به ازای مقادیر مختلف N و L در حل مسئله اول با روش FD

Table 3. Average error values for different N and L in solving the first problem using the FD method

N	L (m)									
	۱۰	۲۰	۳۰	٤۰	۵۰	٦۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
۵	٤e-۵/۲۹٤۹	۳e-۱/٤۹۰٦	۳e-۳/۰۹٤	۳e-۵/۳٤٤	۳e-۸/۲۳۷	۳e-۱/۱۷۷۳	۲e-۱/۵۹۵۰	۲e-۱/۹۳۹٤	۲e-۲/٦۲۳	۲e-۳/۲۳۳٤
٦	٤e-۳/۲۲۷	٤e-۸/۸۱٤۷	۳e-۱/۸۲۲	۳e-۳/۰۷۸	۳e-٤/۸۳٦	۳e-٦/۹۰۷۱	۳e-۹/۳۵٤۸	۲e-۱/۲۳۷۸	۲e-۱/۵۳۸	۲e-۱/۸۹۵۳
۹	۳e-۱/۵۸۵	۳e-۱/٤٤۱۵	۳e-۱/۵۵۹	۳e-۱/۵۸٤	۳e-۲/۳	۳e-۲/۸٤۸٤	۳e-۳/٤۹۱۳	۳e-٤/۲٤۵٤	۳e-۵/۰٦۹	۳e-۵/۹٦٤

همانطورکه در جداول ۱و ۲ و ۳ مشاهده می‌شود مدل سازی عددی با هر سه روش با خطای قابل قبولی انجام شده و در بین سه روش، روش DQ دارای متوسط خطای کمتری بوده است پس از آن روش FD و در انتها روش RBF-DQ دارای خطاهای کمتری بوده‌اند. البته همانطور که قبلا گفته شد، متوسط خطای روش RBF-DQ به مقدار انتخاب شده برای پارامتر شکل (C) بستگی دارد که این موضوع در شکل (۲) قابل مشاهده است.

شکل ۲- نمودار تغییرات متوسط خطا نسبت به تغییرات پارامتر شکل در مسئله اول

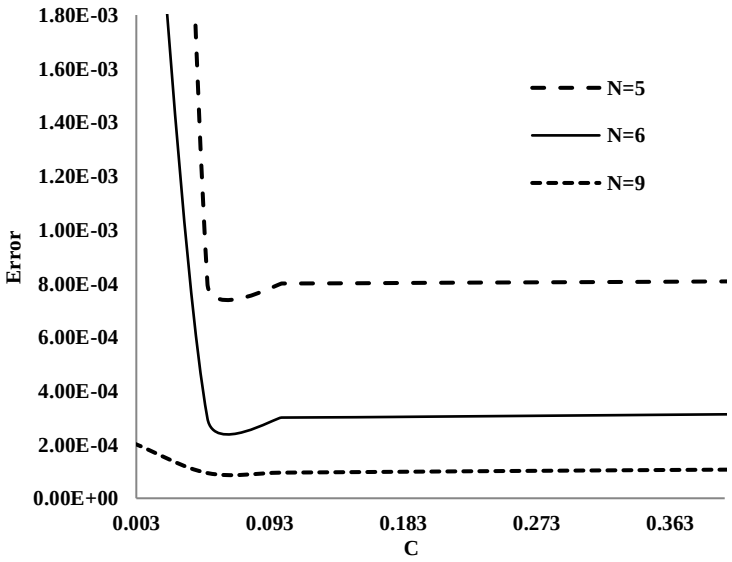

Fig 2. Graph of average error variations with respect to shape parameter changes in the first problem

نتایج حاصل از مدلسازی عددی مسئله دوم به روش‌های DQ و RBF-DQ به ترتیب در جداول ٤ و ۵ آورده شده است. در این جداول، مقادیر متوسط خطا (Error) به ازاء مقادیر مختلف تعداد نقاط (N) و طول دامنه مدل سازی (L) گزارش شده است. البته در مورد روش RBF-DQ با توجه به وابستگی مقدار خطا به مقدار انتخاب شده برای پارامتر شکل، مقادیر حداقل خطا به ازای مقادیر مختلف پارامتر شکل آورده شده است که بعدا مورد بحث قرار می‌گیرد.

جدول ٤- مقادیر حداقل متوسط خطا به ازای مقادیر مختلف N و L در حل مسئله دوم با روش DQ

Table 4. Minimum average error values for different N and L in solving the second problem using the DQ method

N	L (m)									
	۱۰	۲۰	۳۰	٤۰	۵۰	٦۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
۵	٤e-۷/۹۹	٤e-۸/۰۰۵٦	٤e-۸/۰۵۳	٤e-۸/۲٦۷	۳e-۱/۰۳۱٦	٤e-۸/۰٦۸	۳e-۱/۲۵٤۵	٤e-۲/۰۲۵	٤e-۸/٤۸٤	۳e-٤/۱٤۹٦
٦	٤e-۱/۷۲	٤e-۱/۸٦۵۵	٤e-۲/۰۵۱۱	٤e-۱/۹٦۷۱	٤e-۱/٤۳۹	٤e-۳/٦۱۰۵	٤e-۱/۹۹۷	٤e-۳/٦۰۷۸	٤e-۳/۰۳۲	٤e-۸/۱۷٦
۹	۵e-٦/۲۳۸۹	۵e-۷/۳٤۲	۵e-۷/٤۵۳	۵e-۷/۸۰۱۹	۵e-۸/۲۲٤	۵e-۸/٤۵۷۵	۵e-۸/۵۷۹٤	۵e-۹/۱۵۹۹	۵e-۹/۵٦۲	٤e-۱/۰۸۵

جدول ٥- مقادیر حداقل متوسط خطا به ازای مقادیر مختلف N و L در حل مسئله دوم با روش RBF-DQ

Table 5. Minimum average error values for different N and L in solving the second problem using the RBF-DQ method

N	L (m)									
	١٠	٢٠	٣٠	٤٠	٥٠	٦٠	٧٠	٨٠	٩٠	١٠٠
٥	٣e-١/٦٩٧١	٣e-٤/١٧٨	٣e-٥/٤٠٤٢	٣e-٦/١٠٦٠	٣e-٦/٥٥٩٦	٣e-٦/٨٧٥٢	٣e-٧/١١١٠	٣e-٧/٢٨٤٣	٣e-٧/٤٤٣٥	٣e-٧/٥٤٧٨
٦	٤e-٥/٦٥٥٩	٣e-١/٣٨٤٤	٣e-٢/٠٩٧٧	٣e-٢/٥٤٨٠	٣e-٢/٨٥٢٢	٣e-٣/٧٠٩٣	٣e-٣/٢٣٢٧	٣e-٣/٣٦١٠	٣e-٣/٤٦٣٥	٣e-٣/٤٦٣٥
٩	٤e-٢/٥١٥	٤e-١/٤٨١٣	٤e-٢/٣٩٦٨	٤e-٣/٦٩٢٤	٤e-٤/٧٦٧٧	٤e-٥/٦٢٣٢	٤e-٦/٣٠٤٤	٤e-٦/٨٦٨٣	٤e-٧/٣٣٩٩	٤e-٧/٧٢٩٤

همانطورکه در جداول ٤ و ٥ مشاهده می‌شود مدلسازی عددی با هر دو روش با خطای قابل قبولی انجام شده و در بین این دو روش، روش DQ دارای متوسط خطای کمتری بوده است. البته همانطور که قبلا گفته شد، متوسط خطای روش RBF-DQ به مقدار انتخاب شده برای پارامتر شکل (C) بستگی دارد که این موضوع در شکل (٣) قابل مشاهده است.

شکل ٣- نمودار تغییرات متوسط خطا نسبت به تغییرات پارامتر شکل در مسئله دوم

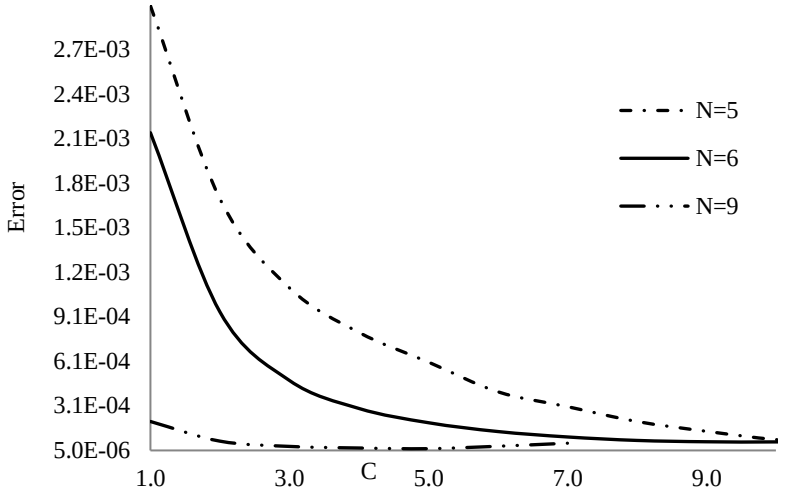

Fig 3. Graph of average error variations with respect to shape parameter changes in the second problem

همچنین زمان محاسبات برای هر سه روش در جداول ٦ و ٧ آورده شده است. همانطور که زمان محاسبات در روش‌های DQ و FD به یکدیگر نزدیک است ولی زمان محاسبات در روش RBF-DQ به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به دو روش دیگر بیشتر است که دلیل آن محاسبات مورد نیاز برای وارون‌گیری‌ها از ماتریس‌ها جهت تعیین ضرایب وزن است که قبلا در معرفی این روش در مورد آن توضیح داده شده است.

جدول ٦- زمان محاسبات برای سه روش به ازاء مقادیر مختلف تعداد نقاط (N) مورد استفاده در مسئله اول

Table 6. Computation time for the three methods for different values of the number of points (N) used in the first problem

N	RBF-DQ	DQ	FD
٥	٢e-٩/٣٦	٢e-٤/٦٨	٢e-٤/٦٨
٦	٠/١٥٦	٢e-٦/٢٤	٢e-٦/٢٤
٩	٠/٩٦٧	٢e-٧/٨	٠/١٤٠٤

جدول ۷- زمان محاسبات برای سه روش به ازاء مقادیر مختلف تعداد نقاط (N) مورد استفاده در مسئله دوم

Table 7. Computation time for the three methods for different values of the number of points (N) used in the second problem

N	RBF-DQ	DQ	FD
۵	۰/۸۲۷	۰/۱۵۶	۰/۱۲۴۸
٦	۱/٤۳۵	۰/۱٤۰	۰/۱۰۹۲
۹	۸/۱۷٤	۰/٤۵۲	۰/٤۰۵٦

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار از روش‌های DQ و RBF-DQ برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های محصور استفاده گردیده است و کارآیی این دو روش برای شبیه‌سازی عددی این نوع جریان نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که دقت جواب‌های به دست آمده با روش DQ نسبت به روش سنتی FD بهتر بوده است ولی روش RBF-DQ دارای دقت کمتری نسبت به روش FD بوده است. همچنین دقت جواب‌های به دست آمده از روش RBF-DQ وابستگی زیادی به مقدار انتخاب شده برای پارامتر شکل دارد که برای تعیین بهترین جواب باید مقادیر مختلفی برای پارامتر شکل در نظر گرفت تا به مقدار بهینه‌ای که منجر به کمترین خطا گردد به دست آید که فرآیندی زمان بر است. مقایسه مدت زمان محاسبات برای سه روش نیز نشان داده است که روش RBF-DQ نسبت به روش DQ و RBF-DQ دارای زمان محاسباتی بیشتری است. اگرچه در این مسئله که جهت امکان مقایسه سه روش دامنه محاسباتی به صورت منظم در نظر گرفته شده، روش DQ دارای مزیت نسبت به دو روش دیگر است ولی در صورت نامنظم بودن دامنه محاسباتی امکان استفاده از آن وجود ندارد ولی روش RBF-DQ در ناحیه‌های نامنظم نیز قابل استفاده است که باتوجه به نتایج این تحقیق، تنها مزیت نسبی این روش است.

۵- تضاد منافع نویسندگان

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

٦- منابع

Abdollahian, M., GhorbanpourArani, A., MosallaieBarzoki, A A., Kolahchi, R., & Loghman, A. (2014). Non-local wave propagation in embedded armchair TWBNNTs conveying viscous fluid using DQM. *Physica B*, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.physb.2013.02.037. (In Persian)

Behroozi, A M., & Vaghefi, M. (2022). Thin plates spline based differential quadrature for numerical solution of groundwater flow. *Engineering Computation*, 3(6). https://doi.org/10.1108/EC-06-2021-0331 2194-2208. (In Persian)

Bellman, R., & Casti, J. (1971). Differential quadrature and long-term integration. *Journal of Mathematical Analysis Applications*, 34, 235-238. https://doi.org/10.1016/0022-247X (71)90110-7

Boujoudar, M., Beljadid, A., & Taik, A. (2024). LRBF meshless methods for predicting soil moisture distribution in root zone. *Preprint submitted to Elsevier*, 1-27. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33221.87523

Chaabelasri, E., Jeyar, M., & Borthwick, A G L. (2019). Explicit radial basis function collocation method for computing shallow water flows. *Procedia Computer Science*, 148, 361-370. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.044

Dehghan, M., & Mohammadi, V. (2015). The numerical solution of Cahn–Hilliard (CH) equation in one, two and three dimensions via globally radial basis functions (GRBFs) and RBFs-differential quadrature (RBFs-DQ) methods. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 51, 74-100. https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2014.10.008. (In Persian)

Eldho, T I., & Boddula S. (2016). Simulation-optimization models for the remediation of groundwater contamination. *American Society of Civil Engineers*, 381-391. https://doi.org/10.1061/9780784480168.038

Ghosh, A., & Chakraborty, R. (2011). Finite difference method for computation of 1d pollutant migration through saturated homogeneous soil media. *International Journal of Geomechanics*, 10, 12-22. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM. 1943-5622.0000068

Hashemi, M R., & Hatam, F. (2011). Unsteady seepage analysis using local radial basis function-based differential quadrature method. *Applied Mathematical Modeling*, 35, 4934-4950. https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.04.002. (In Persian)

Hatami, M., & Ganji, D D. (2014). Motion of a spherical particle in a fluid forced vortex by DQM and DTM. *Particuology*, 16, 206-212. https://doi.org/10.1016/j.partic.2014.01.001. (In Persian)

Hardy, RL. (1971). Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. *Journal Geophysical Research*, 76, 1905-1915. https://doi.org/10.1029/JB076i008p01905

Hung, C S., Lee, C F., & Cheng, A H D. (2007). Error estimate, optimal shape factor, and high precision computation of multiquadric collocation method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 31, 614-623. https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2006.11.011

Kaya, B. (2010). Investigation of gradually varied flows using differential quadrature method. *Scientific Research and Essays*, 13, 2630-2638. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000509

Khoshfetrat, A., & Abedini, M J. (2011). A hybrid DQ/LMQRBF-DQ approach for numerical solution of Poisson-type and Burger's equations in irregular domain. *Applied Mathematical Modelling*, 36, 1885-1901. https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.07.079

Meenal, M., & Eldho, T I. (2012). Simulation–optimization model for groundwater contamination remediation using meshfree point collocation method and particle swarm optimization. *Sadhana*, 37, 351-369. https://doi.org/10.1007/s12046-012-0086-0

Rahman, S., & Bhuiyan, M. (2012). Simulation of subsurface water flow by galerkin finite element method in dhaka city aquifer. Journal of Hydrolic American Society of Civil Engineers, 1-10. https://doi.org/10.1061/9780784410363

Raj, S., & Pradhan, V H. (2013). Numerical simulation of one - dimensional solute transport equation in an adsorbing medium by using differential quadrature method. *International Journal of Mathematics and Computer Applications Research* (IJMCAR), 3 (3), 23-36. https://doi.org/10.48550/arXiv.1510.08011

Safavi, H R. (2006). Engineering hydrology. Arkan Publications, Isfahan. (In Persian)

Shen, Q. (2010). Local RBF-based differential quadrature collocation method for the boundary layer problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 34, 213-228. https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2009.10.004

Shu, C., & Wu, YL. (2002). Development of RBF-DQ method for derivative approximation and its application to simulate natural convection in concentric annuli. *Springer-Verlag*, 8, 477-485. https://doi.org/10.1007/s00466-002-0357-4

Soleimani, S., Qajarjazi, A., Bararnia, H., Barari, A., & Domairry, G., (2011). Entropy generation due to natural convection in a partially heated cavity by local RBF-DQ method. *Meccanica*, 46, 1023-1033. https://doi.org/10.1007/s11012-010-9358-0

Xie, Y., Wu, J., & Xie, C. (2015). Cubic-spline multiscale finite element method for solving nodal darcian velocities in porous media, *Journal of Hydraulic*, 20 (11), 1-10. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001222

Zhang, J., Ross, M., Fu, C., & Trout, K. (2014). Certification tests of MODFLOW implementation in the integrated hydrologic model. *Journal Hydraulic*, 19(3), 643-648. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000822

Zhang, J., Bai, SH., Ma, ZH., An, D., Jiang, Y., Jiang, L., Xi, B., Yang, Y., & Li, M. (2013). Analysis for remedial alternatives of unregulated municipal solid waste landfills leachate-contaminated groundwater. *Higher Education Press and Springer*, 1-10. https://doi.org/10.1007/s11707-013-0374-y

Zhou, F., Xu, J., & Wang, X. (2017). Finite layer formulations for land subsidence due to groundwater withdrawal. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 17 (11). https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000996

Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Summer 2024: Vol 2, Issue 2, 114-126
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1191046

Research Article

Numerical analysis of flow hydraulics in a culvert-weir system with a circular crest and gate

Donya Heidari [1], Elham Izadinia[2*]

1 Master's Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2 Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran.

Corresponding Author email: elham.izadinia@gmail.com

© The Author(s) 2024

Received: 16 Oct 2024 Accepted: 09 Dec 2024 Published: 24 Dec 2024

Abstract

Weirs are essential components in water engineering projects, effectively managing surface flows. Among these structures, circular-crested weirs are particularly popular due to their simple design and high flow capacity. This study primarily focuses on investigating the hydraulic characteristics of flow in a culvert-weir system with a circular crest and analyzing the effects of critical parameters such as crest radius and gate opening on the discharge coefficient. For this purpose, velocity profiles, water surface levels, and other flow parameters were analyzed as the main variables. Various models of the culvert-weir system with circular crests were designed and meshed using Gambit software, then imported to Fluent software for detailed computational fluid dynamics (CFD) simulations. The discharge coefficients of the weir crest, gate, and the entire structure were calculated and compared under different water load conditions and independent parameters. The results indicate that the discharge coefficient of the weir crest is higher when a gate is present compared to a gate-free condition. Furthermore, the discharge coefficient increases as the crest radius decreases and the gate opening expands. Additionally, the comparison between numerical simulation results and reliable experimental data shows a high level of accuracy and satisfactory agreement, validating the numerical modeling approach. This study provides precise data and practical analyses to improve the design and performance of combined hydraulic structures.

Keywords: Circular Weir, Computational Fluid Dynamics (CFD), Culvert-Weir Combination, Flow Hydraulics, Numerical Simulation

مجله راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
شاپا الکترونیکی: ۲۹۸۱-۱۴۴۹
تابستان ۱۴۰۳، دوره دو، شماره۲، ۱۲۶-۱۱۴
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1191046

مقاله پژوهشی

تحلیل عددی هیدرولیک جریان در سیستم کالورت-سرریز تاج‌دایره‌ای همراه با دریچه

دنیا حیدری[۱]، الهام ایزدی‌نیا[۲*]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد،گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: elham.izadinia@gmail.com

© The Author(s) 2024

دریافت: ۱۴۰۳/۷/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹ چاپ: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴

چکیده

سرریزها نقشی حیاتی در پروژه‌های مهندسی آب دارند و به مدیریت جریان‌های سطحی کمک می‌کنند. یکی از انواع پرکاربرد این سازه‌ها، سرریز با تاج‌دایره‌ای است که به دلیل طراحی ساده و توانایی بالا در عبور جریان، در بسیاری از پروژه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش، هدف اصلی بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در سیستم کالورت- سرریز با تاج‌دایره‌ای و تحلیل تأثیر پارامترهای کلیدی مانند شعاع تاج و بازشدگی دریچه بر ضریب دبی است. به این منظور، پروفیل‌های سرعت، سطح آب، و سایر پارامترهای جریان به عنوان متغیرهای اصلی تحلیل شده‌اند. مدل‌های مختلف سیستم کالورت- سرریز با تاج‌دایره‌ای در نرم‌افزار گمبیت طراحی و شبکه‌بندی شده و سپس به نرم‌افزار فلوئنت منتقل شده‌اند تا شبیه‌سازی‌های دقیق دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) صورت گیرد. در این مطالعه، ضریب دبی تاج سرریز، دریچه، و کل سازه سرریز برای مقادیر مختلف بار آبی و پارامترهای متغیر محاسبه و مقایسه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ضریب دبی تاج سرریز در حضور دریچه بیشتر از حالت بدون دریچه بوده و با کاهش شعاع تاج و افزایش بازشدگی دریچه، ضریب دبی افزایش می‌یابد. همچنین، مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با داده‌های آزمایشگاهی معتبر نشان‌دهنده مطابقت قابل‌قبول و دقت بالای مدل‌سازی عددی است. این تحقیق تلاش دارد تا با ارائه داده‌های دقیق و تحلیل‌های کاربردی، راهکارهایی برای بهبود طراحی و عملکرد سازه‌های آبی ترکیبی ارائه دهد

واژه‌های کلیدی: سرریز دایره‌ای، دینامیک سیالات محاسباتی(CFD)، کالورت- سرریز ترکیبی، هیدرولیک جریان، شبیه‌سازی عددی

۱- مقدمه

سرریزهای تاج‌دایره‌ای، که به عنوان یکی از انواع سرریزهای لبه‌باریک شناخته می‌شوند، از جمله سازه‌های هیدرولیکی پرکاربرد در پروژه‌های مهندسی آب به شمار می‌روند. این نوع سرریزها در اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم، قبل از معرفی سرریزهای اوجی شکل، به طور وسیعی استفاده می‌شدند و به دلیل ویژگی‌های خاص خود در بسیاری از کاربردهای مدرن حضور دارند. در طول قرن نوزدهم، با افزایش تقاضا برای ظرفیت‌های بالاتر در تخلیه آب از سازه‌ها، طراحی سرریزهای تاج‌دایره‌ای مورد توجه قرار گرفت و این تلاش‌ها به شکوفایی این نوع سرریزها منجر شد(Ghobadian et al. 2012). سرریزهای تاج‌دایره‌ای و استوانه‌ای در مقایسه با دیگر سازه‌های اندازه‌گیری و کنترل جریان، از مزایای قابل توجهی برخوردار هستند. این مزایا شامل ایجاد الگوی پایدار جریان ریزشی، عبور آسان اجسام شناور بدون اختلال در جریان، طراحی ساده و قابلیت انعطاف، ضریب جریان بالا و پایداری جریان است. از دیگر ویژگی‌های برجسته این سرریزها می‌توان به قابلیت طراحی در مقیاس‌های بزرگ و کاهش هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری اشاره کرد. به همین دلیل، سرریزهای تاج‌دایره‌ای به‌طور گسترده‌ای در مهندسی هیدرولیک به عنوان ابزارهایی برای اندازه‌گیری جریان و سازه‌های تخلیه آب در پروژه‌های مختلف به کار می‌روند. این سرریزها به‌ویژه در کنترل سطح آب در کانال‌ها، مخازن و همچنین در سیستم‌های آبیاری و مدیریت منابع آب بسیار موثر هستند(Beigi Poor & Bina, 2005). به طور خلاصه، سرریز تاج‌دایره‌ای شامل تاجی است که به شکل یک قطاع از دایره با شعاع R_b طراحی شده و به صورت عمود بر جریان قرار گرفته است، به‌طوری‌که دیواره‌های بالادست و پایین‌دست آن با افق زاویه‌های α و β تشکیل می‌دهند. رابطه ارتفاع – دبی در واحد عرض جریان (q) برای این سرریزهای لبه‌باریک به صورت زیر نوشته می‌شود. در اکثر تحقیقات مرتبط با سرریزها، ضریب دبی (C_d) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2gH_1^3} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، q دبی در واحد عرض در بالادست سرریز، g شتاب ثقل، H_1 بار آبی کل نسبت به تاج سرریز و C_d ضریب دبی سرریز است. شکل (۱)، جریان عبوری از روی سرریز را نشان می‌دهد که در آن R_b قطاعی از دایره به شعاع دیواره‌های بالادست و پایین‌دست آن است که با افق زوایای α و β می‌سازد و به صورت عمود بر جهت جریان نصب می‌شود. H_1 بار آبی کل نسبت به تاج سرریز و D بازشدگی دریچه است.

شکل ۱- مقطع یک سرریز تاج‌دایره‌ای

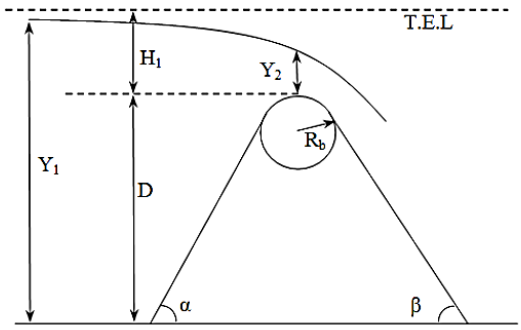

Fig 1. Cross-section of a circular-crested weir

یکی از روش‌های مهم و رایج برای تحلیل رفتار سیال در سرریزها، استفاده از مدل‌های فیزیکی است. این مدل‌ها می‌توانند در صورتی که شرایط مدل‌سازی به‌دقت شبیه‌سازی شوند، نتایج دقیقی ارائه دهند که در بسیاری از موارد قابل استناد هستند. با این حال، یکی از چالش‌های اصلی استفاده از مدل‌های فیزیکی در پروژه‌های مهندسی، زمان طولانی و هزینه‌های بالا است. به‌عنوان مثال، برای بررسی پدیده‌هایی پیچیده مانند کاویتاسیون، ممکن است مدت زمان زیادی نیاز باشد و حتی در برخی از مسائل، مدل‌سازی شرایط محیطی با دماهای بسیار بالا، مانند ٤٠٠٠ درجه سانتی‌گراد، ممکن است دشوار یا حتی غیرممکن باشد. این موضوع باعث می‌شود که استفاده از روش‌های عددی به‌عنوان یک راه‌حل کارآمد، امکان‌پذیر شود. روش‌های عددی، به‌ویژه روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی(CFD)، این امکان را فراهم می‌آورند که در مدت زمان کوتاه‌تری به تحلیل سیستم‌های پیچیده پرداخته شود. این روش‌ها به محققان اجازه می‌دهند که گزینه‌های مختلف را بررسی کرده و آن‌ها را با هزینه‌های بسیار کمتر نسبت به آزمایش‌های فیزیکی ارزیابی کنند. علاوه‌بر سرعت بیشتر، روش‌های عددی می‌توانند اطلاعات دقیق‌تری از جمله تغییرات سرعت، فشار و دما را در سراسر محدوده موردنظر ارائه دهند. این در حالی است که جمع‌آوری چنین داده‌هایی از طریق آزمایش‌های فیزیکی معمولاً پیچیده، زمان‌بر و گاهی غیرعملی است.

یکی از مزایای برجسته استفاده از روش‌های CFD نسبت به روش‌های تجربی عبارت است از:

کاهش چشم‌گیر در زمان و هزینه طراحی‌های جدید: با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی، می‌توان طراحی‌ها و آزمایش‌های مختلف را بدون نیاز به ساخت مدل‌های فیزیکی و انجام آزمایش‌های پیچیده و پرهزینه انجام داد.

امکان بررسی سیستم‌هایی که آزمایش بر روی آن‌ها دشوار یا غیرممکن است: برای مثال، تحلیل سیستم‌های بسیار بزرگ یا سیستم‌هایی که در شرایط خاصی فعالیت می‌کنند، با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی امکان‌پذیر است.

قابلیت مطالعه سیستم‌ها در شرایط غیرعادی یا تصادفی: به کمک روش‌های CFD می‌توان به شبیه‌سازی شرایط غیرمنتظره و یا حالت‌های ناپایدار که در آزمایش‌های فیزیکی به‌راحتی قابل بررسی نیستند، پرداخته و رفتار آن‌ها را تحلیل کرد.

جزئیات بسیار بالای نتایج: روش‌های عددی به‌ویژه به محققان این امکان را می‌دهند که در سطح بسیار دقیقی از نتایج، از جمله پروفایل‌های سرعت، فشار و دما، تجزیه‌وتحلیل انجام دهند.

تحقیقات زیادی تاکنون روی سرریزهای تاج‌دایره‌ای انجام شده است. (Ramamurthy & Vo, 1993) به بررسی تأثیر زاویه وجه بالادست و پایین‌دست و شعاع تاج سرریز بر ضریب دبی پرداختند. (Negm et al., 2002) ضریب دبی و ویژگی‌های هیدرولیکی سرریز لبه‌تیز دریچه‌دار با فشردگی جانبی را بررسی کردند. (Bhajantri et al., 2006) مدل دوبعدی از سرریز تاج‌دایره‌ای را مورد مطالعه قرار دادند و توزیع سرعت، فشار و ضریب دبی را با نتایج مدل‌های فیزیکی مقایسه کردند که تطابق خوبی داشت. (Samani, & Mazaheri, 2009) جریان مستغرق و نیمه‌مستغرق را برای سرریز لبه‌تیز دریچه‌دار بدون انقباض جانبی بررسی کردند و نتایج دقیق مدل‌های آزمایشگاهی را برای تعیین عمق آب و رابطه دبی تاج و دریچه مشاهده کردند. (Schmocker et al., 2011) تأثیر زاویه وجه بالا و پایین‌دست، جریان آزاد و مستغرق، و شعاع تاج سرریز بر ضریب دبی و ویژگی‌های هیدرولیکی را با استفاده از ۲۰ مدل آزمایشگاهی بررسی کردند. (Severi et al., 2014) نیز تغییرات ضریب دبی سرریز استوانه‌ای دریچه‌دار در شرایط مختلف جریان آزاد، ترکیبی، و زیرگذری را مطالعه کردند.

کالورت یا آبرو زیرزمینی سازه متداولی است که برای عبور جریان از زیر جاده، بزرگراه، خاک‌ریز، مناطق مسکونی و سرریز استفاده می‌شود. کالورت‌ها از لحاظ شکل مقطع به پنج دسته مستطیلی، مربعی، دایره‌ای، بیضی و نیم‌بیضی تقسیم‌بندی می‌شوند. انتخاب شکل کالورت به عواملی مانند نوع و محل کاربرد و محدودیت اجرا بستگی دارد. متداول‌ترین نوع کالورت مستطیلی است. طراحی کالورت متأثر از عوامل مختلفی از جمله عملکرد هیدرولیکی کالورت، استحکام بنا، هزینه‌های کلی سازه و نگهداری و سایر موارد است؛ به همین منظور همیشه طراحی یک کالورت ایده‌آل مد نظر است. هدف این تحقیق بررسی شرایط هیدرولیکی جریان با استفاده از مدل‌سازی عددی است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شبیه‌سازی جریان به روش CFD

نرم‌افزار مورد استفاده از یک الگوریتم کلی برای شبیه‌سازی پیروی می‌کند که شامل مراحل زیر است:

تعیین هندسه‌ی جریان: در این مرحله، سیال و مسیر حرکت آن مدل‌سازی می‌شود. این مدل‌سازی می‌تواند در محیط‌هایی مانند ANSYS Design Modeler یا گمبیت انجام شود.

تولید شبکه یا المان: برای حل عددی معادلات سیال از تکنیک‌های ریاضی پیشرفته استفاده می‌شود. نرم‌افزار فلوئنت از روش حجم محدود یا کنترل حجم بهره می‌برد. تولید شبکه به دقت مسأله و نوع هندسه جریان وابسته است و نقش کلیدی در حل دقیق مسأله ایفا می‌کند. این مرحله می‌تواند در نرم‌افزارهایی مانند ANSYS Icem CFD یا گمبیت انجام شود. خروجی این نرم‌افزارها با فرمت msh به عنوان ورودی در فلوئنت استفاده می‌شود.

اعمال شرایط مرزی: در این مرحله مدل جریان (آرام یا آشفته)، ویژگی‌های فیزیکی سیال، فازهای جریان، شرایط مرزی روی سطوح و تنظیمات مربوط به مش دینامیکی مشخص می‌شود.

حل مسأله: تنظیمات مربوط به فرآیند حل در این مرحله انجام می‌شود.

پردازش نتایج: در این مرحله، تمام نتایج محاسباتی و اهداف موردنظر قابل بررسی هستند. این شامل مشاهده‌ی کانتورهای مختلف، خطوط جریان، بردارهای نرمال، استخراج نمودارها و ساخت انیمیشن از مدل جریان است. پردازش نتایج می‌تواند در نرم‌افزار فلوئنت یا محیط‌های ANSYS Workbench و CFD Post انجام شود.

در تحقیق حاضر، برای تعیین سطح آزاد جریان و محاسبه عمق آب بالادست، از مدل $k-\varepsilon$ به دلیل سرعت همگرایی و دقت بالاتر استفاده شد. همچنین، برای برداشت پروفیل‌های سرعت، از مدل Reynolds Stress بهره گرفته شد. مقاطع پروفیل سرعت در طول کانال و سرریز با استفاده از قابلیت Iso Surface نرم‌افزار تعیین شدند و فاصله‌ی این مقاطع با نزدیک شدن به سرریز، به دلیل افزایش تغییرات، کاهش یافت. اندازه‌گیری دبی جریان عبوری از روی تاج و کالورت سازه با استفاده از پروفیل سرعت و انتگرال‌گیری انجام شد(Izadinia & Heidari., 2023).

مدل $k-\varepsilon$ یکی از پرکاربردترین و شناخته‌شده‌ترین مدل‌های آشفتگی در دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته به کار می‌رود. این مدل بر اساس حل دو معادله برای توصیف رفتار آشفتگی در جریان طراحی شده است:

K: نشان‌دهنده انرژی جنبشی آشفتگی است که معیاری برای اندازه‌گیری شدت آشفتگی در جریان است.

(ε): نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی است که نرخ تبدیل انرژی جنبشی آشفتگی به انرژی داخلی را نشان می‌دهد (Izadinia et al., 2022).

۲-۱-۱- تأثیر مدل $(k-\varepsilon)$

دقت بیشتر در شبیه‌سازی جریان‌های آشفته: این مدل با حل معادلاتی برای انرژی آشفتگی و نرخ اتلاف آن، توزیع آشفتگی را در جریان با دقت بیشتری محاسبه می‌کند. در جریان‌هایی با تغییرات شدید سرعت، مانند جریان روی سرریزها یا پشت موانع، مدل $k-\varepsilon$ به دلیل دقت بیشترش می‌تواند نتایج دقیقی ارائه دهد.

کاربرد در جریان‌های آزاد و نیمه‌مستغرق: این مدل برای شبیه‌سازی جریان‌های آزاد، مانند جریان‌های عبوری از سرریزها، که شامل ناحیه‌های مختلف از جمله ناحیه‌های جداشده و بازگردشی هستند، مناسب است. استفاده از مدل $k-\varepsilon$ به محققان امکان می‌دهد که رفتار جریان در نزدیکی سازه‌ها مانند سرریزها را با دقت شبیه‌سازی کنند.

همگرایی سریع‌تر: مدل $k-\varepsilon$ نسبت به برخی دیگر از مدل‌های آشفتگی، مانند مدل‌های پیچیده‌تر Reynolds Stress، از همگرایی سریع‌تری برخوردار است. این ویژگی به معنای کاهش زمان محاسبات است، به‌ویژه در مسائلی که حجم محاسبات زیاد است.

سادگی و پایداری: مدل $k-\varepsilon$ به دلیل ساختار ساده‌تر خود نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی، پایداری بالاتری دارد و به‌راحتی می‌تواند در شرایط مختلف جریان به کار گرفته شود. این ویژگی باعث می‌شود که این مدل در شبیه‌سازی‌های مهندسی سیالات به طور گسترده استفاده شود.

محدودیت‌ها: مدل $k-\varepsilon$ در شبیه‌سازی جریان‌های نزدیک به دیواره (جریان‌های لایه مرزی) یا جریان‌های دارای تغییرات شدید در مقیاس کوچک، مانند جریان‌های با گردابه‌های پیچیده یا جریان‌هایی که به شدت وابسته به شرایط مرزی هستند، دقت کمتری دارد. برای این‌گونه مسائل، مدل‌های پیچیده‌تری مانند k-ε یا Reynolds Stress ترجیح داده می‌شوند(Izadinia et al., 2023).

۲-۲- مدل‌های مورد بررسی

(Ramamurthy & Vo, 1993) و (Schmocker et al., 2011) در پژوهش‌های خود نشان دادند که زاویه وجه بالادست سرریز تاج‌دایره‌ای تأثیر چشم‌گیری در تغییرات ضریب دبی سرریز ندارد از این رو در تحقیق حاضر شعاع تاج سرریز و ارتفاع دریچه به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند. گروه A با سه شعاع تاج مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر و ٦ دبی ۱۸۰، ۲۲۰، ۲٦۰، ۳۰۰، ۳٤۰ و ۳۸۰ لیتر بر ثانیه و گروه B با ٤ ارتفاع دریچه مختلف ۳، ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر و ٦ دبی در واحد عرض مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. پارامتر ثابت در این گروه شعاع تاج ۱۰ سانتی‌متر و زاویه وجه پایین‌دست ٤۵ درجه است، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. پارامتر ثابت در مدل‌های A ارتفاع کالورت ۵ سانتی‌متر و زاویه وجه پایین‌دست ٤۵ درجه است. مشخصات مدل‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

شکل۳- جزئیات پنجره Mesh برای مش‌بندی سرریز- دریچه و حجم کنترل

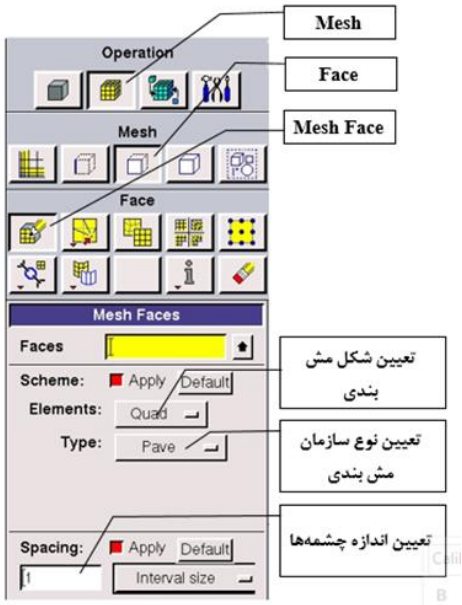

Fig 3. Details of the Mesh window for meshing the weir-gate and control volume

شکل٤- جزئیات پنجره Zones برای تعیین شرایط مرزی حجم کنترل

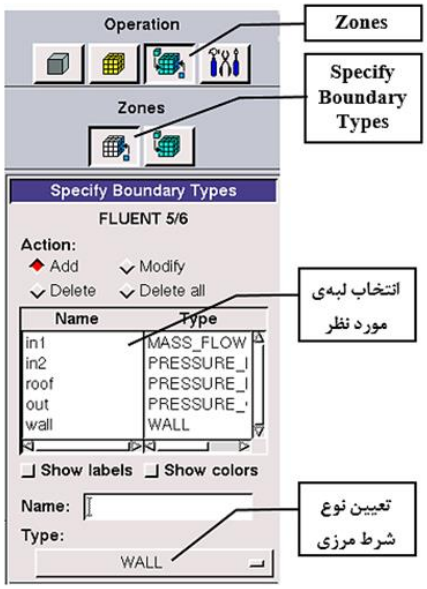

Fig 4. Details of the Zones window for defining boundary conditions of the control volume

۲-۴- صحت‌سنجی مدل عددی

برای صحت‌سنجی این پژوهش از مدل‌سازی عددی ۵ مدل آزمایشگاهی مورد بررسی در مقالات بین المللی استفاده شده است. مدل‌های آزمایشگاهی مورد بررسی در این مقالات در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است. برای صحت‌سنجی دقت محاسبه ضریب دبی سرریز تاج‌دایره‌ای از دو مدل آزمایشگاهی مورد بررسی توسط(Ramamurthy & Vo, 1993) استفاده شد. دو سرریز تاج‌دایره‌ای به شعاع‌های ۱۵/۲ و ۲/۵٤ سانتی‌متر به صورت عددی در نرم‌افزار فلوئنت مدل‌سازی شد. مقایسه نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مطابقت خوبی را نشان می‌دهد.

برای صحت‌سنجی توانایی مدل‌سازی سرریز و دریچه توسط نرم افزار فلوئنت از مدل آزمایشگاهی مورد بررسی توسط (Samani & Mazaheri, 2009) استفاده شد. در این بررسی سرریز لبه‌تیز دریچه‌دار بدون فشردگی جانبی در نرم افزار فلوئنت مدل‌سازی شد. مقایسه عمق آب بالادست محاسبه شده در مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. عمق جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز به ترتیب در فاصله‌های دو برابر و هشت برابر نسبت به مرکز سرریز اندازه‌گیری شدند (Sing and Kumar, 2022).

برای صحت‌سنجی دقت محاسبه پروفیل سرعت و به دنبال آن پروفیل پارامترهای آشفتگی و فشار از دو مدل آزمایشگاهی مورد بررسی توسط (Bagheri & Heydarpour, 2010) استفاده شد. در این بررسی سرریز تاج‌دایره‌ای به شعاع ۸/۰٦۵ سانتی‌متر با سه مدل آشفتگی متفاوت در نرم افزار فلوئنت مدل‌سازی شد. در این مدل‌سازی پروفیل سرعت تاج سرریز برای دو نسبت H/R متفاوت

۰/۸۵ و ۱/۲ استخراج شد. مقایسه نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. پارامترهای شکل (۵)، P' فاصله تاج سرریز تا کالورت،P ارتفاع سرریز، D بازشدگی دریچه سرریز و R شعاع تاج دایره‌ای است.

شکل۵- مشخصات مدل‌های مورد ارزیابی

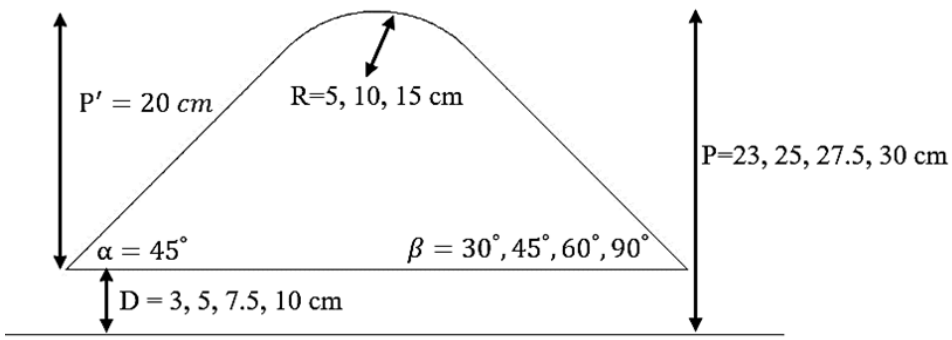

Fig 5. Specifications of the evaluated models

جدول۱- مشخصات هندسی مدل‌ها

Table 1. Geometric specifications of the models

مدل	R(cm)	D(cm)	β	Q(lit/s)
A۱	۵	۵	٤۵	۱۸۰،۲۲۰،۲٦۰،۳۰۰،۳٤۰،۳۸۰
A۲	۱۰	۵	٤۵	۱۸۰،۲۲۰،۲٦۰،۳۰۰،۳٤۰،۳۸۰
A۳	۱۵	۵	٤۵	۱۸۰،۲۲۰،۲٦۰،۳۰۰،۳٤۰،۳۸۰
B۱	۱۰	۳	٤۵	۱۸۰،۲۲۰،۲٦۰،۳۰۰،۳٤۰،۳۸۰
B۲	۱۰	۵	٤۵	۱۸۰،۲۲۰،۲٦۰،۳۰۰،۳٤۰،۳۸۰
B۳	۱۰	۷/۵	٤۵	۱۸۰،۲۲۰،۲٦۰،۳۰۰،۳٤۰،۳۸۰
B٤	۱۰	۱۰	٤۵	۱۸۰،۲۲۰،۲٦۰،۳۰۰،۳٤۰،۳۸۰

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی پروفیل سطح آب

پارامتر متغیر در سرریزها در گروه A شعاع تاج سرریز است. در شکل (٦) پروفیل سطح آب برای دبی ۲٦۰ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، سطح آزاد جریان در بالادست با افزایش شعاع تاج افزایش یافته و پروفیل سطح آب در پایین‌دست از سرریز فاصله گرفته است. در پایین‌دست (در فاصله ۰/۸ متر تا انتها) سطح آب برای کلیه شعاع‌های سرریز برابر است.

شکل٦- تغییرات پروفیل سطح آب در کالورت - سرریز تاج دایره‌ای بر اساس شعاع تاج سرریز

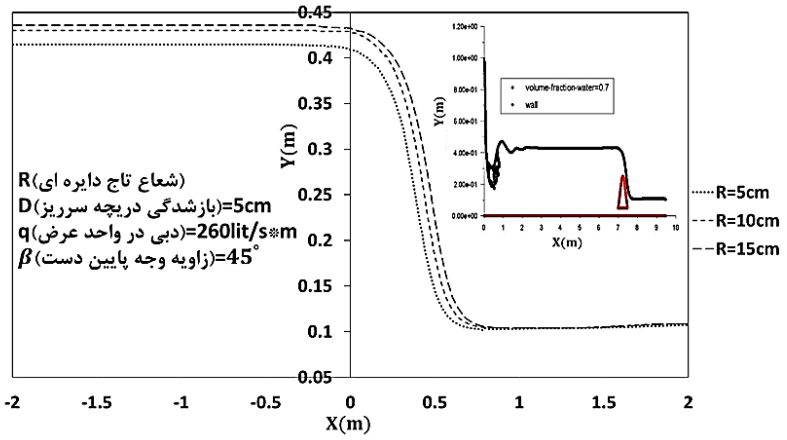

Fig 6. Variations in the water surface profile in the culvert-circular-crested weir based on the radius of the weir crest

پارامتر متغیر در سرریزها در گروه B مقدار بازشدگی دریچه است. در شکل (۷) پروفیل سطح آب برای دبی ۲٦۰ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. سطح آب در بالادست با افزایش بازشدگی دریچه مقدار ناچیزی افزایش یافته است. به دلیل افزایش بازشدگی دریچه و به دنبال آن افزایش دبی دریچه و کاهش دبی سرریز پروفیل سطح آب در پایین‌دست از سرریز فاصله گرفته است. در پایین‌دست (در فاصله ۰/۸ متر تا انتها) سطح آب برای کلیه مقادیر بازشدگی دریچه برابر است.

شکل۷- تغییرات پروفیل سطح آب در کالورت- سرریز تاج‌دایره‌ای براساس بازشدگی دریچه

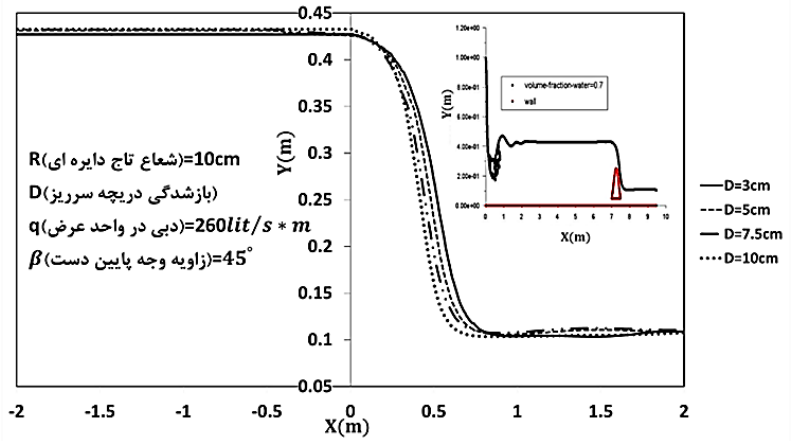

Fig 7. Variations in the water surface profile in the culvert-circular-crested weir based on the gate opening

۳-۲- بررسی پروفیل‌های سرعت در طول کانال و سرریز

محور افقی مقدار سرعت بی‌بعد شده با میانگین سرعت بالادست (v/U_1) و محور قائم ارتفاع جریان (y) نسبت به ارتفاع بیشینه پروفیل (y_{max}) مورد نظر است. محور افقی بالای هر شکل فاصله هر پروفیل از ابتدای سرریز تقسیم بر طول سرریز (L) را نشان

می‌دهد. همان‌گونه که اشاره شده است، پارامتر متغیر در کالورت – سرریز تاج‌دایره‌ای گروه A شعاع تاج سرریز است. شکل (۸-الف) توزیع سرعت را در بالادست سرریز نشان می‌دهد. با توجه به شکل جریان دارای مقدار سرعت بیشینه در نزدیک سطح آزاد است و با حرکت به سمت پایین‌دست جریان یکنواخت و توسعه‌یافته می‌شود. با توجه به اینکه در سرریز با شعاع تاج ۱۵ سانتی‌متر سرعت جریان در نزدیکی بستر کاهش و با نزدیک شدن به سطح آب نسبت به دو شعاع دیگر ۵ و ۱۰ سانتی‌متر، ۱۷ درصد اختلاف داشته می‌توان بیان نمود افزایش شعاع تاج سرریز باعث اثر گذاشتن در جریان بالادست سرریز شده است در حالیکه در دو شعاع دیگر پروفیل‌های سرعت تقریباً یکسان هستند. با نزدیک شدن به سرریز جریان از حالت یکنواخت خارج شده و دارای مقدار بیشینه‌ای در ورودی کالورت است. سرعت ورودی آب به کالورت با افزایش شعاع سرریز کمتر از ٤ درصد افزایش یافته است و با نزدیک شدن به سطح آزاد این روند معکوس شده و بیشترین سرعت مربوط به پروفیل با کمترین شعاع تاج سرریز است. شکل (۸-ب) تغییرات سرعت را در طول کالورت – سرریز نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است بیشینه سرعت جریان در دریچه نزدیک کف کانال و در ابتدای کالورت است. بیشینه سرعت جریان کالورت با کاهش شعاع تاج کمتر از ۳ درصد کاهش می‌یابد. تغییرات سرعت روی سرریز نشان می‌دهد بیشینه سرعت جریان روی تاج سرریز است که با کاهش شعاع ۱۳ درصد افزایش می‌یابد که نشان دهنده تأثیر کاهش شعاع در افزایش سرعت جریان تاج سرریز است. بیشینه سرعت جریان قبل از تاج سرریز نزدیک سطح آزاد است و با نزدیک شدن به تاج سرریز و پایین‌دست تاج این روند معکوس شده و بیشینه سرعت جریان در نزدیک سطح سرریز است. در پایین‌دست سرریز با کاهش شعاع سرعت کاهش یافته است. شکل (۸-ج) تغییرات سرعت را در پایین‌دست سازه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با فاصله گرفتن از سازه جریان یکنواخت شده و بیشینه سرعت جریان در نزدیک سطح آزاد است. درصد اختلاف سرعت جریان پایین‌دست سازه بین شعاع ۵ و ۱۰ سانتی‌متر، ۷ درصد و بین شعاع ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر کمتر از ۳ درصد است که نشان دهنده تأثیر کم شعاع در سرعت پایین‌دست سازه است.

پارامتر متغیر در کالورت-سرریز تاج دایره‌ای مقدار بازشدگی دریچه است. شکل (۹- الف) توزیع سرعت را در بالادست سرریز نشان می‌دهد. با توجه به شکل جریان دارای مقدار سرعت بیشینه در نزدیک سطح آزاد است و با حرکت به سمت پایین‌دست جریان یکنواخت و توسعه‌یافته می‌شود. سرعت جریان با کاهش مقدار بازشدگی دریچه ۱۰ درصد افزایش می‌یابد که علت آن کاهش سطح مقطع جریان با داشتن یک دبی ثابت است. با نزدیک شدن به سرریز جریان از حالت یکنواخت خارج شده و دارای مقدار بیشینه‌ای در ورودی دریچه و نزدیک کف کانال است. مقدار بیشینه سرعت ورودی آب به دریچه با افزایش بازشدگی از کف کانال فاصله گرفته و ۱۱ درصد افزایش یافته است. بیشترین مقدار بیشینه سرعت مربوط به بازشدگی ۱۰ سانتی‌متر و در فاصله $Y / Y_{max} = 0.19$ از کف کانال اتفاق افتاده است. شکل (۹-ب) تغییرات سرعت را در طول سرریز-دریچه نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است بیشینه سرعت جریان در دریچه نزدیک کف کانال و در ابتدای دریچه است. با افزایش بازشدگی دریچه سرعت جریان در دریچه در حدود ۱۱ درصد افزایش یافته است. مقدار سرعت تا مقطع $X / L = 0.48$ بر روی سرریز با افزایش بازشدگی دریچه کاهش یافته که نشان دهنده کاهش دبی عبوری روی سرریز است و بعد از آن با توجه به کاهش سطح مقطع جریان بیشینه سرعت تقریباً ثابت شده است. با افزایش بازشدگی دریچه سرعت جریان روی تاج سرریز ۱۱/۵ درصد کاهش یافته است. شکل (۹-ج) تغییرات سرعت را در پایین‌دست سرریز نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با فاصله گرفتن از سرریز جریان یکنواخت شده و بیشینه سرعت جریان در نزدیک سطح آزاد است. سرعت جریان در پایین‌دست سرریز با افزایش بازشدگی دریچه ۳ درصد افزایش یافته که نشان دهنده تأثیر ناچیز دریچه در تغییرات سرعت پایین‌دست سازه است.

شکل ۸- تغییرات پروفیل‌های سرعت بر اساس شعاع تاج سرریز الف) در بالادست، ب) در طول سرریز-دریچه و ج) در پایین‌دست کالورت- سرریز تاج‌دایره‌ای

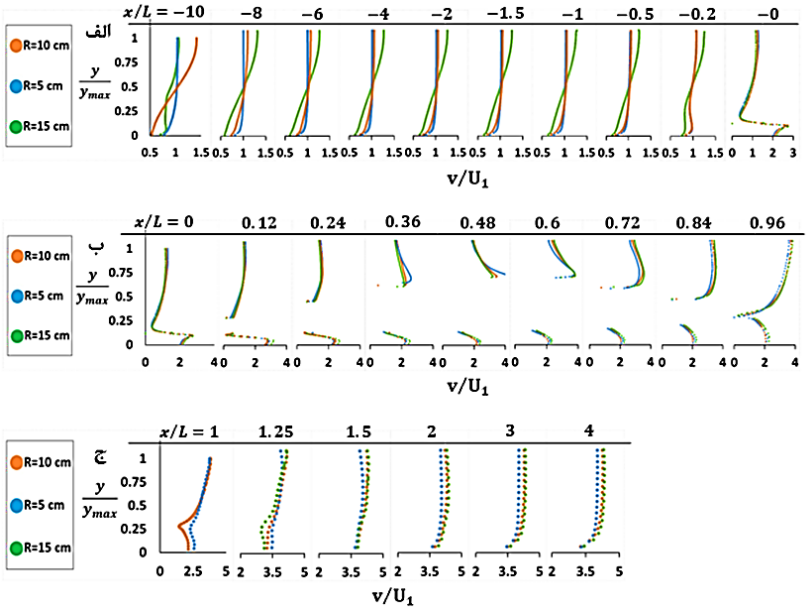

Fig 8. Variations in velocity profiles based on the radius of the weir crest: a) upstream, b) along the weir-gate, and c) downstream of the culvert-circular-crested weir

شکل ۹- تغییرات پروفیل‌های سرعت بر اساس بازشدگی دریچه الف) در بالادست، ب) در طول سرریز-دریچه و ج) در پایین‌دست کالورت- سرریز تاج‌دایره‌ای

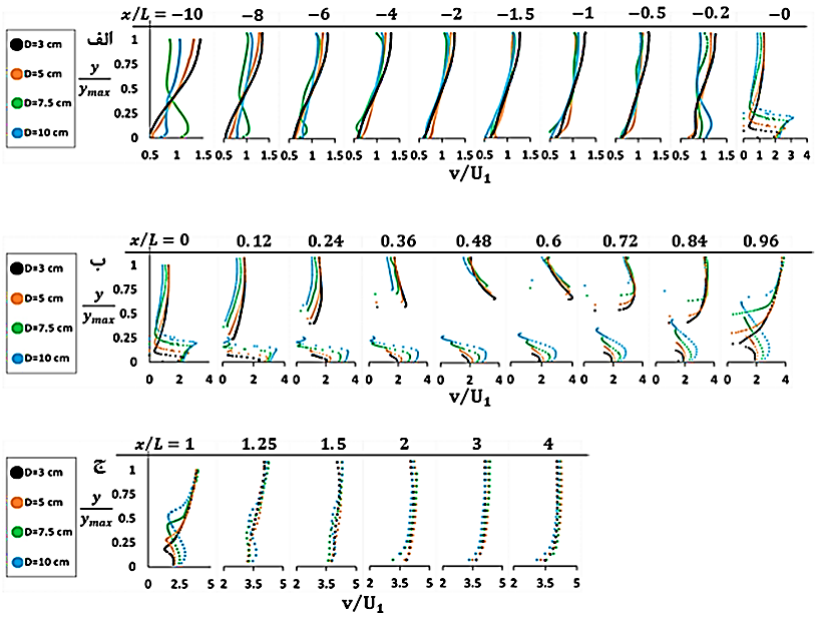

Fig 9. Variations in velocity profiles based on the gate opening: a) upstream, b) along the weir-gate, and c) downstream of the culvert-circular-crested weir

۴- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که ضریب دبی در سرریزهای دریچه‌دار بیشتر از سرریزهای بدون دریچه است. همچنین با کاهش شعاع تاج سرریز، ضریب دبی افزایش می‌یابد. در سرریزهای گروه A، کمترین ضریب دبی مربوط به شعاع تاج ۱۵ سانتی‌متر است که ضریب دبی در محدوده ۱/۲ تا ۱/۳٤ تغییر می‌کند، در حالی که بیشترین ضریب دبی مربوط به شعاع ۵ سانتی‌متر است که ضریب دبی در محدوده ۱/٤۲ تا ۱/۵۲ تغییر دارد. علاوه بر این، با افزایش بازشدگی دریچه در نسبت H_1/R، مقدار ضریب دبی افزایش یافته و اثر دریچه بر ضریب دبی تقویت می‌شود. در سرریزهای گروه B، بیشترین ضریب دبی مربوط به بازشدگی دریچه ۱۰ سانتی‌متر است که ضریب دبی در محدوده ۱/۳ تا ۱/٤٦ تغییر می‌کند و کمترین ضریب دبی مربوط به بازشدگی ۳ سانتی‌متر است که ضریب دبی در محدوده ۱/۲۷ تا ۱/٤ تغییر دارد. این نتایج نشان می‌دهند که تغییرات در شعاع تاج و بازشدگی دریچه تاثیر قابل توجهی بر ضریب دبی سرریزها دارند و می‌توانند در بهینه‌سازی طراحی‌های هیدرولیکی موثر باشند.

۵- تضاد منافع نویسندگان

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

۶- منابع

Bagheri, S., & Heydarpour, M. (2010). Application of Euler equations in determining the discharge coefficient of circular crest spillways. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 40(1)67-73. (In Persian)

Beigi Poor, G., & Bina, M. (2005). Hydraulic flow in circular and cylindrical crested weirs. 5th Iranian Hydraulic Conference, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, 1-8.

Bhajantri, M.R., Eldho, T.I., & Deolalikar, P.B. (2006). Hydrodynamic modelling of flow over a spillway using a two-dimensional finite volume-based numerical model. *Sadhana*, 31(6), 743-754. https://doi.org/10.1007/BF02716893

Ghobadian, R., Farmani Fard, M., & Karami, A. (2012). Effect of crest roughness and body on discharge coefficient and hydraulic conditions of flow in circular crested weirs using a physical model. *Journal of Soil and Water Sciences*, 22(1), 1-8.

Izadinia, E., & Heidari, D. (2023). Flow simulation in a combined culvert-circular crown spillway structure, 22nd Iranian Hydraulic Conference, Maragha. https://civilica.com/doc/1963858

Izadinia, E., & Heidari, D. (2022). Flow simulation in a combined structure of culvert and circular crown spillway, 21st National Conference of Iranian Hydraulics, Ahvaz. https://civilica.com/doc/1694896

Negm, A.M., Al-Brahim, A.M., & Alhamid, A.A. (2002). Combined-free flow over weirs and below gates. *Journal of Hydraulic Research*, 40(3), 359-365. https://doi.org/10.1080/00221680209499950

Ramamurthy, A.S., & Vo, N.D. (1993). Characteristics of circular crested weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(9), 1055–1062.

Samani, J., & Mazaheri, M. (2009). Combined flow over weir and under gate. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(3), 224–227. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:3(224)

Schmocker, L., Halldórsdóttir, B., & Hager, W. (2011). Effect of weir face angles on circular-crested weir flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(6), 637–643. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000346

Severi, A., Masoudian, M., Kordi, E., & Roettcher, K. (2014). Discharge coefficient of combined-free over-under flow on a cylindrical weir-gate. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 42-52. https://doi.org/10.1080/09715010.2014.939503

Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Summer 2024: Vol 2, Issue 2, 127-140
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1184789

Research Article

Analysis and evaluation of key indicators in technical and management strategies in water systems with emphasis on sustainable water resources management

Sadroddin Etesami

PhD in Civil Engineering, Lecturer Payam Noor University, Tehran, Iran.

* *Corresponding author email*: sadretesami@gmail.com

© The Author(s) 2024

Received: 22 Sep 2024 Accepted: 23 Nov 2024 Published:24 Dec 2024

Abstract

Water, as a critical element for economic development, demands effective management. In arid and semi-arid regions, this essential resource is a limiting factor for agriculture, where competition for its acquisition is intense. Neglecting this issue can result in wasted capital and environmental degradation. In Iran, water scarcity has raised serious concerns, with the agricultural sector being the largest consumer. Effective innovations and policies are necessary for sustainable conservation and use of water resources. This research aims to identify key factors in the technical strategies of water systems focused on optimal water management. By reviewing theoretical foundations and prior research, essential dimensions and components related to water systems were identified. These dimensions were weighted and prioritized using the best-worst method, along with a survey of twenty university professors specializing in civil engineering with a focus on water resources (based on prior studies). The study highlights the crucial factors in technical strategies for optimal water management. Results indicate that maintaining water quality, conserving resources, and controlling water pollution are paramount. Water quality is essential for public health and ecosystem protection. Additionally, water conservation aids in reducing waste and optimizing resources to mitigate water shortages. Finally, controlling pollution is fundamental for environmental sustainability, supporting the effective functioning of water systems.

Keywords: Water system management, Strategy, Modelling, Best-worst method

مجله راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
شاپا الکترونیکی: ۱۴۴۹-۲۹۸۱
تابستان ۱۴۰۳، دوره دو، شماره۲، ۱۴۰-۱۲۷
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1184789

مقاله پژوهشی

تحلیل و ارزیابی شاخص‌های اساسی در راهبردهای فنی و مدیریتی در سامانه‌های آبی با تأکید بر مدیریت پایدار منابع آب

صدرالدین اعتصامی

دکتری مهندسی عمران، مدرس دانشگاه پیام نور، تهران ، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: sadretesami@gmail.com

© The Author(s) 2024

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳ چاپ: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴

چکیده

آب، به عنوان یک عنصر حیاتی برای توسعه اقتصادی، نیازمند مدیریت بهینه است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، این منبع کلیدی محدودکننده کشاورزی است و رقابت برای دستیابی به آن شدید است. بی‌توجهی به این مسئله می‌تواند منجر به هدررفت سرمایه‌ها و تخریب زیست‌محیطی شود. در ایران، کمبود آب نگرانی‌های جدی ایجاد کرده و بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آن است. به‌کارگیری نوآوری‌ها و سیاست‌های موثر برای صرفه‌جویی و بهره‌وری پایدار از منابع آبی ضرورت دارد. هدف این پژوهش شناسایی عوامل کلیدی در راهبردهای فنی سامانه‌های آبی با تاکید بر مدیریت بهینه آب است. با مرور مبانی نظری و پیشینه پژوهش، ابعاد و مولفه‌های کلیدی مرتبط با سامانه‌های آبی شناسایی شده و با استفاده از روش بهترین- بدترین(BWM) و نظرسنجی از بیست نفر از اساتید دانشگاهی رشته عمران گرایش آب که جامعه آماری پژوهش را تشکیل داده‌اند(براساس تحقیقات قبلی)، به وزن‌دهی و اولویت‌بندی این مولفه‌هاپرداخته شد. پژوهش حاضر به شناسایی عوامل کلیدی در راهبردهای فنی سامانه‌های آبی بر مدیریت بهینه آب پرداخته و نتایج نشان داد که حفظ کیفیت آب، صرفه‌جویی در مصرف منابع و کنترل آلودگی‌های آبی از اهمیت بالایی برخوردارند. حفظ کیفیت آب به‌عنوان عامل حیاتی برای تأمین سلامت عمومی و محافظت از محیط زیست شناخته شده است. همچنین، صرفه‌جویی در مصرف آب به کاهش هدررفت و بهینه‌سازی منابع برای مقابله با کمبود آب کمک می‌کند. در نهایت، جلوگیری از کنترل آلودگی در پایداری محیطی به‌منظور حمایت از عملکرد مؤثر سامانه‌های آبی ضروری است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت سامانه‌آبی، راهبرد، مدل‌سازی، روش بهترین- بدترین

۱- مقدمه

آب در دنیای امروز به عنوان یک کالای اقتصادی-اجتماعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. قیمت آب، مشابه سایر کالاهای اقتصادی، نشان‌دهنده کمیابی آن است و آگاهی از ارزش اقتصادی آب در بخش‌های مختلف می‌تواند نقشی تعیین‌کننده در مدیریت تقاضای آن ایفا کند. به عنوان مثال، اگر ارزش آب کمتر از واقعیت برآورد شود، تخصیص بهینه منابع آب بین مصارف مختلف مختل خواهد شد و این امر می‌تواند به مشکلات جدی در تأمین نیازهای آب شرب و کشاورزی منجر شود. از سوی دیگر، در صورتی که ارزش آب بیش از حد تعیین گردد، این وضعیت می‌تواند به رفاه اجتماعی آسیب بزند و فشار مالی غیرقابل تحملی براقشار آسیب‌پذیر جامعه وارد کند. این فشار می‌تواند مصرف آب را برای این گروه‌ها با چالش‌های جدی مواجه سازد (Asadi et al., 2018). ایران به ویژه با چالش‌های متعددی نظیر کم‌آبی، خشکسالی‌های متناوب و سیل‌های ویرانگر مواجه است. این مشکلات به همراه رشد جمعیت و تخریب‌های ناشی از آن، نیاز به محصولات کشاورزی و دامی را افزایش داده است. در این راستا، محدودیت منابع آب و خاک حاصلخیز، مسئله کم‌آبی را در بخش کشاورزی تشدید کرده و کشاورزی به بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در کشور تبدیل شده است. برای بهره‌برداری بهینه از منابع آبی، ضروری است که راهکارهای علمی ومدیریتی مناسبی ارائه شود(Piri & Heydari, 2017). بر اساس آمار ارائه‌شده در پنجمین کنفرانس بین‌المللی اقتصاد کشاورزی آسیا، پیش‌بینی می‌شود ایران پس از سال ۲۰۵۰ میلادی به یکی از کشورهای تشنه دنیا تبدیل شود (Acey et al., 2019). در کشورهایی که دسترسی به منابع آب سطحی محدود و بارش‌ها کم و نامنظم است، آب‌های زیرزمینی از اهمیت بالایی برخوردارند. اما این منابع به دلیل برداشت بیش از حد مجاز و کنترل آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی تحت تهدید جدی قرار دارند. این وضعیت نه تنها به امنیت غذایی آسیب می‌زند، بلکه پیشرفت اقتصادی و توسعه پایدار کشورها را نیز با چالش روبه‌رو می‌کند (Nazari & Judoi, 2014). تحقیقات نشان می‌دهد که در بسیاری از کشورها آب‌های زیرزمینی طی چند سال اخیر دچار افت کیفی قابل ملاحظه‌ای شده‌اند(Jeong, 2001; Elhatip et al., 2003). وابستگی بخش زیادی از حیات و تمدن بشر به آب‌های زیرزمینی و همزمان افت کیفی و کمی این منابع، حساسیت جوامع را نسبت به مسائل مرتبط با آب‌های زیرزمینی افزایش داده است. به همین دلیل، مدیریت بهره‌برداری و حفاظت از آب‌های زیرزمینی به عنوان یک امر ضروری مطرح می‌شود (Nazari & Judoi, 2014). در این راستا، نیاز به توسعه فن‌آوری‌های نوین و روش‌های مدیریت پایدار منابع آب احساس می‌شود. استفاده از سامانه‌های آبیاری هوشمند، بهبود روش‌های بازیافت آب و ارتقاء فرهنگ مصرف بهینه آب می‌تواند به کاهش فشار بر منابع آب کمک کند. همچنین، آموزش و آگاهی‌بخشی به جوامع محلی در خصوص اهمیت حفظ منابع آب و روش‌های مدیریت آن، از دیگر اقداماتی است که می‌تواند به بهبود وضعیت موجود کمک کند. برای مدیریت بهینه این منابع، علاوه بر آگاهی از خصوصیات فیزیکی آبخوان و چرخه جریان آب، آگاهی از وضعیت کیفیت آب سفره نیز اهمیت ویژه‌ای دارد. (Ani et al., 2024) پژوهشی با عنوان ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر برای تأمین آب شامل بررسی مقایسه‌ای ابتکارات آفریقا و ایالات متحده انجام دادند. این پژوهش به بررسی ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در سامانه‌های تأمین آب به‌عنوان راهکاری کلیدی برای چالش‌های جهانی مانند تغییرات اقلیمی و امنیت آب پرداخت. با مقایسه ابتکارات در کشورهای آفریقایی و ایالات متحده، اهمیت سامانه‌های پایدار و کارآمد مورد تأکید قرار گرفت. این پژوهش چالش‌ها و فرصت‌های فن‌آوری، مالی و زیرساختی را بررسی کرده و به پایداری و مقیاس‌پذیری ابتکارات انرژی تجدیدپذیر در بخش آب پرداخت. در پایان، بر ضرورت همکاری بین‌المللی و نوآوری برای تحقق اهداف توسعه پایدار، به‌ویژه در دسترسی به آب و انرژی پاک، تأکید کرده است. (Olatunde et al., 2024) پژوهشی با عنوان بررسی سامانه‌های مدیریت هوشمند آب از آفریقا و ایالات متحده انجام دادند. این پژوهش به بررسی سامانه‌های مدیریت هوشمند آب در آفریقا و ایالات متحده پرداخت و بر توسعه و تأثیرات آن‌ها تمرکز کرد. چارچوب‌های نظری شامل ادغام سامانه‌های سایبر- فیزیکی و اصول توسعه پایدار مورد بررسی قرار گرفت. نوآوری‌های فن‌آوری مانند اینترنت اشیاء و هوش مصنوعی در مدیریت آب تحلیل شدند و تأثیرات زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی این سامانه‌ها، از

جمله صرفه‌جویی در آب و دسترسی بهتر به آب سالم، مورد تأکید قرار گرفت. چالش‌های فنی، مالی و قانونی نیز به‌طور انتقادی بررسی گردید و پژوهش بر ضرورت ادغام فن‌آوری، سیاست و مشارکت جامعه در مدیریت هوشمند آب تأکید کرد و خواستار تحقیقات و همکاری‌های بیشتر شد.

(Obiuto et al., 2024) پژوهشی با عنوان مهندسی شیمی و اقتصاد دایره‌ای آب شامل شبیه‌سازی برای مدیریت پایدار آب در سامانه‌های زیست‌محیطی انجام دادند. این پژوهش به بررسی نقش مهندسی شیمی در پیشبرد اقتصاد آب گردشی و مدیریت پایدار آب پرداخت. مفهوم اقتصاد آب گردشی بر استفاده کارآمد و بازیابی منابع آب تأکید نمود. شبیه‌سازی‌های محاسباتی در مهندسی شیمی به تحلیل چرخه آب و شناسایی راهبردهای بهینه برای تخصیص منابع، کنترل آلودگی و حفظ محیط زیست کمک کردند. همچنین، فرآیندهای تصفیه فاضلاب و فن‌آوری‌های نوآورانه مانند فیلتراسیون غشایی و الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفتند. ادغام این شبیه‌سازی‌ها در اقتصاد آب گردشی، راهی امیدوارکننده برای مدیریت آب و تضمین پایداری سامانه‌های محیطی ارائه داد.

(Abatan et al., 2024) تحقیقی با عنوان چارچوب‌های شبیه‌سازی یکپارچه برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی آلاینده‌های شیمیایی در سامانه‌های آبی انجام دادند. این پژوهش به بررسی تهدیدات محیط‌زیستی ناشی از آلاینده‌های شیمیایی در محیط زیست‌های آبی پرداخت و نیاز به درک دینامیک آلاینده‌ها و پیامدهای اکولوژیکی آن‌ها را برجسته کرد. چارچوب‌های شبیه‌سازی یکپارچه به‌عنوان ابزارهای مؤثر برای ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی این آلاینده‌ها مطرح شدند. این چارچوب‌ها شامل دانش چندرشته‌ای و شبیه‌سازی تعاملات پیچیده بین فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی بودند. آن‌ها قادر به پیش‌بینی الگوهای انتشار آلاینده‌ها تحت شرایط مختلف و شناسایی منابع آلاینده بحرانی شدند. همچنین، کاربرد این چارچوب‌ها در ارزیابی تأثیرات ناشی از تخلیه‌های صنعتی و رواناب‌های کشاورزی و شهری مؤثر بود. در نهایت، پیشرفت‌های مداوم در تکنیک‌های مدل‌سازی توانست به بهبود قابلیت‌های این چارچوب‌ها در مدیریت محیط‌زیست کمک کند و تحلیل دقیق عوامل کلیدی در راهبردهای فنی این سامانه‌ها را ضروری ساخت.

(Motaghi & Qarabeigi, 2018) پژوهشی را با استفاده از روش پیمایشی و تحلیل ماتریس انجام دادند که راهبردهایی برای مدیریت بهینه آب در ایران طراحی کرد. این پژوهش شامل ۵۰ نفر از اعضای هیئت علمی جغرافیا در سه دانشگاه معتبر بود. یافته‌ها نشان دادند که مدیریت آب در کشور از نظر عوامل درونی و بیرونی ضعیف بوده است. راهبردهای پیشنهادی شامل محلی‌سپاری، مداخله مدیریتی برای کاهش سیاسی‌سازی، بهبود مدیریت منابع انسانی و یکپارچه‌سازی سازمان‌ها بودند.

(Khoshmanesh et al., 2017) پژوهشی درباره کنترل و کاهش کنترل آلودگی منابع آب کشور انجام دادند. در این پژوهش، ابتدا منابع آب از نظر کمیت و کیفیت بررسی شدند و سپس چشم‌انداز و رسالت سازمان تعیین گردید. نتایج نشان دادند که راهبردهای ملی در پنج محور اصلی شامل قوانین و مقررات، نیروی انسانی، منابع مالی، سخت‌افزار و تجهیزات و آگاهی‌رسانی و مشارکت مردمی هستند. (Kaaba et al., 2017) در پژوهشی به ارزیابی ریسک کنترل آلودگی منابع آب دشت گیسور در جنوب خراسان رضوی پرداختند. از روش‌های آماری چند متغیره، از جمله ضریب همبستگی و نمودار خوشه‌ای استفاده کردند که نشان‌دهنده ارتباط نزدیک عناصر اصلی با یکدیگر بود. نتایج نشان دادند که کنترل آلودگی ناشی از فلزات سنگین در دشت گیسور، بر خلاف تصور اولیه، رد می‌شود. همچنین، وضعیت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی نامناسب گزارش شد. ضرورت انجام پژوهش حاضر به دلیل چالش‌های جدید از جمله تغییرات اقلیمی و رشد جمعیت است که مدیریت منابع آب را تحت فشار قرار داده است. تحقیقات گذشته به طور پراکنده به مشکلاتی نظیر کمبود و آلودگی آب پرداخته‌اند، اما نیاز به یک رویکرد جامع و یکپارچه احساس می‌شود. همچنین، بسیاری از این مطالعات از لحاظ ارزیابی شاخص‌های کلیدی ناکافی بوده‌اند. این تحقیق می‌تواند به شناسایی و توسعه راهبردهای فنی مؤثر در مدیریت پایدار منابع آب کمک کند و به عنوان راهنمایی برای سیاست‌گذاران و مدیران منابع آب در راستای اتخاذ تصمیمات بهینه و پایدار در مدیریت آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش بهترین - بدترین

روش بهترین - بدترین[1] که در سال ۲۰۱۵ توسط جعفر رضایی در مجله امگا[2] ارائه شد، روشی کارآمد در تصمیم‌گیری است. در این روش، ابتدا معیارهای بهترین(مهم‌ترین و مطلوب‌ترین) و همچنین بدترین(کم‌اهمیت‌ترین و نامطلوب‌ترین) توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شوند. سپس مقایسات زوجی میان هر یک از این معیارها با سایر معیارها انجام می‌گیرد. این روش مزایای قابل توجهی نسبت به روش‌های مشابه دارد. از جمله اینکه به مقایسه‌های کمتری نیاز دارد و به مقایسه‌های سازگارتری منجر می‌شود. این سازگاری، به معنای ارائه پاسخ‌های قابل‌اطمینان‌تر است که می‌تواند کیفیت تصمیم‌گیری را بهبود بخشد. مدل اصلی روش بهترین بدترین یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیر خطی است که در رابطه ۱ بیان شده است.

$$
\begin{aligned}
& \min \varepsilon \\
& \text{s.t.} \\
& \left|\frac{w_b}{w_j} - a_{Bj}\right| \le \varepsilon \quad \text{ها} \qquad \text{برای تمامی (j) ها} \\
& \left|\frac{w_j}{w_\omega} - a_{jw}\right| \le \varepsilon \qquad \text{برای تمامی (j) ها} \\
& \Sigma_j w_j = 1 \\
& w_j \ge 0 \text{ ، for all j} \qquad \text{برای تمامی (j) ها}
\end{aligned}
\qquad \text{رابطه (۱)}
$$

برای حل این مدل در ابتدا مجموعه شاخص‌های تصمیم گیری به صورت$\{\boldsymbol{c_1}, \boldsymbol{c_2}, \boldsymbol{c_3}, \dots \dots, \boldsymbol{c_n}\}$ تعریف می‌شود در گام بعدی بهترین شاخص (B) و بدترین شاخص (w) مشخص می‌شود. در گام سوم ارجحیت بهترین شاخص نسبت به سایر شاخص‌ها ($\boldsymbol{a_{Bj}}$) با اعداد ۱ تا ۹ مشخص می‌شود در گام چهارم ارجحیت سایر شاخص‌ها نسبت به بدترین شاخص ($\boldsymbol{a_{jw}}$) با اعداد ۱ تا ۹ مشخص می‌شود و در نهایت در گام پنجم با تشکیل و حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی مقادیر بهینه وزن شاخص‌ها ($\boldsymbol{w_1}, \boldsymbol{w_2}, \boldsymbol{w_3}, \dots, \boldsymbol{w_n}$) محاسبه می‌شود(Rezaei, 2015). با توجه به ساده‌تر بودن حل مدل‌های برنامه‌ریزی خطی نسبت به برنامه‌ریزی غیرخطی، تلاش‌هایی برای ارائه روش‌های مبتنی بر مدل سازی و حل برنامه‌ریزی خطی انجام شده است در این خصوص می‌توان به پژوهش(Dehghani & Abbasi, 2021) اشاره کرد که در آن الگوریتمی برای حل مدل غیرخطی با استفاده از حل مدل‌های برنامه‌ریزی خطی ارائه شده است. (Abbasi & Dehghani, 2022) همچنین با بهبود الگوریتم قبلی الگوریتمی ارائه کردند که با حل مدل‌های برنامه روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی و حل برنامه‌ریزی خطی انجام شده است در این خصوص می‌توان به پژوهش (Dehghani & Abbasi, 2021) اشاره کرد که در آن الگوریتمی برای حل مدل غیر خطی با استفاده از حل مدل‌های برنامه‌ریزی خطی ارائه شده است. از روش‌های مزبور می‌توان در گام پنج استفاده کرد. برای اطمینان از قابل قبول بودن نتایج بهترین-بدترین نرخ سازگاری با استفاده از$\boldsymbol{\varepsilon}$ (مقدار بهینه تابع هدف مدل ۱) مقدار شاخص سازگاری[3] یا $\boldsymbol{\varepsilon_{max}}$ که در جدول (۱) طبق رابطه ۲ محاسبه شده است. مقدار نرخ سازگاری عددی بین صفر و یک است هرچه نرخ سازگاری به صفر نزدیکتر باشد سازگاری بیشتر و هرچه نرخ سازگاری به یک نزدیک‌تر باشد سازگاری کمتر است(Rezaei, 2016)

$$\boldsymbol{CR^0} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{\text{سازگاری های شاخص}} \qquad \text{رابطه (۲)}$$

[1] Best-Worst Method
[2] Omega
[3] Consistency Index

جدول ۱- شاخص‌های سازگاری بهترین و بدترین روش

Table 1. Best-worst method compatibility indices

a_{Bw}	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹
ε_{max}	۰/۰۰	۰/٤٤	۱/۰۰	۱/٦۳	۲/۳۰	۳/۰۰	۳/۷۳	٤/٤۷	٥/۲۳

۲-۲- تحلیل داده‌های تحقیق بواسطه روش تصمیم‌گیری بهترین- بدترین

درخت تصمیم معیارها و شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش، از مقالات مختلف و با نظرات متخصصان عمران در زمینه منابع آب و اساتید دانشگاه استخراج شده است. این معیارها و شاخص‌ها در شکل (۱) نشان داده شده‌اند.

شکل ۱- درخت تصمیم معیارها و شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق (منبع: نویسنده)

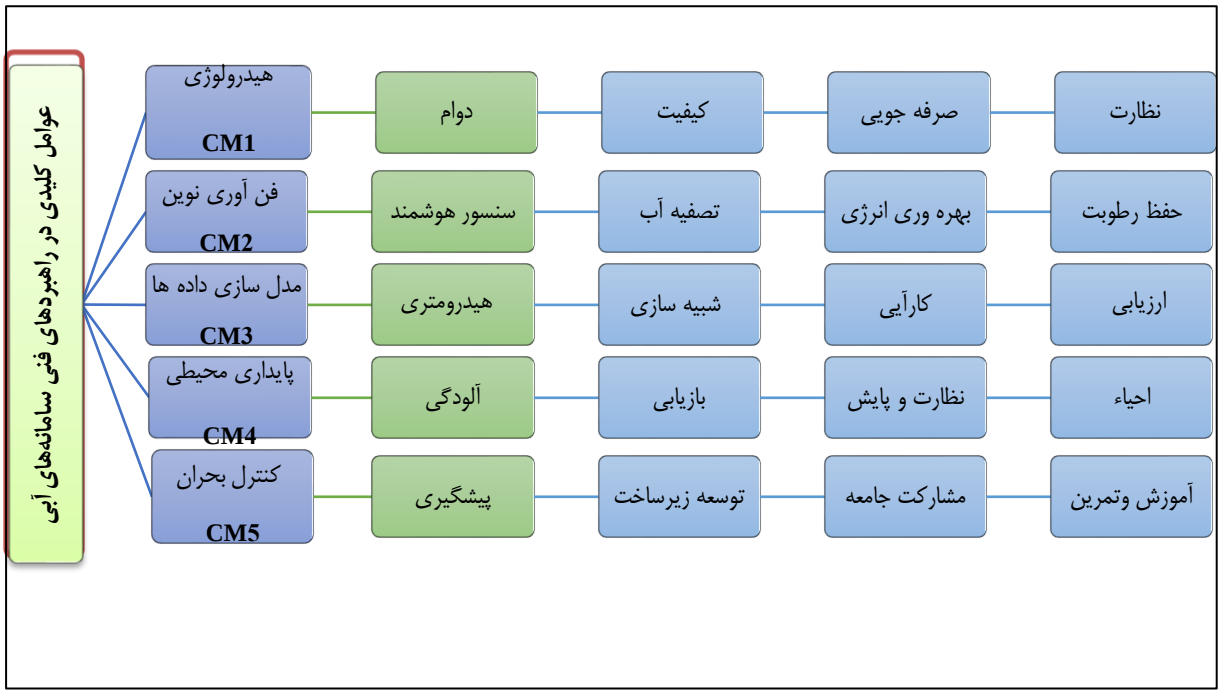

Fig 1. Decision tree of criteria and indicators used in this research. (Source: Author)

در این پژوهش، یک مدل پنج بعدی به منظور تعریف وزن عوامل مؤثر بر راهبردهای فنی سامانه‌های آبی در مدیریت بهینه آب ارائه شد. در این مدل، پنج معیار کلی شامل هیدرولوژی، فن‌آوری نوین، مدل‌سازی داده‌ها، پایداری محیطی و کنترل بحران در نظر گرفته شد. برای هر یک از این معیارها، چند زیرمعیار تعریف و در فرم‌های جداگانه تنظیم گردیدند. این رویکرد به ایجاد یک ساختار منسجم و کارآمد برای ارزیابی و توسعه راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی کمک خواهد کرد. معیارهای انتخاب‌شده در این مدل مبتنی بر چندین ملاک اساسی هستند. نخست، استفاده از نتایج و یافته‌های تحقیقات پیشین که به شناسایی عوامل کلیدی در مدیریت آب کمک کرده است. دوم، نظرات کارشناسان و متخصصان حوزه عمران، که تجربیات و دانش آن‌ها در انتخاب معیارها و زیرمعیارها بسیار مؤثر بوده است. علاوه بر این، تحلیل‌های کمی و کیفی نیز در نظر گرفته شده است تا یک دید جامع از وضعیت موجود ارائه گردد.

۱- فرم مدیریت منابع آب (CM_1): شامل زیر معیارهای دوام، کیفیت، صرفه جویی و نظارت است.

۲- فرم فن‌آوری نوین (CM_2): شامل زیر معیارهای سنسور هوشمند، تصفیه آب، بهره وری انرژی و حفظ رطوبت می‌باشد.

۳- فرم مدل‌سازی داده‌ها (CM_3): شامل زیر معیارهای هیدرومتری، شبیه سازی، کارآیی و ارزیابی است.

٤- فرم پایداری محیطی (CM_4): شامل زیر معیارهای کنترل آلودگی، بازیابی، نظارت وپایش، احیاء می باشد.

٥- فرم کنترل بحران (CM_5): شامل زیر معیارهای پیشگیری، توسعه زیرساخت، مشارکت جامعه و آموزش وتمرین است.

لازم به ذکر می باشد نحوه محاسبه داده‌ها به روش تصمیم‌گیری بهترین- بدترین در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل ۲- نحوه محاسبه داده ها با استفاده از بهترین و بدترین روش تصمیم گیری.(منبع: نویسنده)

Criteria Number = 5	Criterion 1	Criterion 2	Criterion 3	Criterion 4	Criterion 5
Names of Criteria	مدیریت منابع آب	فن‌آوری نوین	مدل‌سازی داده‌ها	پایداری محیطی	کنترل بحران
Select the Best	زیرساخت				
Select the Worst	فرهنگ سازی				
Best to Others	مدیریت منابع آب	فن‌آوری نوین	مدل‌سازی داده‌ها	پایداری محیطی	کنترل بحران
زیرساخت	۱	۴	۳	۲	۷
Others to the Worst	فرهنگ سازی				
مدیریت منابع آب	۷				
فن آوری نوین	۱				
مدل سازی داده ها	۲				
پایداری محیطی	۳				
کنترل بحران	۱				
Weights	مدیریت منابع آب	فن‌آوری نوین	مدل‌سازی داده‌ها	پایداری محیطی	کنترل بحران
	۰/٤۱۲۵	۰/۰۷۵	۰/۱۷۵	۰/۲٦۲۵	۰/۰۷۵
Ksi*	۰/۱۱۲۵				

Fig 2. Method of data calculation using the best-worst decision-making method. (Author)

۳- نتایج

۳-۱- وزن معیارهای اصلی (CM5, CM4, CM3, CM2, CM1)

نتایج مربوط به وزن‌های محاسبه‌شده برای هر یک از معیارهای اصلی که توسط اساتید دانشگاهی متخصص در زمینه عمران- منابع آب با کمک پرسشنامه بهترین- بدترین به دست آمده است، در جدول (۲) بیان شده‌اند.

جدول ۲- عناصر کلیدی(مدیریت منابع آب)

Table 2. Key elements (water resource management)

	هیدرولوژی	فن‌آوری نوین	مدل‌سازی داده‌ها	پایداری محیطی	کنترل بحران
p1	۰/۴۱	۰/۰۸	۰/۱۸	۰/۲۶	۰/۰۸
p2	۰/۴۲	۰/۰۸	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۰۸
p3	۰/۲۳	۰/۱۵	۰/۰۸	۰/۴۴	۰/۱۰
p4	۰/۴۳	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۲۳	۰/۱۲
p5	۰/۴۲	۰/۰۸	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۰۸
p6	۰/۲۵	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۴۲	۰/۰۸
p7	۰/۲۴	۰/۱۰	۰/۱۴	۰/۴۳	۰/۱۰
p8	۰/۴۰	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۲۸	۰/۱۴
p9	۰/۴۲	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۲۵	۰/۱۷
p10	۰/۲۶	۰/۰۸	۰/۱۸	۰/۴۱	۰/۰۸
p11	۰/۲۳	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۴۳	۰/۱۲
p12	۰/۴۱	۰/۱۴	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۰۶
p13	۰/۲۳	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۴۳	۰/۱۲
p14	۰/۲۶	۰/۰۸	۰/۱۸	۰/۴۱	۰/۰۸
p15	۰/۴۳	۰/۱۰	۰/۱۴	۰/۲۴	۰/۱۰
p16	۰/۴۱	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۲۶	۰/۱۳
p17	۰/۴۲	۰/۰۸	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۰۸
p18	۰/۲۳	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۴۳	۰/۱۲
p19	۰/۴۱	۰/۰۸	۰/۱۸	۰/۲۶	۰/۰۸
p20	۰/۱۰	۰/۲۶	۰/۱۳	۰/۴۱	۰/۱۰
میانگین	۰/۳۲۹	۰/۱۰۵	۰/۱۴۰	۰/۳۲۷	۰/۱۰۰

با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود که معیار هیدرولوژی از دیدگاه اساتید در تعیین عوامل مؤثر بر راهبردهای فنی سامانه‌های آبی با تاکید بر مدیریت بهینه آب، بیشترین اهمیت را دارد. همچنین، معیارهای پایداری محیطی، مدل‌سازی داده‌ها، فن‌آوری نوین و در نهایت کنترل بحران در ردیف‌های بعدی قرار گرفته‌اند. در ادامه، به زیرمعیارهای هر یک از این معیارها که مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند، پرداخته می‌شود.

شکل ۳- اهمیت عناصر کلیدی

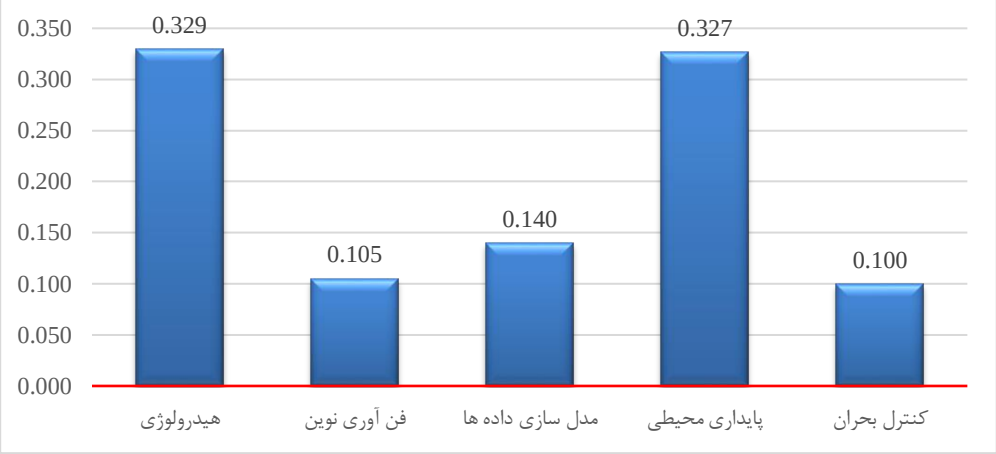

Fig 3. Importance of key elements

۳-۲- وزن زیرمعیارها

با توجه به داده‌های خروجی از شکل (٤) مشاهده می‌شود که طبق نظر اساتید عمران، عامل کیفیت از زیرمعیارهای هیدرولوژی در تعیین عوامل مؤثر بر راهبردهای فنی سامانه‌های آبی، بیشترین اهمیت را دارد. همچنین، عوامل صرفه‌جویی، دوام و نظارت در ردیف‌های بعدی قرار گرفته‌اند.

شکل ٤- اهمیت زیر معیارهای هیدرولوژیکی

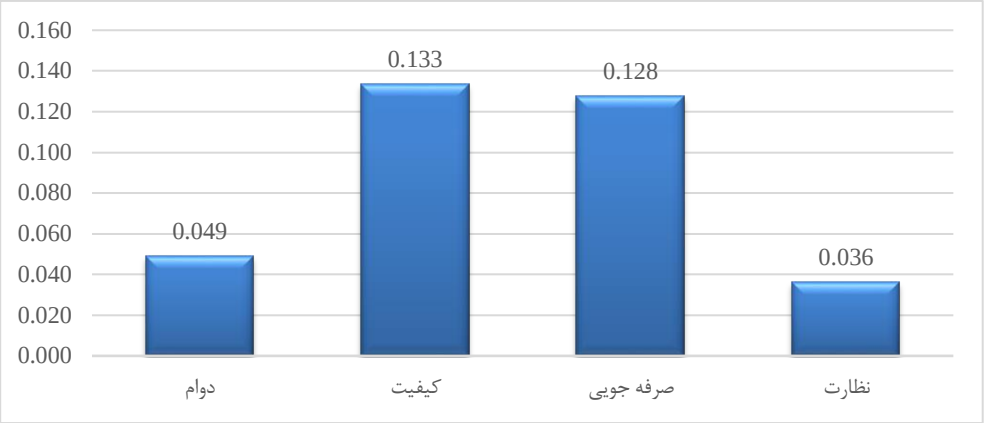

Fig 4. Importance of hydrological sub-criteria

با توجه به داده‌های خروجی از شکل(٥) مشاهده می‌شود که طبق نظر اساتید جامعه آماری عامل سنسور هوشمند از زیرمعیارهای فن‌آوری نوین در تعیین عوامل مؤثر بر راهبردهای فنی سامانه‌های آبی بیشترین اهمیت را داشته و عوامل تصفیه آب، بهره‌وری انرژی و حفظ رطوبت درردیف های بعدی قرار گرفتند.

شکل ٥- اهمیت زیرمعیارهای فن‌آوری جدید

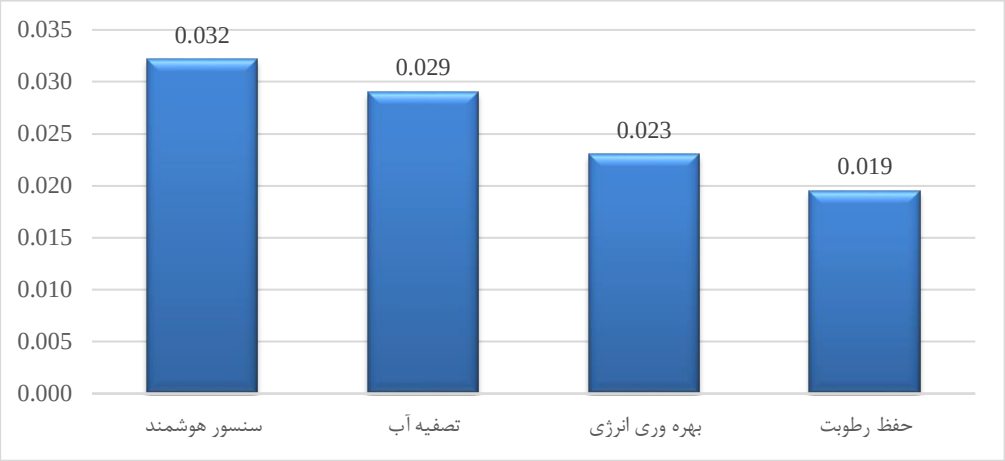

Fig 5. Importance of new technology sub-criteria

با توجه به داده‌های خروجی از شکل (٦) مشاهده گردید که طبق نظر اساتید دانشگاه عامل هیدرومتری از زیرمعیارهای مدل‌سازی داده‌ها در تعیین عوامل مؤثر بر راهبردهای فنی سامانه‌های آبی بیشترین اهمیت را داشته و عوامل شبیه‌سازی، کارآیی و ارزیابی در ردیف‌های بعدی قرار گرفتند.

شکل ٦- اهمیت زیر معیارهای قیمت گذاری مناسب

Fig 6. Importance of appropriate pricing sub-criteria

با توجه به داده‌های خروجی از شکل (۷) مشاهده گردید که طبق نظر اساتید دانشگاه عامل کنترل آلودگی از زیرمعیارهای پایداری محیطی در تعیین عوامل مؤثر بر راهبردهای فنی سامانه‌های آبی بیشترین اهمیت را داشته وعوامل احیا، نظارت وپایش و بازیابی درردیف‌های بعدی قرار گرفتند.

شکل ۷- اهمیت زیر معیارهای پایداری زیست محیطی

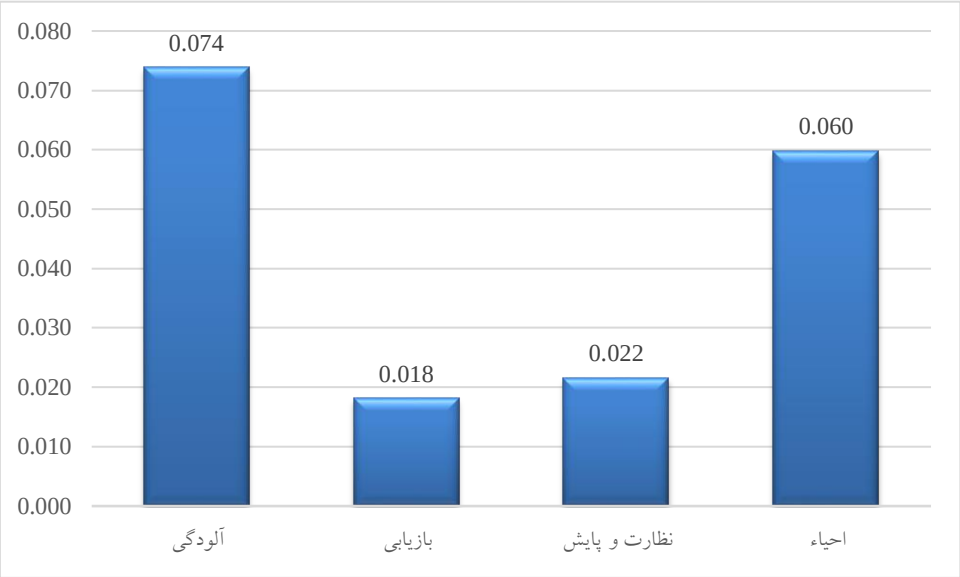

Fig 7. Importance of environmental sustainability sub-criteria

با توجه به داده‌های خروجی از شکل(۸) مشاهده گردید که طبق نظر اساتید عامل توسعه زیرساخت از زیرمعیارهای کنترل بحران در تعیین عوامل مؤثر بر راهبردهای فنی سامانه‌های آبی بیشترین اهمیت را داشته و عوامل پیشگیری، مشارکت جامعه و آموزش درردیف های بعدی قرار گرفتند.

شکل ۸- اهمیت زیرمعیارهای فرهنگ سازی

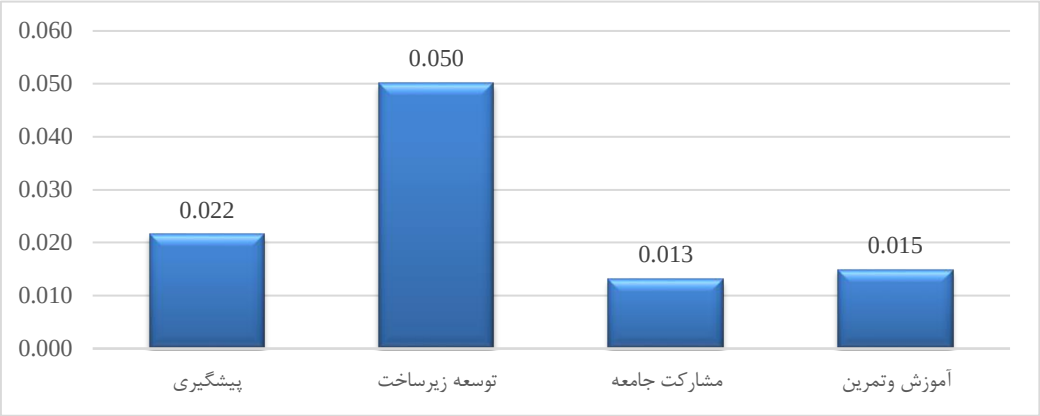

Fig 8. Importance of cultural development sub-criteria

با توجه به مجموع وزن‌های بدست آمده برای هریک از زیر معیارهای تعریف شده در این پژوهش بر اساس نظر اساتید اهمیت هریک از زیر معیارها در یک نگاه کلی در شکل (۹) آمده است.

شکل ۹- اهمیت کلی معیارهای فرعی

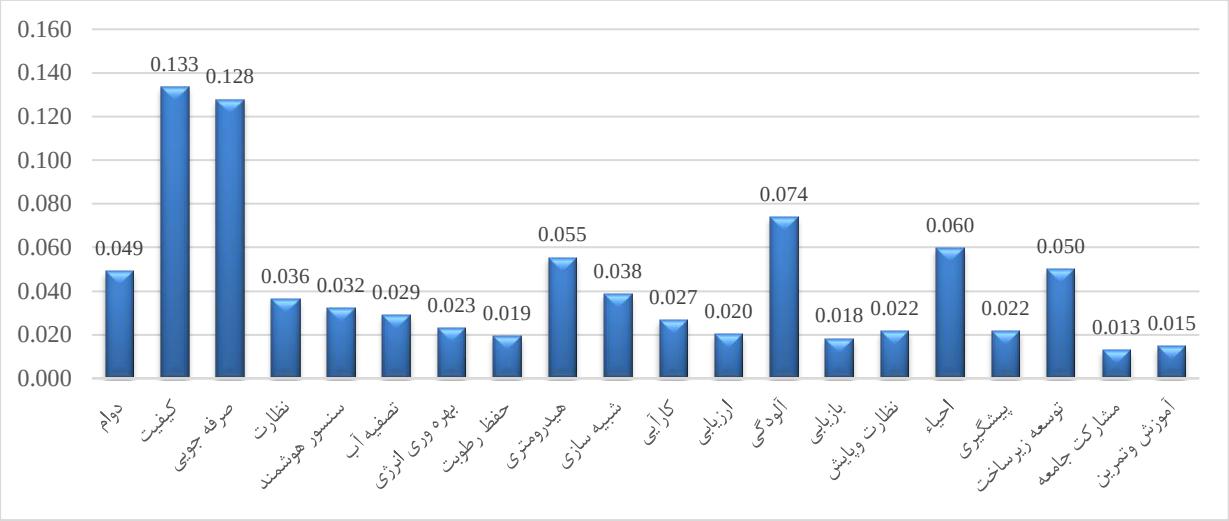

Fig 9. Importance of overall sub-criteria

۴- بحث ونتیجه‌گیری

با توجه به گستردگی و پیچیدگی سیستم‌های منابع آب، تعیین سیاست و انتخاب گزینه و راهبردهای مناسب جهت عملکرد مناسب سیستم‌های منابع آب در شرایط مختلف ضرورت داشته و نیاز به یک فرایند بهینه‌سازی جامع دارد. در این راستا، مدیریت کارا و بهره‌برداری شایسته از امکانات موجود و همچنین مدیریت در مصرف، دارای اهمیت زیادی می‌باشد. این امر، در دوره‌های کمبود آب در مناطق مستعد خشکسالی و به خاطر تخصیص و ترخیص رقابتی آب، از نقطه نظر مدیریت بهره‌برداری اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. بنابراین مدیریت مصرف براساس افزایش بهره‌وری با هدف بهره‌برداری بهینه از منابع آب بسیار ضروری و اجتناب ناپذیر می‌باشد(Georgiou & Papamichail, 2008). در این تحقیق، با استفاده از روش بهترین- بدترین عوامل مؤثر در راهبردهای فنی سامانه‌های آبی با تاکید بر مدیریت بهینه آب شناسایی شدند. اولین عامل اساسی با توجه به موضوع مورد تحقیق کیفیت آب بوده که از دیدگاه کارشناسان از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. کیفیت آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله

لیتولوژی، تعامل سنگ و آب، دفع ضایعات خانگی، استفاده از کودها و آفتکش‌ها در کشاورزی و شرایط آب و هوایی است(Tiwari et al., 2017). بنابراین کیفیت آب زیرزمینی یک جنبه مهم زیست محیطی است که باید بسته به توزیع فضایی آن تحلیل و مدیریت شود. برای بهترین کنترل و مدیریت کیفیت آب زیرزمینی، دانستن توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی مهم است. در این راستا، سامانه مطالعات جغرافیایی (GIS) می‌تواند ابزار قدرتمندی برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی باشد(Machiwal et al., 2011). دومین عامل اساسی وتاثیرگذار در این زمینه از نگاه کارشناسان عمران عامل صرفه جویی در مصرف آب بوده، که در مدیریت بهینه آب از اهمیت بالایی برخورداراست. کمبود آب، باعث ایجاد نگرانی در ابعاد جهانی شده است. از همین رو، متخصصین امر پیوسته در تلاشند تا راهکارهای جدید و برنامه‌های مدونی را برای استفاده بهینه از آن ارائه دهند. مسأله کمبود آب در ایران نیز تازگی ندارد، اما افزایش جمعیت و کاهش بارندگی به این مشکل دامن زده و شرایط نگران کننده‌ای را به وجود آورده‌اند. با وجود تمامی تلاش‌ها برای بهبود مصرف آب، حجم آب‌های سطحی و زیرزمینی ایران طی سال‌های گذشته کاهش چشمگیری داشته و سفره‌های زیرزمینی با تراز منفی روبه‌رو بوده‌اند (Mosavi et al., 2009). بر اساس اصل تعادل آب شناسی آب‌های زیرزمینی، میزان استحصال سالانه این آب‌ها، باید با میزان تزریق سالانه محیط به این منابع برابر باشد (Balali et al., 2008). بر این اساس، بایستی محدودیت‌هایی را برای استحصال آب‌های زیرزمینی در نظر گرفت. آب در ایران دارای مصارف متنوعی است، به‌ویژه در کشاورزی که بیش از ۹۲ درصد از کل مصرف آب را شامل می‌شود. هدررفت آب در این بخش نیازمند تدابیر جدی است، از جمله استفاده از روش‌های نوین آبیاری مانند قطره‌ای و بارانی توصیه می‌شود. همچنین، باید از کشت‌های پرمصرف و کم‌بازده جلوگیری شده و به کشت‌های گلخانه‌ای توجه بیشتری شود. در مصارف خانگی، فرهنگ‌سازی می‌تواند به صرفه‌جویی کمک کند. صنایع نیز باید در مناطق پرآب ایجاد شوند و برای آبیاری عمومی از روش‌های بازیافت آب بهره‌برداری شود. با اجرای این راهکارها، می‌توان به‌طور مؤثری بحران آب را مدیریت کرد(Faramarznasab & Ahmadi, 2015). درنهایت سومین شاخص با اهمیت از دیدگاه کارشناسان عمران با توجه به عنوان پژوهش، عامل کنترل آلودگی شناسایی شد. با توجه به اینکه آب‌های زیرزمینی از مهمترین منابع طبیعی بوده، و بخش قابل ملاحظه‌ای از مصارف آب کشور ایران، به خصوص در بخش شرب به وسیله منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد، ممکن است عدم شناخت صحیح و عدم درک از میزان آسیب پذیری سریع آب‌های زیرزمینی سبب ایجاد آلودگی‌های شدید در این منابع شود، چه بسا اتفاق می‌افتد که دیگر نتوان از این منابع استفاده کرد و برای رفع کنترل آلودگی و مصرف مجدد، باید دقت و هزینه زیادی صرف شود. در بعضی از موارد، فرآیندهای طبیعی به طور جدی سبب آلودگی می‌شوند، اما بیشتر نگرانی‌های بشر در مورد آلودگی‌آب‌های زیرزمینی بر اثر فعالیت انسانی است. فعالیت‌های انسانی اخیر، محیط آسیب‌پذیری را به وجود آورده، به طوری که آب زیرزمینی را به عنوان منبع طبیعی در معرض آلاینده های صنعتی و کشاورزی قرار داده‌اند. مفهوم آسیب پذیری برای اولین بار در اواخر سال ۱۹۶۰ میلادی در فرانسه برای آگاهی در مورد کنترل آلودگی آب زیرزمینی ارائه شد (Verba & Zaporozhek 1994). آسیب پذیری را می‌توان امکان نفوذ و پخش آلاینده‌ها از سطح زمین به سامانه آب زیرزمینی تعریف کرد. آسیب پذیری آبخوان، نیروی آن را برای نفوذ و پخش آلاینده‌ها از سطح زمین به سامانه آب زیرزمینی نشان می‌دهد، به طوری که آلودگی تولید شده در سطح زمین بتواند به آب زیرزمینی برسد و در آن پراکنده شود (Worrall & Besien, 2004). در مجموع، یک رویکرد جامع و یکپارچه در این زمینه نه تنها به افزایش پایداری منابع آب کمک می‌کند، بلکه به ارتقای کیفیت زندگی و توسعه اقتصادی نیز منجر می‌شود. بنابراین، ضرورت دارد که سیاست‌گذاران و مدیران منابع آبی به این عوامل توجه ویژه‌ای داشته باشند تا از بحران‌های آبی آینده جلوگیری کنند.

در زمینه بهبود راهبرد سامانه‌های آبی با تاکید بر مدیریت بهینه آب، می‌توان به موارد زیر به عنوان پیشنهاد توجه کرد:

۱. استفاده از سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و هوشمند برای بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی.

۲. ایجاد سامانه‌های پایش و نظارت مستمر بر کیفیت منابع آب برای شناسایی و رفع آلاینده‌ها.

۳. برگزاری دوره‌های آموزشی و کارگاه‌های آگاهی‌رسانی برای تشویق مردم به صرفه‌جویی در مصرف آب.

٤. ترویج استفاده مجدد از آب‌های خاکستری در مصارف غیرشرب مانند آبیاری باغ‌ها.

٥. ساخت سدها و مخازن جدید برای ذخیره‌سازی آب باران و رواناب‌ها.

٦. ارائه مشوق‌های مالی برای کشاورزان و صنایع که از فن‌آوری‌های کم‌مصرف آب استفاده می‌کنند.

٧. وضع تعرفه‌های آب به‌گونه‌ای که مصرف بیش از حد را کنترل کند و به صرفه‌جویی تشویق کند.

۵- تضاد منافع نویسندگان

نویسنده این پژوهش اعلام می‌دارد که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این پژوهش ندارد.

۶- منابع

Abatan, A., Obaigbena, A., Ugwuanyi, E. D., Jacks, B. S., Umoga, U. J., Daraojimba, O. H., & Lottu, O. A. (2024). Integrated simulation frameworks for assessing the environmental impact of chemical pollutants in aquatic systems. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(2), 543-554. https://doi.org/10.51594/estj.v5i2.831

Ani, E. C., Olajiga, O. K., Sikhakane, Z. Q., & Olatunde, T. M. (2024). Renewable energy integration for water supply: a comparative review of African and US initiatives. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(3), 1086-1096. https://doi.org/10.51594/estj.v5i3.972

Asadi, M A, Khalilian, S., & Mousavi, S H E. (2018). Determining the economic value of water in wheat and rape fields (case study: Qazvin plain irrigation network). *Scientific Quarterly Journal of Water Resources Engineering*, 12(40), 137-148. (In Persian)

Acey, C., Kisiangani, J., Ronoh, P., Delaire, C., Makena, E., Norman, G., ... & Peletz, R. (2019). Cross-subsidies for improved sanitation in low-income settlements: Assessing the willingness to pay of water utility customers in Kenyan cities. *World Development*, 115, 160-177. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.11.006

Abbasi, M., & Dehghani, M R. (2022). Determining and estimating the weights of best-worst method criteria through solving linear programming or mixed integer linear programming models. *Journal of New Researches in Mathematics*. Article in press. (In Persian)

Balali, H., Khalilian, S. Ahmadian, M. & Torabi Pellet Kaleh, S. (2008). Analysis of effects of energy subsidies adjustment on groundwater balance and exploitation. *Agricultural Research*, 8(3), 95-106. (In Persian)

Dehghani, M R., & Abbasi, M. (2021). Performance evaluation of thermal power generation companies using integrated proposed trustable BWM algorithm and BSC model (A real case study). *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, 10 (4), 64-72. https://doi.org/20.1001.1.23222344.1400.10.4.4.5.(In Persian)

Elhatip, H., Afşin, M., Dirik, K., Kurmaç, Y., & Kavurmacı, M. (2003). Influences of human activities and agriculture on groundwater quality of Kayseri-Incesu-Dokuzpınar Springs, Central anatolian part of Turkey. *Environmental Geology*, 44(4), 490-494. https://doi.org/10.1007/s00254-003-0787-0

Faramarznasab, R., & Ahmadi, Z. (2015) Water resource management through saving to control the water crisis, the second national conference on strategies for the development and promotion of science education in Iran. *Goleda.* https://civilica.com/doc/600544

Georgiou, P. E., & Papamichail, D. M. (2008). Optimization model of an irrigation reservoir for water allocation and crop planning under various weather conditions. *Irrigation Science*, 26, 487-504. https://doi.org/10.1007/s00271-008-0110-7

Jeong, C. H. (2001). Effect of land use and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon Area, Korea. *Journal of Hydrology*, 253(1), 194-210. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00481-4

Kaaba, M., Bagheri, R., & Jafarzadeh, M. (2017). Risk assessment of water resource pollution in Gisour Plain, south of Razavi Khorasan. 11th National Specialized Geological Conference of Payam Noor University and 21st Conference of Geological Society of Iran, Qom. (In Persian)

Khoshmanesh, B., Raushi, N., & Sefalai, E. (2017). Strategy plan for controlling and reducing the pollution of the country's water resources. The Second Specialized Conference and Exhibition of Environmental Engineering, Tehran. (In Persian)

Machiwal, D., Jha, M. K., & Mal, B. C. (2011). GIS-based assessment and characterization of groundwater quality in a hard-rock hilly terrain of Western India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 174, 645-663. https://doi.org/10.1007/s10661-010-1485-5

Motaghi, A., & Qarabeigi, M. (2018). Designing and developing optimal water management strategies in Iran. The 14th Congress of the Geographical Society of Iran, Tehran. https://civilica.com/doc/876577. (In Persian)

Mosavi, S., Akbari, S., Soltani, GH., & Zare Mehrgerdi, M. (2009). Virtual water, a new way to cope with water crisis. National Conference on Water Crisis Management. Islamic Azad University of Marvdasht branch. Marvdasht. Iran. (in Persian)

Nazari, R. & Judoi, A. (2014). Applied modeling of flow and pollutant transport in an aquifer with a guide to GMS software. Pp: 230. (In Persian)

Obiuto, N. C., Olu-lawal, K. A., Ani, E. C., Ugwuanyi, E. D., & Ninduwezuor-Ehiobu, N. (2024). Chemical engineering and the circular water economy: Simulations for sustainable water management in environmental systems. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(3), 001-009.

Olatunde, T. M., Adelani, F. A., & Sikhakhane, Z. Q. (2024). A review of smart water management systems from Africa and the United States. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(4), 1231-1242. https://doi.org/10.51594/estj.v5i4.1014

Piri, H., & Heydari, M. (2017). Estimation of demand function and economic value of water in fodder sorghum production in Sistan region. *Scientific-Research Quarterly of Agricultural Economics Research*, 10(38), 121-134. (In Persian)

Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*, 64, 126-130. https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001

Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009

Tiwari, K., Goyal, R., & Sarkar, A. (2017). GIS-based spatial distribution of groundwater quality and regional suitability evaluation for drinking water. *Environmental Processes*, 4, 645-662. https://doi.org/10.1007/s40710-017-0257-4

Verba, J., & Zaporozec, A. (Eds.). (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability (Vol. 16, pp. 1-131). Hannover: Heise. ISBN 3-922705-97-9

Worrall, F., & Besien T. (2004). The vulnerability of groundwater to pesticide contamination estimated directly from observations of presence or absence in wells. *Journal of Hydrol* 303, 92-107. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.019

Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Summer 2024: Vol 2, Issue 2, 141-153
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1188272

Research Article

Investigating the social, economic, and environmental effects of water structures: A case study of Kelaroud reservoir dam

Mojtaba Farhadzadeh, Heydar Davoodiyan, Maliheh Akbari, Fatemeh Tamjid, Parisa Maleki *

Mazandaran Regional Water Company, Mazandaran, Iran.

Corresponding Author email: Maleki.workmail.1402@gmail.com

© The Author(s) 2024

Received: 26 Oct 2024 Accepted: 15 Dec 2024 Published: 24 Dec 2024

Abstract

Dam construction projects have various impacts on the biological and social environment. The construction of a dam on the Kelaroud River in Mazandaran Province is one of the important development projects. This study aims to examine the social, environmental, and economic impacts of the construction of this dam on the surrounding areas. The study primarily relies on a review of existing resources and the socio-economic analysis conducted during the initial phase of the Kelaroud Dam studies. The study predicted population growth and drinking water demand for the target year using demographic data. The social and economic consequences of the construction of the dam were also examined. Among its many positive effects, the most important of them is the storage and regulation of water from the Kelaroud River to meet part of the drinking water needs of the cities of Babol, Babolsar, and Fereidounkenar, which are currently facing a shortage of drinking water. According to the latest population data (2016), these cities collectively have 419,493 residents. By the target year of 1430 (2051 in the Gregorian calendar), the estimated water demand for drinking, industry, and tourism in these cities is approximately 40 million cubic meters of which 17 million cubic meters is planned to be supplied by the Kelaroud Dam. In addition to addressing water shortages, the dam offers positive social outcomes, such as job creation, increased income, higher land value, enhanced public participation, improved health and social welfare, reduced migration, and development of the regional tourism industry. However, the project also presents several negative impacts, including erosion and sedimentation, waste accumulation, deforestation, wildlife displacement, air pollution, and noise pollution in the area.

***Keywords**:* Social effects, Economic effects, Environmental effect, Kelaroud Dam, Drinking water need

مجله راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
شاپا الکترونیکی: ۲۹۸۱-۱۴۴۹
تابستان ۱۴۰۳، دوره دو، شماره۲، ۱۵۳-۱۴۱
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1188272

مقاله پژوهشی

بررسی آثار اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی سازه‌های آبی (مطالعه موردی سد مخزنی کلارود)

مجتبی فرهادزاده، حیدر داوودیان، ملیحه اکبری، فاطمه تمجید، پریسا ملکی*

شرکت آب منطقه‌ای مازندران، مازندران، ایران

ایمیل نویسنده مسئول: Maleki.workmail.1402@gmail.com

© The Author(s) 2024

دریافت:۱۴۰۳/۰۸/۰۵ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵ چاپ: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴

چکیده

طرح‌های احداث سد دارای اثرات مختلفی بر محیط بیولوژیکی و اجتماعی می‌باشند. احداث سد بر روی رودخانه کلارود در استان مازندران از جمله طرح‌های توسعه‌ای مهم است. هدف از این پژوهش بررسی اثرات اجتماعی، محیط زیستی و اقتصادی احداث این سد بر روی مناطق اطراف آن می‌باشد. شیوه انجام این پژوهش بر پایه بررسی منابع موجود و استفاده از نتایج تحلیل اجتماعی- اقتصادی مطالعات مرحله اول سد کلارود است. در این مطالعات با استفاده از اطلاعات جمعیتی، میزان رشد جمعیت و نیاز شرب آن‌ها در سال هدف پیش بینی گردید. سپس پیامدهای اجتماعی و اقتصادی سد مورد بررسی قرار گرفت. احداث سد کلارود دارای آثار مثبت فراوانی است. مهم‌ترین آن‌ها ذخیره و تنظیم آب رودخانه کلارود، با هدف تأمین بخشی از نیاز آب شرب شهرهای بابل، بابلسر و فریدونکنار است که در حال حاضر با کمبود آب مواجه هستند. براساس آمارنامه جمعیتی آخرین سرشماری (۱۳۹۵)، جمعیت شهرهای فوق ۴۱۹۴۹۳ نفر می‌باشد. میزان آب مورد نیاز شرب این شهرها در سال ۱۴۳۰ (سال هدف) حدود ۴۰ میلیون مترمکعب تخمین زده شد. تأمین بخشی از نیاز آبی این شهرها به میزان ۱۷ میلیون متر مکعب از سد کلارود در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، احداث سد کلارود پیامدهای مثبت اجتماعی مانند ایجاد اشتغال و درآمد، بالا رفتن ارزش زمین، افزایش مشارکت‌های مردمی، بهبود سلامت و رفاه اجتماعی، جلوگیری از مهاجرت و همچنین توسعه صنعت گردشگری در این منطقه را به همراه خواهد داشت. احداث سد کلارود دارای آثار منفی نیز می‌باشد. مهمترین اثرات منفی شامل فرسایش و رسوب‌گذاری، انباشت زایدات، تخریب جنگل، مهاجرت برخی از جانوران، آلودگی هوای منطقه و ایجاد آلودگی‌های صوتی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آثار اجتماعی، آثار اقتصادی، اثر محیط زیستی، سد کلارود، نیاز آب شرب

۱- مقدمه

سال‌ها است که احداث سدها بر روی رودخانه‌ها به عنوان یکی از راهکارهای اساسی حفظ منابع آب به شمار می‌روند. ساخت سدها برای استفاده از پتانسیل آبی کشور و تأمین نیازهای آب شرب، کشاورزی، صنعت، تولید برق آبی و همچنین کنترل سیلاب مطرح می‌شود. هر چند احداث سدها دارای اثرات مثبت اقتصادی- اجتماعی هستند، اما دارای هزینه‌های زیاد و مضرات محیط زیستی نیز هستند (Wajid et al., 2013). لذا ضروری است اثراتی که سد در حوضه‌های مختلف، به خصوص در روستاها و مناطق بهره بردار از آب سد دارد، مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد (Power, 2010). (Hadian et al., 2013) تأثیر احداث سد حنا در استان اصفهان بر تغییرات کاربری و پوشش اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره لندست را بررسی کردند. نتایج نشان داد که سدسازی در کوتاه مدت باعث افزایش سطح اراضی کشت آبی شده است ولی بعد از ۱۵ سال، یک کاهش شدید در سطح این اراضی مشاهده شد که می‌تواند به علت افزایش جمعیت و مصرف آب در بخش خانگی، تجاری و صنعتی باشد. (Khatunabadi et al., 2018) بررسی اثرات اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی احداث سد شاه قاسم یاسوج از دیدگاه روستاییان بهره‌بردار پرداختند. نتایج حاصل از تحلیل دیدگاه روستاییان نشان داد که بیشترین تأثیرات سد در بخش اقتصادی شامل بهبود درآمد روستاییان، افزایش سطح زیرکشت منطقه، بهبود وضعیت اشتغال، تنوع در محصولات کشاورزی، افزایش تولیدات در منطقه، بهبود وضعیت توریستی منطقه است و تأثیرات بخش محیط زیستی مانند تغییر گونه‌های گیاهی نادیده گرفته شد. (Taheri Saffar et al., 2016) به ارزیابی آثار اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی احداث سد بار در نیشابور پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که با توجه به افزایش جمعیت روستایی و شهری و محدودیت منابع و زمینه‌های اشتغال در منطقه، احداث سد با مدیریت صحیح و تمهیدات محیط زیستی می‌تواند باعث بهبود وضعیت اشتغال و رفاه روستائیان شده و تأثیرات مثبت زیادی را به همراه داشته باشد. (Akbarzadeh and Kaboli, 2017) در پژوهش خود مهم‌ترین آثار مثبت سدسازی را بهبود کشاورزی منطقه، تأمین آب شرب، افزایش سطح زیرکشت آبی، کنترل سیلاب، افزایش ارزش زمین و بهبود سطح درآمد خانوارها و از مهم‌ترین آثار منفی نیز کوچ اجباری و از بین رفتن مشاغل ساکنین بالادست سد، خسارات زیست محیطی، قطع درختان و تملک اراضی در بالادست سد گزارش کرده‌اند. (Golbaz et al., 2017) آثار منفی ناشی از عملیات ساختمانی سد، خاکریزی و خاکبرداری، حفر تونل و ایجاد جاده جدید، خسارات زیست محیطی و قطع درختان، تملک اراضی و جابه‌جایی و اسکان مجدد مردم را از جمله مشکلات برشمرده‌اند. اما بر اساس نتایج حاصل از تحلیل چند معیاره، آثار مثبت طرح نسبت به آثار منفی آن چشمگیرتر بوده است.

هدف کلی این پژوهش بررسی اثرات اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی ناشی از احداث سد کلارود بر محیط اطراف و پایین دست این سد است. ارزیابی اثرات سدها در بخش‌های مختلف می‌تواند راهنمایی برای تصمیم‌گیری سازمان‌های اجرایی جهت ادامه مطالعات و اجرای پروژه‌های سدسازی باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مورد مطالعه

محل سد مخزنی کلارود در شمال کشور در استان مازندران، در فاصله حدود ۲۵ کیلومتری جنوب غربی شهر بابل بر روی رودخانه کلارود، یکی از سرشاخه‌های مهم رودخانه بابلرود جانمایی شده است (شکل ۱). با توجه به نیاز شدید منطقه به آب شرب، صنعت و کشاورزی از یک سو و محدودیت منابع آب در دسترس از سویی دیگر، شرکت آب منطقه‌ای مازندران مطالعات کنترل آب‌های سطحی رودخانه کلارود را با استفاده از احداث سد مخزنی مد نظر قرار داد. سد کلارود با ارتفاع ٦٢ متر از بستر رودخانه دارای حجم مخزن ۹/۵ میلیون مترمکعب در تراز نرمال می‌باشد(Ab-Niro Consulting Engineers 2023).

مشخصات اصلی این سد در جدول ۱ ارائه شده است. به لحاظ موقعیت سیاسی، محیط اجتماعی منطقه مورد مطالعه، شهرستان‌های بابل، بابلسر و فریدونکنار را در بر می‌گیرد. محدوده مذکور از غرب به شهرستان‌های آمل، محمودآباد و از شرق به شهرستان‌های جویبار، سیمرغ، قائم شهر، سواد کوه شمالی، از شمال به دریای مازندران و از جنوب به استان تهران محدود می‌شود.

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

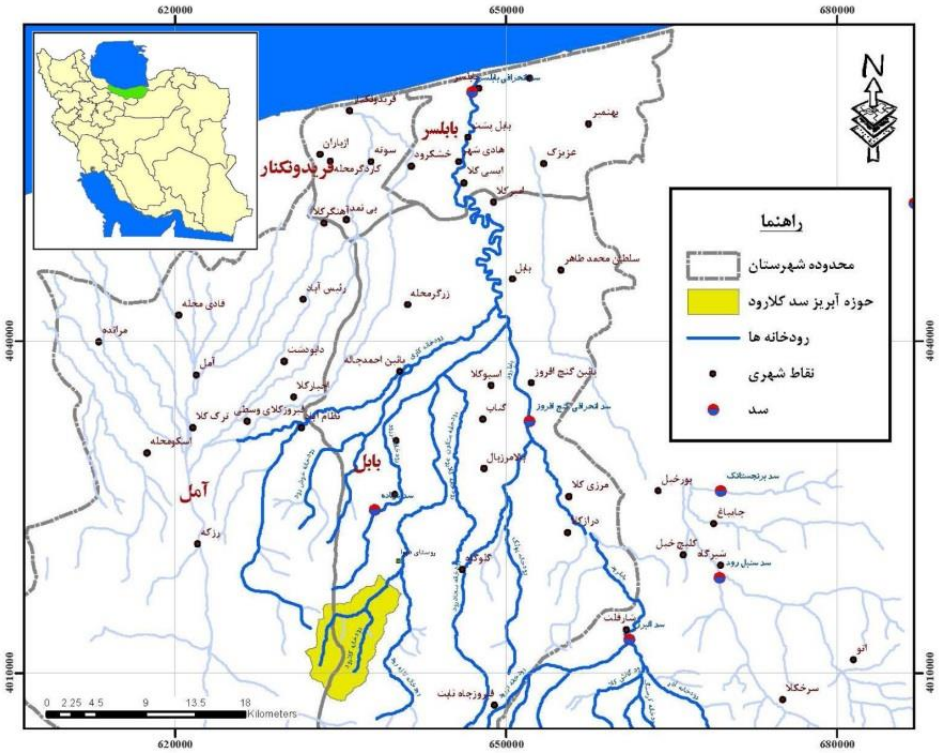

Fig 1. Location of the study area

جدول ۱- مشخصات سد مخزنی کلارود

نوع سد	سد با مغزه بتن غوطه‌ای و روکش بتنی (RFC)
نوع سر ریز	آزاد روی بدنه
تراز نرمال آب مخزن	۲۵۷ متر از سطح دریا
طول تاج سد در بدنه اصلی	۴۲۰ متر
ارتفاع حداکثر از بستر رودخانه	۶۲ متر
سطح مخزن در تراز نرمال	۵۲ هکتار
حجم مخزن در تراز نرمال	۹/۵ میلیون متر مکعب

Table 1. Specifications of the Kelaroud Reservoir Dam

۲-۲- روش مطالعه

شیوه مطالعات اجتماعی و اقتصادی در این مقاله عمدتاً بر پایه بررسی منابع موجود و استفاده از نتایج تحلیل اجتماعی- اقتصادی مطالعات مرحله اول سد کلارود است که توسط (Ab-Niro Consulting Engineers 2023) انجام شده است. در این مطالعات

با استفاده از اطلاعات جمعیتی حاصل از آخرین سرشماری (۱۳۹۵)، میزان رشد جمعیت و نیاز آب شرب آنها در سال هدف (۱٤۳۰) پیش‌بینی گردید. سپس پیامدهای اجتماعی و اقتصادی احداث سد مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۲-۱- خصوصیات جمعیتی مناطق تحت تأثیر پروژه

محدوده اجتماعی تحت تأثیر غیرمستقیم احداث سد مخزنی کلارود به تفکیک نقاط شهری و روستایی مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق آمارنامه سال ۱۳۹۵، مناطق شهری سه شهرستان واقع در محدوده مورد مطالعه دارای ٤۱۹٤۹۳ نفر جمعیت با ۱۳٦۹٦۰ خانوار می‌باشد. بنابراین بعد خانوار در سال آماری مذکور در مناطق شهری محدوده مورد مطالعه ۳/۰٦ است. از کل جمعیت شهری ساکن در این محدوده، ۲۰۹٤۲۲ نفر مرد و ۲۱۰۰۷۱ نفر زن هستند یعنی به ازای هر ۱۰۰ نفر زن، ۹۹/۷ نفر مرد در این شهرها زندگی می‌کنند. بیشترین گروه سنی در میان مردان و زنان، گروه سنی ۳۰-۳٤ و کمترین گروه سنی مربوط به گروه سنی ٦۰-٦٤ سال است. از کل جمعیت ٦ ساله و بالاتر ۹۱/۷ درصد باسواد هستند.

کل جمعیت روستایی واقع در محدوده مورد مطالعه طبق آمارنامه سال ۱۳۹۵ حدود ۳۰۷۵٦۷ نفر با ۱۰۱۹۰۵ خانوار می‌باشد که از این جمعیت ۱۵٦۲۸۲ نفر مرد و ۱۵۱۲۸۵ نفر زن هستند. لذا نسبت جنسی در این محدوده ۱۰۳ می‌باشد. بیشترین گروه سنی در میان مردان و زنان روستایی محدوده طرح ۳۰-۳٤ ساله می‌باشد. از جمعیت ٦ ساله و بالاتر مناطق روستایی محدوده مورد مطالعه ۸۱ درصد باسواد هستند که ۵۳/۷ درصد آن را مردان و ٤٦/۳ درصد را زنان تشکیل می‌دهند.

۲-۲-۲- بررسی وضعیت اشتغال

براساس آمارنامه سال ۱۳۹۵، جمعیت ۱۰ ساله و بیشتر محدوده مورد مطالعه در حدود ۸٦/٤ درصد جمعیت کل محدوده طرح هستند که ۵۰/۲ درصد آنها را مردان و بقیه را زنان تشکیل می‌دهند. درمیان این جمعیت ۳٤/۵ درصد شاغل هستند. جمعیت شاغلین در مناطق شهری ۳۳/۸ درصد و در نقاط روستایی ۳۵/۵ درصد هستند. از میان شاغلین محدوده طرح ۱۳/۲ درصد را زنان و ۸٦/۸ درصد را مردان تشکیل می‌دهند.

نتایج آمارها نشان می‌دهد که ساختار اقتصادی در محدوده طرح مانند ساختار اقتصادی استان، خدماتی است و این بخش بیشترین سهم اشتغال را در منطقه دارا می‌باشد. سهم اشتغال در بخش‌های عمده فعالیت اقتصادی، کشاورزی، صنعت و خدمات در مناطق شهری به ترتیب ۷/۵، ۲۸/۳ و ٦٤/۲ درصد و در مناطق روستایی به ترتیب ۳٤/۸، ۲۸/۳ و ۳٦/۹ درصد است. آمار میدانی حاکی از آن است که در ۵ سال گذشته سهم اشتغال در بخش‌های کشاورزی و صنعت کاهش و در بخش خدمات افزایش یافته است.

۲-۲-۳- مهاجرت

از آبان ماه سال ۱۳۹۰ تا آبان ۱۳۹۵، ۳٤۲۲۳ نفر به شهرستان‌های محدوده مورد مطالعه وارد و یا در داخل این شهرستان‌ها جابجا شده‌اند. محل اقامت قبلی ٤۳/۹ درصد مهاجران سایر استان‌ها، ۲۷/۵ درصد شهرستان‌های دیگر استان محل سرشماری و ۲۷/۹ درصد شهر یا آبادی دیگری در همین شهرستان بوده است. محل اقامت قبلی بقیه افراد خارج از کشور یا اظهار نشده بوده است. مقایسه محل اقامت قبلی مهاجران با محلی که در آن سرشماری شده‌اند، نشان می‌دهد که ۱۵ درصد از روستا به شهر، ۵۸ درصد از شهر به شهر، ۷ درصد از روستا به روستا و ۱۹ درصد از شهر به روستا طی پنج سال قبل از سرشماری آبان ماه ۱۳۹۵ مهاجرت کرده‌اند. بیشترین میزان مهاجرت در محدوده طرح از شهر به شهر بوده است (شکل ۲).

شکل ۲- تعداد مهاجران وارد شده به محدوده‌های مورد مطالعه طی ۵ سال

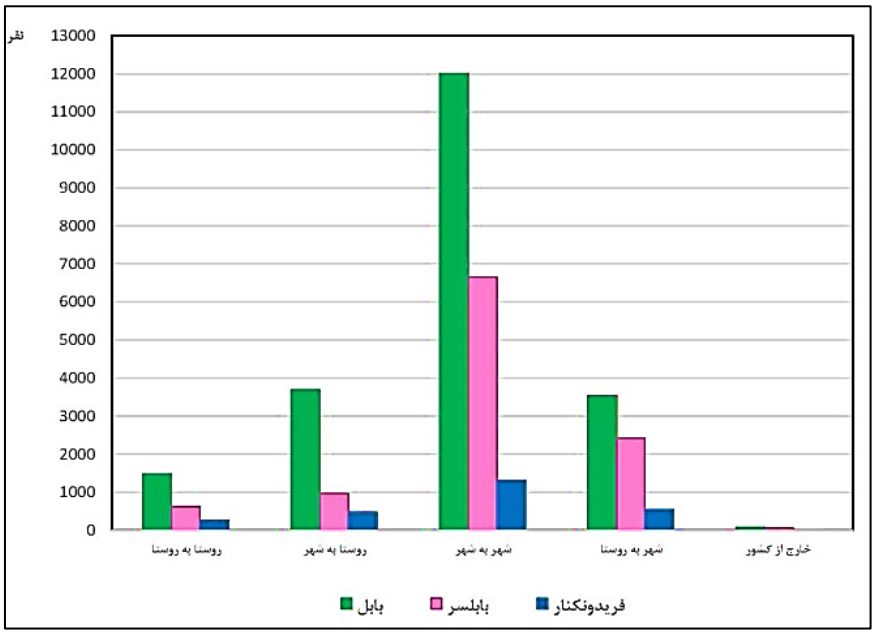

Fig 2. The number of immigrants entering the studied areas in 5 years

۲-۲-۴- مشخصات فرهنگی و قومی منطقه

زبان مازندرانی با نام زبان طبری دارای سابقه ادبی طولانی است. مردم منطقه بابل، فریدونکنار و بابلسر نیز با لهجه مازندرانی مختص به خود گفتگو می‌کنند. این محدوده از دو منطقه نسبتاً متفاوت تشکیل شده است. یکی منطقه جلگه‌ای است که درحد فاصل خط ساحلی دریای خزر و کوهپایه‌های شمالی البرز گسترده شده است و دیگری ناحیه کوهستانی است که در بخش جنوبی محدوده واقع شده است. هریک از مناطق مذکور، شیوه‌های زندگی، شرایط اقلیمی و طبیعی، بافت اجتماعی و فرهنگی مخصوص خود را دارند. مراکز شهری بزرگ عمدتاً در مناطق جلگه‌ای واقع شده‌اند. مناطق کوهستانی نیز با وجود فاصله از شهر، ارتباط نزدیکی با این مراکز دارند. به دلیل برخی مسائل اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و اقلیمی بسیاری از هموطنان در گذشته دور یا نزدیک از استان‌های مختلف به مازندران و شهرهای مورد مطالعه مهاجرت نموده‌اند. این مهاجران که در مناطق مختلف ساکن هستند، زبان یا لهجه خود را حفظ نموده و در ارتباطات داخلی از آن استفاده می‌کنند. پایه اقتصاد مازندران و این منطقه بر مبنای صنعت گردشگری و کشاورزی می‌باشد و از محصولات عمده آن برنج، مرکبات، کیوی و دانه‌های روغنی (کلزا) است. پرورش گل و گیاه زینتی، دامداری و صنایع وابسته به کشاورزی نیز در آن رواج دارد. از صنایع دستی قدیمی نیز می‌توان به گلیم‌بافی، جاجیم بافی، نمدمالی، حصیربافی، منبت‌کاری، سفالگری و ... اشاره نمود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحولات جمعیت شهرهای تحت پوشش طرح

با توجه به نتایج سرشماری مرکز آمار ایران جمعیت شهرهای تحت پوشش تأمین آب شرب از سد کلارود (شهرهای بابل، بابلسر و فریدونکنار) طی سال‌های ۱۳۳۵-۱۳۹۵مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است.

در جدول (۳) نرخ رشد جمعیت شهرهای مذکور در طی سال‌های ۱۳۳۵ الی ۱۳۹۵ مورد بررسی قرار گرفته است. همانطوری که نتایج جدول فوق نشان می‌دهد، در سال ۱۳٦۵ تا ۱۳۹۵ نرخ رشد به طور محسوسی کاهش می‌یابد. بنابراین به منظور برآورد جمعیت تا سال افق پروژه از نرخ رشدهای سال ۱۳٦۵ به بعد در محاسبات استفاده گردید تا نتایج به واقعیت نزدیکتر باشند.

جدول ۲- جمعیت شهرهای منطقه تأمین آب شرب از سد کلارود در سال‌های ۱۳۳۵ تا ۱۳۹۵

استان	شهرستان	بخش	شهر	۱۳۳۵	۱۳۴۵	۱۳۵۵	۱۳۶۵	۱۳۷۵	۱۳۸۵	۱۳۹۵
مازندران	بابل	مرکزی	بابل	۳۶۱۹۴	۴۹۹۷۳	۶۸۰۵۹	۱۱۵۳۲۰	۱۵۸۲۴۶	۱۹۸۶۳۶	۲۵۰۲۱۷
	بابلسر	مرکزی	بابلسر	۷۲۳۷	۱۱۷۸۱	۱۸۸۱۰	۲۸۵۸۹	۳۸۶۴۴	۴۷۸۷۲	۵۹۹۶۶
	فریدونکنار	مرکزی	فریدونکنار	۵۰۳۹	۸۸۸۲	۱۳۹۴۴	۲۰۹۹۷	۲۷۹۷۶	۳۴۴۵۲	۳۸۱۵۴
مجموع:				۴۸۴۷۰	۷۰۶۳۶	۱۰۰۸۱۳	۱۶۴۹۰۶	۲۲۴۸۶۶	۲۸۰۹۶۰	۳۴۸۳۳۷

Table 2. Population of cities in the drinking water supply area from Klaroud Dam in the years 1335 to 1395

جدول ۳- نرخ رشد جمعیت شهرهای منطقه طرح در سال‌های ۱۳۳۵ تا ۱۳۹۵

استان	شهرستان	بخش	شهر	۳۵-۴۵	۴۵-۵۵	۵۵-۶۵	۶۵-۷۵	۷۵-۸۵	۸۵-۹۵
مازندران	بابل	مرکزی	بابل	۳/۲۸	۳/۱۴	۵/۴۱	۳/۲۱	۲/۳	۲/۳۴
	بابلسر	مرکزی	بابلسر	۴/۹۹	۴/۷۹	۴/۲۸	۳/۰۶	۲/۱۶	۲/۲۸
	فریدونکنار	مرکزی	فریدونکنار	۵/۸۳	۴/۶۱	۴/۱۸	۲/۹۱	۲/۱	۱/۰۳

Table 3. The population growth rate of the cities of the plan area in the years 1335 to 1395

۳-۲- پیش بینی جمعیت شهری و روستایی و نیازهای آبی آنها

براساس محاسبات انجام شده جمعیت مناطق تحت پوشش زون ٤(در طرح جامع آب شرب و صنعت استان مازندران زون ٤ شامل شهرهای بابل، بابلسر و فریدونکنار است) برای سال‌های ۱٤۲۵ و ۱٤٤۰ شمسی به ترتیب ۱۰۵۸۵۸٦ و ۱۲۸۱۰٤۹ نفر و کل نیاز آبی شرب، صنعت و گردشگری این محدوده (اعم از شهری و روستایی) تا این سال‌ها به ترتیب ۷۵/٤ و ۹۵/۷ میلیون متر مکعب در سال خواهد بود(Khazarab Consulting Engineers, 2014). جهت پیش بینی جمعیت شهرهای بابل، بابلسر و فریدونکنار از استان مازندران، از روش ترکیبی استفاده شده است. امروزه روش ترکیبی بیش از هر روش دیگری برای پیش‌بینی به کار می‌رود. در این روش جمعیت پیش‌بینی شده بر اساس مجموعه عوامل مؤثر بر تغییر و تحول جمعیت به‌دست می‌آید. این عوامل شامل نرخ رشد، مهاجرت و ترکیب سنی و جنسی جمعیت سرشماری شده است. نتایج برآورد نهایی جمعیت در جدول (٤) ارائه شده است. شایان ذکر است که در برآورد جمعیت شهرهای محدوده طرح توریستی بودن و افزایش جمعیت این شهرها در فصل‌های بهار و تابستان مدنظر واقع شده است.

جدول ٤- جمعیت برآورد شده نهایی شهرهای تحت پوشش تأمین آب شرب از سد کلارود تا سال افق پروژه

شهرستان	۱۳۹۵	۱۴۰۰	۱۴۰۵	۱۴۱۰	۱۴۱۵	۱۴۲۰	۱۴۲۵	۱۴۳۰
بابل	۲۵۰,۲۱۷	۲۷۰,۱۱۰	۲۸۸,۷۳۰	۳۰٤,۹٦۰	۳۷۹,٦۸۰	۳۳۲,٥٤۰	۳۳٤,۸٤۰	۳٥٦,۹٥۰
بابلسر	٥۹,۹٦٦	٦٤,۷٦۰	٦۹,۲۷۰	۷۳,۲۳۰	۷٦,۸٥۰	۸۰,۰٥۰	۸۳,۱۳۰	۸٦,۱۸۰
فریدونکنار	۳۸,۱٥٤	٤۱,۰۰۰	٤۳,٦۷۰	٤٦,۰۰۰	٤۸,۱۲۰	٤۹,۹۷۰	٥۱,۷٦۰	٥۳,٥٤۰
جمع	۳٤۸,۳۳۷	۳۷٥,۸۷۰	٤۰۱,٦۷۰	٤۲٤,۱۹۰	٤٤٤,٦٥۰	٤٦۲,٥٦۰	٤۷۹,۷۳۰	٤۹٦,٦۷۰

Table 4. The final estimated population of the cities covered by drinking water supply from the Klaroud Dam until the project horizon year

در مطالعات طرح جامع آبرسانی شرب و صنعت استان (Khazarab Consulting Engineers, 2014) منابع تأمین آب در زون ٤ با توجه به افت شدید سطح آب زیرزمینی و وضعیت نامطلوب آن و نیاز به تقویت و در نتیجه کاهش فشار بر آن برای سال‌های آینده تنها از محل منابع آب سطحی (سدهای موجود زون ٤) برنامه ریزی شده است. در این زون سد البرز واقع بر شاخه اصلی رودخانه بابلرود در دست بهره برداری می‌باشد. این سد علاوه بر تأمین نیاز آبی اراضی کشاورزی پایاب و همچنین تأمین حقابه محیط زیستی، حدود ۳۳/۵ تا ۳۵ میلیون مترمکعب در سال از مصارف شرب و صنعت مراکز شهری و روستایی واقع در این ناحیه را تأمین خواهد کرد. علاوه بر این، سد سجادرود واقع بر رودخانه سجادرود که در مجاورت این رودخانه قرار داشته و مطالعات آن نیز به اتمام رسیده، برای تأمین سالانه حدود ٢٤ میلیون مترمکعب آب شرب زون ٤ برنامه‌ریزی شده است. با توجه به مطالب فوق نیاز آبی شرب، صنعت و گردشگری برای زون ٤ بر مبنای سال افق ١٤٢٥ شمسی حدود ۷۵ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده که می‌بایست از سیستم رواناب رودخانه بابلرود تأمین گردد. از سویی دیگر آب قابل تأمین و برنامه‌ریزی شده از سد البرز ۳۳/۵ تا ۳۵ میلیون‌مترمکعب و از سد سجادرود ٢٤ میلیون‌مترمکعب (مجموع ۵۷/۵ تا ۵۹ میلیون متر مکعب در سال) بوده که به این ترتیب مابقی نیاز آبی شرب و صنعت برای زون ٤ برای سال افق ١٤٢٥ شمسی حدود ١٦ تا ۱۷/۵ میلیون مترمکعب خواهد بود که این آب از محل سد کلارود می‌بایست تأمین گردد.

۳-۳- برآورد آب شرب مورد نیاز شهرها

با توجه به جمعیت پیش‌بینی شده در سال‌های مختلف تا سال افق پروژه و ضمن در نظر گرفتن مصرف سرانه مناطق شهری برای شهرهای محدوده طرح حدود ۲۰۰ لیتر نفر در روز کل حجم آب شرب مورد نیاز برآورد گردید که نتایج آن در جدول (۵) ارائه شده است. با توجه به این جدول حجم آب مورد نیاز شهرهای بابل، بابلسر و فریدونکنار در سال افق پروژه ١٤٣٠ به ترتیب ۲۸/۷، ٦/۹ و ۳/٤ میلیون مترمکعب و در کل ۳۹/۹ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است که بخشی از این آب مورد نیاز از محل سد کلارود قابل تأمین خواهد بود.

جدول ۵- آب شرب مورد نیاز شهرهای محدوده طرح تا سال افق پروژه (میلیون مترمکعب)

شهرستان	۱۳۹۵	۱۴۰۰	۱۴۰۵	۱۴۱۰	۱۴۱۵	۱۴۲۰	۱۴۲۵	۱۴۳۰
بابل	۲۰/۱	۲۱/۷	۲۳/۲	۲٤/۵	۲۵/۷	۲٦/۷	۲۷/۷	۲۸/۷
بابلسر	٤/۸	۵/۲	۵/٦	۵/۹	٦/۲	٦/٤	٦/۷	٦/۹
فریدونکنار	۳/۱	۳/۳	۳/۵	۳/۷	۳/۹	٤	٤/۲	٤/۳
مجمع	۲۸	۳۰/۲	۳۲/۳	۳٤/۱	۳۵/۷	۳۷/۱	۳۸/۵	۳۹/۹

Table 5. Drinking water requirements of the cities within the project area until the year of the project horizon (million cubic meters)

۳-۴- اثرات مثبت احداث سد کلارود

احداث سد کلارود علاوه بر تأمین آب شرب شهرهای محدوده، پیامدهای مهم اقتصادی، اجتماعی دیگر نیز دارد که به مهمترین آنها در ادامه اشاره می شود.

۳-۴-۱- ایجاد اشتغال و درآمد

ایجاد اشتغال و به تبع آن افزایش درآمد یکی از مهمترین اثرات مثبت احداث سد خواهد بود. باید توجه داشت که ایجاد اشتغال در فاز ساختمانی طرح، موقت و کوتاه مدت است ولی در مرحله بهره‌برداری اشتغال ایجاد شده دائمی و بلندمدت خواهد بود

و کارکنان شاغل عمدتاً از ساکنین مناطق پیرامون طرح خواهند بود. همچنین در کنار ایجاد فرصت‌های شغلی مستقیم، فرصت‌های شغلی غیرمستقیم نیز در اثر اجرای پروژه وجود خواهد داشت، بطوریکه انتظار می‌رود در بخش حمل و نقل، تصفیه خانه آب، خدمات آموزشی، ترویجی، تحقیقاتی، گردشگری و تفریحی اشتغال غیرمستقیم ایجاد گردد.

۳-۴-۲- ارزش زمین

تأمین آب شرب و ایجاد شرایط مناسب برای زندگی، موجب گسترش شرایط عمرانی منطقه می‌گردد. لذا پس از بهره‌برداری و افزایش شاخص‌های کیفی زندگی در منطقه به دلیل توریستی بودن محدوده شاهد حضور افراد و مسافران بیشتری در منطقه خواهیم بود. همین امر افزایش قیمت زمین را به دنبال خواهد داشت. اگرچه امکان سوءاستفاده و تغییر کاربری اراضی توسط افراد سودجو نیز قابل پیش بینی است که بایستی با نظارت و مدیریت دقیق از فعالیت این افراد در منطقه جلوگیری به عمل آید. در کل افزایش قیمت زمین موجب ارتقاء وضعیت اقتصادی خانوارها و ایجاد انگیزه بیشتر برای فعالیت‌های مختلف همگام با طرح شده و مانع از مهاجرت ساکنین به ویژه نیروی کار جوان خواهد شد.

۳-۴-۳- پذیرش اجتماعی و مشارکت‌های مردمی

با احداث پروژه ساکنین شهرهای بابل، بابلسر، فریدونکنار و روستاهای اطراف که در شرایط کنونی دچار کمبود آب سالم و بهداشتی هستند، از آب کافی بهداشتی بهره‌مند شده تأمین آب بهداشتی و رفع کمبودها از اثرات مثبت طرح بوده، لذا پذیرش مناسبی نسبت به احداث پروژه خواهند داشت.

۳-۴-۴- جلوگیری از مهاجرت

در حال حاضر بدلیل کمبود آب و بیکاری و در نتیجه شرایط بد اقتصادی، بیشتر مردم منطقه در حال مهاجرت هستند، به دنبال تأمین آب شرب مناسب در منطقه، از روند مهاجرت به خارج از منطقه کاسته خواهد شد. با فراهم نمودن شرایط مناسب برای زندگی با تأمین نیاز آب شرب منطقه، ایجاد زمینه‌های اشتغال و افزایش درآمد نه تنها از مهاجرت آنها کاسته می‌شود بلکه روند عکس به خود می‌گیرد که این یکی از اهداف طرح می‌باشد.

۳-۴-۵- فرهنگ جوامع منطقه

با اجرای پروژه در محدوده طرح انتظار می‌رود وضعیت فرهنگی جوامع محلی تا حدودی دچار دگرگونی شود. این مورد به ویژه از نظر سطح سواد آموزشی می‌تواند به صورت جدی مطرح شود. با اجرای طرح و بهبود وضعیت اقتصادی می‌توان بهبود وضعیت فرهنگی منطقه را در نتیجهٔ افزایش سطح سواد و ارتقای سطح آموزش پیش‌بینی کرد. قابل ذکر است توسعه اقتصادی منطقه با ارتقای کیفیت زندگی همراه می‌باشد و از این نظر دسترسی به امکانات رفاهی، اجتماعی و بهداشتی، باعث بالارفتن سطح زندگی عموم مردم منطقه می‌گردد. به دنبال این امر بهره‌گیری از وسائل ارتباط جمعی و تسهیلات آموزشی می‌تواند در بلندمدت به ارتقای کیفیت فرهنگی منطقه کمک‌های شایان و قابل توجهی نماید.

۳-۴-۶- بهبود کیفیت زندگی

در جوامع انسانی عوامل مختلف بر سطح رفاه عمومی و کیفیت زندگی تأثیرگذار می‌باشند. این عوامل طیف وسیعی از پارامترهای طبیعی تا اقتصادی- اجتماعی- فرهنگی را شامل می‌شوند. یکی از اصلی‌ترین عواملی که به صورت غیرمستقیم تأثیر معنادار بر کیفیت زندگی خانوارها و جوامع دارد، سطح درآمد است. همانطور که اشاره شد با بهره‌برداری از طرح و ایجاد اشتغال و درآمد،

سطح میانگین درآمد خانوارهای منطقه افزایش خواهد یافت و توانایی و قدرت آنها برای خرید کالاهای مختلف و بهره‌مندی از خدمات رفاهی ارتقا خواهد یافت. بنابراین در این مرحله شاهد بهبود و ارتقای کیفیت زندگی در سطح منطقه خواهیم بود.

۳-۴-۷- اثرات بهداشتی

با احداث سد و تأمین آب آشامیدنی تصفیه شده برای جمعیت ساکن و شناور شهرهای بابل، بابلسر و فریدونکنار، سطح سلامت و رفاه در این مناطق افزایش یافته و امکان احتمال بیماری‌های مرتبط با آب در منطقه کاهش می‌یابد. بالا بردن سطح سلامت جامعه یکی از اثرات مثبت معنادار بوده و از اهداف اصلی طرح محسوب می‌شود. مهمترین بیماری‌های مرتبط با آب در منطقه براساس عامل، ناقل و نحوه انتقال بیماری در جدول (٦) ارائه شده است.

جدول ٦- مهمترین بیماری‌های مرتبط با آب منطقه کلارود

نام بیماری	عامل بیماری	ناقل بیماری	نحوه انتقال
مالاریا	Plsmodium	پشه ناقل A.scarovi	سیکل حشره-انسان
شیستوزومیازیس	Shistosoma	حلزون Bullinus به عنوان میزبان واسط	توسط انگلهای کرمی آب
آسکاریازیس	آسکاریس لامیر کاوئیدس	--	آب و غذای آلوده
گاسترو آنتریت ویروسی	روتاویروس،پارویروس	مگس و سایر حشرات موذی به صورت ناقل مکانیکی	آب و غذای آلوده
هپاتیت	ویروس هپاتیت	مگس و سایر حشرات موذی به صورت ناقل مکانیکی	آب و غذای آلوده
اسهال باسیلی	شیگلا	مگس و سایر حشرات موذی به صورت ناقل مکانیکی	آب و غذای آلوده
ژیادیازیس	ژیاردیالامبلیا	مگس و سایر حشرات موذی به صورت ناقل مکانیکی	آب و غذای آلوده

Table 6. The most important diseases related to water in Klaroud region

۳-۴-۸- توسعه گردشگری

سد مخزنی کلارود به دلیل جاذبه‌های طبیعی و چشم‌اندازهای جنگلی زیبا در چهارسوی خود و نزدیکی به شهرهای توریستی حاشیه دریای خزر می‌تواند سبب جذب بیشتر گردشگران و رونق صنعت توریسم در منطقه گردد. توسعه امکانات تفریحی در حاشیه مخزن و ایجاد زیرساخت‌های متناسب با توسعه توان توریستی می‌تواند زمینه اشتغال و افزایش درآمد در منطقه را به ارمغان بیاورد. همچنین دریاچه سد می‌تواند یکی از زیستگاه‌های مهم پرندگان مهاجر باشد. پیش‌بینی می‌شود که بخشی از پرندگان برای گذراندن فصل زمستان به سوی دریاچه کلارود جذب شوند. این امر در تشدید زیبایی و چشم‌انداز دریاچه برای جلب توریست نقش بسزایی دارد.

۳-۴-۹- ایجاد چشم‌انداز زیبا

منطقه اجرای سد، به لحاظ وجود چشم‌اندازها و مناظر طبیعی یکی از مناطق جذاب بشمار می‌آید. اجرای طرح سد مخزنی کلارود چشم انداز جدیدی در منطقه به وجود می‌آورد که کمک شایانی به افزایش زیبایی‌های طبیعی منطقه خواهد نمود. بنابراین باید گفت که ایجاد چشم‌انداز زیبای دریاچه و ارتقای ویژگی‌های زیباشناختی منطقه در کنار ایجاد زیرساخت‌ها و برنامه‌ریزی‌های صحیح در کنار مدیریت در امر حفاظت و نگهداری از توان اکولوژیکی منطقه می‌تواند یکی از اثرات مثبت این پروژه باشد که تأثیر مستقیم بر کیفیت زندگی و رفاه ساکنین منطقه و پذیرش اجتماعی طرح خواهد داشت.

۳-۵- اثرات منفی احداث سد کلارود

احداث سد به خصوص در مراحل ساختمانی دارای اثرات منفی می‌باشد. این اثرات در قالب ارزیابی محیط زیستی پروژه کلارود (Ab-Niro Consulting Engineers 2023) به تفکیک محیط‌های تأثیرپذیر شامل محیط فیزیکی، بیولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی به خصوص در فاز ساختمانی مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین این اثرات در ادامه آمده است.

۳-۵-۱- اثر بر فرسایش و رسوبگذاری

محل سد مخزنی کلارود در محدوده‌ای با فرسایش متوسط قرار می‌گیرد که شیب عمومی آن نسبتاً زیاد می‌باشد. بنابراین پیش‌بینی می‌شود به علت حجم عملیات خاکبرداری و خاکریزی طی فعالیت‌های اجرایی طرح، پارامترهای فرسایش و رسوب‌گذاری اثر منفی با شدت متوسط تا زیاد برخوردار شوند. البته این تأثیر کوتاه مدت برگشت پذیر خواهد بود.

۳-۵-۲- تولید و انباشت زایدات و پسماندها

در طول مرحله اجرایی سد مخزنی کلارود زایدات و پسماندهای مختلف تولید خواهد شد. علت عمده آن مربوط به باقیمانده عملیات خاکی ساخت و ساز و بقایای منابع برداشت شده جهت استفاده در طرح می‌باشد. انباشت آنها سبب تخریب خاک و پوشش گیاهی محدوده انباشت و افزایش کدورت در آب‌های سطحی خواهد شد. علت دیگر تولید زایدات به دلیل حضور و زندگی کارگران و پرسنل طرح بوده و شامل انواع پسماندهای اداری و خانگی می‌باشد. عدم جمع‌آوری و دفع اصولی این بخش از زایدات و پراکنده شدن آنها در محیط، آلودگی منابع خاک و آب منطقه را به دنبال خواهد داشت. البته باید توجه داشت که تأثیر این پارامتر موقت و قابل پیشگیری و کنترل می‌باشد.

۳-۵-۳- اثر بر کیفیت هوای منطقه

محدوده سد کلارود جزء مناطق کمتر توسعه یافته بوده بنابراین منابع آلاینده هوا در آن قابل توجه نمی‌باشند. در مرحله ساختمانی اجرای طرح سد مخزنی کلارود عمدتاً به علت خروج منطقه از وضعیت طبیعی خود به دلیل برداشت پوشش گیاهی محدوده مخزن، خاکبرداری و خاکریزی، اجرای عملیات بتنی، حمل و نقل مصالح و تجهیزات و از طرف دیگر عبور و مرور ماشین آلات سبک و سنگین بر کیفیت هوای محدوده طرح تأثیر موضعی و محدود خواهد داشت. اگرچه پوشش گیاهی متراکم منطقه از شدت دریافت آلودگی هوا و صوت ناشی از عملیات ساخت و ساز می‌کاهد ولی به منظور اطمینان بیشتر جهت کاهش اثرات مذکور لازم است تدابیر امنیتی خاصی مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۵-۴- اثرات انتشار صوت در منطقه

در محدوده اجرای طرح در حال حاضر مشکل آلاینده صوتی مشهود نیست. اما در طی فاز ساختمانی با ورود دستگاه‌ها و ماشین‌آلات ساخت و ساز تراز صوتی در منطقه بالا می‌رود. بیشترین سروصدا مربوط به عملیات خاکبرداری، انفجار و سایر اقدامات ساختمانی است. برخی از این فعالیت‌ها ماهیت موقتی داشته و برخی همچون تردد ماشین آلات ممکن **است** تداوم بیشتری داشته و سطح صدای طبیعی در منطقه را در مدت بیشتری تحت تأثیر قرار دهد. البته اثرات صدا و انتشار آن در فاز ساختمانی طرح کوتاه مدت و با شدت و دامنه کم خواهد بود.

۳-۵-۵- اثر بر پوشش گیاهی

در طی مرحله ساختمانی به دلیل فعالیت‌های اجرایی مهمترین اثرات بالقوه در ارتباط با پوشش منطقه، برداشت و حذف پوشش گیاهی مخزن سد، محدوده کارگاه عملیاتی و تکمیل و اصلاح مسیر دسترسی به سد می‌باشد. پوشش گیاهی محدوده مخزن سد، پوشش جنگلی است که عمدتاً از گونه‌های درختی نظیر ممرز، ازگیل، آلوچه وحشی و ... تشکیل شده است. با توجه به سطح مخزن حدود ۵۰ هکتاری سد کلارود در تراز نرمال و تراکم پوشش جنگلی در دامنه شمالی البرز، اثرات اجرای طرح بر جوامع گیاهی در دوره ساختمانی به لحاظ تخریب پوشش گیاهی با حذف درختان داخل مخزن و زیر بدنه سد صورت می‌گیرد.

۳-۵-۶- مهاجرت برخی از جانوران

در زمان عملیات اجرایی مهمترین زیستگاهی که تخریب می‌شود، زیستگاه جنگلی واقع در مخزن سد کلارود است. علاوه بر این زیستگاه‌های حاشیه مخزن و زیستگاه آبی رودخانه طرح تحت تأثیر پروژه واقع می‌شوند. گونه‌های حیات وحش ساکن در این زیستگاه‌ها نیز دارای یک حد آستانه بردباری و سازگاری با شرایط محیطی هستند. چنانچه تغییرات شدیدی در محیط صورت گیرد جانوران هم رفتارهای خاص از خود نشان می‌دهند. برخی از آنها با شرایط جدید سازگاری یافته و گروهی مهاجرت اجباری و ناخواسته را بر می‌گزینند. بنابراین فعالیت‌های مرحله اجرای سد بر کیفیت زیستگاه جانوران محدوده طرح تأثیر سویی خواهد داشت و انتظار می‌رود، این اثرات موقتی و یا دارای شدت و دامنه متوسط باشند.

٤- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از مطالعات اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی سد مخزنی کلارود مهم‌ترین اثر مثبت احداث این سد، ذخیره و تنظیم رواناب‌های رودخانه کلارود، به منظور تأمین بخشی از نیازهای آب شرب شهرهای بابل، بابلسر و فریدونکنار و روستاهای اطراف (واقع در زون ٤ طرح جامع آب شرب مازندران) است که در شرایط کنونی با کمبود آب شرب مواجه هستند. حجم آب مورد نیاز شرب، صنعت و گردشگری شهرهای مذکور در سال افق پروژه (١٤٣٠) حدود ٤٠ میلیون مترمکعب برآورد شده است که سهم سد کلارود جهت تأمین بخشی از این نیاز آبی، ۱۷ میلیون‌مترمکعب در سال است. احداث سد پیامدهای اقتصادی و اجتماعی مثبت دیگر مانند ایجاد اشتغال و بهبود سلامت و رفاه اجتماعی، افزایش پذیرش و مشارکت‌های مردمی، جلوگیری از مهاجرت و همچنین ایجاد چشم‌انداز زیبا و توسعه صنعت گردشگری در این منطقه را به همراه دارد. از طرف دیگر با اجرای طرح و بهبود وضعیت اقتصادی می‌توان بهبود وضعیت فرهنگی منطقه را در نتیجهٔ افزایش سطح سواد و ارتقای سطح آموزش پیش بینی کرد. مهمترین اثرات منفی احداث سد کلارود تأثیر آن بر فرسایش و رسوبگذاری، تولید و انباشت زایدات و پسماندها، اثر منفی بر کیفیت هوای محدوده و ایجاد آلودگی صوتی، خسارات زیست محیطی مانند قطع درختان جنگلی و تغییر پوشش گیاهی و مهاجرت برخی از جانوران محدوده می‌باشد.

۵- تضاد منافع نویسندگان

نویسنده این پژوهش اعلام می‌دارد که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این پژوهش ندارد.

۶- منابع

Ab-Niro Consulting Engineers (2023) Report on studies of the first stage of economic and social analysis of the Klaroud Dam project. Mazandaran Regional Water Company, Sari, Iran. (In persian)

Akbarzadeh, P., & Kaboli, SH. (2017). Assessing the socio-economic effects of reservoir dam construction, case study; Siahzakh in Divandareh, Iran, *Geography and Sustainability of Environmental*, 7(2), 53-65.

Golbaz, M., Heydari, B., Hosseinzad Firouzi, J., Hayati, B A., & Riahi Darcheh, F. (2016). Evaluation of the economic, social and environmental effects of the Tangab dam and irrigation network in Firozabad, Fars. *Journal of Economic Research and Agricultural Development of Iran,* 2-48 (2), 179-195.

Hadian, F., Jafari, R., Bashri, H., & Ramezani, N. (2013). Investigating the effects of the Hana Dam on changes in the cultivated area and land use. *Journal of Applied Ecology,* 2(4),101-104.

Khatunabadi, S.A., Parvizi, E., & Ataei, M. (2018) Investigating the economic, social and environmental impacts of the construction of Shah Qasem Dam in Yasuj from the perspective of the beneficiary villagers. *Journal of Water and Soil Sciences (Agricultural Sciences and Technologies and Natural Resources),* 22(4), 109-127.

Khazarab Consulting Engineers (2014) Reports on the comprehensive water plan of Mazandaran province. Iran Water and Wastewater Engineering Company, Tehran, Iran.

Power, A. G. (2010). Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies, Philosophical Transactions of the Royal Society, B 365, 2959-2971.

Taheri Saffar, M., Shanoushi, N., & Abolhassani, L. (2016). environmental, social and economic impacts of dam construction in Khorasan Razavi province (case study of Bar Dam in Neyshabur), *Journal of Geography and Environmental Hazards,* 4 (3), 127-146.

Wajid, A., Usman, A., Kashif Khan, M., & Chaudhry AA. (2013). Socio economic impact of small dams on local vicinity: A case study of Aza Khel Dam Peshawar, *Global Journal of Management Management and Business Research Economics and Commerce,* 13(5), 31-39.

Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Summer 2024: Vol 2, Issue 2, 154-173
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1183435

Review Article

Applying the principles of designing sponge greenways in the management of water resources in desert cities (Case study: Maddis of Isfahan)

Mozhdeh Jamshidi [1,2]

1 Assistant Professor, Department of Urbanism, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
2 Assistant Professor, Tourism, Architecture and Urban Research Center, Isfahan (Khorasghsn) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
* *Corresponding author email*: Mojdeh.jamshidi.84@gmail.com

© The Author(s) 2024

Received: 10 Sept 2024 Accepted: 16 Nov 2024 Published: 24 Dec 2024

Abstract

This article examines the principles of the "sponge city" concept, proposing it as a sustainable solution for water resource recovery, specifically through the application of its principles to revive one of the rare water management systems in Iranian cities: the Maddies of Isfahan. Desert cities in Iran, including Isfahan, are facing serious challenges such as water shortages, pollution, climate changes (including urban heat islands and atmospheric inversions), and prolonged droughts, all of which make urban and human life increasingly difficult. Adopting an approach to mitigate these problems and restore natural elements is essential. The Maddies of Isfahan serve to direct, drain, and store water, playing a crucial role in protecting underground water resources. The emerging concept of sponge cities-designed to absorb and retain rainwater-coupled with the development of urban greenways as natural pathways within cities, can enhance the role of these linear natural elements. This research employs an analytical-descriptive method, reviewing existing literature on sponge cities principles and greenway characteristics. By extracting the principles of both approaches and aligning them, this study explores their application in the restoration and regeneration of the Maddies in Isfahan.

The findings suggest that the concept of "spongy greenways" represents an innovative approach to revitalizing ancient water systems. Through design solutions and practical interventions, this approach can enhance environmental functions, social vitality, economic sustainability, and public health. These solutions fall into seven categories: shell design, spatial form and structure, materials and color, natural resource management, vegetation, functionality, and management and maintenance. Together, these strategies contribute in realizing the vision of sustainable urban water management.

Keywords: Sponge city, Sponge greenway, Urban design guidline, Maddies of Isfahan

مجله راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
شاپا الکترونیکی: ۱۴۴۹-۲۹۸۱
تابستان ۱۴۰۳، دوره دو، شماره۲، ۱۵۴-۱۷۳
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1183435

مقاله مروری

کاربست اصول طراحی مسیرهای سبز اسفنجی در مدیریت منابع آب در شهرهای کویری (موردپژوهی: مادی‌های شهری اصفهان)

مژده جمشیدی[۱و۲]

۱. استادیار گروه شهرسازی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
۲. استادیار، مرکز تحقیقات گردشگری معماری و شهرسازی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: Mojdeh.Jamshidi.84@gmail.com

© The Author(s) 2024

دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶ چاپ: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴

چکیده

این مقاله به بررسی اصول «شهر اسفنجی» و پیشنهاد آن به عنوان یک راه‌حل پایدار برای بازیابی منابع آبی و کاربست اصول آن در احیای نقش یکی از منابع نادر در شهرهای ایران؛ مادی‌های شهر اصفهان؛ پرداخته است. شهرهای کویری در ایران اعم از اصفهان با چالش‌های جدی مانند کمبود آب، آلودگی، تغییرات اقلیمی (اعم از جزایر حرارتی و وارونگی هوا) و خشکسالی مواجه هستند که حیات جمعی و زیست انسانی را در این شهرها با مشکل روبرو ساخته و لزوم اتخاذ رویکردی برای کاهش اثرات این معضلات و احیای عناصر طبیعی موجود را ضروری کرده است. سیستم تقسیم آب مادی‌ها در شهر اصفهان علاوه بر تقسیم آب رودخانهٔ زاینده‌رود دارای عملکرد هدایت، زهکشی و ذخیرهٔ آب برای حفاظت از آب‌های زیرزمینی بوده است. ایدهٔ جدید طراحی شهرهای اسفنجی با رویکرد جذب و نگهداشت آب باران از یکسو و طراحی مسیرهای سبز شهری به عنوان ایده‌ای برای طراحی مسیرهای طبیعی در شهرها از سویی دیگر می‌تواند به بهبود نقش این عناصر طبیعی خطی کمک کند. در این پژوهش، از روش تحلیلی- توصیفی و مرور ادبیات موجود در زمینه شهرهای اسفنجی و استخراج اصول آن و بررسی ویژگی‌های مسیرهای سبز و استخراج اصول آن از سویی دیگر و تطابق اصول این دو رویکرد برای کاربست در احیا و بازآفرینی مادی های شهر اصفهان استفاده شده است. نتایج این مقاله حاکی از آن است که ایدهٔ مسیرهای سبز اسفنجی یکی از ایده‌های نوین در احیای سیستم‌های باستانی مادی‌ها است که از طریق پیاده‌سازی و راهکارهای طراحی می‌تواند به ارتقاء نقش محیط زیستی، پویایی اجتماعی، کارایی اقتصادی و سلامت و بهداشت بیانجامد. این راهکارها در ۷ گروه طراحی پوسته‌ها، فرم و شکل‌گیری فضایی، مصالح و رنگ، مدیریت منابع طبیعی، پوشش گیاهی، عملکرد و مدیریت و نگهداری به تحقق این ایده کمک می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: شهر اسفنجی، مسیر سبز اسفنجی، راهکارهای طراحی شهری، مادی‌های اصفهان

۱- مقدمه

در حالی که جمعیت شهرها به سرعت در حال افزایش است، مشکلاتی از قبیل سیلاب‌ها، آلودگی آب و کمبود منابع آبی در حال تشدید است. شهرها برای تأمین نیاز شهروندان خویش دائماً در حال توسعه هستند، که مشکلات زیست محیطی را به چالشی برای آنها بدل کرده‌است. از این رو زندگی شهری و فعالیت‌های اجتماعی با چالش‌های زیست محیطی متعددی ناشی از توسعه‌های شهری روبرو هستند؛ این چالش‌ها شامل مدیریت منابع زیست محیطی اعم از منابع آب، تغییرات اقلیمی، آلودگی، خشکسالی، فرونشت و نظایر آن می‌باشد. در این میان تغییرات اقلیمی این چالش‌ها را سخت‌تر کرده و تأثیرات آن شامل بارش‌های ناپیوسته و شدید، گرماهای شدید و روندهای خشکسالی متناوب می‌باشد. به همین دلیل، روش‌های سنتی مدیریت آب دیگر کارایی لازم را ندارند و شهرها نیاز به راهکارهایی دارند که نه تنها به مدیریت منابع آب کمک کند بلکه در بهبود کیفیت زندگی ساکنان نیز مؤثر باشد.

در راستا، ایدهٔ «شهرهای اسفنجی» به عنوان یک رویکرد نوین برای مدیریت منابع آبی و به عنوان راه حلی برای محدودیت منابع آبی در شهر مطرح گردیده است. بررسی‌های(Shu et al., 2023) نشان داد که در سال ۲۰۱۲ ایدهٔ شهر اسفنجی برای برخورد با پدیدهٔ سیل در چین پیشنهاد شده‌است. شهرهای اسفنجی، بر مبنای جذب، ذخیره و تصفیه آب باران طراحی شده و به عنوان یک راه‌حل پایدار برای توسعه شهری به ویژه بر اساس اصول توسعهٔ کم اثر[1] می‌توانند استفاده شوند. (Hinman, 2005) توسعهٔ کم اثر را به عنوان یکی از روش‌های مدیریت منابع آب شهری (به ویژه رولناب‌ها) معرفی می‌کند که توسط اقداماتی نظیر جوی باغچه، آسفات متخلل، روسازی متخلخل، ترانشه‌های نفوذ، فیلترهای نواری و سیستم‌های ماند بیولوژیکی می‌تواند در طراحی تحقق یابد(Kabarfard et al., 2017) و راهکارهای آن در راستای تحقق شهر اسفنجی نقش مهمی ایفا کند. افزون بر این «شهرهای اسفنجی» تنها در برخورد با رواناب‌ها در شرایط بحرانی سیل مطرح نمی‌شوند، بلکه به عنوان راهکاری برای هدایت و ذخیرهٔ آب‌های سطحی در شرایط خشکسالی نیز کارآمد هستند. خشکسالی یکی از وقایع محیطی و بخش جدایی ناپذیر نوسانات اقلیمی است که شهرهای کویری با ویژگی خاص را تحت تأثیر قرار داده است. راهکارهای توسعهٔ کم اثر برخاسته از اصول شهر اسفنجی که در اشکال گوناگون مدیریت فضاهای سبز مطرح می‌شود، موضوعی است که در این پژوهش برای یکی از شهرهای ایران که دارای یکی از منحصربه فردترین عناصر تاریخی سبز است، استفاده گردید.

فضاهای سبز در معنای عام و ساختارهای سبز در معنای خاص نقش مهمی در ادبیات شهرهای اسفنجی و توسعهٔ کم اثر دارند. زیرساخت‌های سبز با اجرای پیاده‌روهای نفوذپذیر، باغ‌های بارانی و سیستم‌های زهکشی پایدار برای مدیریت مؤثر آب به ویژه آب‌های سطحی و آب باران بسیار مهم هستند. زیرساخت سبز چارچوبی برای حفاظت و توسعه خودپایدار است(Benedict & McMahon, 2012) که تحقق آن می‌تواند نقش مهمی در حفاظت از منابع زیستی به ویژه خاک وآب ایفا کند.

رودخانهٔ زاینده‌رود و نهرهای منشعب از آن در شهر اصفهان مهمترین جریان سطحی در مرکز فلات ایران بوده است که متاسفانه در دو دههٔ اخیر با پدیدهٔ خشکسالی روبرو شده است. هرچند مدیریت سنتی توسعهٔ شهری کارایی لازم برای احیا و بازآفرینی این جریان را به دنبال نداشته‌است و احیای کامل این جریان امری تقریباً غیر ممکن به نظر می‌رسد، تلاش برای احیای این رودخانه همچنان مورد توجه این مقاله است. از این رو این پژوهش با تمرکز بر یکی از مهمترین عناصر سبز این شهر که در ادبیات شهر اسفنجی به عنوان یکی از راهکارهای مدیریت منابع آب مطرح می‌شود، به دنبال احیای هر چند اندک این منبع و کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از نبود این جریان در شهر اصفهان به ویژه حفاظت از منابع آبی سطحی و زیرسطحی می‌پردازد.

[1] LID: Low Impact Development

در این مقاله با استناد به اهمیت و ضرورت شهرهای اسفنجی برای آینده توسعه شهری به ویژه در زمینهٔ پایداری منابع آب، به بسط مبانی این رویکرد و تحقق زیرساخت سبز به عنوان یکی از راهکارهای آن پرداخته شد سپس راهکارهایی برای مادی‌های شهر اصفهان به عنوان یک ساختار سبز شهری بر اساس اصول شهر اسفنجی ارائه گردید. از این رو این مقاله به بررسی سوالات زیر می‌پردازد: ویژگی‌های شهرهای اسفنجی چیست؟ روش‌های کاربردی این الگو برای توسعهٔ زیرساخت‌های سبز شهری کدام‌ها هستند؟ راهکارهای طراحی برای احیای مادی‌های شهر اصفهان براساس اصول شهر اسفنجی و تحقق مسیرهای سبز اسفنجی کدام‌ها می‌باشند؟

۲- روش پژوهش

این پژوهش از یک رویکرد مروری برای ارزیابی مفهوم شهرهای اسفنجی به عنوان یک راه‌حل پایدار در مدیریت منابع آبی استفاده کرده است. در این میان یکی از مهمترین روش‌های شهر اسفنجی احیای ساختارهای سبز می‌باشد که اصول آن نیز مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه شامل سه مرحله اصلی: مرور ادبیات، مطالعه و تحلیل تجربی و راهکارهای طراحی برای مادی‌ها است.
در مرحله اول، مرور جامع ادبیات انجام شد تا دانش موجود درباره اصول، مزایا و چالش‌های مرتبط با شهرهای اسفنجی جمع‌آوری گردد. این مرحله شامل تحلیل مقالات علمی، گزارش‌های دولتی و مطالعات موردی از شهرهایی بود که به‌طور موفقیت‌آمیز اصول شهر اسفنجی را اجرا کرده‌اند. اطلاعات جمع‌آوری‌شده، نظری پایه‌ایی برای درک مفاهیم کلیدی و ویژگی‌های شهرهای اسفنجی فراهم کرد. مرحله دوم شامل تحلیل مقایسه‌ای بین دو مفهوم شهر اسفنجی و زیرساخت سبز است. این مطالعات نشان می‌دهد که اساس ارتباط و موفقیت شهرها در بهبود تاب‌آوری شهری و مدیریت آب، می‌تواند راهکارهای شهر اسفنجی و زیرساخت‌های سبز باشد. مرحلهٔ سوم شامل ارائهٔ راهکارهای طراحی برای مادی‌های شهر اصفهان برگرفته از اصول شهر اسفنجی جهت مدیریت مناسب منابع آب و کاهش اثرات خشکسالی در ترکیب با ایدهٔ مسیرهای سبز شهری می‌باشد.

۳- مبانی نظری

۳-۱- مفهوم‌شناسی شهر اسفنجی

۳-۱-۱- مفهوم شهر اسفنجی

شهر اسفنجی با تعابیر مختلف دیگری نظیر اسفنج شه، اسفنج سبز و بدن اسفنجی در ادبیات شهری به کار رفته است. این مفهوم کاربردهای بسیاری در حوزهٔ صنعت و دانشگاه دارد. اسفنج که واژهٔ مشترک این کلمات است، برای توصیف عملکرد و توانایی شهرها در یک اسفنج می‌باشد(Sallustio et al., 2019; Sun et al., 2020). در کشورهای مختلف این ایده با اشکال گوناگون تعابیر توسعه مطرح شده‌است. به عنوان مثال، طراحی توسعه کم تاثیر در ایالات متحده، طراحی شهری حساس به آب[۲] در استرالیا، سیستم زهکشی پایدار شهری[3] در بریتانیا، طراحی شهری غیرمتمرکز[۴] در آلمان، سیستم هیدرولوژیکی متعادل[۵] در ژاپن و شهر چرخه آب سالم[۶] در کره جنوبی (Sun et al, 2020). طراحی توسعه کم تأثیر عمدتاً از طریق مدیریت منابع آلودگی فضای سبز، آب باران و فناوری انجام می‌شود. نکته اصلی طراحی شهری حساس به آب، انطباق با تغییرات اقلیمی، تقویت مدیریت و استفاده از رواناب باران است. سیستم زهکشی شهری پایدار عمدتاً بر وحدت بین کمیت، کیفیت و راحتی در مهندسی واقعی تمرکز دارد. طراحی شهر غیرمتمرکز بر تفکر توزیع شده متمرکز است و از دو بخش مدیریت غیرمتمرکز آب باران و مدیریت رواناب آب طوفان تشکیل شده است. سیستم هیدرولوژیکی متعادل بر تعادل بین مصرف آب، کنترل سیل و محیط زیست در حوضه تمرکز

[2] WSUD: Water Sensitive Urban Design
[3] SuDs: Sustainable urban Drainage system
[4] DUD: Decentralized Urban Design
[5] BHS: Balanced Hydrological System
[6] HWC: Healthy Water Cycle

دارد. شهرهای چرخه آب سالم عمدتاً با ایجاد یا تغییر زیرساخت‌های سبز آب باران، شهر باران و دهکده باران محقق می‌شوند. شهر اسفنجی چین به طور شهودی زهکشی، جذب و استفاده مجدد از آب باران را از طریق طبیعت بیان می‌کند(Sun et al., 2020).

۳-۱-۲- عملکرد شهر اسفنجی

مفهوم «شهر اسفنجی» به مناطق شهری اشاره دارد که برای جذب، ذخیره و تصفیه آب باران طراحی شده‌اند و از این طریق سیلاب شهری را کاهش داده و به مسائل کمبود آب رسیدگی می‌کنند. این رویکرد به ویژه در زمینه شهرنشینی سریع در چین مرتبط است، جایی که روش‌های ساخت و ساز سنتی این چالش‌ها را تشدید کرده است (Li et al., 2016). تحقیقات نشان می‌دهد که ابتکارات شهر اسفنجی نه تنها مدیریت منابع آب را بهبود می‌بخشد، بلکه پیامدهای بهداشت عمومی را با کاهش آلودگی محیطی و افزایش کیفیت فضاهای شهری بهبود می‌بخشد، بهبود سلامت مرتبط با این پیشرفت‌ها ۱۰/٤ درصد گزارش شده است(Li et al., 2016). علاوه بر این، استفاده از اصول شهر اسفنجی در طراحی چشم‌انداز آب‌نما شهری بر ادغام ویژگی‌های اکولوژیکی در برنامه‌ریزی شهری تأکید می‌کند و جنبه‌های زیبایی‌شناختی و عملکردی محیط‌های شهر را تقویت می‌کند (Peiyao, 2024). با این حال، چالش‌هایی از جمله نیاز به سیستم‌های ارزیابی عملکرد موثر و پرداختن به توسعه مراحل اولیه شهرهای اسفنجی در چین در مقایسه با همتایان غربی (Chen, 2024; Zhu, 2023) باقی می‌مانند. افزون بر این شهرهای اسفنجی نشان دهنده یک رویکرد برنامه‌ریزی شهری نوآورانه با هدف بهبود مدیریت آب و کاهش سیل از طریق یکپارچه‌سازی زیرساخت‌های سبز است. این مفهوم که برای اولین بار در چین معرفی شد، بر تغییر محیط‌های شهری برای مدیریت بهتر آب طوفان و بهبود انعطاف‌پذیری محیط زیستی تاکید داشت(Kryvoruchko & Tymashkov, 2024).

الگوی شهر اسفنجی در مقایسه با الگوی سنتی جمع‌آوری آب، به دلیل زمان کم در مواجهه با بارندگی شدید، امکان تخلیهٔ آب زیرزمینی را از تونل فراهم نمی‌کند و باعث کارایی پایین تونل در سیستم هدایت و ذخیرهٔ آب باران می‌شود و آب باران به دلیل خروج در فضاهای آلاینده به هدر می‌روند. حدود ۸۰ درصد آب باران نفوذ نمی‌کند(Sun et al., 2020)(شکل ۱).

در یک جمع‌بندی می‌توان گفت: ساخت و ساز شهر اسفنجی به صورت ردیف متکی بر کانال‌های زهکشی نیست بلکه متکی بر تالاب‌های مصنوعی جدید، بام سبز، حوض‌ها، برکه‌های مرطوب، دریاچه‌های مصنوعی، کاشت چمن، خندق، پوشش‌های کف‌های نفوذپذیرسبز، آجرهای سوراخ‌دار و نظایر آن است که باعث افزایش عمق و افزایش میزان ذخیره‌سازی آب باران می‌شود(Sun et al., 2020) . این ایده نشان دهنده یک استراتژی امیدوارکننده برای توسعه پایدار شهری است و به مفهوم ایجاد و طراحی شهری است که بتواند به طور مؤثر آب باران را جذب، ذخیره و مدیریت کند. این رویکرد با هدف کاهش خطر سیل، افزایش کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی و بهبود محیط زیست شهری طراحی شده است. در یک شهر اسفنجی، زیرساخت‌ها و فضاهای سبز به گونه‌ای طراحی می‌شوند که توانایی جذب و نگه‌داری آب باران را داشته باشند و این آب می‌تواند بعداً به عنوان منبعی برای آبیاری یا استفاده‌های دیگر مورد استفاده قرار گیرد. شهر اسفنجی به عنوان یک راهکار جامع در طرح‌ریزی شهری تعریف می‌شود که در آن از فناوری‌ها و طراحی‌های طبیعی برای مدیریت هیدرولیکی و بهینه‌سازی استفاده از آب در محیط‌های شهری استفاده می‌شود. این مفهوم معمولاً شامل عناصری نظیر پوشش گیاهی، سطوح نفوذپذیر، حوضچه‌های آبگیر و سیستم‌های طبیعی تصفیه آب است. هدف اصلی آن ایجاد شرایطی است که شهرها بتوانند به محیط زیست بهتر پاسخ دهند و از آسیب‌های ناشی از تغییرات آب و هوایی و سیلاب‌ها جلوگیری کنند(شکل ۱و ۲).

۳-۱-۳- هستهٔ اصلی شهر اسفنجی

هسته اصلی ساخت «شهر اسفنجی» شامل شروع از خدمات اکوسیستم و ساخت زیرساخت‌های اکولوژیکی آب در مقیاس‌های مختلف همراه با انواع فناوری‌های خاص اســت (Onuma & Tsuge, 2018). یکی از زیرســاخت‌های اکولوژیکی در این میان زیرساخت‌های سبز و خاکستری می‌باشد.

شکل ۱- قیاس الگوی مدیریت سنتی کنترل آب با الگوی شهر اسفنجی (Sun et al., 2020)

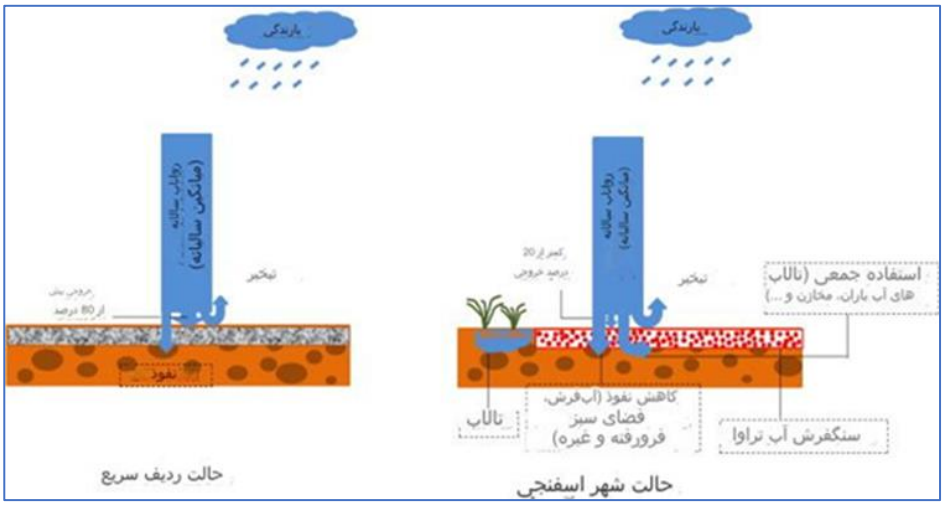

Fig 1. Comparing the traditional water control management model with the sponge city model

شکل ۲- شماتیک بدنه اسفنجی شهری (Sun et al., 2020)

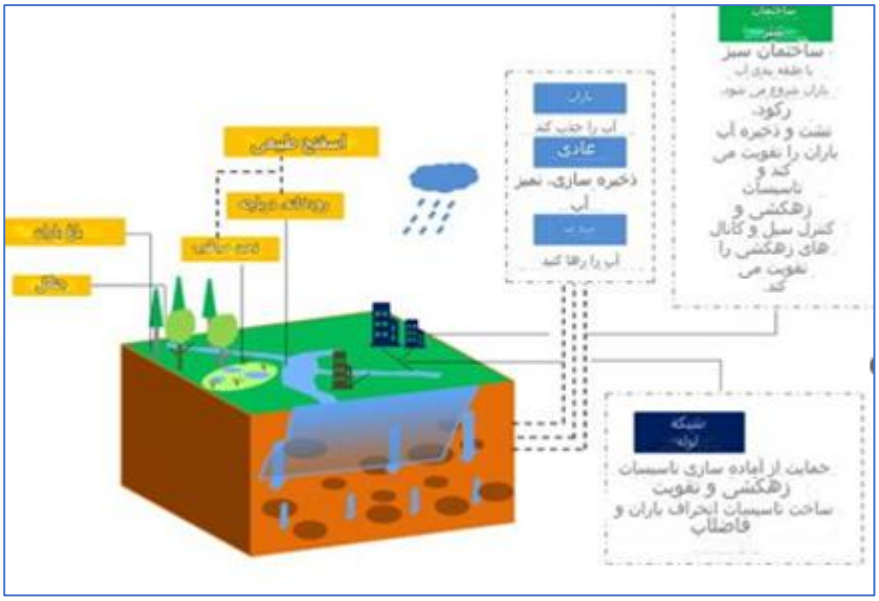

Fig 2. Schematic of urban sponge body

۳-۱-۴- عوامل موثر بر تجلی مفهوم شهرهای اسفنجی

بررسی ادبیات پژوهش پیرامون ایدهٔ شهر اسفنجی را باید در سه خاستگاه تاب‌آوری شهری، توسعهٔ پایدار و تغییرات اقلیمی جستجو کرد. رویکرد شهر اسفنجی را می‌توان روشی به منظور مدیریت بهتر شهرها، بهبود شرایط محیطی و برخورد مناسب با تغییرات اقلیمی دانست.

مطالعات مختلف در این زمینه نظیر Shu et al., 2023; Gan & Sun, 2023; Chen, 2024; Zhu, 2023; Li et al., 2016; Wei & Sun, 2022) (Wang, et al., 2022; Deng et al., 2022; عوامل اصلی تأثیرگذار بر شکل‌گیری این ایده را در ۵ دسته نشان می‌دهند:

عوامل محیطی: تغییرات اقلیمی، افزایش سیلاب‌ها، کمبود منابع آب.

عوامل اجتماعی: رشد سریع جمعیت شهری، افزایش آگاهی عمومی

عوامل اقتصادی: هزینه‌های بالای مدیریت آب، فرصت‌های سرمایه‌گذاری

عوامل سیاسی و مدیریتی: تغییر در سیاست‌های شهری، همکاری بین‌المللی

عوامل تکنولوژیکی: پیشرفت‌های فناوری، نوآوری در طراحی شهری (Jamshidi, 2024).

۳-۱-۵- سیر تاریخی تجلی مفهوم شهر اسفنجی

بررسی پیشینهٔ پژوهش پیرامون ایده‌های مدیریت منابع آب در شهرها حاکی از آن است که این مفهوم را باید در دههٔ ۹۰ میلادی جستجو کرد(Deng et al., 2022) (شکل ۳). (Dietz et al., 2015; Ahiablame et al., 2016) در بررسی تاریخچه مدیریت منابع آبی به دهه ۱۹۸۰و فناوری توسعه با نفوذ کم بر اساس باغ باران در شهرستان پرنس جورج در آمریکا اشاره می‌کنند. پس از آن، اولین استاندارد فنی طراحی جامع در سال ۱۹۹۹ توسط دولت ایالات متحده تدوین شد. مفهوم طراحی LID به سرعت توسط دولت فدرال ایالات متحده و دولت‌های ایالتی بین سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۵ تصویب شد. مطالعات مختلفی توسط (Deng et al., 2022) مورد بررسی قرار گرفته است که در اینجا به آن اشاره می‌شود: LID برای مدیریت باران و طراحی کنترل آلودگی منبع غیرنقطه‌ای توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده، ارتباط مفهوم شهر اسفنجی با مفهوم «زیرساخت سبز» که در ایالات متحده ترویج می‌شد (Deng et al., 2022). همچنین به سیستم دیگری اشاره می‌کند که می‌توان آن را در این راستا موثر دانست و آن سیستم زهکشی پایدار می‌باشد که هدف آن سازگار ساختن سیستم‌های زهکشی شهری با چرخه آب طبیعی است که در اشکال گوناگون بام سبز، کمربندسبز و نظایر آن می‌تواند تحقق یابد(Deng, et al., 2022). مورد دیگری که در این راستا شکل می‌گیرد ایدهٔ طراحی شهری حساس به آب می‌باشد که در استرالیا به دلیل مفهومی مشابه پدیدار می‌شود(Kazemi et al., 2018; Rostami et al., 2024).

در دههٔ دوم قرن ۲۱ این ایده باعث گسترش دیدگاه‌های نوآورانه شد. یکی ازاین ایده‌ها که در این پژوهش، ارتباط آن با شهر اسفنجی مد نظر قرار گرفت، زیرساخت سبز و ادبیات برخاسته از آن است. زیرساخت سبز تعبیری از حفاظت هوشمندانه در قرن بیست و یکم است(Benedict & McMahon, 2012).

شکل ۳- سیر تاریخی مفهوم شهر اسفنجی (Jamshidi, 2024)

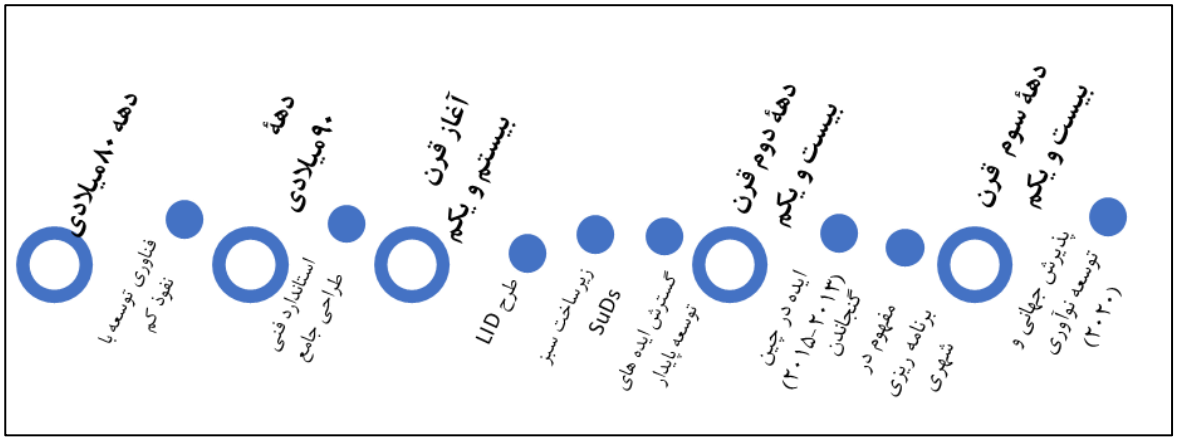

Fig 3. The Evolution of the sponge city concept

۳-۱-۶- اصول، روش‌ها، راهکارها و روش‌های تحقق شهر اسفنجی

با الهام از تفکر پایداری در ایده‌پردازی شهر اسفنجی می‌توان اصول این ایده را به شرح ذیل برشمرد (Jamshidi, 2024).

تفکر اکوسیستمی: طراحی شهرها به گونه‌ای که فرآیندهای طبیعی و اکوسیستمی در مدیریت آب لحاظ شوند.

مدیریت پایدار آب**:** استفاده پایدار از منابع آب و توجه به گردش طبیعی آن.

توجه به تنوع زیستی: حفظ و ارتقای تنوع زیستی در طراحی محیط‌های شهری.

بررسی مطالعات (Zhang et al., 2019) در این زمینه ما را به راهکارهای زیر رهنمود می‌سازند:

زیرساخت‌های سبز: استفاده از فضاهای سبز به عنوان ابزار مدیریت آب.

سیستم‌های جمع‌آوری آب باران: طراحی و ساماندهی سیستم‌های مؤثر برای جمع‌آوری و استفاده از آب باران.

آموزش و آگاهی: افزایش آگاهی عمومی در مورد اهمیت حفظ منابع آب.

برخی از روش‌های پیشنهادی مطالعات در راستای تحقق شهر اسفنجی عبارت است از:

تحلیل فضایی: بررسی و طراحی فضاهای شهری برای افزایش نفوذپذیری.

مدیریت جریان آب: بهبود و هدایت جریان‌های آب برای جلوگیری از سیلاب.

توسعه بستر آبی: ایجاد بسترهای آبی برای ذخیره آب باران.

برخی از روش‌های پیشنهادی در مطالعات (Zhang et al., 2019) را می‌توان به شرح ذیل برشمرد:

حوضچه‌های نفوذ: طراحی حوضچه‌های جمع‌آوری آب برای نفوذ و ذخیره‌سازی.

سقف‌های سبز: استفاده از گیاهان و خاک بر روی سقف‌ها برای جذب باران

محله‌های سبز: طراحی محله‌ها به گونه‌ای که فضای سبز در آن‌ها مزایای مدیریت آب را در پی داشته باشد.

مناطق خزانه‌داری آب: ایجاد فضاهایی برای ذخیره و استفاده مجدد از آب‌های بارانی.

۳-۱-۷- راهکارهای نمونه‌های جهانی برای شهر اسفنجی

شهرهای مختلفی در سراسر جهان، همچون سنگاپور، کپنهاگو ونکوور موفق به پیاده‌سازی اصول شهرهای اسفنجی شده‌اند و نتایج مثبتی را به دست آورده‌اند. این نمونه‌ها می‌توانند الهام‌بخش سایر شهرها باشند تا امکان‌سنجی خود را در این مدل توسعه بررسی کنند. در زمینه شهرهای اسفنجی، چندین شهر و کشور پیشرو وجود دارند که نمونه‌های موفقی از این رویکرد را پیاده‌سازی کرده‌اند. در ادامه، این شهرها و راهکارهای پیشنهادی آن‌ها به‌تفکیک معرفی شده است:

چین: به عنوان کشور پیشرو در شهرهای مختلفی ایدهٔ شهرهای اسفنجی با راهکارهای مختلف را اجرا نموده است. به عنوان مثال راهکارها و روش‌های پیشنهادی در شهر چنگدو به شرح ذیل است: طراحی فضاهای سبز(ایجاد پارک‌ها، باغ‌ها و مناطق سبز که به جذب و ذخیره آب باران کمک می‌کند)، سیستم‌های لوله‌کشی هوشمند (استفاده از فناوری‌های پیشرفته برای مدیریت و هدایت آب باران، استخرهای بی‌هوازی، مجسمه‌های هیدرولیک، بسترهای حوضچه‌های گیاهی، استخرهای ماهی و تأسیسات استفاده مجدد از آب از بالا به پایین در امتداد زمین)، ساختارهای نفوذپذیر(استفاده از مصالح نفوذپذیر در معابر و پارکینگ‌ها، پارک آبی زنده، جاده اسفنجی) (Greening Solution, 2023).

راهکارها و روش‌های پیشنهادی شنزن[7]استفاده از حوضچه‌های ذخیرهٔ آب (ایجاد حوضچه‌های ذخیره آب باران برای استفاده در آبیاری و کنترل سیلاب)، مدیریت آب باران بر اساس فرایندهای طبیعی(توسعه زیرساخت‌های طبیعی برای مدیریت آب و افزایش کیفیت آب) (Wang et al., 2022).

[7]Shenzhen

ایالت متحده آمریکا: در این میان می‌توان به شهر سیاتل و پورتلند اشاره نمود. راهکارها و روش‌های پیشنهادی در شهر سیاتل[8] شامل سقف‌های سبز(تشویق به ایجاد سقف‌های سبز در ساختمان‌ها برای جذب آب باران) و حوضچه‌های جمع‌آوری آب باران(طراحی حوضچه‌های جمع‌آوری آب باران برای استفاده در آبیاری و کاهش سیلاب) است(Urbanist, 2023).

راهکارها و روش‌های پیشنهادی در شهر پورتلند[9]: استفاده از فضای سبز در طراحی شهری(توسعه مناطق سبز و ایجاد باغ‌های بارانی برای جذب و فیلتر کردن آب باران) و سیاست‌های تشویق به کاربرد موادی با نفوذپذیری بالا(استفاده از مصالح و گزینه‌های طراحی که آب را به داخل زمین هدایت می‌کنند) (O'Donnell et al., 2020).

آلمان: راهکارها و روش‌های پیشنهادی برای شهر هامبورگ[10]: سیستم‌های مدیریت آب شهری(استفاده از سیستم‌های هوشمند برای کنترل جریان آب و زهکشی سبز)، فضاهای سبز، بام‌های سبز و نماهای سبز(تشویق به طراحی بام‌های سبز و ایجاد پارک‌های جذب‌آب برای کنترل سیلاب و بهبود کیفیت آب).

هلند: راهکارها و روش‌های پیشنهادی برای شهر روتردام[11]: طرح‌های دیجیتال برای مدیریت آب(ارتباط بین سیستم‌های آب شهری و اطلاعات از طریق سیستم‌های دیجیتال)، توسعه پروژه‌های نوآورانه مانند لجن‌های آب‌زیرزمینی(استفاده از فناوری‌های نوین برای مدیریت آب‌های سطحی و زیرزمینی، چمن‌های لانه زنبوری و حذف سنگفرش)، کانال‌های جذب موثر آب باران به واسطهٔ ایجاد تراس‌ها، ایجاد مسیرهای خاص (مسیرهای خاص کوهستانی)(SWM, n.d).

ژاپن: راهکارها و روش‌های پیشنهادی برای شهر توکیو[12]: استفاده از مخازن زیرزمینی (توسعه مخازن زیرزمینی برای ذخیره و مدیریت آب باران)، فضاهای عمومی سبز(افزایش مساحت فضاهای عمومی سبز برای بهبود کیفیت آب و کاهش سیلاب) (INCAS, 2019).

این نمونه‌ها و راهکارها نمایانگر تلاش‌های جهانی برای تحقق مفاهیم شهر اسفنجی و مدیریت پایدار آب باران می‌باشند. هر یک از این شهرها به شیوه‌ای خاص اقدام کرده‌اند که می‌تواند الگوی مناسبی برای دیگر شهرها در راستای مدیریت آب و مقابله با مشکلات ناشی از مباحث آبی باشد.

۳-۲- مفهوم‌شناسی زیرساخت سبز

۳-۲-۱- مفهوم ساختار سبز

ساختار سبز شهری را نباید یک رویکرد جدید دانست منشاء آن در دو رویکرد: ۱- زیباسازی شهری در جهت بهره‌گیری برای شهروندان ۲- حفاظت از مناطق و منابع طبیعی است(Benedict & McMahon, 2012). از این رو این مفهوم را باید برخاسته از رویکرد توسعه پایدار دانست که برای حل مشکلات زیست محیطی شهرها به ویژه منابع آبی کارساز بوده‌است.

زیرساخت سبز رویکردی برای مدیریت آب است که از چرخه طبیعی آب محافظت، بازیابی یا تقلید می‌کند. زیرساخت سبز موثرو اقتصادی است و ایمنی و کیفیت زندگی جامعه را افزایش می‌دهد(American rivers, nd). (Sun et al., 2020) ضمن بررسی تاریخچه زیرساخت سبز دو تعبیر را برای این واژه ترکیبی بررسی کردند: زیرساخت سبز به عنوان اسم و زیر ساخت سبز به عنوان صفت. هنگامی که زیرساخت سبز به عنوان یک اسم استفاده می شود، به «شبکه فضای سبز متشکل از مناطق طبیعی و سایر فضاهای باز به هم پیوسته، از جمله مناطق طبیعی، مناطق حفاظت شده عمومی و خصوصی و زمین‌های مولد با ارزش‌های حفاظتی اشاره دارد (Woznicki et al., 2018). هنگامی که زیرساخت سبز به عنوان یک صفت استفاده می‌شود، نشان دهنده

[8] Seattle
[9] Portland
[10] Hamburg
[11] Rotterdam
[12] Tokyo

یک شبکه سیستم باز محافظت شده است که از ارزش منابع طبیعی محافظت می‌کند و عملکردهای بقای انسان‌ها، حیوانات و گیاهان را حفظ می‌کند و زیرساخت سبز برنامه‌ریزی شده و هنجاری است(Lafortezza Alves et al., 2018; Bohns, 2020 et al., 2013;).

با درک عمیق زیرساخت سبز، از آن به عنوان یک اقدام مهم برای حفاظت صحیح از زمین و هدایت توسعه پایدار شهر در آینده استفاده خواهد شد.

۳-۲-۲- مزایا و عملکرد زیرساخت‌های سبز

بر اساس گزارش آژانس محیط زیست اروپا (EEA, 2011) زیرساخت سبز دارای ٤ عملکرد می‌باشد: ۱- ارتقاء کیفیت زیست محیطی۲- چند عملکردی بودن ۳- مکان‌سازی ٤- حفاظت هوشمند.

راهنمای زیرساخت سبز برای مدیریت آب سازمان ملل متحد(UNEP, 2014) عملکرد زیرساخت سبز را اینچنین معرفی می‌کند: ۱- سازگاری با تغییرات اقلیمی۲- ارتقاء کیفیت منابع آبی ۳- مزایای تفریحی و گردشگری ٤- ارتقاء تاب‌آوری در برابر شوک‌های آب و هوایی ٥- تنوع.

آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا (EPA, 2015) عملکرد و مزایا زیرساخت سبز نسبت به زیرساخت خاکستری را به شرح ذیل بر می‌شمارد: ۱- صرفهٔ اقتصادی ۲- ارتقای کیفیت هوا/ تغییرات اقلیمی ۳- ارتقای کیفیت و کمیت آب ٤- ارتقای کیفیت زندگی ٥- فرصت‌های آموزشی.

۳-۲-۳- اشکال ساختار سبز

شبکه ساختار سبز: طیف گسترده‌ای از اکوسیستم‌های بومی طبیعی و بازسازی شده و ویژگی‌های چشم‌انداز از جمله منابع و مناطق طبیعی حفاظت شده مانند تالاب‌ها، جنگل‌ها، آبراهه‌ها و زیستگاه‌های حیات وحش را در بر می‌گیرد. اراضی حفاظتی عمومی و خصوصی مانند پارک‌های ملی و دولتی، مناطق طبیعی حفاظت شده، راهروهای حیات وحش، مناطق بیابانی، چشم اندازها و مسیرهای سبز است. از نظر شکلی شبکهٔ ساختار سبز در شبکه‌ای از قطب، ارتباطات و سایت‌ها است(Benedict & McMahon, 2012). مراکز را می‌توان تحت عنوان مکان‌های سبز(موضع)، ارتباطات را با مسیر سبز (مسیر) و سایت‌ها را با پهنهٔ سبز (حوزه) تعریف کرد (Jamshidi & Ghalenoee, 2010)

سیر تاریخی ساختار سبز: ساختار سبز مفهومی جدید در ادبیات شهرسازی نمی‌باشد و می‌توان آن را در تغییرات الگوی فضایی شهر در ارتباط با طبیعت و فضای سبز از دوران پیش از رنسانس جستجو نمود. در دوران پیش از رنسانس ارتباط مطلوب شهر و بستر طبیعی تعاملی میان فضای ساخته شده و فضای طبیعی باز بود که در دوران رنسانس با اعمال نظم سادهٔ هندسی و با جایگزینی طبیعت بکر به جای فضای ساخته شده در قالب نهضت منظرسازی خود را نشان داد. در قرن ۱۹ میلادی با رخداد انقلاب صنعتی و کاهش فضاهای طبیعی اقدامات متفکران و متخصصان شهری آغاز شد که از نمونه این تلاش‌ها می‌توان به تلاش اندروجکسن دانینگ[13] و جنبش باغسازی اشاره کرد که بعدها توسط فردریک اولمستد[14] ایدهٔ واردکردن فضاهای سبز به دل شهرها با نهضتی به نام پارکسازی گسترش یافت. در اوایل قرن ۲۰ام میلادی ایده‌هایی مانند باغشهر ابنزر هاوارد[15] و همچنین شهر پهن دشت، ایدهٔ باغشهر شهر عمودی لوکوربوزیه[16] مطرح شد. این امر در قرن ۲۱ میلادی با مفاهیم توسعهٔ پایدار، اکوشهر، شهر سبز، بایوفیلیک[17] و

[13] Andrew Jackson Downing
[14] Frederick Law Olmsted
[15] Ebenezer Howard
[16] Le Corbusier
[17] Biophilic

نظایر آن توسعه یافت (Khatami & Mosavinejad, 2022) . با تأکید بر مسیر سبز در این پژوهش، می‌توان سه نسل برای مسیرهای سبز در نظر گرفت: ۱- نسل اول: محورهای دید، بلوارها، پارک‌های خطی و مسیرهای زیبا (محورهای دید و بلوارها در اروپا و پارک‌های خطی در آمریکا)، ۲- نسل دوم: مسیرهای سبز تفریحی جهت‌دار ۳- مسیرهای سبز چند منظوره (در شکل ٤ شبکهٔ مسیرهای سبز نشان داده‌شده‌است)(Jamshidi & Ghalenoee, 2010).

شکل ٤- عناصر ساختار سبز (Benedict & McMahon, 2012)

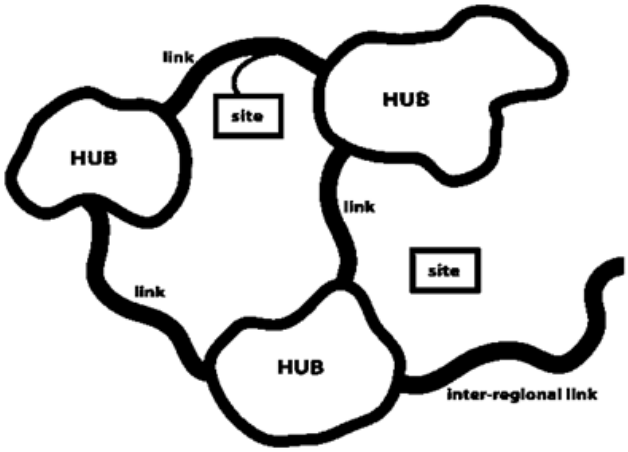

Fig 4. Green structure elements

جدول (۱) ویژگی‌های نسل‌های مختلف مسیر سبز را به اختصار توضیح می‌دهد. این سیر تغییر الگو از الگوی خطی به الگوی شبکه‌ای با عملکرد چند منظوره را نشان می‌دهد.

جدول ۱- سیر تاریخی مفهوم مسیر سبز(Jamshidi & Ghalenoee, 2010)

Table 1. The evolution historical course of the greenway concept

الگو		طول	مسیر سبز تراکم ساخت پیرامونی	فضای مورد نیاز برای ساخت	تأمین دسترسی	عملکرد
نسل اول	الگوی خطی	طولانی	بالا	کم	زیاد	**محورهای دید**
نسل دوم	الگوی حلقوی	متوسط	متوسط	کم	متوسط	**محورهای فراغتی و گردشگری**
نسل سوم	الگوی شبکه‌ای	کوتاه	متوسط	متوسط	زیاد	**محورهای چند منظوره**

۳-۳- شهر اسفنجی و مسیرهای سبز شهری راهی به سوی ارتقاء کیفیت زیست شهری

بر اساس آنچه بررسی شد، ایدهٔ شهر اسفنجی به عنوان راه حلی برای شهرهای دارای کمبود آب و بهبود کیفیت زندگی در آنها به کار می‌رود. افزون بر این شهر اسفنجی به مفهومی اطلاق می‌شود که در آن طراحی شهری به گونه‌ای است که بتواند به طور مؤثری آب باران را جذب، ذخیره و مدیریت کند. این شهرها با استفاده از فضاهای سبز و روش‌های پایدار، توانایی بیشتری در مقابله با سیلاب‌ها و دیگر چالش‌های زیست‌محیطی اعم از خشکسالی و کمبود آب دارند. مسیرهای سبز خطی نیز به عنوان شبکه‌های سبز و فضاهای عمومی تعریف شدند که به عنوان گذرگاه عمل می‌کنند تا شهروندان بتوانند به راحتی بین مناطق مختلف شهر حرکت

کنند و به فضای سبز دسترسی داشته باشند. این مسیرها علاوه بر تأمین فضای مناسب برای پیاده‌روی، دوچرخه‌سواری و فعالیت‌های دیگر، می‌توانند به بهبود کیفیت هوا، کاهش گرمای شهری، حفظ تنوع زیستی، کنترل، هدایت و ذخیرهٔ آب کمک کنند. مسیرهای سبز خطی می‌توانند بخشی از سیستم مدیریت آب در شهر اسفنجی باشند. این مسیرها می‌توانند به جذب آب باران کمک کنند و در نتیجه به کاهش خطر سیلاب و تقویت اکوسیستم‌های محلی منجر شوند. همچنین، از طریق طراحی مناسب، مسیرهای سبز خطی می‌توانند از جریان آب و نفوذ آن به زمین‌های زیرین حمایت کنند، به این ترتیب به تقویت عملکرد شهر اسفنجی کمک می‌کنند. افزون بر این مسیرهای سبز و شهر اسفنجی هر دو، به طور موثر بر کیفیت زندگی شهری تأثیر گذارند و می‌توانند به چالش‌های محیطی و اجتماعی شهرها پاسخ دهند. طراحی شهری هوشمند و یکپارچه می‌تواند این دو رویکرد را در کنار هم به خدمت گیرد و بهبود محیط زیست و زندگی شهری را تضمین کند.

ارتباط بین این دو مفهوم را می‌توان با تأکید بر اثرات مسیر سبز بر شهرها در ٤ حوزهٔ زیر بیان نمود: ۱- ارتقاء کیفیت‌های زیست محیطی(ایجاد مناطق حساس زیست محیطی[18]، حفاظت از تنوع زیستی، ارتقا کیفیت منابع آبی، ارتقاء کیفیت هوا، ارتقاء صوت، کارایی انرژی). ۲- کارایی اقتصادی (ارتقاء اقتصاد محلی، ارزش افزودهٔ زمین، درآمدزایی محلی، کاهش هزینه‌های حمل و نقل عمومی، هزینه‌های درمانی، هزینه‌های چرخه حیات). ۳- پویایی اجتماعی (سرزندگی و پویایی زندگی جمعی، پیوستگی اجتماعی، آموزش).٤- سلامت و بهداشت (Jamshidi & Ghalenoee, 2010; Dehghanzad et al., 2018).

۳-۳-۱- اصول طراحی مسیرهای سبز در راستای هماهنگی با اصول طراحی شهر اسفنجی

با توجه به مبانی مطرح شده برای ساختار سبز و مسیر سبز، ۵ اصل برای طراحی که مبنای سیاست‌گذاری، ضوابط و برنامه‌های عملیاتی است به شرح ذیل پیشنهاد می‌شود(شکل ۵):

طراحی برای هماهنگی با طبیعت و محیط زیست (طراحی سبز): در راستای حفاظت و استفاده بهینه از منابع طبیعی (حفاظت از منابع آب(سطحی و جاری) و خاک و نظایر آن، طراحی در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر).

طراحی بر اساس حمل و نقل پاک (طراحی برای سهولت تردد پیاده و دوچرخه و حمل و نقل عمومی).

طراحی کارا (طراحی اقتصادی).

طراحی پویا (اصل تنوع: تنوع زیستی، کالبدی، فضایی، کاربری، حرکتی، جمعیتی؛ اصل نفوذپذیری: بصری و کالبدی؛ اصل پیوستگی: پیوستگی طبیعی، کالبدی-فضایی، حرکتی، جمعیتی؛ اصل امنیت)

اصل طراحی برای سلامت و بهداشت محیط (طراحی انسانی: اصل انسان‌محوری، اصل کاهش آلودگی‌های منابع آب، خاک و هوا، فاضلاب و نظایر آن) (Jamshidi & Ghalenoee, 2010).

۳-۴- تجلی الگوی مسیر سبز اسفنجی در شهرهای کویری

شهرهای کویری به خاطر شرایط اقلیمی، با مشکلات زیست محیطی مختلفی روبرو هستند:

۱- کمبود منابع آبی: در این مناطق بارش باران به مقدار بسیار کم و نامنظم است که باعث کمبود آب شرب و کشاورزی می‌شود.

۲- خشکسالی‌های مکرر: خشکسالی‌های طولانی‌مدت می‌تواند به کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و نابودی منابع آبی منجر شود.

۳- آسیب به محیط زیست: استخراج بیش از حد آب و تغییرات کاربری زمین می‌تواند به تخریب اکوسیستم‌های طبیعی و زیستگاه‌های محلی منجر شود.

٤- افزایش دما و تغییرات اقلیمی: گرم شدن زمین و تغییرات اقلیمی موجب افزایش دما و ایجاد تنش‌های آبی می‌شود.

[18] ESA: Environmentally Sensitive Areas

شهر اسفنجی با استفاده از ساختارهای سبز به عنوان یکی از مهمترین عناصر سازندهٔ خود می‌تواند به عنوان یک راه‌حل جامع و کارآمد برای مقابله با مشکلات آب در شهرهای کویری در نظر گرفته شود. برخی از روش‌های به کارگیری این مفهوم در شهرهای کویری بر اساس آموخته‌های شهر اسفنجی شامل موارد ذیل است:

جمع‌آوری آب باران: با طراحی سیستم‌های مناسب برای جمع‌آوری باران، می‌توان آب باران را در زمان‌های بارندگی ذخیره کرد. این آب می‌تواند به عنوان منبعی برای آبیاری فضای سبز و مصارف خانگی در ایام خشکی استفاده شود.

توسعه فضای سبز: ایجاد باغ‌های بارانی، پارک‌ها و فضاهای سبز می‌تواند به جذب آب باران کمک کرده و دما را کنترل کند. فضای سبز همچنین می‌تواند به بهبود کیفیت هوای شهر و کاهش آلودگی کمک کند.

استفاده از مواد نفوذپذیر: استفاده از مصالح و مواد با ویژگی‌های نفوذپذیر در ساخت‌وساز، به جذب و نگهداری آب کمک می‌کند. این کار می‌تواند بارش آب را به زمین منتقل کند تا منابع آبی زیرزمینی دوباره تغذیه شوند.

نظام مدیریتی هوشمند: با بهره‌گیری از فناوری و داده‌های بزرگ، می‌توان به پیش‌بینی بارش‌ها و مدیریت بهینه آب پرداخت. سیستم‌های هوشمند می‌توانند به شناسایی نقاط ضعف و تقویت زیرساخت‌های آبی کمک کنند.

آموزش و فرهنگ‌سازی: آموزش ساکنان شهرهای کویری در مورد روش‌های بهره‌برداری بهینه از آب و اهمیت حفظ منابع آبی می‌تواند به افزایش آگاهی و مشارکت آنها در حفاظت از آب کمک کند.

شکل ۵- کیفیت‌های مشترک شهر اسفنجی و مسیرهای سبز (Jamshidi, 2024)

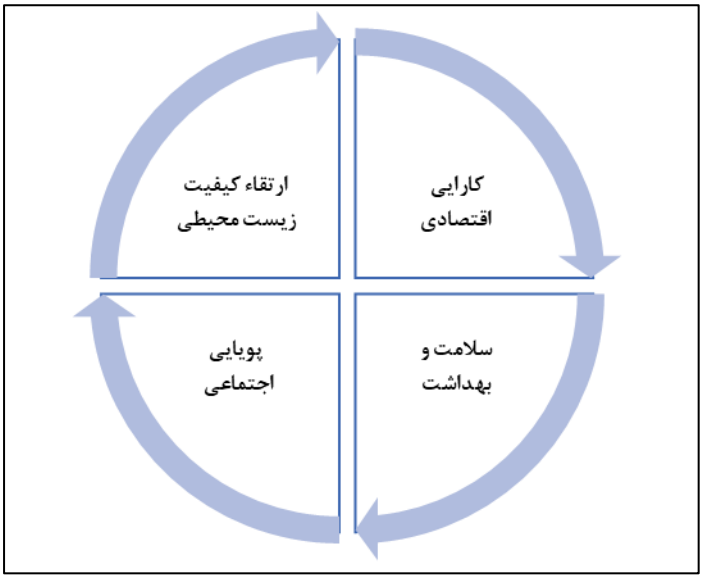

Fig 5. Common qualities of sponge city and greenways

۴- نتایج و بحث

۴-۱- معرفی مادی‌های شهر اصفهان

رودخانهٔ زاینده‌رود به عنوان یک شریان حیاتی در فلات مرکزی مطرح بوده‌است. طول این رودخانه را با پیچ و خم‌های آن از ۳۶۰ تا ٤۲۰ کیلومتر نوشته‌اند، اما از این فاصله به خط مستقیم حدود ۲۷۰ کیلومتر است(Honarfar, 1992). به طور کلی تعداد ۱٥٤ نهر یا مادی از زاینده رود جدا می‌شود که به طومار شیخ بهایی تعداد این نهرها ۷۸ عدد ذکر شده که ٤۷ نهر از سمت چپ و ۳۸ نهر از سمت راست منشعب می‌شوند. این تقسیم براساس ۳۳ سهم اصلی انجام می‌شود و هر سهم، خود تقسیمات فرعی دیگری هم داشته است. از این تعداد مادی‌ها اکنون ۱۰ مادی در بافت کنونی شهر اصفهان عبور می‌کنند که جهت حرکت آنها از جنوب غربی به شمال شرقی بوده است و طبق تقسیم‌بندی فرعی دیگر به نام لت تمام اراضی، باغ‌ها و خانه‌های شخصی مشروب می‌شده

است (Ahmadi, 2015; Shafaghi, 2001). در ایران باستان برای رساندن آب به روی زمین، جوی می‌کندند که پاره‌ای از آنها هنوز آب روان است مانند مادی‌های اصفهان که باید زمان مادها کنده باشند(Shafaghi, 2001). بنابراین اطلاق لفظ مادی بر نهرهایی که آب زاینده‌رود را به زمین‌های زراعی می‌رسانند، شاید اشاره‌ای به ایجاد آنها در زمان مادها باشد. مادی به لفظ فارس قدیم، ممر و مجرای آب‌ها را گویند که از رودخانه کوچکتر و از نهر بزرگتر باشد (Ahmadi, 2015). در لغت نامه دهخدا واژه مادی چنین معنی شده است: کانال اصلی آب، در تداول اصفهانیان جوی بزرگ و مجرای آب که از نهری برای زراعت عمومی قرا و قصبات جدا نمایند. در کتاب اصفهان تالیف هنرفر، کلمه‌ی مادی اصطلاحی محیطی و به معنی نهرآب در اصفهان است. تقسیم آب زاینده‌رود که از نمونه‌های برجسته میراث فرهنگی ما در مدیریت منابع آب است، به طور سنتی به نام شیخ بهایی معروف شده است.

سیرتکاملی مادی‌ها: بر اساس مطالعات انجام شده توسط(Jamshidi & Ghalenoee, 2010) چهار دورهٔ تاریخی برای مادی‌ها در شهر اصفهان قابل شناسایی است:

دورهٔ اول: مادی‌ها به عنوان مسیرهای آبی هستند که با عبور از زمین‌های کشاورزی آنها را به فراخور از آب بهره‌مند می‌ساختند. این دوره حداقل به دوران ساسانی باز می‌گردد و تا آغاز دوران صفویه ادامه می‌یابد.

دورهٔ دوم: این دوره از مادی‌ها به عنوان مسیرهای سبز به دوران صفویه باز می‌گردد. در این دوران به دنبال طراحی شهری جدید، باغ‌ها و محلات جدید به شهر اضافه شد و لزوم نظم‌دهی جدید برای هدایت آب رودخانه الزامی گردید. در دوران صفویه برای اولین بار عناصر و منابع آب طبیعی به عنوان عناصر شهری مطرح شدند. در این دوران حاشیه زاینده رود و بیشه‌های پیرامونی و مادی‌ها با ایجاد پوشش گیاهی محیط مطلوبی را برای گذران اوقات فراغت فراهم آوردند. در این دوران مادی‌ها دارای نقش زیرساختی (سیستم عبور و مرور، آبرسانی، هدایت آب های سطحی)، اجتماعی (ارتباط محلات و پیوستگی اجتماعی، ایجاد فضاهایی برای گذران اوقات و برگزاری مراسم و جشن‌ها)، کالبدی(ارتباطی، پیوستگی کالبدی)، اقتصادی (تقویت کشاورزی)، زیست محیطی (سیستم تهویه مطبوع، ایجاد پیوستگی میان عناصر طبیعی داخل و خارج شهر)، تفریحی و گردشگری بودند.

دورهٔ سوم: مادی‌ها به عنوان معابر سواره مورد استفاده قرار گرفتند. با ورود ماشین به شهرهای ایران و توسعه و تخریب زمین‌های کشاورزی، مادی‌ها محل عبور و پارک وسایل نقلیه شدند و این امر تخریب این عناصر را به دنبال داشت.

دورهٔ چهارم: احیا و بازآفرینی مادی‌ها به عنوان معابر با اولویت پیاده، در این دوران مورد توجه مدیران شهری قرار گرفت. در این دوران زیباسازی شهری و تبدیل برخی از این معابر به محورهای پیاده مد نظر بوده است (شکل ٦).

۴-۲- مادی‌ها به عنوان مسیرهای سبز اسفنجی سبز

مادی‌های شهر اصفهان به دلیل ساختار خطی و جهت حرکت جنوب غربی به شمال شرقی و شرق پتاسیل تشکیل شبکه را در شهر اصفهان فراهم می‌آورند. اگر چه این محورها در بسیاری از مناطق شهری به واسطهٔ حضور اتوبان‌ها و مسیرهای اصلی شهر از بین رفته‌اند ولی آزادسازی آنها در ایجاد یک شبکه پیوسته می‌تواند نقش عنصر ارتباط در شهرهای اسفنجی را که یکی از مهمترین عناصر و اشکال این الگو است را ایفا کند. عناصر سازندهٔ مادی‌ها (مسیر، لبه (جداره) و رابط) می‌تواند نقش مهمی در ایجاد و تقویت عناصر مورد نیاز شهر اسفنجی داشته باشد. این دو الگو در تطابق با هم نقش موثری بر ارتقاء کیفیت زیست شهری دارند. مسیرهای سبز اسفنجی به عنوان الگو در طراحی مادی‌ها با تمرکز بر سه رکن مسیرها، مراکز و پهنه‌ها الگویی نوین و بومی را برای شهر اصفهان و ارتقاء زیست بوم این شهر و زیست شهروندان تأمین می‌کنند. در این میان مورفولوژی مادی‌ها و نقش زیست محیطی آنها فرصت‌های مناسبی را برای تحقق اصول شهر اسفنجی در اصفهان به عنوان یک شهر کویری ایجاد کرده‌اند(شکل ۷).

۴-۳- راهکارهای طراحی مسیرهای سبز اسفنجی

بر اساس ویژگی‌ها و اصول طراحی مسیرهای سبز و اصول شهر اسفنجی می‌توان برای عناصر سازندهٔ مادی‌ها راهکارهای زیر را پیشنهاد داد:

۴-۳-۱- راهکارهای طراحی جداره‌ها و پوسته‌ها

- بام سبزو استفاده از پشت بام‌های گیاهی که آب باران را جذب کرده و گرما را کاهش می دهند.
- بام‌های انرژی‌زا و بام‌هایی که با پنل‌های خورشیدی ترکیب شده‌اند و می‌توانند به تأمین انرژی پاک کمک کنند.
- بام‌های باغی و ایجاد باغ‌های عمودی یا باغچه‌های روی بام که می‌توانند آب باران را جذب کنند و به عایق‌بندی ساختمان‌ها کمک کنند. این فضاها می‌توانند شامل گیاهان گل‌دار و سبزیجات باشند.
- جداره‌ها و دیوارهای سبز با استفاده از گیاهان بومی برای کاهش دما و بهبود کیفیت هوا. دیوارهای سبز در ساختمان‌ها و بام‌های سبز می‌توانند به جذب آب و ایجاد سایه کمک کنند.
- دیوارهای زیستی: عناصر منظرطراحی شده برای تمرکز یا حذف زباله و آلودگی از رواناب سطحی.
- استفاده از مصالح محلی و پایدار: استفاده از مصالح چون آجر، سنگ و ملات‌های خمیری یا گِل که در منطقه موجود هستند و با رنگ‌های طبیعی که به محیط هویت می‌دهند.
- استفاده از مصالح انرژی‌زا و استفاده از مصالحی که گرما را جذب و به آرامی آزاد می‌کنند مانند سنگ‌های طبیعی و آجرهای با نفوذپذیری بالا.
- استفاده از رنگ‌ها و پالت‌های رنگی متناسب با اقلیم برای مثال برای شهر اصفهان استفاده از رنگ‌های روشن که به انعکاس حرارت کمک می‌کند و دما را کاهش می‌دهد. انتخاب رنگ‌های خاص با هدف زیباسازی مانند رنگ‌های خاکی یا سبز.
- استفاده از عایق‌های حرارتی و مناسب با اقلیم و استفاده از مصالح عایق برای ساخت بناها به‌منظور کاهش مصرف انرژی برای مثال استفاده از عایق های طبیعی و بومی مانند کاه‌گل برای جلوگیری از اتلاف انرژی و بروزسازی روش‌های بومی و معماری بومی.

شکل ٦- شبکه مادی‌های اصفهان(ماخذ: نگارنده برگرفته از طرح درایگاه نظر، (Esfahan Municipality (2020)

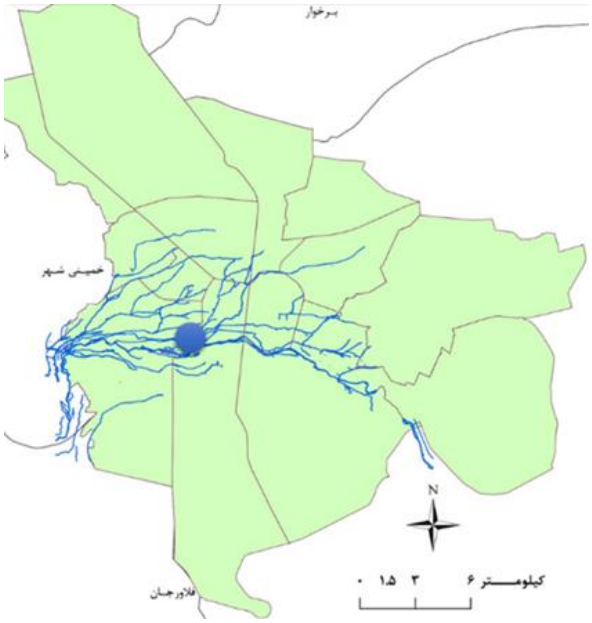

Fig 6. Maddeis networks of Isfahan

شکل ۷- پتانسیل مسیرهای سبز اسفنجی منطقه ۱ اصفهان(Jamshidi & Ghalenoee, 2010)

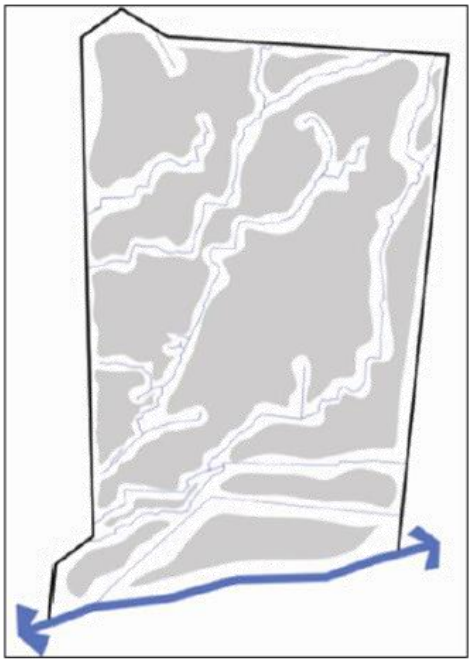

Fig 7. The potential of spongy greenways in the 1st region of Isfahan

۴-۳-۲- راهکارهای فرم و شکل‌گیری فضاها

- طراحی فرم‌های دوپوسته در جداره‌ها به منظور ایجاد لایه‌ای از هوا برای عایق‌بندی‌ها در جداره‌ها.
- طراحی فرم ساختمان‌ها و الگوهای ساختمانی و سازمان فضایی بر اساس نور طبیعی و استفاده از رون (جهت‌گیری مناسب ساختمان متناسب با اقلیم و توجه به زوایا مناسب و ابعاد مناسب بازشوها.
- استفاده از سازه‌های سبز و طراحی سازه‌های با تأکید بر سیستم‌های بیومتریکی و فناوری‌های سبز.

۴-۳-۳- راهکارهای مصالح و رنگ‌ها

- استفاده از فناوری‌های نوین در استفاده از مصالح بومی و بروزسازی روش‌های بومی.
- استفاده از مصالح با ظرفیت حرارتی مناسب برای مبلمان شهری: استفاده از مبلمان شهری از جنس چوب یا فلزات مقاوم در برابر رطوبت با طراحی ارگونومیک. همین‌طور نصب نیمکت‌ها و سایه‌بان‌ها در مسیرهای راه‌ها.

۴-۳-۴- راهکارهای مدیریت منابع طبیعی (آب، هوا، نور)

- بارش سنجی و مدیریت آب در ساختمان به منظور استفاده و بازیافت آب و استفاده از تجهیزات بازیافت آب.
- استفاده از سیستم‌های آبیاری هوشمند برای فضاهای سبز و فضاهای باز عمومی: استفاده از سیستم‌های آبیاری قطره‌ای و بازیابی آب باران برای آبیاری گیاهان در فضای سبز.
- تالاب‌های ساخته شده و استفاده از سیستم‌های مهندسی شده‌ای که آب طوفان را تصفیه می‌کنند و در عین حال زیستگاه هم فراهم می‌کنند.
- پارک‌های بازیافت آب و طراحی به گونه‌ای که باران را جمع‌آوری و به آب‌های زیرزمینی تزریق کنند. این پارک‌ها می‌توانند شامل حوضچه‌های ذخیره‌سازی و گیاهان بومی باشند.

- حوضچه‌های زیستی: حوضچه‌هایی که از گیاهان آبزی برای تصفیه آب و جذب آلاینده‌ها استفاده می‌کنند. این حوضچه‌ها می‌توانند به عنوان فضاهای تفریحی و آموزشی نیز عمل کنند.
- آب‌نماهای باران: طراحی آب‌نماهایی که آب باران را جمع‌آوری و از طریق زیبایی‌شناسی به منظر شهری اضافه می‌کنند.
- مسیل‌های سبز: کانال‌های طبیعی که قادر به جمع‌آوری و هدایت آب باران به سمت ذخیره‌گاه‌های جداگانه یا منابع آب زیرزمینی هستند.
- مخازن زیرزمینی آب: ساخت مخازن برای ذخیره آب باران و تأمین آب مورد نیاز در مواقع کم آبی.
- کانال‌های زیرزمینی: سیستم‌های جمع‌آوری آب برای هدایت آن به مخازن و حوضچه‌ها.
- استفاده از تهویه طبیعی و طراحی ساختمان‌ها با در نظر گرفتن جریان هوای طبیعی برای خنک کردن فضا مانند ایجاد پاسیوها و حیاط‌های داخلی که به جریان هوا کمک می‌کند.
- استفاده از پنل‌ها و چراغ‌های خیابانی با فناوری در جهت کاهش مصرف انرژی و کاهش مصرف سوخت‌های تجدیدناپذیر، استفاده از چراغ‌های کم‌مصرف و قابل تنظیم که نور و انرژی کمتری مصرف کنند.

۴-۳-۵- راهکارهای پوشش گیاهی

- انتخاب گیاهان بومی: استفاده از گیاهان مقاوم به کم‌آبی و بومی که با اقلیم منطقه سازگارند.
- گلدان‌های چرخان: گلدان‌هایی که به صورت مستقل قابلیت حرکت دارند و می‌توانند به جذب آب باران و ایجاد رنگ و زندگی در معابر و فضاهای عمومی کمک کنند.
- گلدان‌های آب‌گیر: گلدان‌هایی که با طراحی خاص برای جمع‌آوری آب باران و تأمین رطوبت گیاهان استفاده می‌شوند.
- الگوهای طراحی متناسب با ساختار شهر اسفنجی برای مثال طراحی خطی مسیرهای سبز و ایجاد شبکهٔ به هم پیوسته از مسیرها و فضاهای سبز در راستای افزایش نفوذپذیری پیوسته آب، گذرگاه‌های پیاده‌رو سبز و توسعه پیاده‌روها با پوشش گیاهی برای جذب آب باران و بهبود تهویه هوا. این گذرگاه‌ها می‌توانند به عنوان مسیرهای راحت برای پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری عمل کنند.
- طراحی شبکه‌ای مسیرهای سبز و فضاهای سبز برای استفاده از حمل و نقل پاک برای مثال مسیرهای پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری.

۴-۳-۶- راهکارهای عملکردی

- استفاده از فضاهای چندمنظوره و طراحی فضاهایی که بتوانند همزمان به عنوان پارک، باغ یا بازار مصرف شوند.
- ایجاد و طراحی محل‌های استراحت و نمایش به منظور ایجاد مکان‌هایی برای تجمع، کنسرت‌ها و نمایشگاه‌های موقت که می‌توانند به جذابیت و کاربری بیشتر فضاها کمک کنند.
- باغ‌های محلی و عمومی به منظور تبادل ایده‌ها و ایجاد باغ‌های جمعی که در آن ساکنان می‌توانند گیاهان خود را بکارند و در فعالیت‌های اجتماعی مشارکت کنند و در آنها فعالیت‌های اجتماعی و فرهنگی انجام دهند.
- باغ‌های آموزشی و پژوهشی به منظور ایجاد فضایی برای آموزش جامعه درباره کشاورزی پایدار، اکوسیستم‌ها و روش‌های مدیریت منابع طبیعی.
- برگزاری کارگاه‌ها و جلسات مشاوره برای جلب نظر و پیشنهادات شهروندان در طراحی مسیرهای سبز.
- ایجاد جوامع محلی و اینجیوها (NGO) و سازمان‌های دولتی و غیردولتی و مردمی به منظور افزایش مشارکت مردم در نگهداری و توسعه فضاهای سبز.

۴-۳-۷- راهکارهای مدیریتی و نگهداری

- برنامه‌ریزی مناسب برای نگهداری و طراحی برنامه‌هایی برای نگهداری مستمر از فضاهای سبز و تجهیزات، با توجه به فصل‌ها و وضعیت آب و هوا.
- نظارت دائمی و بررسی سیستم.

۵- نتیجه‌گیری

همان گونه که بررسی شد، شهرهای اسفنجی به عنوان یک راهکار نوین برای مدیریت منابع آبی و مقابله با چالش‌های شهری به ویژه مشکلات زیست محیطی، اجتماعی، اقتصادی و سلامت و بهداشت مطرح هستند. با توجه به افزایش تهدیدات ناشی از تغییرات اقلیمی و کمبود منابع آب، توسعه این ایدهٔ شهرسازی ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به عناصر سازندهٔ شهر اسفنجی و نقش زیرساخت‌های سبز در ایجاد مسیرهای سبز و عنصر ارتباط شهر اسفنجی، می‌توان ایدهٔ مسیر سبز اسفنجی را به عنوان الگویی کارامد برای عناصر خطی طبیعی در شهرها پیشنهاد کرد. با ایجاد زیرساخت‌های لازم به منظور بهره‌برداری مؤثر از منابع آب با ایدهٔ مسیرسبز اسفنجی می‌توان به ساخت شهری دستیابی پیدا کرد که نه تنها در برابر چالش‌های کلان مقاوم باشد بلکه باعث بهبود کیفیت زندگی شهروندان، کارایی اقتصادی، پویایی، سرزندگی و سلامت شهری انجامد. برای اجرایی شدن ایده‌های شهرهای اسفنجی و مسیرهای سبز شهری لازم است سیاست‌هایی در قالب راهکارهای طراحی در اختیار برنامه‌ریزان، شهرسازان و معماران قرار گیرد تا بر اساس آن به ساخت شهری پایدار در این زمینه دست یافت. این راهکارهای طراحی با تمرکز بر ۷ موضوع کلیدی که ابزار کار طراحان شهری و معماران است می‌تواند راهنمایی برای تحقق این الگو باشد. این راهکارها بر طراحی پوسته‌ها، فرم و شکل‌گیری فضاها، مصالح و رنگ، پوشش گیاهی، مدیریت منابع طبیعی، عملکرد، نگهداری و مدیریت پس از اجرا متمرکز هستند. افزون بر این راهکارها تحقق این ایده مستلزم حمایت از سوی دولت‌ها و نهادهای محلی است. سیاست‌های دولتی و محلی باید شامل جلب سرمایه‌گذاری‌های عمومی و خصوصی، تسهیل روندهای قانونی و ساختاری و آموزش عمومی درباره مزایای استفاده از روش‌های مدیریت آب باشند.

در نهایت، توجه به تجارب موفق دیگر شهرها در زمینه پیاده‌سازی اصول شهر اسفنجی و زیرساخت‌های سبز (به ویژه مسیرهای سبز) می‌تواند به عنوان الگو و نمونه‌ای برای ساکنان و مسئولان شهرهای کویری در جهت مدیریت بهینه آب و مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی مطرح شود. با توجه به تغییرات اقلیمی و بحران‌های آبی جهانی، این امر ضرورت بیشتری پیدا می‌کند و می‌تواند به عنوان یک تحول اساسی در راستای ساخت شهری پایدار و مقاوم در برابر بحران‌ها محسوب شود.

٦- تضاد منافع نویسندگان

نویسنده این مقاله اعلام می‌دارد که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارد.

۷- منابع

Ahiablame, L., & Shakya, R. (2016). Modeling flood reduction effects of low impact development at a watershed scale. *Journal of Environmental Management*. 171, 15, 81-91. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.036

Ahmadi, F. (2015). Maddies of Isfahan. Isfahan: Publications of Isfahan Municipality Welfare and Recreation Organization. (In Persian)

Alves, A., Gersonius, B., Sanchez, A., Vojinovic, Z., & Kapelan, Z. (2018). Multi-criteria approach for selection of green and grey infrastructure to reduce flood risk and increase CO-benefits. *Water Resources Management*, 32(7), 2505-2522. https://doi.org/10.1007/s11269-018-1943-3

American Rivers. (n.d.). What is green infrastructure? https://www.americanrivers.org/what-is-green-nfrastructure/#:~:text=Green%20infrastructure%20is%20an%20approach,costly%20new%20water%20treatment%20plant

Esfahan Municipality: Associate President of Urban Development and Architecture. (2020). Urban design in Daraygah e Nazar with tourism approach. Report. Design by Gozine Architectural and urban planning consultant office. (In Persian)

Benedict, MA., & McMahon, ET. (2012). Green infrastructure: linking landscapes and communities.Washengton: Island press.

Bohns, J. (2020). Urban Greenways: A guide to planning and design. Routledge. Island Press; First Edition (October 1, 1993)

Chen, J. (2024). Research on performance evaluation of sponge city construction based on PSIR Model. *Frontiers in Science and Engineering*, 4 (4) . https://doi.org/10.54691/b555ky45

Dehghanzad, SH., Ghalenoee, M., & Jamshidi, M. (2018). In search of macro measures of urban green structure; Case study: Shahreza city. Master's Thesis, urban design field. Faculty of Architecture and Urban Planning. Isfahan Art University. (In Persian)

Deng, Y, Wen, J., & Zhang, CH. (2022). Sponge city and water environment planning and construction in Jibu district in Changde city. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su15010444

Dietz, ME., Clausen, JC., Rosa & David, J. (2015). Calibration and verification of SWMM for low impact development. *The Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*. 51, 746–757. https://doi.org/10.1111/jawr.12272

EEA: European Environment Agency. (2011). Green infrastructure and territorial cohesion. The concept of green infrastructure and its integration into policies using monitoring systems. EEA Technical report. No 18/2011. https://www.eea.europa.eu/publications/green-infrastructure-and-territorial-cohesion

EPA: Environmental Protection Agency. (2015). Green Infrastructure. https://www.epa.gov/green-infrastructure

Gan, R., & Sun.R. (2023). Construction of sponge city in luoyang city. *Engineering Advances*, 3(4), 302-305. https://dx.doi.org/10.26855/ea.2023.08.005

Greening Solution. (2023). The construction of sponge city is in progress. Retrieved from https://www.greening-solution.com/the-construction-of-sponge-city-is-in-progress

Hinman, C. (2005). Low impact development technical guidance manual for Puget sound. Puget Sound Action Team, *Olympia*, WA, USA.

Honarfar, L. (1992). Isfahan's treasure of historical works. Tehran. Saghafi publish. (In Persian)

INCAS. (2019). Sponge cities: New perspectives on the progress of urban de-growth in Japan. INCAS . Retrieved October 13, 2024. https://doi.org/10.58079/q4ld

Jamshidi, M., & Ghalenoee, M. (2010). Urban design of the forgotten greenways: a way to create a more sustainable urban environment (case example: Madi Niasserm). Master's thesis, urban design field. Faculty of Architecture and Urban Planning. Isfahan Art University. (In Persian)

Jamshidi, M. (2024). The approach of sponge cities to realize the sustainability of water resources in desert cities. The first national conference on engineering and management strategies in water systems. Isfahan: Isfahan Islamic Azad University (Khorasgan). (In Persian)

Kabarfard, M., FazlOli, R., Zarghami, M., & Akbarpour, A. (2017). Evaluating the most efficient method of low-impact development and determining the best quantitative urban flood management solution using real-time events. *Iran Irrigation and Drainage Journal*, 12(1), 40-52. (In Persian)

Kazemi, F., Golzarian, MR., & Myers, B. (2018). Potential of combined water sensitive urban design systems for salinity treatment in urban environments. *Journal of Environment Manag*ement 1(209), 169–175. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.046

Khatami, SM., & Al-Sadat Mousavinejad, F. (2022). A sustainable link between the city and nature through the design of the network of public spaces (case example: Shahr Noor). *Journal of Urban Structure and Function Studies*, 9(31), 74-100. https://doi.org/10.22080/usfs.2022.22409.2193

Kryvoruchko, N, & Tymashkov, M. (2024). The "sponge city" program as a system of adaptation methods to climate changes in reforming and forming the architectural environment. *Current Problems of Architecture and Urban Planning.* https://doi.org/10.32347/2077-3455.2024.69.252-269

Lafortezza, R., Davies, C., Sanesi, G., & Konijnendijk, C. (2013). Green infrastructure as a tool to support spatial planning in European urban regions. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 6(3), 102. https://doi.org/10.3832/ifor0723-006

Li, X., Li, J., Fang, X., Gong, Y., & Wang, W. (2016). Case studies of the sponge city program in China. In World Environmental and Water Resources Congress 2016. 295-308. https://doi.org/10.1061/9780784479858.031

Ming, L., Zhang, Y., & Zhou, J. (2019). Green infrastructure as a solution for urban flood management. *Environmental Engineering and Management Journal*, 18(12), 2711-2725. https://doi.org/10.1002/wat2.1560

Nguyen, T., Ngo, HH., Guo, W., & Wang, XC. (2020). A new model framework for sponge city implementation: Emerging challenges and future developments. *Journal of Environmental Management*, 253, 109689. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109689

O'Brien, CD. (2015). Sustainable drainage system (SuDS) ponds in Inverness, UK and the favourable conservation status of amphibians. *Urban Ecosystem*, 18, 321–331. https://doi.org/10.1007/s11252-014-0397-5

O'Donnell, E., Thorne, CR., Yeakley, A., & Shun Chan, FK. (2020). Sustainable flood risk and stormwater management in blue-green cities; an interdisciplinary case study in Portland, Oregon. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 56(5), 2235. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12854

Onuma, A., & Tsuge, T. (2018). Comparing green infrastructure as ecosystem-based disaster risk reduction with gray infrastructure in terms of costs and benefits under uncertainty: A theoretical approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 32, 22-28. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.01.025

Peiyao, W. (2024). Application of sponge city concept in urban waterfront landscape design. *Academic Journal of Architecture and Geotechnical Engineering*, 6(3). https://doi.org/10.25236/AJAGE.2024.060301

Rostami, I., Ithari, M., Bahrami, J., & Jafari Nadushan, E. (2024). Investigating the use of the sponge city concept for the city of Sanandaj for flood prevention, storage and optimal allocation of water. *Scientific Research Journal of Irrigation and Water Engineering of Iran*. https://doi.org/10.22125/IWE.2024.459447.1810. (In Persian)

Sallustio, L., Perone, A., Vizzarri, M., & et al. (2019). The green side of the grey: Assessing greenspaces in built-up areas of Italy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 37, 147-153. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.10.018

Shafaghi, S. (2001). Geography of Isfahan. Isfahan: Isfahan University Press. (In Persian)

Shu., Xi., Sun. Lu., & Guo, CH. (2023). Research on sewage purification technology in sponge cities. *Frontiers in Sustainable Development*, 3(4). https://doi.org/10.54691/fsd.v3i4.4779

Sun, Y., Deng, L., Pan, Sh., & et al. (2020). Integration of green and gray infrastructures for sponge city. *Water and Energy Nexus*, 3, 29-40. https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.03.003

SWM. (n.d.). Vertical sponge city above Hamburg. Retrieved from: https://www.swm.aco/case-studies/reference/vertical-sponge-city-above-hamburg

UNEP: United Nations Environment Programmer. (2014). Green Infrastructure Guide for Water Management: Ecosystem-based management approaches for water-related infrastructure projects. [PDF]. https://www.unep.org/resources/publication/green-infrastructure-guide-water-management.

Urbanist, T. (2023). Urbanism 101: What is a sponge city? The Urbanist. https://www.theurbanist.org/2023/02/08/urbanism-101-what-is-a-sponge-city/

Wang, N., Li, H., Zhang, J., & et al. (2022). Research on sustainable evaluation model of sponge city based on emergy analysis. *Water*, 15(1). https://doi.org/10.3390/w15010032

Wei, L., & Sun, X. (2022). Study on sponge city construction scheme based on the AHP: Taking Tianjin as an Example. *ICCREM*. https://doi.org/10.1061/9780784484562.084

Woznicki, SA., Hondula, KL., & Jarnagin, ST. (2018). Effectiveness of landscape-based green infrastructure for stormwater management in suburban catchments. *Hydrological Processes*, 32(15), 2346-2361. https://doi.org/10.1002/hyp.13144

Zhang, C., He, M., & Zhang, Y. (2019). Urban sustainable development based on the framework of sponge city: 71 case studies in China. *Sustainability*, 11(6), 1544. https://doi.org/10.3390/su11061544

Zhu, J. (2023). Research on the problems and strategies of sponge city construction in China. *Applied and Computational Engineering*, 24(1), 83-90 https://doi.org/10.54254/2755-2721/24/20230681

Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Summer 2024: Vol 2, Issue 2, 174-185
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1128791

Research Article

Investigating the dam failure process and associated risks: A case study of Doroudzan dam

Roozbeh Aghamajidi

Department of Civil Engineering, Sepidan Branch, Islamic Azad University, Sepidan, Iran.

Corresponding Author email: roozbeh1381@yahoo.com

© The Author(s) 2024

Received: 11 Aug 2024 Accepted: 07 Dec 2024 Published: 24 Dec 2024

Abstract

Dam failures pose significant risks to human communities, as these critical structures are essential for water resource management and energy production. Consequently, any failure can result in substantial loss of life and property. This study examines the factors contributing to dam failures, specifically focusing on the Doroudzan earth dam, which plays a vital role in regional water supply and agriculture. The purpose of this study is to investigate the dam failure process and associated risks: A case study of Doroudzan dam. MIKE 21 software was employed to analyze these risks and provide detailed numerical modeling. MIKE 21 enables precise simulation of water flow and structural behavior under various scenarios, facilitating a comprehensive assessment of potential dam failure impacts on downstream areas.

The results indicate that failure of the Doroudzan earth dam could lead to catastrophic flooding, causing widespread damage to downstream communities. Simulations highlight that residential areas, agricultural lands, and critical infrastructure are particularly vulnerable, emphasizing the need for optimal dam design and proactive risk management measures. Raising community awareness about dam failure risks and promoting emergency preparedness through regular drills can further mitigate human and financial losses. This study underscores that adopting scientific approaches and leveraging advanced technologies such as MIKE 21 can significantly reduce the adverse effects of dam failures, helping to protect lives and minimizing property damage.

***Keywords**:* Dam Failure, Earth Dam, MIKE 21 Model, Numerical method

مجله راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
شاپا الکترونیکی: ۲۹۸۱-۱۴۴۹
تابستان ۱۴۰۳، دوره دو، شماره۲، ۱۷٤-۱۸۵
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1128791

مقاله پژوهشی

بررسی روند شکست سد و خطرات ناشی از آن درصورت وقوع (مطالعه موردی سد درودزن)

روزبه آقامجیدی

استادیار گروه عمران، واحد سپیدان، دانشگاه آزاد اسلامی، سپیدان، ایران

ایمیل نویسنده مسئول: roozbeh1381@yahoo.com

© The Author(s) 2024

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۱ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷ چاپ: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴

چکیده

اهمیت مسئله شکست سد از آنجا ناشی می‌شود که این حوادث خطرات جدی برای جوامع انسانی به همراه دارند. سدها به عنوان سازه‌های کلیدی در مدیریت منابع آبی و تولید انرژی، نقش مهمی در زندگی انسان‌ها ایفا می‌کنند و هر گونه شکست در آنها می‌تواند به خسارات جانی و مالی قابل توجهی منجر شود. با توجه به اهمیت سدها، به‌ویژه سدهای خاکی، بررسی و تحلیل عوامل شکست آنها اهمیت بالایی دارد. سد خاکی درودزن یکی از سدهای مهم کشور است که در تأمین آب و کشاورزی منطقه نقش حیاتی دارد. هدف از این مطالعه بررسی روند شکست سد و خطرات ناشی از آن درصورت وقوع (مطالعه موردی سد درودزن) است. در این تحقیق برای تحلیل دقیق‌تر، از مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار MIKE 21 استفاده شده است که قابلیت شبیه‌سازی دقیق جریان آب و رفتار سازه را در شرایط مختلف دارد. این مدل‌سازی به ارزیابی تأثیرات شکست سد بر مناطق پایین‌دست کمک می‌کند و شامل محاسبه سطح سیلاب، سرعت جریان آب و تعیین مناطق است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که شکست سد درودزن می‌تواند باعث سیلاب‌های شدید و خسارات گسترده در مناطق پایین‌دست شود و به مناطق مسکونی، زمین‌های کشاورزی و زیرساخت‌های حیاتی آسیب برساند. این یافته‌ها بر لزوم اقدامات پیشگیرانه و طراحی صحیح سدها تأکید دارند. همچنین، آموزش و آگاهی‌بخشی به جوامع محلی درباره خطرات بالقوه شکست سد و برگزاری نمایش‌های امدادی دوره‌ای، می‌تواند به کاهش تلفات و خسارات کمک کند. این تحقیق نشان می‌دهد که با استفاده از روش‌های علمی و فناوری‌های پیشرفته، می‌توان خطرات شکست سدها را کاهش داده و از خسارات جانی و مالی جلوگیری کرد.

واژه‌های کلیدی: شکست سد، سد خاکی، مدل MIKE 21، روش عددی

۱- مقدمه

شکست سدها یکی از مسائل مهم و حیاتی در مهندسی هیدرولیک و مدیریت منابع آب است که می‌تواند خسارات جانی و مالی قابل‌توجهی به بار آورد. سدها به‌طور کلی به عنوان ساختارهای مهندسی بزرگ با هدف ذخیره‌سازی و تنظیم جریان آب، تولید برق، تأمین آب شرب و کشاورزی و کنترل سیلاب‌ها ساخته می‌شوند. هرچند که با توجه به اهمیت بالای این سازه‌ها، احتمال شکست آن‌ها و اثرات آن بر جوامع پایین‌دست باید به‌دقت مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. از منظر تاریخی، شکست سدها به دلایل مختلفی از جمله وقوع سیلاب، نقص‌های سازه‌ای و پدیده‌های زمین‌شناسی همچون لغزش زمین و زلزله رخ داده است (Hydrologic Engineering Center, 2014).

سدها به انواع مختلف سدهای خاکی یا سنگریزه‌ای، سدهای بتنی وزنی، سدهای بتنی تک‌قوسی یا چندقوسی، سدهای پشت‌بند دار و سدهایی از جنس فولاد یا تیرچوبی تقسیم می‌شوند. هر نوع سد با توجه به نوع مصالح و طراحی خاص خود دارای نقاط قوت و ضعف مشخصی در برابر نیروهای مختلف از جمله سیلاب، نشت، لغزش و دیگر پدیده‌های طبیعی و انسانی است. گزارش Costa (1988) و Atallah (2002) نشان می‌دهد که بیشترین علت شکست سدها روگذری سیلاب از تاج سد و سپس نقص در پی سد بوده است.

علل شکست سدها به مکانیزم‌های مختلفی وابسته است که می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

سیلاب شدید: باعث روگذری آب از تاج سد و احتمالاً تخریب سازه می‌شود.

نشت یا رگاب: حرکت آب از طریق شکاف‌ها یا نواحی مستعد نفوذ در زیر یا اطراف سد که می‌تواند منجر به تضعیف ساختار سد شود.

لغزش زمین: وقوع زمین‌لغزش در اطراف یا زیر سد.

زلزله: تکان‌های ناشی از زمین‌لرزه که ممکن است به شکست ساختار سد منجر شود.

نقص پی: ضعف در پایه سد یا خاک زیر آن که می‌تواند از دلایل شکست باشد(Costa, 1988).

برای پیش‌بینی دقیق هیدروگراف خروجی از سد و هیدروگراف پایین‌دست، تعیین محل، ابعاد و زمان توسعه شکاف ایجاد شده در سد حیاتی است. این پارامترها به تحلیل ریسک، پیش‌بینی سیلاب و مدیریت بحران کمک می‌کنند و در نرم‌افزارهایی مانند HEC-RAS جهت مدل‌سازی هیدرولیکی استفاده می‌شوند. پارامترهای کلیدی در این مدل‌سازی عبارتند از: عرض شکاف و ارتفاع شکاف(فاصله عمودی از کف شکاف تا تاج سد) (Urzică et al., 2021).

روش‌های مختلفی برای برآورد پارامترهای شکست سد وجود دارد، از جمله:

دستورالعمل آژانس‌های فدرال: ارائه محدوده مقادیر پارامترهای شکست بر اساس تاریخچه شکست سدها.

معادلات رگرسیون: استفاده از داده‌های تاریخی برای برآورد پارامترهای شکست.

آنالیز مقایسه‌ای: مقایسه سد مورد مطالعه با سد مشابهی که قبلاً دچار شکست شده است.

مدل‌های کامپیوتری فیزیکی: استفاده از نرم‌افزارهایی که شبیه‌سازی فرآیندهای شکست را انجام می‌دهند.

هرکدام از این روش‌ها دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود هستند و انتخاب روش مناسب برای تحلیل شکست سد نیازمند شناخت دقیق از ویژگی‌های سد و محدودیت‌های روش‌ها است. به عنوان مثال، در تحلیل حساسیت، می‌توان تأثیر هر یک از پارامترهای شکست را بر هیدروگراف خروجی، دبی حداکثر، عمق جریان در پایین‌دست و زمان هشدار به جمعیت‌های در معرض خطر ارزیابی کرد.

شکست سدها به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین مسائل مهندسی، تهدیدات جدی برای جوامع و محیط زیست ایجاد می‌کند. بررسی عوامل مؤثر در شکست سدها، به‌ویژه تحت تأثیر سیلاب یا بارهای لرزه‌ای، می‌تواند به بهبود طراحی و بهره‌برداری ایمن‌تر کمک کند.

عوامل شکست سدها شامل فرسایش تاج سد، نشست‌های غیریکنواخت، لرزش‌های ناشی از زلزله و تأثیرات توپوگرافی پایین‌دست است. تاج سد به‌عنوان یکی از نقاط بحرانی، مستعد فرسایش و شکست در زمان عبور جریان سیلابی است.

(Wahl, 2004) در مطالعه‌ای، با استفاده از مدل‌سازی، نشان داد که استفاده از موادی نظیر آسفالت برای بهسازی تاج سد می‌تواند به کاهش خطر فرسایش و افزایش ایمنی در برابر عبور سیلاب کمک کند. همچنین، این پژوهش نشان داد که شکست سدهای خاکی عمدتاً در شیب بالادست اتفاق می‌افتد و تغییرات ایجاد شده اغلب موضعی هستند و به فروپاشی کامل بدنه سد منجر نمی‌شوند. تحلیل لرزه‌ای سدها نیز اهمیت ویژه‌ای در طراحی مقاوم‌تر آنها دارد. (Sun et al., 2014) با استفاده از روش اجزای محدود نشان دادند که شکست لرزه‌ای بیشتر در مناطق آسیب‌پذیر شیب بالادست رخ می‌دهد و تغییرات ناشی از آن ممکن است باعث تضعیف تدریجی سد شود. از سوی دیگر، نقش توپوگرافی پایین‌دست سدها در انتشار موج سیلاب قابل‌توجه است. (Dorn et al., 2014) در پژوهشی نشان دادند که سدهای واقع در مناطق کوهستانی به دلیل وجود دره‌ها و موانع طبیعی، باعث کاهش سرعت موج سیلاب و افزایش پیچیدگی در مسیر جریان می‌شوند. همچنین، مدل‌سازی عددی نشان داده است که هندسه سد و ساختار پایین‌دست تأثیر زیادی بر مشخصات جریان سیلاب دارد. (Froehlich, 2008) با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و روش VOF نشان داد که در صورت وقوع شکست، نحوه حرکت جریان سیلاب تحت تأثیر پارامترهایی نظیر وضعیت پایین‌دست، شرایط توپوگرافی و کیفیت مصالح سد قرار می‌گیرد. علاوه بر این، بهسازی تاج سد با استفاده از روش‌هایی مانند پوشش‌های مقاوم در برابر فرسایش، به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش خطر شکست سدها شناخته می‌شود. همچنین، استفاده از تکنیک‌های پیشرفته تحلیل لرزه‌ای و ارزیابی هیدرولیکی سدها، به شناخت بهتر نقاط ضعف و بهبود ایمنی سدها کمک می‌کند. تحقیقات جدید بر شناسایی عوامل اصلی شکست سدها تمرکز کرده‌اند و نشان می‌دهند که طراحی نادرست، عدم نگهداری مناسب و وقوع رویدادهای طبیعی مانند زمین‌لرزه یا سیلاب، از دلایل اصلی این پدیده هستند. به‌طور خاص، (Das et al., 2024) اشاره کرده‌اند که نشت آب و فرسایش داخلی از مهم‌ترین دلایل شکست در سدهای خاکی به شمار می‌آید. این مطالعه تأکید دارد که نظارت دقیق و شناسایی زودهنگام این مشکلات می‌تواند خطر شکست را کاهش دهد. در زمینه کنترل و پیشگیری، استفاده از فناوری‌های پیشرفته برای مدیریت ریسک سدها در اولویت قرار گرفته است. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از ابزارهای حسگر برای پایش تغییرات فشار و نشت، می‌تواند دقت پیش‌بینی خطرات را افزایش دهد. به عنوان مثال، (Mostafa & Zhenzhong 2023) بیان کردند که نصب سیستم‌های هشداردهنده زودهنگام در ترکیب با نرم‌افزارهای تحلیلی، به کاهش احتمال وقوع فجایع منجر می‌شود. علاوه بر این، استفاده از ژئوتکستایل‌ها برای تقویت ساختار سد و جلوگیری از فرسایش، در مطالعات مختلف مورد تأیید قرار گرفته است.

روش‌های شبیه‌سازی عددی نیز نقش مهمی در تحلیل و مدیریت ریسک شکست سدها ایفا می‌کنند. مدل‌هایی مانند HEC-RAS برای شبیه‌سازی جریان‌های آب و پیش‌بینی پدیده شکست استفاده می‌شوند. (Haltas et al., 2016) با استفاده از این مدل‌ها نشان دادند که پیش‌بینی جریان‌های بحرانی می‌تواند به کاهش خسارات ناشی از شکست کمک کند. این مطالعات همچنین تأکید دارند که شبیه‌سازی‌های دو و سه بعدی می‌توانند در ارزیابی پایداری سدها در شرایط مختلف، از جمله وقوع سیلاب‌های بزرگ، به‌کار گرفته شوند. پیامدهای شکست سدها اغلب فراتر از خسارات مالی است و اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی گسترده‌ای به دنبال دارد.

(Pareta, 2024) نشان داد که تخریب زیستگاه‌های طبیعی و افزایش آلودگی منابع آب از پیامدهای بارز شکست سدها است. علاوه بر این، تأثیرات اجتماعی شامل جابجایی جمعیت و کاهش دسترسی به منابع آب شیرین می‌باشد که نیازمند مدیریت دقیق پیامدهای پس از بحران است. این مطالعه بر لزوم برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات محیطی و بازسازی سریع مناطق آسیب‌دیده تأکید دارد.. تحقیقاتی نظیر (Wang et al., 2023) بر اهمیت استفاده از مصالح باکیفیت و بهبود روش‌های اجرایی تأکید کرده‌اند. جمع‌بندی مطالعات نشان

می‌دهد که پیشگیری از شکست سدها نیازمند تلفیق فناوری‌های نوین، طراحی مقاوم و پایش مستمر است. همچنین، ترکیب ابزارهای پیشرفته با رویکردهای مبتنی بر شبیه‌سازی، به مهندسان کمک می‌کند تا خطرات بالقوه را به حداقل برسانند.

با توجه به اهمیت موضوع تحلیل شکست سد (شکل ۱) و خطرات ناشی از وقوع آن این پژوهش با هدف بررسی روند شکست سد و خطرات ناشی از آن در صورت وقوع انجام شد و شکست سد درودزن با استفاده از نرم‌افزار پیشرفته هیدرولیکی MIKE21 مدلسازی گردید.

شکل ۱- نمایی از اهمیت تحلیل شکست سد در کل مطالعات

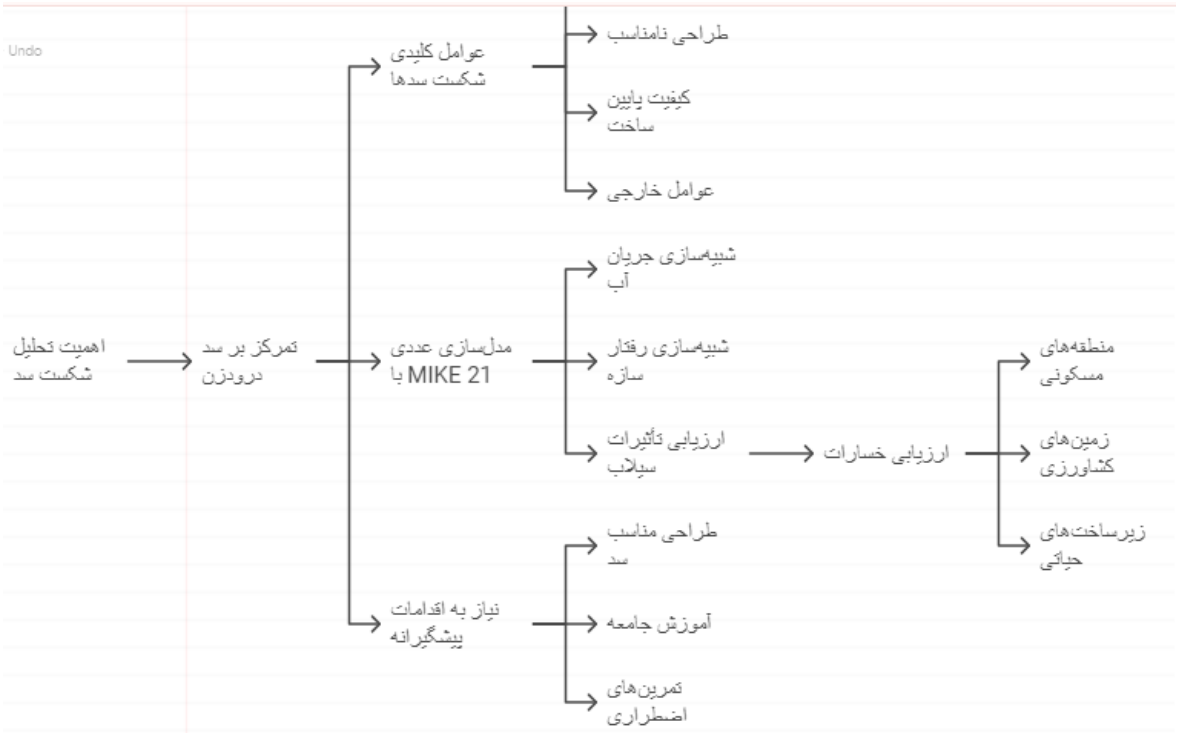

Fig 1. An overview of the importance of dam failure analysis in all studies

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نرم‌افزار MIKE21

نرم‌افزار MIKE21 یکی از ابزارهای پیشرفته و جامع برای مدل‌سازی دوبعدی در محیط‌های آبی و سیلاب‌ها است که توسط موسسه DHI دانمارک توسعه یافته است. این نرم‌افزار با استفاده از فناوری‌های پیشرفته، توانایی بالایی در شبیه‌سازی جریان‌های سطحی، شکست سد، انتقال رسوبات و سایر فرآیندهای هیدرولیکی دارد. مدل‌سازی در MIKE21 بر پایه دو روش اصلی انجام می‌شود: روش تفاضل محدود در شبکه منظم و روش حجم محدود در شبکه بی‌سازمان مثلثی. این روش‌ها به نرم‌افزار امکان می‌دهند تا شرایط مختلف را با دقت بالا شبیه‌سازی کند و از ویژگی‌های هر روش برای حل مسائل پیچیده هیدرولیکی بهره ببرد (DHI, 2024).

یکی از ویژگی‌های کلیدی MIKE21، انعطاف‌پذیری در شبکه‌بندی است. به‌طور معمول، در مناطقی با اهمیت بیشتر، مانند اطراف محل شکست سد یا مناطق مجاور رودخانه، شبکه محاسباتی با دقت بالاتری طراحی می‌شود. این قابلیت باعث می‌شود تا فرآیندهایی مانند توزیع سیلاب و انتقال رسوبات با دقت بیشتری مدل‌سازی شوند. در عین حال، در مناطقی با اهمیت کمتر، می‌توان از سلول‌های

بزرگ‌تر استفاده کرد که موجب کاهش زمان محاسبات و بهینه‌سازی منابع می‌شود (Pareta, 2024). این ویژگی باعث افزایش کارایی نرم‌افزار و تطبیق آن با نیازهای مختلف پروژه‌ها شده است.

سادگی کاربری و سرعت بالا از دیگر مزایای MIKE21 محسوب می‌شود. این نرم‌افزار، با وجود دقت بالای محاسبات، برای کاربران با تجربه‌های مختلف طراحی شده و محیط کاربرپسندی ارائه می‌دهد. تنظیم محدوده شبکه محاسباتی و امکان تعریف سلول‌های با ابعاد متفاوت در بخش‌های مختلف مدل، از عوامل اصلی افزایش کارایی این نرم‌افزار است. همچنین، قابلیت تنظیم شرایط مرزی و هیدرولیکی پیچیده، آن را به ابزاری مناسب برای تحقیقات پیشرفته و پروژه‌های کاربردی تبدیل کرده است (Bigdeli et al., 2022).

MIKE21 در بسیاری از پروژه‌های مدل‌سازی سیلاب و مدیریت منابع آبی به کار گرفته شده و نتایج آن در مقایسه با داده‌های واقعی از دقت بالایی برخوردار بوده است. این ویژگی‌ها همراه با الگوریتم‌های بهینه و روش‌های عددی پیشرفته، آن را به یکی از محبوب‌ترین نرم‌افزارها در حوزه مدل‌سازی هیدرولیکی تبدیل کرده است(Pareta, 2024).

از دیگر مزایای MIKE21، قابلیت شبیه‌سازی فرآیندهای مرتبط با رسوبات ته‌نشسته و تعلیق مجدد آنها است. این ویژگی به‌ویژه در پروژه‌هایی که در آن‌ها مسائل رسوب‌گذاری و انتقال رسوبات نقش مهمی ایفا می‌کند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مدل رسوب MIKE21 به کاربر این امکان را می‌دهد تا روند تحکیم و تعلیق رسوبات را در شرایط مختلف بررسی کرده و نتایج دقیقی از این فرآیندها به دست آورد. (DHI, 2024).

۲-۲- منطقه مورد مطالعه

سد درودزن سدی خاکی است که بر روی رودخانه کر احداث شده است. این سد در نزدیکی شهر مرودشت استان فارس قرار گرفته است. سد مخزنی درودزن در صد کیلومتری شمال غرب شیراز بر روی رودخانه کر و حدود جغرافیایی ۲۵و۵۲ طول شرقی و ۱۳و۳۰ عرض شمالی احداث گردیده است. ساختمان خاکی سد در آذر ۱۳٤٥ آغاز شد و در اسفند ماه ۱۳۵۰ به‌عنوان اولین سد خاکی خاورمیانه به اتمام رسید و از سال ۱۳۵۱ آبگیری و مورد بهره‌برداری قرار گرفت. این سد با تنظیم حدود ۷٦۰ میلیون مترمکعب آب در سال، آب کشاورزی حدود ٤۲ هزار هکتار از اراضی بلوک رامجرد و حدود ۳٤ هزار هکتار از اراضی منطقه کربال و کناره مرودشت را تامین می‌نماید، همچنین از طریق سد درودزن آب شرب شهر شیراز- مرودشت و تعدادی از روستاهای بین راه و موسسات بزرگ صنعتی نزدیک و نیز آب صنعتی جهت مصارف صنایع پتروشیمی تامین می‌گردد.

۳- نتایج و بحث

نتایج مربوط به مدل‌سازی شکست سد و بررسی محدوده پایین‌دست سد درودزن با استفاده از نرم‌افزار پیشرفته MIKE21 در شکل (۲) نمایش داده شده است. در این شکل، محدوده‌های مختلف تحت تأثیر شکست سد با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی و رنگ‌بندی مشخص شده‌اند. در ادامه توضیحی در خصوص آن ارائه می‌شود:

محدوده قرمز: نشان‌دهنده بیشترین تأثیر شکست سد بر پایین‌دست است. این ناحیه نمایانگر مناطق پرخطر در هنگام شکست سد با دبی‌های بالا است که باید در مدیریت بحران و تخلیه جمعیت مورد توجه قرار گیرد. همان طور که مشهود است باغات و منازل مسکونی به وفور در اطراف رودخانه پراکنده شده‌اند که در هنگام بروز حوادث سیل مشکلاتی اساسی در پی خواهد داشت. متأسفانه این ناحیه کاملا کوهستانی است که در صورت کمی تأخیر خسارات غیرقابل جبرانی قابل انتظار است.

محدوده زرد، سبز و آبی: پهنه‌های سیلابی با شدت متفاوت را نشان می دهد که نمایانگر میزان پراکندگی جریان و شدت سیلاب در مناطق پایین‌دست است. رنگ زرد نواحی با شدت سیلاب بالا را نشان می‌دهد، در حالی که رنگ سبز مناطق با شدت سیلاب کمتر را پوشش می‌دهد.

خطوط و مسیرهای جریان: الگوی توزیع جریان هستند، مسیر حرکت آب پس از شکست سد را نشان می‌دهند. این مسیرها به شناسایی مناطق در معرض خطر و برنامه‌ریزی برای اقدامات محافظتی کمک می‌کنند.

شکل۲ – مدل‌سازی شکست سد و بررسی محدوده پایین‌دست سد درودزن

Fig 2. Dam failure modeling and investigation of the downstream area of the Dorudzan Dam

شکل (۳) نشان‌دهنده مناطق با خطرپذیری مختلف در اثر شکست ناگهانی سد می‌باشد. براساس محاسبات انجام شده در صورت بروز خطر با احتمالات مختلف، محیط و مساحت تحت تاثیر مناطق اطراف سد، بصورت جدول (۱) خواهد بود. این جدول خروجی نرم افزار است.

شکل ۳– مناطق با خطرپذیری مختلف سد درودزن (مخزن کارده مربوط به مخرن کنترل پایین دست سد درودزن می‌باشد)

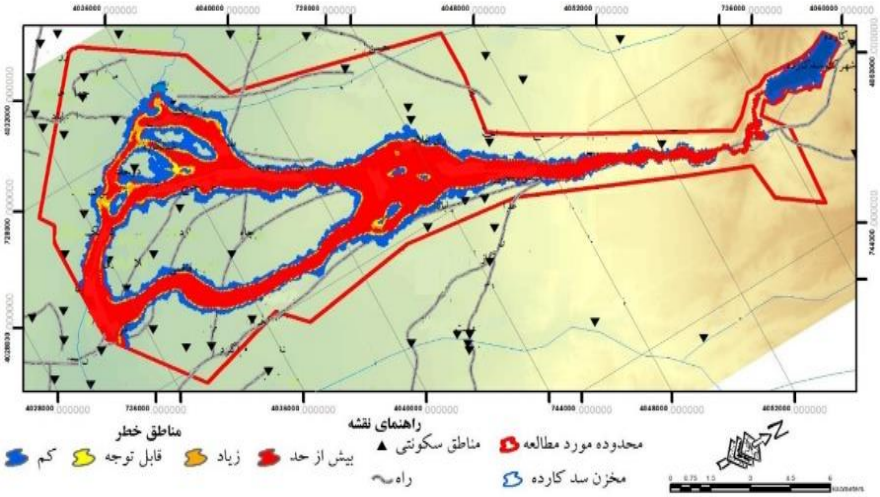

Fig 3. Areas with different risks of Doroudzan Dam

شکل (٤)، نمودار تغییرات ارتفاع آب (H) بر حسب فاصله (Station) در امتداد یک رودخانه یا کانال را بعد از شکست سد نشان می‌دهد که مربوط به شرایط زمانی t= 5s است. این نمودار بیانگر یک کاهش شدید و سریع در ارتفاع آب در ابتدا و سپس تثبیت آن

به نزدیک صفر در فواصل دورتر است. این کاهش سریع ارتفاع ممکن است ناشی از وقوع یک پدیده ناگهانی مانند شکست سد باشد، که منجر به آزادسازی حجم زیادی از آب و جریان شدید در طول رودخانه می‌شود.

در فاصله‌های نزدیک (کمتر از ۵۰۰ متر)، بیشترین ارتفاع آب مشاهده می‌شود که ناشی از اثر مستقیم موج اولیه آزاد شده است. به‌تدریج با افزایش فاصله، انرژی جریان کاهش می‌یابد و ارتفاع آب به طور نمایی کم می‌شود. این رفتار معمولاً به دلیل اتلاف انرژی جریان از طریق اصطکاک بستر، پراکندگی جریان و کاهش سرعت موج رخ می‌دهد.

شکل (٤) نشان می‌دهد که شکست سد منجر به انتشار موج قوی در مدت‌زمان کوتاه می‌شود که اثرات آن در نزدیکی محل سد بسیار شدید است. اما با فاصله گرفتن از محل شکست، شدت و ارتفاع موج به‌سرعت کاهش می‌یابد. این تحلیل اهمیت مدیریت ریسک شکست سد و طراحی مناسب سازه‌های پایین‌دست را برای کاهش خطرات و خسارات ناشی از چنین پدیده‌هایی برجسته می‌سازد.

جدول۱- مشخصات مناطق با خطرپذیری مختلف

Table 1. Characteristics of areas with different risk

سطح خطرپذیری	محیط (m)	مساحت (m^2)
کم	۲۳۹٤۵۳/۳	۱۵/۷
قابل توجه	۱۳۷٤٦۸/۳	½
زیاد	۱٤٦٤۵۰/٦	۲/٦
بیش از حد	۱۹۵۲۳۲/۵	۳۵/۸
جمع	۷۱۸٦۰٤/۷	۵٦/۲
فاقد آبگرفتگی	۱۹۹۷۱۲/٤	۱۱۰/۷
جمع کل	۹۱۸۳۱۷/۱	۱٦٦/۹

شکل (۵) تغییرات ارتفاع سطح آب (H) را در مقابل موقعیت (Station) در امتداد یک رودخانه نشان می‌دهد. خطوط پیوسته و خط‌چین به ترتیب سطح آب در ساحل راست و ساحل چپ را نمایش می‌دهند. روند کلی نشان‌دهنده کاهش تدریجی ارتفاع است، اما در بخش‌هایی از نمودار، تغییرات ناگهانی در ارتفاع مشاهده می‌شود که ممکن است به دلیل وجود شیب‌های تند یا موانع طبیعی باشد. در صورت وقوع شکست سد، این تغییرات به‌شدت تشدید شده و باعث افزایش ناگهانی سطح آب در پایین‌دست رودخانه می‌شود، که می‌تواند منجر به سیلاب و تخریب شدید مناطق مسکونی و زیرساخت‌ها در آن منطقه شود. بنابراین، تحلیل این نمودارها برای ارزیابی خطرات ناشی از شکست سد و اتخاذ اقدامات پیشگیرانه ضروری است.

شکل ٤- ارتفاع آب بعد از شکست سد در ۵ ثانیه

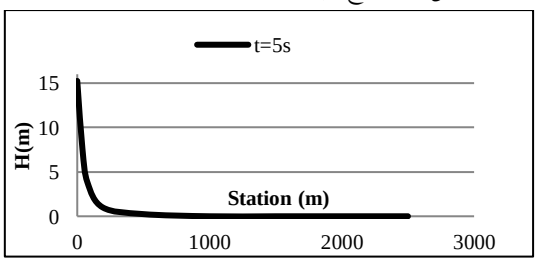

Fig 4. Water height after dam failure in 5 seconds

شکل ۵- ارتفاع آب در سواحل سمت راست و چپ بعد از ۹۰ ثانیه

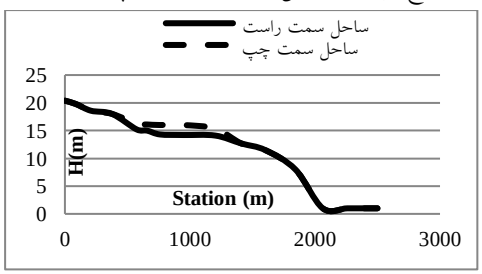

Fig 5. Water height on the right and left banks after 90 seconds

شکل(٦) تغییرات دبی جریان (Discharge) را بر حسب زمان (Time) در فاصله ۱۵۰۰ متری محل شکست نشان می‌دهد و روند یک سیلاب ناشی از شکست سد را مدل‌سازی می‌کند. در ابتدا، دبی جریان با سرعت زیاد افزایش یافته و در مدت کوتاهی به مقدار اوج نزدیک به ۱۰,۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. این مرحله نشان‌دهنده آزادسازی ناگهانی و شدید حجم زیادی از آب ذخیره‌شده در پشت سد است. این افزایش ناگهانی دبی، خطر بالایی برای مناطق پایین‌دست رودخانه دارد و می‌تواند باعث تخریب سازه‌ها و زیرساخت‌ها شود.

پس از رسیدن به اوج دبی، جریان به‌آرامی شروع به کاهش می‌کند. این کاهش به دلیل تخلیه تدریجی آب ذخیره‌شده پشت سد و کاهش انرژی سیلاب است. کاهش دبی به‌صورت نمایی رخ می‌دهد و نشان‌دهنده کاهش خطر در مناطق پایین‌دست در طول زمان است. این روند معمولاً در اثر اصطکاک بستر، کاهش حجم آب ذخیره‌شده و پراکندگی انرژی جریان اتفاق می‌افتد.

در بخش نهایی نمودار، دبی جریان به مقادیر نزدیک به صفر میل می‌کند و به یک حالت پایدار می‌رسد. این بخش نشان‌دهنده پایان یافتن سیلاب و بازگشت جریان به شرایط طبیعی است.

می‌توان بیان داشت که در جریان شکست سد، اوج دبی و زمان رسیدن به آن دو عامل کلیدی هستند که می‌توانند خسارات و تأثیرات سیلاب را تعیین کنند. تحلیل این داده‌ها می‌تواند به برنامه‌ریزی بهتر برای مدیریت بحران، طراحی سیستم‌های هشدار سریع و ساخت سازه‌های مقاوم در پایین‌دست کمک کنند. به‌علاوه، این اطلاعات برای کاهش ریسک و حفاظت از جوامع انسانی بسیار ارزشمند است.

شکل ٦- تغییرات دبی عبوری در فاصله ۱۵۰۰ متری محل شکست

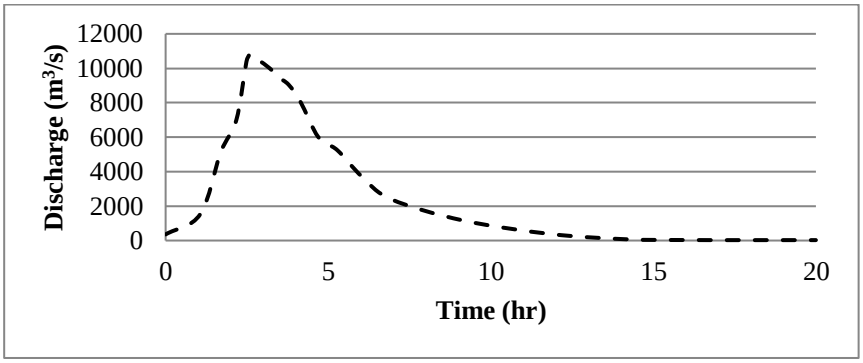

Fig6. Changes in discharge at a distance of 1500 meters from the failure site

شکل (۷) تغییرات H (ارتفاع آب یا بار هیدرولیکی) را بر حسب فاصله (Station) در یک کانال یا رودخانه برای سه مقادیر مختلف ضریب زبری مانینگ برابر با ۰/۲، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۳ نشان می‌دهد.

محور افقی(Station) بیانگر فاصله (برحسب متر) از نقطه‌ی مرجع یا نقطه‌ی آغازین جریان آب است. محور عمودی (H) ارتفاع یا بار هیدرولیکی آب را (برحسب متر) نشان می‌دهد. سه منحنی مختلف برای مقادیر مختلف ضریب زبری مانینگ (n) رسم شده‌اند: خط قرمز (n = 0.025) نمایانگر ضریب زبری کمتر است که نشان‌دهنده سطح صاف‌تری برای جریان است. خط نقطه‌چین سیاه (n = 0.02) نمایانگر ضریب زبری متوسط است. خط سیاه با خط‌چین ضخیم (n = 0.035) ضریب زبری بیشتری دارد که نشان‌دهنده سطح ناهموارتر است. در تمامی حالات، ارتفاع آب در ابتدای نمودار به شدت کاهش یافته و سپس در طول کانال یا رودخانه به حالت پایدار و تقریباً ثابت می‌رسد. افزایش ضریب زبری (n) تأثیر چشمگیری در کاهش سریع‌تر ارتفاع یا بار هیدرولیکی در طول جریان دارد. در مقادیر بزرگ‌تر ضریب زبری(n = 0.035)، کاهش بار هیدرولیکی سریع‌تر اتفاق می‌افتد و در نقاط ابتدایی جریان، اختلاف در ارتفاع آب واضح‌تر است. این نوع نمودارها به طور معمول برای تحلیل تأثیر زبری کف و دیواره‌های کانال بر رفتار جریان آب و انتقال انرژی استفاده می‌شوند.

شکل ۷- تغییرات ارتفاع آب بر حسب فاصله در یک کانال یا رودخانه برای سه مقادیر مختلف ضریب زبری مانینگ

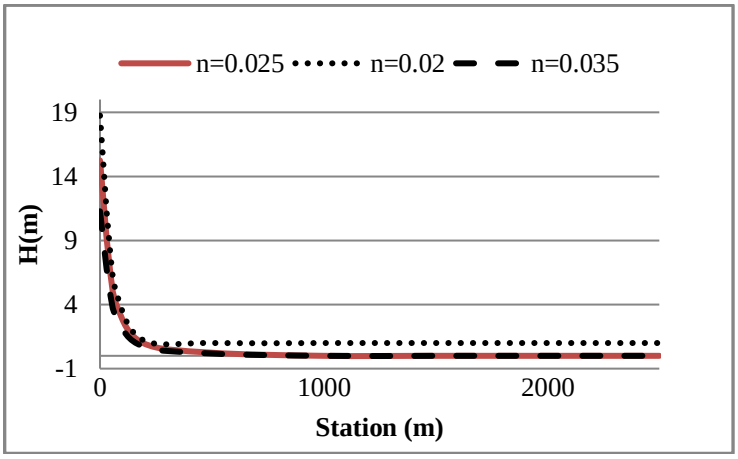

Fig 7. Variations in water height based on distance in a channel or river for three different values of the Manning roughness coefficient

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه انجام شده بر روی سد درودزن، تصویری روشن از پیامدهای فاجعه‌بار شکست سد را ارائه داده است. نتایج این تحقیق، علاوه بر تأیید خطرات بالقوه، فرصتی ارزشمند برای بهبود مدیریت ریسک و آمادگی در برابر حوادث مشابه را فراهم می‌کند. در ادامه عوامل موثر و تاثیرگذار در شکست سد ارائه شده است که بتوان در مورد عملکرد و تاثیر آن بر پایین دست سد بهتر قضاوت نمود(شکل ۸).

زمان محدود برای واکنش: مدت زمان دو ساعته برای رسیدن سیلاب به مناطق پایین‌دست، به ظاهر زمانی قابل توجه است، اما در شرایط اضطراری، این مدت زمان بسیار کوتاه است. با توجه به اینکه بسیاری از مناطق روستایی ممکن است به زیرساخت‌های ارتباطی و امدادی ضعیفی مجهز باشند، دو ساعت برای تخلیه کامل و ایمن جمعیت کافی نخواهد بود.

تأثیر توپوگرافی بر شدت سیلاب: وجود کوه‌های سنگی و ضریب زبری کم، علاوه بر افزایش سرعت سیلاب، می‌تواند باعث تمرکز جریان آب در برخی مناطق و تشدید خسارت‌ها شود. این موضوع اهمیت مطالعه دقیق توپوگرافی و هیدرولوژی منطقه را در ارزیابی ریسک شکست سد برجسته می‌کند.

آسیب‌پذیری بالای مناطق اطراف سد: زمان فرار بسیار کوتاه برای مناطق اطراف سد، نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای این مناطق است. این مناطق اغلب به دلیل نزدیکی به سد، از نظر زیرساختی و اجتماعی نیز آسیب‌پذیرتر هستند.

ضرورت سیستم‌های هشدار سریع و کارآمد: ایجاد سیستم‌های هشدار سریع که بتوانند با دقت و سرعت بالا وقوع شکست سد را پیش‌بینی کنند، از اهمیت حیاتی برخوردار است. این سیستم‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که بتوانند به سرعت به ساکنان مناطق خطرناک اطلاع‌رسانی کنند و آنها را برای تخلیه آماده سازند.

اهمیت آموزش و فرهنگ‌سازی: آموزش عمومی در مورد خطرات ناشی از شکست سد و نحوه مقابله با آن، نقش مهمی در کاهش خسارات جانی و مالی ایفا می‌کند. برگزاری مانورهای آمادگی و ایجاد فرهنگ خودامدادی در بین مردم، می‌تواند به افزایش آمادگی جامعه در برابر حوادث کمک کند.

شکل ۸- بررسی عکس‌العمل و آمادگی برای کنترل شکست سد

Fig 8. Reaction and readiness check for dam failure control

به‌روزرسانی مداوم مطالعات هیدرولوژیکی و ژئوتکنیکی: با توجه به تغییرات اقلیمی و عوامل دیگر، مطالعات هیدرولوژیکی و ژئوتکنیکی سدها باید به صورت دوره‌ای به‌روزرسانی شوند تا اطمینان حاصل شود که ارزیابی ریسک بر اساس آخرین اطلاعات انجام می‌شود.

تقویت نظارت بر سدها: نظارت مستمر بر وضعیت سدها و انجام تعمیرات و نگهداری به‌موقع، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از فناوری‌های نوین مانند حسگرها و سیستم‌های نظارت از راه دور می‌تواند به بهبود کیفیت نظارت کمک کند.

ایجاد سیستم‌های هشدار چندمرحله‌ای: سیستم‌های هشدار باید به گونه‌ای طراحی شوند که بتوانند هشدارهای اولیه، هشدارهای جدی و دستور تخلیه را صادر کنند. این سیستم‌ها باید با سایر سیستم‌های هشدار مانند سیستم‌های هشدار زلزله و سیلاب نیز هماهنگ باشند.

توسعه برنامه‌های آمادگی اضطراری جامع: برنامه‌های آمادگی اضطراری باید شامل تمام مراحل از جمله پیش‌بینی، هشدار، تخلیه، امداد و نجات و بازسازی باشد. این برنامه‌ها باید با مشارکت همه دستگاه‌های اجرایی و مردم محلی تدوین و اجرا شوند.

توجه به ابعاد اجتماعی و روانشناسی بحران: در کنار ابعاد فنی و مهندسی، ابعاد اجتماعی و روانشناسی بحران نیز باید مورد توجه قرار گیرد. آموزش‌های روانشناسی برای مقابله با استرس و اضطراب در شرایط بحرانی، می‌تواند به کاهش اثرات روانی حادثه کمک کند.

توسعه تحقیقات در زمینه شکست سد: تحقیقات در زمینه شکست سد باید به صورت مستمر ادامه یابد تا شناخت ما از این پدیده افزایش یابد و روش‌های پیش‌بینی و مقابله با آن بهبود یابد.

۵- تضاد منافع نویسندگان

نویسنده این پژوهش اعلام می‌دارد که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این پژوهش ندارد.

۶- منابع

Atallah, T. A. (2002). A review on dams and breach parameters estimation. *Hydrosystem Engineering M. Sc* (Doctoral dissertation, Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University).

Bigdeli, M., Taheri, M., & Mohammadian, A. (2022). Numerical modeling of dam-break flood flows for dry and wet sloped beds. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 29(3), 259–269. https://doi.org/10.1080/09715010.2022.2052986

Costa, J. E. (1988). Floods from dam failures. *Open-File Report*, 85-560. https://doi.org/10.3133/ofr85560

Das, S., Priyadarshana, A., & Grebby, S. (2024). Monitoring the risk of a tailings dam collapse through spectral analysis of satellite InSAR time-series data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38(8), 2911-2926. https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.00781

DHI. (2024). MIKE21 user manual. *DHI Software*.

Dorn, H., Vetter, M., & Höfle, B. (2014). GIS-based roughness derivation for flood simulations: a comparison of orthophotos, LiDAR and crowdsourced geodata. *Remote sensing*, *6*(2), 1739-1759. https://doi.org/10.3390/rs6021739

Hydrologic Engineering Center. (2014). HEC-RAS river analysis system user's manual. *U.S. Army Corps of Engineers*.

Froehlich, D. C. (2008). Embankment dam breach parameters and their uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(12), 1708-1721. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708)

Haltas, I., Elçi, S., & Tayfur, G. (2016). Numerical simulation of flood wave propagation in two-dimensions in densely populated urban areas due to dam break. *Water Resources Management*, 30, 5699-5721. https://doi.org/10.1007/s11269-016-1344-4

Mostafa, M. M., & Zhenzhong, S. (2023). Effect of zones' dimensions and geometry on seepage through zoned earth dams. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70(1), 46. https://doi.org/10.1186/s44147-023-00223-7

Pareta, K. (2024). 1D-2D hydrodynamic and sediment transport modelling using MIKE models. *Discover Water*, 4(1), 94. https://doi.org/10.1007/s43832-024-00130-9

Sun, R., Wang, X., Zhou, Z., Ao, X., Sun, X., & Song, M. (2014). Study of the comprehensive risk analysis of dam-break flooding based on the numerical simulation of flood routing. Part I: model development. *Natural hazards*, 73, 1547-1568. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1154-z

Urzică, A., Mihu-Pintilie, A., Stoleriu, C. C., Cîmpianu, C. I., Huţanu, E., Pricop, C. I., & Grozavu, A. (2021). Using 2D HEC-RAS modeling and embankment dam break scenario for assessing the flood control capacity of a multi-reservoir system (NE Romania). *Water*, 13(1), 57. https://doi.org/10.3390/w13010057

Wahl, T. L. (2004). Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(5), 389–397. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:5(389)

Wang, H., Li, D., Sheng, T., Sheng, J., Jing, P., & Zhang, D. (2023). A modeling of human reliability analysis on dam failure caused by extreme weather. *Applied Sciences*, 13(23), 12968. https://doi.org/10.3390/app132312968

Technical Strategies in Water Systems

Summer 2024, Volume 2, issue 2 **e-ISSN: 2981-1449**

Applying and comparing finite difference, differential quadrature, and radial basis function-based differential quadrature numerical methods in confined aquifers **103-113**
Atena Naghipour Karder, Ali Khoshfetrat

Numerical analysis of flow hydraulics in a culvert-weir system with a circular crest and gate **114-126**
Donya Heidari, Elham Izadinia

Analysis and evaluation of key indicators in technical and management strategies in water systems with emphasis on sustainable water resources management **127-140**
Sadroddin Etesami

Investigating the social, economic, and environmental effects of water structures: A case study of Kelaroud reservoir dam **141-153**
Mojtaba Farhadzadeh, Heydar Davoodiyan, Maliheh Akbari, Fatemeh Tamjid, Parisa Maleki

Applying the principles of designing sponge greenways in the management of water resources in desert cities (Case study: Maddis of Isfahan) **154-173**
Mozhdeh Jamshidi

Investigating the dam failure process and associated risks: A case study of Doroudzan dam **174-185**
Roozbeh Aghamajidi