



## Research Article



## Modeling of copper removal from electroplating industry wastewaters using zinc oxide nano adsorbent supported on graphene oxide

Mahin Moradi<sup>1</sup>, Soroor Sadeghi\*<sup>2</sup>, Sara Sharifi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

<sup>2</sup> Department of Chemistry, College of Basic Sciences, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

<sup>3</sup> Department of Biology, College of Basic Sciences, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

\*Corresponding Author: soroorsadeghi@iauksh.ac.ir

Received: 03 Sept 2023

Accepted: 08 Oct 2023

Published: 14 Oct 2023

### Abstract

A new nano adsorbent was prepared using zinc oxide nanoparticles supported on graphene oxide to separate copper from electroplating industry wastewater. Graphene oxide was synthesized via Hummer's modified method, and its surface morphology was characterized through FTIR spectroscopy and scanning electron microscopy (SEM). A systematic study of the adsorption process was conducted, varying pH, initial copper concentration, contact time, adsorbent dosage, and temperature. The experimental results revealed that the maximum adsorption capacity, with 89.77% efficiency, was achieved at a pH of 7 when 0.5 g of adsorbent was in contact with a 200 mg/L copper solution at 20°C for 30 minutes. The nano adsorbent exhibited a high adsorption capacity in both simulated and real industrial wastewater samples, effectively removing up to 99% of copper from industrial samples. Adsorption isotherm, kinetic, and thermodynamic studies were performed to elucidate the adsorption mechanism. The adsorption process followed pseudo-second-order models and the Freundlich isotherm. Thermodynamic studies indicated that the adsorption of copper ions on ZnO/GO was a spontaneous and exothermic reaction with an enthalpy of -6361.21 J/mol. This study demonstrates that nano ZnO/GO can be utilized as an effective, low-cost, and environmentally friendly nano adsorbent for electroplating wastewater treatment.

**Keywords:** Graphene oxide, Nano zinc oxide, Copper, Nano-adsorbent, Electroplating wastewater



## مدل سازی حذف مس از پساب صنایع آبکاری فلزات با استفاده از نانو جاذب اکسید روی تثبیت شده بر اکسید گرافن

مهین مرادی<sup>۱</sup>، سرور صادقی<sup>۲\*</sup>، سارا شریفی<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

۲. گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

۳. گروه زیست شناسی، دانشکده علوم پایه، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

\* نویسنده مسئول: [soroorsadeghi@iauksh.ac.ir](mailto:soroorsadeghi@iauksh.ac.ir)

چاپ: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲

### چکیده

یک نانوجاذب جدید با استفاده از نانوذرات اکسید روی تثبیت شده بر اکسید گرافن جهت جداسازی مس از پساب صنعت آبکاری تهیه شد. اکسید گرافن با روش اصلاح شده هامر تهیه شد و مورفولوژی سطح آن با طیف‌سنجی FTIR و میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM مشخص شد. یک مطالعه سیستماتیک از فرآیند جذب با تغییر pH، غلظت اولیه مس، زمان تماس، دوز جاذب و دما انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که حداکثر ظرفیت جذب با راندمان ۸۹/۷۷ درصد در pH برابر با ۷ زمانی بدست آمده است که ۰/۵ گرم جاذب به مدت ۳۰ دقیقه در تماس با ۲۰۰ میلی گرم در لیتر محلول مس در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد بوده است. نانوجاذب ظرفیت جذب بالایی در نمونه‌های پساب صنعتی شبیه‌سازی شده و واقعی نشان داد و در حذف تا ۹۹ درصد مس از نمونه‌های صنعتی مؤثر بود. مطالعات ایزوترم، جنبشی و ترمودینامیکی جذب برای توضیح مکانیسم جذب انجام شد. فرآیند جذب مطابق با مدل‌های مرتبه دوم شبه و ایزوترم فروندلیخ است. بررسی‌های ترمودینامیکی نشان داد که جذب یون‌های مس روی ZnO/GO یک واکنش خودبده‌خودی و گرمازا با مقدار انتالپی برابر با  $-۶۳۶۱/۲۱ \text{ J mol}^{-1}$  بوده است. این مطالعه نشان داد که نانو ZnO/GO می‌تواند به عنوان یک نانوجاذب موثر، کم هزینه و سازگار با محیط زیست برای تصفیه پسابهای آبکاری استفاده شود.

**واژه‌های کلیدی:** اکسید گرافن، نانو اکسید روی، مس، نانوجاذب، پساب آبکاری فلزات

## ۱. مقدمه

پساب‌های صنعتی حاوی فلزات سنگین به دلیل تنوع مسیرهای ورود از صنایع و همچنین افزایش جمعیت رو به افزایش است. فلزات سنگین بسیار سمی و تجزیه ناپذیر بوده و در محیط زیست پایدار هستند و توانایی تجمع در اندام‌ها را داشته و کیفیت آب‌ها را تحت تاثیر قرار داده‌اند. روش‌های حذف یون‌های فلزی از محلول‌های آبی عمدتاً شامل فناوری‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است. فن‌آوری‌های مرسوم مانند رسوب شیمیایی، انعقاد آهک، استخراج با حلال، فیلتراسیون غشایی، اسمز معکوس و تبادل یونی، برای حذف یون‌های فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی استفاده می‌شود (Rafiq et al., 2014; Sulaiman et al., 2021). با این حال، این فناوری‌های مرسوم به دلیل استفاده از مواد غیر قابل احیا، هزینه بالا، نیاز به معرف و انرژی بالا و تولید لجن سمی گران هستند یا در حذف کامل فلزات دارای معایب خاصی هستند. مس دارای طیف گسترده‌ای از کاربردهای صنعتی مانند آبکاری، معدن، برق و الکترونیک، تولید آهن و فولاد، صنعت فلزات غیر آهنی، صنایع چاپ و عکاسی، فرآیندهای فلزکاری است. با افزایش فرایندهای صنعتی، مصرف مس به شدت افزایش یافته است و مقداری که وارد جریان‌های پسماند می‌شود و در نتیجه آلودگی آب‌های طبیعی را نیز به دنبال دارد (Bertram et al., 2002; Sulaiman et al., 2021). اثرات سمی و سرطان‌زایی مس به خوبی ثابت شده است و این اثرات در نتیجه ماهیت توان تجمعی زیستی آن‌ها که این سموم را وارد زنجیره غذایی می‌کند چندین برابر می‌شود (Malamis et al., 2011).

در بین روش‌های حذف مس از پساب‌های صنعتی، جذب به دلیل سادگی روش، راندمان بالا، به حداقل رساندن لجن‌های شیمیایی، بازسازی جاذب‌ها و هزینه کم با قدرت انتخاب جاذب یکی از کاربردی‌ترین و مطالعه شده‌ترین روش‌ها است (Fu & Wang 2011; Rafiq et al. 2014, Zhang et al., 2020). جاذب مناسب باید دارای ویژگی‌های سطح ویژه بالا، حجم تخلخل قابل دسترس برای مولکول‌های جاذب و بازسازی و بازیابی آسان جاذب باشد. استفاده از ضایعات کشاورزی، کربن‌های فعال، زئولیت‌ها، خاک رس و بسیاری از مواد دیگر به‌عنوان جاذب توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما این مواد یا دارای راندمان جذب پایینی هستند یا زمانی که برای تصفیه پساب‌های صنعتی واقعی استفاده می‌شوند، چندان مؤثر نیستند (Aydin et al., 2008). برای حل این مسئله، تمرکز بر استفاده از نانومواد به‌عنوان جاذب‌های بالقوه برای حذف فلزات سنگین معطوف شد، زیرا آن‌ها پتانسیل جذب بهتری به دلیل مساحت سطح بالا، خواص الکتریکی و مغناطیسی دارند (Barakat 2011). بنابراین، نانومواد به طور کلی می‌توانند ظرفیت جذب بسیار بالایی داشته باشند و مقرون به صرفه باشند.

مواد کربنی مانند کربن فعال (Li et al., 2011)، نانولوله‌های کربنی (Fiyadh et al., 2019) و کامپوزیت‌های آن‌ها (Gong et al., 2010, Li et al., 2009) بیشترین کاربرد را به‌عنوان نانو جاذب دارند (Li et al., 2011). اخیراً، گرافن و اکسید گرافن به‌عنوان جاذب برای حذف آلاینده‌های مختلف از محلول‌های آبی مورد استفاده قرار گرفتند و ظرفیت جذب بالا و سینتیک مناسب و سرعت جذب سریع را نشان دادند (Chandra & Kim 2011; Deng et al., 2010; Serag et al., 2017; Vasudevan & Lakshmi 2012; Zhang et al., 2011). گرافن و کامپوزیت‌های آن به دلیل ماهیت دو بعدی منحصر به فرد و ساختار مرتبط (Rao et al., 2009) و خواص الکترونیکی (Mattevi et al., 2009) و مکانیکی (Lee et al., 2008) و تحرک عالی حامل‌های بار و هدایت حرارتی بالا (Balandin et al., 2008) بسیار کارآمد هستند. مهمترین و پرکاربردترین کاربرد

گرافن و اکسید گرافن در پاکسازی و تصفیه آلاینده‌های محیطی است (Vasudevan & Lakshmi 2012)، و به دلیل سطح ویژه بالا و ساختار دو بعدی برای طراحی کامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن عملکرد بسیار خوبی برای حذف آلاینده‌های خطرناک نشان دادند (Zhang et al., 2011). به عنوان مثال، کامپوزیت‌های اکسید گرافن احیا شده (RGO)-MnO<sub>2</sub> برای حذف یون های فلزی از آب سنتز شده‌اند (Sreeprasad et al., 2015). گرافن مورد استفاده برای طراحی کامپوزیت معمولاً به شکل احیا شده از اکسید گرافن (GO) تهیه شده توسط اکسیداسیون گرافیت است. RGO به طور طبیعی تمایل به تجمع غیرقابل بازگشت دارد و بصورت لایه‌هایی انباشته می‌شوند، یا از طریق برهمکنش واندروالس به سطح گرافیت متصل می‌شود (Fu et al., 2015; Zhang et al., 2020). گرافن اکساید یک سیستم به شدت اکسیژن دار بوده و گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن صفحات پایه کربنی و همچنین مکان‌های لبه صفحات گرافنی را اشغال می‌کند. صفحات پایه عمدتاً توسط گروه‌های OH به همراه برخی دیگر از گروه‌های حاوی اکسیژن اشغال می‌شوند در حالی که گروه‌های COOH عموماً در لبه‌ها یافت می‌شوند (Kaniyoor et al., 2010).

هدف از این تحقیق تصفیه پساب‌های صنعت آبکاری مس با نانوجاذب نانو ZnO/GO کم هزینه و با پتانسیل جذب بسیار بالاتر و در نتیجه حذف تقریباً کامل مس از پساب می‌باشد. در این مطالعه، خواص جذب نانو ذرات اکسید روی تثبیت شده بر روی GO از طریق بررسی پارامترهای تجربی، مانند pH، دوز جاذب، زمان تماس، غلظت و دما مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای ایزوترم جذب، جنبشی و ترمودینامیکی از نتایج تجربی برآورد شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد شیمیایی

سولفات مس (CuSO<sub>4</sub>)، کلرید هیدروژن، هیدروکسید سدیم، اسید سولفوریک، پرمنگنات پتاسیم و پراکسید هیدروژن از Merck (آلمان) خریداری شد. گرافیت (متوسط قطر ذرات > ۲۰ میکرومتر)، از سیگما آلدریچ خریداری شد. نانوذرات ZnO دارای خلوص: ۹۹/۵٪، ۲۰ APS نانومتر، SSA برابر با ۵۰ m<sup>2</sup>/g، مورفولوژی تقریباً کروی، چگالی (g/cm<sup>3</sup>) ۵/۶۰۶ می‌باشند.

### ۲-۲- تهیه و شناسایی ساختار اکسید گرافن

اکسید گرافن با استفاده از روش هامر اصلاح شده تهیه شد (Humers & Offeman, 1958). در این روش، ۱۲۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ در یک فلاسک حاوی پودر گرافیت (۵ گرم) اضافه شده و سپس KMnO<sub>4</sub> (۱۷/۵ گرم) به آرامی در دمای صفر درجه سانتیگراد اضافه شد. مخلوط به مدت ۳ ساعت در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد به هم زده شد و سپس با آب در دمای نزدیک به صفر درجه سانتی‌گراد رقیق شد. پس از آن، H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (۳۰ درصد حجمی در آب) به مخلوط اضافه شد تا حباب زدن گاز کامل شود. پودر اکسید گرافن (GO) با سانتریفیوژ محلول جمع آوری شد و متعاقباً تحت خلاء در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. مورفولوژی و ساختار GO توسط SEM (MIRA TESCAN SEM) مشخص شد. طیف FTIR

GO از ۴۰۰ تا  $4000\text{ cm}^{-1}$  بر روی دستگاه Bruker- FTIR (Germany) مدل ALPHA (در محل آزمایشگاه تحقیقاتی دانشگاه) انجام شد.

### ۲-۳- تثبیت نانو ذرات اکسید روی بر اکسید گرافن

برای سنتز کامپوزیت ZnO/GO، ۰/۵ میلی‌گرم نانو اکسید روی در ۵۰ میلی‌لیتر آب با سونیکاسیون ۳۰ دقیقه‌ای حل شد، سپس ۱۰ میلی‌لیتر مخلوط اکسید گرافن (۱ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) به محلول اضافه شد. پس از ۱ ساعت هم زدن، کامپوزیت سانتریفیوژ شد، شسته و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد (Zhang et al., 2011). مورفولوژی سطح نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف FTIR آنالیز شد.

### ۲-۴- جذب مس توسط کامپوزیت نانو ذرات روی تثبیت شده بر گرافن اکساید

برای بررسی قابلیت جذب جاذب، آزمایش‌ها با قرار دادن وزن معینی از جاذب در ۲۵ میلی‌لیتر محلول آبی مس انجام شد. محلول در طول آزمایش به صورت مغناطیسی روی میله همزن مغناطیسی هم زده شد. سپس در یک بازه زمانی مشخص، سوسپانسیون خارج شد و با سانتریفیوژ جدا شد. سپس میزان باقیمانده یون مس در نمونه‌های محلول آزمایشگاهی به کمک روش اندازه‌گیری جذب نوری UV-Vis توسط طیف سنج نوری Varian (USA) مدل Cary 100 Bio (در محل آزمایشگاه تحقیقاتی دانشگاه) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری تغییر غلظت از جذب یون مس در طول موج ۳۲۴ نانومتر استفاده شد. مقدار جذب یون مس با رابطه زیر محاسبه شد:

$$qt = \frac{(C_0 - C_e)V}{M} \quad (1)$$

که  $M$  جرم جاذب بر حسب گرم است،  $V$  حجم محلول‌های یون فلز بر حسب  $L$  و  $C_0$  و  $C_e$  به ترتیب غلظت اولیه و تعادلی بر حسب میلی‌گرم در لیتر هستند. منحنی استاندارد با استفاده از محلول‌های استاندارد مس ترسیم شد.

## ۳. نتایج و بحث

### ۳-۱- شناسایی ساختار و مورفولوژی سطح جاذب

شکل‌گیری GO و نانو ZnO/GO توسط طیف‌سنجی FTIR تأیید شد. شکل ۱ قسمت a طیف FTIR اکسید گرافن را نشان می‌دهد، همانطور که انتظار می‌رفت، طیف GO سیگنال‌هایی را در  $3308/55$ ،  $1728/55$  و  $1628/35$ ،  $1288$  و  $1175/04$  و  $1068/96$ ،  $1007/81\text{ cm}^{-1}$  به ترتیب مربوط به کشش ارتعاشی OH، C=O از گروه کربوکسیلیک، C-O از گروه اپوکسی و C-O از گروه آلکوکسی، نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که این پیک‌ها شدت نسبتاً کمتری در طیف کامپوزیت ZnO/GO نشان داده یا در مواردی ناپدید شده‌اند (شکل ۱ قسمت b). طیف  $3380/71\text{ cm}^{-1}$  نشان می‌دهد که می‌تواند به عنوان کشش ارتعاش OH که شدت کمتری دارد نسبت داده شود. علاوه بر این، این طیف همچنین دو پیک مشخص برای ZnO در  $1517/7$  و  $\text{cm}^{-1}$

۱۳۹۱/۹ را نشان می‌دهد. این پیک‌ها در طیف GO مشاهده نشدند، که نشان دهنده عملکرد موفقیت آمیز سطحی گرافن اکساید است.

شکل ۱. (a) طیف FTIR اکسید گرافن، (b) طیف FTIR اکسید روی تثبیت شده بر اکسید گرافن

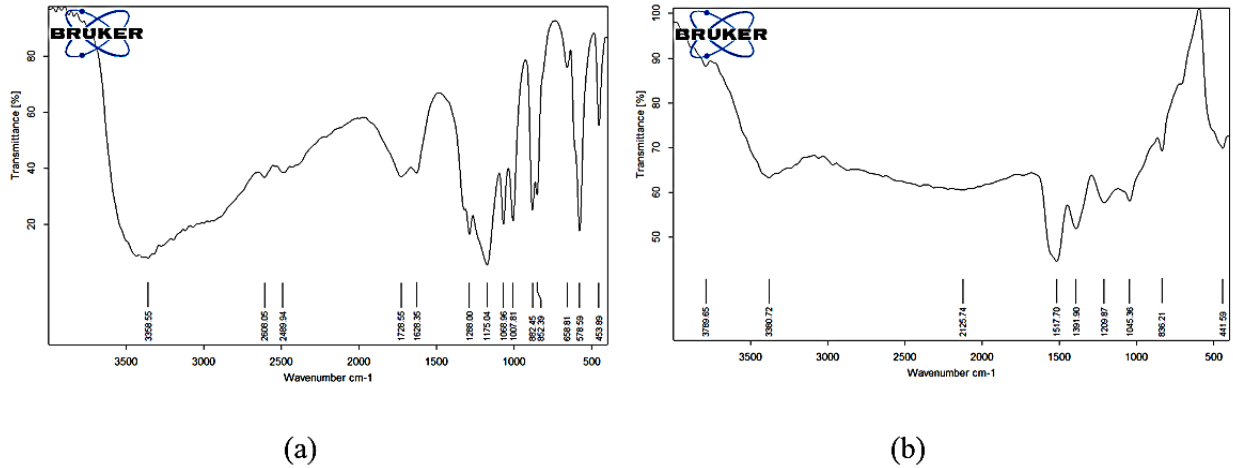


Fig 1. (a) FT-IR spectrum of GO, (b) FT-IR spectrum of nano ZnO/GO

شکل ۲ مورفولوژی GO سنتز شده و اکسید روی تثبیت شده بر اکسید گرافن با روش هامر اصلاح شده را نشان می‌دهد. مطابق شکل ب، ZnO/GO مورفولوژی کاملاً متفاوتی در مقایسه با GO دارد، نانوذرات ZnO شکل خوشه‌ای تجمع یافته را نشان می‌دهند و روی سطح صفحه‌ای GO دیده می‌شوند. در سطح کامپوزیت، می‌توان توزیع یکنواخت نانوذرات اکسید روی را مشاهده نمود.

شکل ۲. (a) تصویر SEM از اکسید گرافن، (b) تصویر SEM از نانو جاذب ZnO/GO

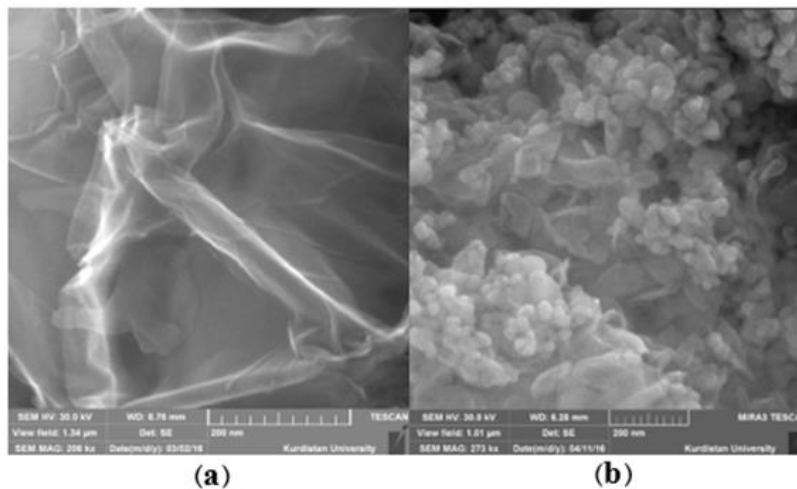


Fig 2. (a) SEM images of GO, (b) SEM images of ZnO/GO nano-adsorbent

## ۳-۲- مطالعات جذب مس توسط کامپوزیت

مطالعات جذب مس بوسیله نانوجاذب با استفاده از نمونه‌های شبیه سازی شده انجام شد. پنج پارامتر برای حداکثر جذب یون-های فلزی بهینه شدند. به منظور ارزیابی اثر غلظت اولیه مس، آزمایش‌هایی در غلظت‌های اولیه متفاوت از ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر انجام شد. از جدول ۱، مشخص است که مقدار فلز جذب شده در هر گرم جاذب ( $q_t$ ) با افزایش غلظت یون فلزی جذب شده به مقدار جاذب موجود، افزایش می‌یابد.

جدول ۱. اثر غلظت اولیه بر جذب مس، زمان تماس ۳۰ دقیقه، مقدار نانو جاذب ۰/۱ گرم، دما ۲۰ درجه سانتیگراد،  $pH=7$

Table 1. Effect of initial concentration on copper adsorption by 0.1 g nano-adsorbent Temperature was 20°C and  $pH=7$ .

ظرفیت جذب ( $mg.g^{-1}$ )	غلظت باقیمانده ( $mg.L^{-1}$ )	زمان تماس (min)	دوز جاذب (g)	غلظت اولیه ( $mg.L^{-1}$ )
۵/۱۲۰	۲۹/۵۲۳	۳۰	۰/۱	۵۰
۱۷/۱۴۵	۳۱/۴۲۰	۳۰	۰/۱	۱۰۰
۲۹/۱۷۰	۳۳/۳۲۰	۳۰	۰/۱	۱۵۰
۳۹/۳۹۱	۴۲/۴۳۴	۳۰	۰/۱	۲۰۰

تغییر در جذب یون‌های مس بر ZnO/GO به عنوان تابعی از زمان تماس در دمای اتاق مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور ۰/۱ گرم از جاذب در تماس با ۲۵ میلی‌لیتر محلول یون مس (II) برای زمان‌های مختلف تماس ۳۰-۱۲۰ دقیقه، به منظور دستیابی به تعادل و رسیدن به زمان تماس بهینه استفاده شد. جدول ۲ روند جذب Cu(II) روی نانوجاذب‌های ZnO/GO را برای زمان‌های تماس مختلف نشان می‌دهد و مشاهده شد که تعادل در ۶۰ دقیقه به دست آمد اما جذب اولیه  $39/391 \text{ mg.g}^{-1}$  در ۳۰ دقیقه اول سریع بوده است که به آرامی به  $40/262 \text{ mg.g}^{-1}$  افزایش می‌یابد.

جدول ۲. اثر زمان تماس بر جذب مس، غلظت اولیه فلز ۲۰۰ ( $mg/L$ )، مقدار جاذب ۰/۱ گرم؛ دما ۲۰ درجه سانتیگراد و  $pH=7$

Table 2. Effect of contact time on copper adsorption, Initial concentration of copper solutions was 200 ( $mg/L$ ), temperature was 20°C, adsorbent dosage was 0.1 g, and  $pH=7$

ظرفیت جذب ( $mg.g^{-1}$ )	غلظت باقیمانده ( $mg.L^{-1}$ )	دوز جاذب (g)	زمان تماس (min)	$t/q_t$	$\log(q_e - q_t)$
۳۹/۳۹۱	۴۲/۴۳۴	۰/۱	۳۰	۰/۷۶۲	-۰/۰۶۰
۴۰/۰۶۷	۳۹/۷۳۷	۰/۱	۶۰	۱/۴۹۷	-۰/۷۱۰
۴۰/۱۲۰	۳۹/۵۱۷	۰/۱	۹۰	۲/۲۴۳	-۰/۸۴۸
۴۰/۲۶۲	۳۸/۹۵۰	۰/۱	۱۲۰	۲/۹۸۰	$t_e$

این نتیجه را می‌توان به جذب سریع یون‌ها در سطح بزرگ کامپوزیت ZnO/GO نسبت داد که با افزایش زمان تماس اشغال می‌شود و با نزدیک شدن به تعادل باعث کاهش سرعت می‌شود. سرعت حذف فلز در ابتدا زیاد است زیرا سطح بزرگتر جاذب برای جذب فلز در دسترس است، اما پس از رسیدن به تعادل، حذف فلز نیز کند می‌شود زیرا سطح جاذب توسط فلز استفاده

می‌شود. مدل‌های سینتیکی برای بررسی نتایج به‌دست‌آمده از نظر سرعت جذب  $\text{Cu (II)}$  روی نانوجاذب  $\text{ZnO/GO}$  استفاده شد. داده‌های بدست آمده با معادله شبه مرتبه اول (PFO) و شبه مرتبه دوم بررسی شدند. جدول ب پارامترهای مربوط به این دو معادله را نمایش می‌دهد و پردازش داده‌ها برای جذب یون‌های مس در  $\text{ZnO/GO}$  نشان می‌دهد که مدل شبه مرتبه دوم به خوبی مطابقت دارد. بنابراین جذب مس (II) روی نانوجاذب از سینتیک مرتبه دوم شبه پیروی کرد و دخالت فرآیند جذب شیمیایی را در تعیین سرعت آن مشخص می‌نماید، همچنین سینتیک‌های شبه مرتبه دو نشان می‌دهند که میزان اشغال سایت‌های فعال نانو جاذب به تعداد مجذور مکان‌های فعال اشغال نشده روی سطح نانوجاذب مرتبط است.

دوز جاذب پارامتر مهمی است که بر جذب یون‌های فلزی تأثیر می‌گذارد. مقادیر مختلفی از جاذب‌ها در حجم یکسانی از محلول یون فلزی در pH، زمان تماس و دمای ثابت در نظر گرفته شد تا دوز جاذب بهینه به دست آید. مطابق با جدول ۳ جذب مس (II) با افزایش دوز جاذب به دلیل افزایش تعداد محل جذب افزایش می‌یابد، اما مقدار مس جذب شده در هر گرم نانوجاذب  $q_e$  با افزایش دوز جاذب کاهش می‌یابد. جذب بسیار سریع بر روی سطح جاذب منجر به غلظت کمتر جاذب در محلول می‌شود و هنگامی که غلظت جاذب در محلول کمتر است، مکان‌های جذب جاذب غیر اشباع باقی می‌مانند، بنابراین با افزایش دوز جاذب، مقدار مس جذب شده در واحد وزن جاذب کاهش می‌یابد (Hu et al. 2010).

جدول ۳. اثر میزان جاذب بر جذب مس، غلظت اولیه فلز  $200 \text{ (mg/L)}$ ، زمان تماس ۳۰ دقیقه، دما ۲۰ درجه سانتیگراد و  $\text{pH}=7$

Table 3. Effect of adsorbent dosage on copper adsorption, Initial concentration of copper solutions was  $200 \text{ (mg/L)}$ , the contact time was 30 min, the temperature was  $20^\circ\text{C}$ , and the  $\text{pH}=7$

دوز جاذب (g)	غلظت اولیه ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	غلظت باقیمانده ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	ظرفیت جذب ( $\text{mg.g}^{-1}$ )	راندمان جذب (%)
۰/۱	۲۰۰	۴۲/۴۳۴	۳۹/۳۹۱	۷۸/۷۸
۰/۲	۲۰۰	۳۶/۲۶۸	۲۰/۴۶۶	۸۱/۸۷
۰/۳	۲۰۰	۳۲/۱۵۸	۱۳/۹۸۷	۸۳/۹۲
۰/۴	۲۰۰	۲۷/۰۴۷	۱۰/۸۰۹	۸۵/۹۸
۰/۵	۲۰۰	۲۰/۴۵۸	۸/۹۷۷	۸۹/۷۷

شکل ۳ نشان دهنده مقایسه دو مدل ایزوترم لانگمویر و فروندلیخ است. با توجه به میزان ضریب همبستگی محاسبه شده از این نمودارها، مشخص شده است که مدل ایزوترم فروندلیخ توصیف کننده فرآیند جذب مس توسط نانو جاذب  $\text{ZnO/GO}$  است. مدل ایزوترم فروندلیخ یک معادله تجربی است که بر اساس جذب سطحی روی سطح ناهمگن یا جذب سطحی بر روی سطح-های حاوی مکان‌هایی فعال با تمایل‌های مختلف برای جذب است. فرض بر این است که ابتدا محل اتصال قوی‌تر توسط جذب شونده اشغال می‌شود و با افزایش اشغال محل‌های فعال، قدرت اتصال جذب شونده کاهش می‌یابد.



شکل ۳. (a) مدل ایزوترم لانگمویر و (b) مدل ایزوترم فروندلیخ برای جذب مس بوسیله نانو جاذب ZnO/GO

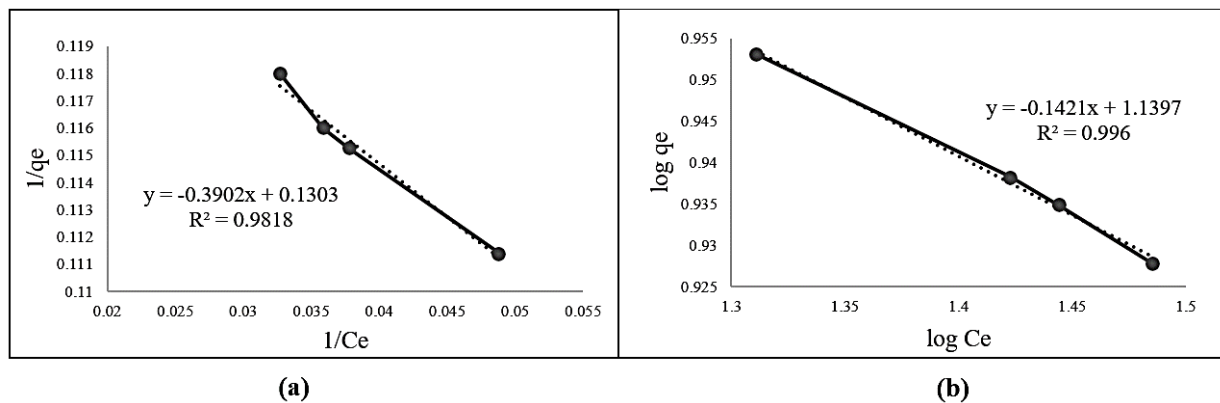


Fig 3. (a) Langmuir isotherm model, and (b) Freundlich isotherm model for adsorption of copper ions on ZnO/GO nano-adsorbent

در فرآیند جذب، دما نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند زیرا پساب‌ها در دماهای مختلف در صنایع مختلف خارج می‌شوند. برای بررسی اثر دما بر جذب فلز روی نانو جاذب، ۰/۵ گرم جاذب اجازه داده شد تا در تماس با ۲۵ میلی‌لیتر محلول یون فلز مس برای زمان‌های تماس بهینه با تغییر دما از ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد باقی بماند. جدول ۴ نشان دهنده این است که جذب یون‌ها با افزایش دما کاهش می‌یابد، زیرا جذب یون‌های مس روی نانو جاذب یک فرآیند گرمازا است. در این مطالعه بیشترین مقدار  $q_e$  به میزان ۳۹/۷۲ میلی‌گرم بر گرم با میزان حذف ۸۹/۷۷ درصد در ۲۹۳ کلوین رسید.

جدول ۴. اثر دما بر جذب مس توسط کامپوزیت و پارامترهای ترمودینامیکی، غلظت اولیه فلز ۲۰۰ (mg/L)، دوز جاذب ۰/۵ گرم، زمان تماس ۳۰ دقیقه، و  $pH=7$

Table 4. Effect of temperature on copper adsorption, initial concentration of copper solutions was 200 (mg/L), the adsorbent dosage was 0.5 g, the contact time was 30 min, and  $pH=7$ 

دما (K)	غلظت باقیمانده (mg.L <sup>-1</sup> )	ثابت تعادل Kc	Ln Kc	$\Delta G$ (J.mol <sup>-1</sup> )	1/T (K <sup>-1</sup> )
۲۹۳	۲۰/۴۵۸	۸/۷۷۶	۲/۱۷۲	-۵۲۹۰/۹۹	۰/۰۰۳۴
۳۱۳	۲۶/۴۶۶	۶/۵۵۷	۱/۸۸۱	-۴۸۹۴/۸۹	۰/۰۰۳۲
۳۳۳	۲۷/۸۲۰	۶/۱۸۹	۱/۸۲۳	-۵۰۴۶/۵۳	۰/۰۰۳۰
۳۵۳	۳۰/۵۷۷	۵/۵۴۱	۱/۷۱۲	-۵۰۲۴/۴۵	۰/۰۰۲۸

رفتار ترمودینامیکی جذب یون‌های مس بر ZnO/GO با پارامترهای ترمودینامیکی، تغییر انرژی آزاد گیبس ( $\Delta G$ )، آنتالپی ( $\Delta H$ ) و آنتروپی ( $\Delta S$ ) ارزیابی شد. این پارامترها با استفاده از معادلات ۳ و ۲ محاسبه شدند:

$$\Delta G = -RT \ln Kc \quad (2)$$

$$\ln Kc = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (3)$$

که در آن  $Kc$  ثابت تعادل،  $R$  ثابت گاز ایده‌آل و  $T$  دمای جذب بر حسب کلوین است. مقدار منفی  $\Delta G$  ماهیت خود به خودی جذب را نشان می‌دهد. این مطلب که جذب در دماهای پایین‌تر راندمان بهتری دارد علاوه بر گرمازا بودن فرایند جذب نشان دهنده مزیت دیگر این نانوجاذب در جذب مس است که علی‌رغم بسیاری از جاذب‌های شیمیایی نیاز به تنظیم دماهای بالا و صرف انرژی و زمان برای افزایش راندمان وجود ندارد.

تغییر آنتالپی ( $\Delta H = -6361.21 \text{ J.mol}^{-1}$ ) و تغییر آنتروپی ( $\Delta S = 3.99 \text{ J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) از شیب و عرض از مبدا نمودارهای خطی وانت هاف در شکل ج به دست آمد. مقدار منفی تغییر آنتالپی نشان می‌دهد که فرایند جذب طبیعت گرمازا دارد و مقادیر منفی تغییر آنتروپی کاهش تصادفی بودن رابط محلول را در طول جذب یون‌های مس روی جاذب نشان می‌دهد.

شکل ۴. دیاگرام ترمودینامیکی جذب مس بوسیله نانو جاذب ZnO/GO

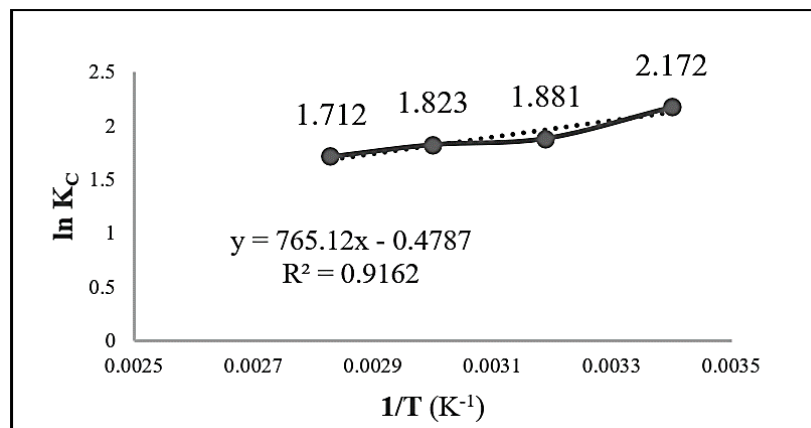


Fig 4. Thermodynamic diagram for copper adsorption by ZnO/GO nano-adsorbent

$\text{pH}$  محلول فلزی یکی از مهم‌ترین پارامترهای کنترل کننده فرایند جذب یون است. برای بررسی این اثر، یک سری آزمایش با استفاده از محلول‌های مس، با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر و در شرایط بهینه بدست آمده از قبل، با  $\text{pH}$  اولیه در محدوده ۴-۷ انجام شد و نتایج در شکل ۴ ارائه شده است. ظرفیت جذب با  $\text{pH}$  در محدوده اسیدی افزایش می‌یابد و به حداکثر راندمان حذف ۸۹/۷۷ درصد در  $\text{pH}$  برابر با ۷ می‌رسد. به دلیل رسوب فلز، و پس از ۷، مقدار بیشتری نمی‌توان ثبت کرد. در حالی که در  $\text{pH}$  پایه، افزایش در محل‌های بار مثبت رخ می‌دهد که نیروهای دافعه الکترواستاتیکی بین سطح یون‌های جاذب و فلزات را افزایش می‌دهد، بنابراین نتیجه آن کاهش جذب یون‌های فلزات است (Nassar 2010). در مقایسه با برخی جاذب‌ها که در میزانهای اسیدی یا قلیایی کارایی بهتری دارند، این مطلب که  $\text{pH}$  بهینه عملکرد جاذب مورد نظر در نزدیکی  $\text{pH}$  خنثی است مزیت بسیار مهمی از نکته نظر عملکرد پذیری، سرعت عمل و عدم نیاز به تنظیم  $\text{pH}$  در بسیاری از موارد است.

شکل ۵. اثر pH بر جذب مس بوسیله نانو جاذب ZnO/GO

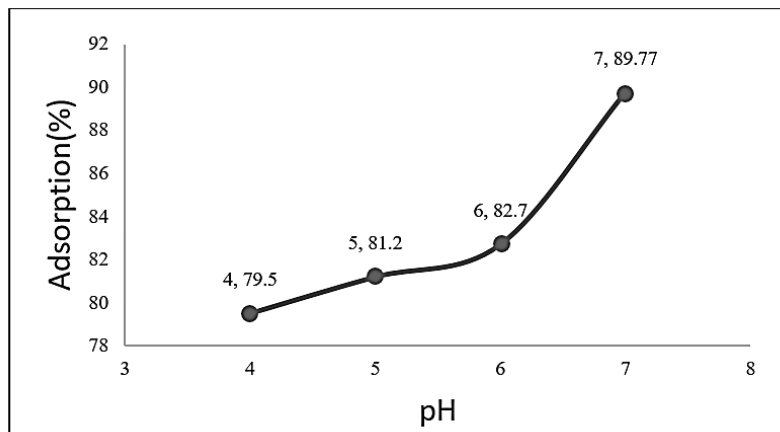


Fig 5. Effect of pH on copper adsorption by ZnO/GO nano-adsorbent

### ۳-۳- مطالعات جذب مس از نمونه حقیقی پساب صنعتی

پس از بهینه‌سازی پارامترها، نانوجاذب تهیه شده برای نمونه پساب صنایع آبکاری فلزات مورد استفاده قرار گرفت. غلظت مس نمونه قبل و بعد از عملیات جذب بررسی شد. نتایج به دست آمده به اندازه نمونه‌های شبیه‌سازی شده مؤثر بود. درصد راندمان حذف به دست آمده ۹۹/۹۵ درصد بوده است.

### ۴. نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به استفاده از نانوذرات اکسید روی و تثبیت آن‌ها بر روی اکسید گرافن به عنوان یک نانوجاذب موثر برای حذف مس (II) از پساب صنایع آبکاری فلزات می‌پردازد. گرافن با استفاده از روش اصلاح شده هامر با موفقیت تهیه شده است. در مقایسه با جاذب‌های گران قیمت با ظرفیت جذب محدود، روش تهیه ساده نانوجاذب ZnO/GO، فرایند جذب آسان و سریع مس و ظرفیت بالای جاذب از مزایای این روش است. فرآیند جذب از سینتیک مرتبه دوم پیروی می‌کند، که نشان می‌دهد جذب یک فرآیند کنترل کننده شیمیایی است. مدل ایزوترم فروندلیچ جذب سطحی مس را روی سطح ناهمگن حاوی مکان‌هایی فعال برای جذب تایید کرده است. بررسی‌های ترمودینامیکی نشان داد که واکنش جذب یک واکنش خودبه‌خود و گرمازا بود. نانوجاذب ظرفیت جذب بالایی را در نمونه‌های شبیه‌سازی شده و نمونه حقیقی پساب صنعتی نشان داد. بر اساس این روش، فرآیند جذب آسان و ظرفیت جذب بالا، کامپوزیت نانو ZnO/GO یک روش جداسازی ساده و سازگار با محیط زیست برای حذف آلاینده‌های یون فلزی از سیستم‌های آبی و پساب‌های صنعتی ارائه می‌کند.

## ۵. سپاسگزاری

این مطالعه در دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه انجام شد که بدینوسیله مورد تقدیر و تشکر قرار می‌گیرد.

## ۶. تضاد منافع نویسندگان

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

## ۷. منابع

- Aydın, H., Bulut, Y., & Yerlikaya, Ç. (2008). Removal of copper (II) from aqueous solution by adsorption onto low-cost adsorbents. *J. Environ. Manag.* 87(1), 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.005>
- Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F. & Lau, C. N. (2008). Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Lett.*, 8(3), 902-907. <https://doi.org/10.1021/nl0731872>
- Barakat, M. A. (2011). New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arab. J. Chem.*, 4(4), 361-377. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.07.019>
- Bertram, M., Graedel, T.E., Rechberger, H. & Spataro, S. (2002). The contemporary European copper cycle: waste management subsystem. *Ecol. Econ.*, 42(1), 43-57. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00100-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00100-3)
- Chandra, V. & Kim, K. S. (2011). Highly selective adsorption of Hg 2+ by a polypyrrole-reduced graphene oxide composite. *Chem. Commun.*, 47(13), 3942-3944. <https://doi.org/10.1039/C1CC00005E>
- Deng, X., Lü, L., Li, H. & Luo, F. (2010). The adsorption properties of Pb (II) and Cd (II) on functionalized graphene prepared by electrolysis method. *J. Hazard. Mater.*, 183(1), 923-930. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.117>
- Fiyadh, S.S., AlSaadi, M.A., Jaafar, W.Z., AlOmar, M.K., Fayaed, S.S., Mohd, N.S., & El-Shafie, A. (2019). Review on heavy metal adsorption processes by carbon nanotubes. *J Clean Prod* 230, 783-793. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.154>
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *J. Environ. Manag.*, 92, 407-18. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- Gong, J. L., Wang, B., Zeng, G. M., Yang, C. P., Niu, C. G., Niu, Q. Y., Zhou, W.J. & Liang, Y. (2009). Removal of cationic dyes from aqueous solution using magnetic multi-wall carbon nanotube nanocomposite as adsorbent. *J. Hazard. Mater.*, 164(2), 1517-1522. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.072>
- Hu, J., Song, Z., Chen, L., Yang, H., Li, J. & Richards, R. (2010). Adsorption properties of MgO (111) nanoplates for the dye pollutants from wastewater. *J. Chem. Eng. Data*, 55(9), 3742-3748. <https://doi.org/10.1021/jc100274e>
- Humers, W. S. and Offeman, R. E. (1958). Preparation of graphitic oxide [J]. *J. Am. Chem. Soc.* 80(6), 1339. <https://doi.org/10.1021/ja01539a017>
- Kaniyoor, A., Baby, T. T. & Ramaprabhu, S. (2010). Graphene synthesis via hydrogen induced low-temperature exfoliation of graphite oxide. *J. Mater. Chem.*, 20(39), 8467-8469. <https://doi.org/10.1039/C0JM01876G>
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W. & Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Sci.*, 321(5887), 385-388. <https://doi.org/10.1126/science.1157996>

- Li, Y., Du, Q., Liu, T., Qi, Y., Zhang, P., Wang, Z., & Xia, Y. (2011). Preparation of activated carbon from *Enteromorpha prolifera* and its use on cationic red X-GRL removal. *Appl. Surf. Sci.*, 257(24), 10621-10627. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.07.060>
- Li, Y., Liu, F., Xia, B., Du, Q., Zhang, P., Wang, D., Wang, Z. & Xia, Y. (2010). Removal of copper from aqueous solution by carbon nanotube/calcium alginate composites. *J. Hazard. Mater.*, 177(1), 876-880. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.114>
- Malamis, S., Katsou, E. & Haralambous, K.J. (2011). Study of Ni (II), Cu (II), Pb (II), and Zn (II) removal using sludge and minerals followed by MF/UF. *Water, Air, & Soil Pollut.*, 218(1-4), 81-92. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0625-4>
- Mattevi, C., Eda, G., Agnoli, S., Miller, S., Mkhoyan, K. A., Celik, O., Mastrogiovanni, D., Granozzi, G., Garfunkel, E. & Chhowalla, M. (2009). Evolution of electrical, chemical, and structural properties of transparent and conducting chemically derived graphene thin films. *Adv. Funct. Mater.*, 19(16), 2577-2583. <https://doi.org/10.1002/adfm.200900166>
- Nassar, N. N. (2010). Rapid removal and recovery of Pb (II) from wastewater by magnetic nano adsorbents. *J. Hazard. Mater.*, 184(1), 538-546. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.069>
- Rafiq, Z., Nazir, R., Shah, M.R. & Ali, S. (2014). Utilization of magnesium and zinc oxide nano-adsorbents as potential materials for treatment of copper electroplating industry wastewater. *J. Environ. Chem. Eng.*, 2(1), 642-651. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.11.004>
- Rao, C. E. E., Sood, A. E., Subrahmanyam, K. E. & Govindaraj, A. (2009). Graphene: the new two-dimensional nanomaterial. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 48(42), 7752-7777. <https://doi.org/10.1002/anie.200901678>
- Serag, E., El Nemr, A., & El-Maghraby, A. (2017). Synthesis of highly effective novel graphene oxide-polyethylene glycol-polyvinyl alcohol nanocomposite hydrogel for copper removal. *J. Water Environ. Nanotechnol.* 2, 223–234. <https://doi.org/10.22090/JWENT.2017.04.001>
- Sulaiman, S., Azis, R.S., Ismail, I., et al. (2021). Adsorptive Removal of Copper (II) Ions from Aqueous Solution Using a Magnetite Nano-Adsorbent from Mill Scale Waste: Synthesis, Characterization, Adsorption and Kinetic Modelling Studies. *Nanoscale Res Lett* 16, 168. <https://doi.org/10.1186/s11671-021-03622-y>
- Sreepasad, T. S., Maliyekkal, S. M., Lisha, K. P. & Pradeep, T. (2011). Reduced graphene oxide–metal/metal oxide composites: facile synthesis and application in water purification. *J. Hazard. Mater.*, 186(1), 921-931. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.11.100>
- Vasudevan, S. & Lakshmi, J. (2012). The adsorption of phosphate by graphene from aqueous solution. *Rsc Adv.*, 2(12), 5234-5242. <https://doi.org/10.1039/C2RA20270K>
- Zhang, N., Qiu, H., Si, Y., Wang, W. & Gao, J. (2011). Fabrication of highly porous biodegradable monoliths strengthened by graphene oxide and their adsorption of metal ions. *Carbon.*, 49(3), 827-837. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.10.024>
- Zhang, J., Lin, S., Han, M., Qing, Su., Xia, L., & Hui, Z. (2020). Adsorption Properties of Magnetic Magnetite Nanoparticle for Coexistent Cr (VI) and Cu (II) in Mixed Solution. *Water*, 12, 446–459. <https://doi.org/10.3390/w12020446>



Research Article



## Optimal design of circular concrete water tanks by MCMC subset simulation method

Mohammad Aghae<sup>1</sup>, Yasin Aghae-Shalmani<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> MsC. in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Azad University of Najaf-Abad, Isfahan, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Prof, Department of Mechanical and Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University of Khomeinishahr, Isfahan, Iran.

\*Corresponding Author: [y.aghaee@iaukhsh.ac.ir](mailto:y.aghaee@iaukhsh.ac.ir)

Received: 25 June 2023

Accepted: 07 Oct 2023

Published: 14 Oct 2023

### Abstract

Today, one of the favorite subjects among structural engineering researchers is methods based on the optimization of structures, often referred to as RBDO (Reliability-Based Design Optimization). In this field, optimization problems are formulated and solved while considering probabilistic constraints. In the present research, we have undertaken the task of optimizing a circular water tank. The objective function in this study is the cost associated with constructing a reinforced concrete tank, and potential constraints include factors related to strength and serviceability, such as the demand-to-capacity ratio, crack width, and structural deformations. The criteria for designing strength and serviceability adhere to Regulation 123 of the country's management and planning organization. To demonstrate the effectiveness and efficiency of the MCMC (Markov Chain Monte Carlo) simulation and optimization method employed in this research for tank design, we have investigated a water tank with a volume of 113 m<sup>3</sup>. Additionally, we have modeled this reservoir using SAP2000 software and implemented computer programming using the MCMC method in MATLAB software.

**Keywords:** Reliability, Optimization, Probabilistic Constraints, RBDO, MCMC



## طراحی بهینه مخازن آب بتنی دایروی به روش شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای MCMC

محمد آقایی<sup>۱</sup>، یاسین آقایی شلمانی<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناسی ارشد مهندسی عمران سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ایران.

۲. استادیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه عمران، دانشکده مهندسی مکانیک و عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان، ایران.

\* نویسنده مسئول: [y.aghaee@iaukhsh.ac.ir](mailto:y.aghaee@iaukhsh.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵

چاپ: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

### چکیده

امروزه یکی از موضوعات موردعلاقه پژوهشگران حوزه مهندسی سازه، روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی سازه‌ها با نام RBDO یا همان بهینه‌سازی بر پایه قابلیت‌اعتماد سازه‌ها است. در این حوزه، مسائل بهینه‌سازی با توجه به قیود احتمالاتی، طراحی و بهینه‌سازی می‌گردند. در پژوهش حاضر مسئله بهینه‌سازی مخزن دایروی آب، مورد طراحی بهینه قرار گرفته است. تابع هدف در این پژوهش، هزینه ساخت مخزن بتن‌آرمه بوده و قیود احتمالاتی آن شامل قیود مقاومتی و خدمت‌پذیری نظیر نسبت تقاضا به ظرفیت، میزان عرض ترک و تغییرشکل‌های سازه می‌باشد که آیین‌نامه مورد استفاده نیز برای بارگذاری، طراحی ضوابط مقاومتی و خدمت‌پذیری، آیین‌نامه ۱۲۳ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور می‌باشد. در نهایت برای نشان‌دادن کارایی و عملکرد مناسب روش شبیه‌سازی و بهینه‌سازی MCMC که در این پژوهش، برای حل مسئله طراحی مخزن به کار رفته است به بررسی یک مخزن آب با حجم  $113 \text{ m}^3$  پرداخته شده است. همچنین مدل-سازی این مخزن در نرم‌افزار SAP2000 و برنامه‌نویسی کامپیوتری به روش MCMC در نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: قابلیت‌اعتماد، بهینه‌سازی، قیود احتمالاتی، RBDO، MCMC

## ۱. مقدمه

از پرکاربردترین مخازن بتنی و یکی از سازه‌های مهم حیاتی بشر، مخازن ذخیره‌ی آب است که با توجه به رشد فزاینده جمعیت و توسعه جمعیت روستاها و شهرها، به‌منظور حفظ مایع درون آن در شرایط بحرانی و اقتصادی واضح و آشکار است. بنابراین استفاده از روش‌های نوین در طراحی و احداث مخازن، اهمیت بسزایی دارد. چنانچه طراحی مخازن بتنی، به‌درستی انجام نشده باشد، یا ایمنی و دوام آن به خطر افتد، با صرف هزینه‌های اضافی باعث اتلاف منابع مالی می‌شود. با توجه به ملاحظات پدافند غیرعامل و فنی، مخازن دایروی به علت نداشتن گوشه‌های تیز در شکل هندسی نسبت به مخازن مکعب مستطیلی برتری دارد. بنابراین در پژوهش حاضر، به مثالی از طراحی بهینه مخازن بتنی دایروی آب از نوع غیرمدفون، پرداخته شده است. مهندسین و محققین تقریباً از سال ۱۹۶۰ به اهمیت ارزیابی ایمنی سازه‌ها با بررسی رفتار تصادفی پارامترهای طراحی و خصوصیات آماری آن‌ها پرداختند (Mirsharifi & Baba 2017). پژوهش‌های انجام شده در زمینه بهینه‌سازی، عمدتاً از روش‌هایی می‌باشند که ضعف عمده‌ی آن ناتوانی در لحاظ نمودن قیود احتمالاتی است. پیرامون همین موضوع، Jahanshahi و همکاران (2016)، به کاربرد روش‌های نوین بهینه‌سازی در سازه‌های بتنی پرداختند. Havaei و Kia (2012)، به بهینه‌سازی مخزن بتنی مستطیلی نیمه‌مدفون آب توسط الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)<sup>۱</sup> با استفاده از غلاف تقویت منشوری پرداختند. Wankhede و همکاران (2015) در پژوهشی بهینه‌سازی هزینه مخازن آب دایروی با یک برنامه‌ریزی کامپیوتری و استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات، را بررسی کردند. Chiti و همکاران (2015) در مقاله‌ای طراحی بهینه سدهای وزنی بتنی را بر اساس قابلیت‌اعتماد به روش شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای انجام دادند. Ahmadi (2012) در پژوهشی به بهینه‌سازی ساخت مخازن بتنی زمینی آب با کاهش مقاومت فشاری بتن و افزایش مقاومت کششی فولاد پرداخت. Proppe (2017)، روش شبیه‌سازی MCMC<sup>۲</sup> را برای تحلیل قابلیت‌اعتماد سازه‌ها بکار برد. او با استفاده از تحلیل زیرمجموعه‌ای و با به‌کارگیری روش تقریب زنی احتمالاتی MCMC سعی در شبیه‌سازی قابلیت‌اعتماد سازه‌ها داشته است. Jensen و همکاران (2021) در پژوهشی یک رویکرد کلی برای حل مسائل طراحی سازه ارائه کردند که یک رویکرد دو فازی برای به دست آوردن طرح‌های بهینه در نظر گرفته شده است. فاز یک نمونه‌ها (طرح‌ها) را تولید می‌کند که به طور یکنواخت در فضای طراحی امکان‌پذیر توزیع شده‌اند، در حالی که فاز دوم مجموعه‌ای از طرح‌ها را در مجاورت مجموعه راه‌حل بهینه به دست می‌آورد که مشکل به روز رسانی مدل معادل با روش مونت کارلوی زنجیره مارکف انتقالی حل شده است. Xiao و Nowak (2022) یک روش نمونه‌گیری کارآمد جدید برای تخمین PDF<sup>۳</sup> شرطی شکست و شاخص حساسیت قابلیت اطمینان از طریق شبیه‌سازی دو مرحله‌ای زنجیره مارکوف مونت کارلو (MCMC) پیشنهاد دادند.

در سال 2013، در پژوهشی از الگوریتم MCMC جهت طراحی روسازی راه بر اساس قابلیت‌اعتماد استفاده شد (Dilip & Sivakumar Babu 2013). Khanmohammadi و همکاران (2010)، به بررسی مبانی طراحی مخازن بتنی ذخیره آب در آیین‌نامه‌های معتبری چون (EN 1998-4:2006, NZS 3106-2009, ACI350.3-06) و نشریه ۱۲۳ پرداختند. در سال 2010، در پژوهشی تحت عنوان بهینه‌سازی طراحی با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای، یک الگوریتم بهینه‌سازی

1- Particle Swarm Optimization  
3- Markov Chain Monte Carlo  
3- Probability Density Function



عمومی دو معیاره ارائه شد (Li & Au 2010). روش پیشنهادی این الگوریتم، در واقع همان روش MCMC است که در معیار اول، آنهایی که دامنه‌ی بیشتری به اطلاعات موجود دهد و در معیار دوم آنهایی که تابع هدف را بهبود بخشد، مورد قبول است. در سال 2015، در مقاله‌ای به طراحی بهینه مجزای سازه‌های خرپایی شکل با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای پرداخته شد (Li & Ma 2015).

Lopez و Beck (2012) در یک مقاله‌ی مروری، انواع روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت‌اعتماد، به خصوص روش مرتبه اول قابلیت‌اعتماد (FORM)؛<sup>۴</sup> را مورد بررسی قرار دادند. روش بهینه‌سازی بر پایه‌ی قابلیت‌اعتماد (RBDO<sup>۵</sup>)، به دنبال راهی است که پاسخ بهینه را در یک سطح حداقلی از ایمنی نگه دارد. از آنجایی که روش FORM، جهت محاسبه شاخص قابلیت‌اعتماد مورد استفاده قرار می‌گیرد در اصل جزء روش‌های بهینه‌سازی است. استفاده از این روش در استراتژی RBDO در یک دیدگاه سنتی دارای دو حلقه‌ی تو در تو می‌باشد. منظور از حلقه‌ی درونی، تحلیل قابلیت‌اعتماد و حلقه‌ی بیرونی روند بهینه‌سازی است. از آنجا که ترکیب این دو حلقه از لحاظ محاسباتی بسیار هزینه‌بر است؛ جهت کاهش حجم محاسباتی RBDO که بر اساس روش FORM شکل گرفته‌اند پژوهشگران این حوزه را بر آن داشته است که پیشنهادهایی جهت جدا نمودن روند محاسباتی این دو حلقه از هم ارائه دهند؛ این پیشنهادها به دو دسته‌ی اصلی تقسیم‌بندی می‌گردند:

دسته‌ی اول به روش‌هایی تعلق دارد که تک حلقه‌ای بوده و به صورت زنجیره‌ای از تک حلقه‌ها می‌باشد و هدف آن است که دو حلقه از یکدیگر جدا گردد و حل آن‌ها به صورت زنجیره‌ای تا رسیدن به یک معیار توقف ادامه یابد. دسته‌ی دوم مربوط به روش‌های تک سطحی است و با در نظر گرفتن یک استراتژی متفاوت، سعی در به نتیجه رساندن حلقه‌ی بهینه‌سازی دارد.

روش‌های جداسازی به دو دسته‌ی مهم یعنی بهینه‌سازی زنجیره‌ای بر اساس قابلیت‌اعتماد (SORA<sup>۶</sup>) و برنامه‌ریزی تقریبی مرحله‌ای، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این دو دسته بهترین کارایی را در مقایسه با تمامی روش‌های جداسازی دارا می‌باشند. در مقایسه با روش MCMC می‌توان گفت که روش FORM بر پایه‌ی محاسبه‌ی گرادیان توابع حالت‌حدی، بهینه‌یابی می‌کند در صورتی که شبیه‌سازی مانند MCMC تنها با جایگذاری مقادیر عددی که بار محاسباتی بسیار کمی دارد (سعی و خطا) به شبیه‌سازی قیود می‌پردازد. لذا حساسیتی به مشتق‌پذیر بودن قیود مسئله ندارد. در ضمن برنامه‌نویسی کامپیوتری آن‌ها بسیار ساده‌تر از روش‌های کلاسیک می‌باشد. همچنین روش‌های کلاسیک در برخورد با تعداد زیاد قیود فعال دچار عدم همگرایی مناسب می‌شود در حالی که عدم حساسیت روش MCMC یکی دیگر از مزایای این گونه روش‌ها می‌باشد.

بنابراین در حوزه‌ی طراحی بهینه مخازن بتنی به‌ویژه دایروی، پژوهش‌های بسیار کمی صورت گرفته است. ضمن آن که مزیت الگوریتم به‌کارگرفته شده در پژوهش حاضر، نسبت به الگوریتم‌های کلاسیک معمول در بهینه‌سازی، توان آن در لحاظ نمودن قیود احتمالاتی در مسئله است. روش‌های زیادی مانند الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات، کولونی مورچگان و... تنها توان حل مسئله مبتنی بر متغیرهای معین را دارند در صورتی که روش پیشنهادی MCMC با لحاظ نمودن پارامترهای تصادفی دارای اهمیت در مسئله‌ی طرح، بهینه‌سازی را بر اساس توابع توزیع و در قالب قیود احتمالاتی انجام می‌دهد. بنابراین استفاده از

4- First Order Reliability Method

5- Reliability Based Design Optimization

6- Sequential Optimization and Reliability Assessment

الگوریتم‌های کلاسیک نمی‌تواند از جامعیت بالایی برخوردار باشد. در نتیجه پژوهش حاضر با لحاظ نمودن قیود احتمالاتی و استفاده از توابع توزیع و با روش MCMC، به طرح بهینه مخازن به‌ویژه از نوع دایروی پرداخته است.

## ۲. روش کار

### ۲-۱- بهینه‌سازی بر پایه نظریه قابلیت‌اعتماد سازه‌ها به روش MCMC

مهندسان در طراحی‌های خود با متغیرهای تصادفی (هم در مورد بارها و هم در خصوص مقاومت) سروکار دارند. معمولاً جهت پیش‌بینی رفتار هر متغیر، آزمایش‌های مکرری بر روی آن صورت گرفته و سپس نمودارهای آماری برای آن تهیه شده و از این نمودارها در مطالعات آماری در به‌دست‌آوردن روابط احتمالاتی استفاده می‌گردد. برای تجزیه و تحلیل آماری پارامترهای مربوط به کمیت‌ها دو روش وجود دارد:

اولین روش تحلیل خطی آماری نام دارد و بر اساس بسط تیلور شکل‌گرفته است. در این روش از جملات خطی بسط تیلور (فقط مشتقات مرتبه اول) استفاده شده است؛ بنابراین این روش برای روابط غیرخطی بین متغیرهای اولیه و کمیت‌های طراحی نتایج دقیقی ارائه نمی‌دهد (Mirsharifi & Baba, 2017).

روش دوم که به روش تحلیلی مونت‌کارلو معروف می‌باشد، در واقع یک روش شبیه‌سازی است. در این روش ابتدا برای تمامی متغیرهای تصادفی اولیه (مثل بار یا مقاومت) با میانگین، واریانس و ضریب پراکندگی مشخص، توابع توزیع بر اساس تجربه موجود در نظر گرفته می‌شود. سپس مقادیر تصادفی بین 0 تا 1 تولید می‌شوند که در واقع نشان‌دهنده احتمال وقوع مقادیر مشخص از متغیر تصادفی موردنظر می‌باشد.

### ۲-۲- روش شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای مارکوف چین مونت کارلو (MCMC)

روش مارکوف چین مونت کارلو (MCMC)، یک روش شبیه‌سازی احتمالاتی است که به کمک یک PDF دلخواه، با تولید تعداد نمونه‌های شرطی تصادفی کم‌تر و مطلوب‌تر می‌تواند حجم محاسبات را کاهش دهد و در نتیجه با همان دقت روش مونت کارلو به جواب بهینه برسد. به‌طور کلی به روش مونت کارلو که برای تولید نمونه‌های تصادفی خود از زنجیره‌ی مارکوف استفاده می‌کند در واقع یک زنجیره‌ی مارکوف، یک دنباله‌ای از اعداد است که هر نمونه، وابسته به نمونه قبلی در آن دنباله است. الگوریتمی به نام متروپولیس هستینگ (MH<sup>V</sup>)، مشخص می‌کند عدد تصادفی جدید، کمکی در به روز شدن دانش قبلی خواهد کرد یا خیر؛ و در نتیجه دیتای تصادفی جدید، رد یا قبول گردد. الگوریتم متروپولیس-هستینگ یک روش زنجیره مارکوف مونت کارلو برای بدست آوردن ترتیبی از نمونه‌های تصادفی از یک توزیع احتمالی است که نمونه‌برداری مستقیم از آن دشوار می‌باشد. این ترتیب را می‌توان برای برآورد یک توزیع به عنوان مثال تولید یک هیستوگرام (امید ریاضی) استفاده کرد (Hastings, 1970). به کمک الگوریتم MH در انتخاب و انتقال از یک نمونه به به نمونه دیگر به صورت یک مرحله‌ی رد و قبول در معرض قضاوت و در نتیجه عملیاتی می‌گردد. در این الگوریتم یکی از روش‌های رد یا قبول، محاسبه‌ی ضریبی به نام  $\tau(\theta_{\text{new}}, \theta_{t-1})$

برگرفته از اطلاعات دانش قبلی و به‌روز کردن آن با استفاده از روش بیزین است. احتمال شرطی به‌نام احتمال بیز بصورت زیر است (Nowak & Collins, 2012):

$$P(B_j|A) = \frac{P(B_j \cap A)}{P(A)} = \frac{P(B_j)P(A|B_j)}{\sum_{i=1}^n P(B_i)P(A|B_i)} \quad J=1,2,3,\dots,n \quad (1)$$

که در که در رابطه فوق  $P(B_j|A)$  احتمال وقوع پیشامد  $B_j$  با مشروط کردن نسبت به وقوع پیشامد  $A$  است.  $P(B_j)$  احتمال وقوع پیشامد  $B_j$  و  $P(A)$  احتمال وقوع  $A$  است. همچنین  $P(B_j \cap A)$  بیانگر احتمال وقوع همزمان پیشامدهای  $A$  و  $B$  است.

### ۲-۳- بهینه‌سازی بر پایه قابلیت اعتماد (RBDO)

هر مسئله بهینه‌سازی دارای تعدادی متغیر مستقل است که آن‌ها را متغیرهای طراحی می‌نامند. هدف از بهینه‌سازی تعیین متغیرهای طراحی است، به‌گونه‌ای که تابع هدف کمینه یا بیشینه شود. در واقع هدف از بهینه‌سازی یافتن بهترین جواب قابل قبول، با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسئله است. برای یک مسئله، ممکن است جواب‌های مختلفی موجود باشد که برای مقایسه آن‌ها و انتخاب جواب بهینه، تابعی به نام تابع هدف تعریف می‌شود. انتخاب این تابع به طبیعت مسئله وابسته است. هزینه از جمله اهداف رایج بهینه‌سازی در سازه‌های بتنی و همچنین در این پژوهش می‌باشد. شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای یک روش بسیار مؤثر در بهینه‌سازی سازه‌ها معرفی گردید که برای مطالعه بیشتر می‌توان به Li & Cao (2016) مراجعه نمود. جهت شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای برای بهینه‌سازی سازه‌ها، فرض کنید که قرار است یک مسئله بهینه‌سازی نامقید حل گردد و مسئله‌ی آن به‌صورت رابطه زیر ارائه شده است:

$$\text{Min: } W(d) \quad d^l \leq d \leq d^u \quad (2)$$

در رابطه بالا،  $W(d)$  تابع هدف،  $d$  بردار طراحی،  $d^l, d^u$  نیز حدود بالا و پایین مقادیر بردارهای طراحی‌اند. بنابراین می‌توان یک مسئله قابلیت اعتماد ساختگی را بر پایه متغیرهای طراحی و به بیان احتمالاتی تبیین و به‌صورت رابطه زیر ارائه داد:

$$P_F = P(F) = P(W(d) < W_{opt}) \quad (3)$$

در این رابطه،  $W_{opt}$  مقدار کمینه‌ای است که تابع هدف می‌تواند داشته باشد و رخداد  $F = \{W(x) \leq W_{opt}\}$  یک رخداد دلخواه ساختگی است که در این روند تعریف شده است. روشن است که احتمال شکست  $P_F$  دارای مقدار صفر است. در شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای که به کمک آن بهینه‌سازی سازه‌ها را می‌توان بررسی نمود معادله‌ی حاکم همچنان رابطه (۳) می‌باشد. در گام اول عملیات بهینه‌سازی حل و محاسبه‌ی بردار طراحی  $d$  بایستی ابتدا پارامترهای تصادفی را با استفاده از توزیع‌های حاکم بر آن‌ها مقداردهی نمود. در گام دوم عملیات بهینه‌سازی که حالتی تکراری و چندمرحله‌ای دارد عمدتاً ناپیوستگی به اتمام برسد مگر آنکه به معیار توقف رسیده باشد. از بررسی مقالات مختلف که در این زمینه به چاپ رسیده‌اند این نتیجه حاصل شد که تنها دو روش جهت اعمال معیار توقف وجود دارد:

در روش اول در بهینه‌سازی احتمالاتی از حداکثر تعداد استفاده می‌شود و در روش دوم اگر بین چند تکرار پیاپی، تغییر خاصی در تابع هدف ایجاد نشود بدین معنی است که بایستی عملیات بهینه‌سازی متوقف گردد. معیار توقف جدید که بر پایه‌ی نمونه‌های احتمالاتی ارائه شده است در زیر آورده شده است (Li & Cao, 2016):

$$\max(\hat{\sigma}_k) \text{ or } \max(|\hat{\sigma}_k - \hat{\sigma}_{k-1}|) \leq \varepsilon \quad (4)$$

در رابطه‌ی بالا  $\hat{\sigma}_k$  بیانگر انحراف از معیار داده‌هایی است که از مرحله‌ی  $K$  ام شبیه‌سازی به دست آمده‌اند. متغیر  $\varepsilon$  نیز نشانگر تoleransi است که جهت پایان عملیات توقف تعیین می‌گردد. یک مسئله قابلیت‌اعتماد بر پایه متغیرهای طراحی و به بیان احتمالاتی به صورت رابطه زیر بیان شود:

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱- بارگذاری

در پژوهش حاضر بارگذاری بصورت ترکیبی از بارهای زنده، مرده، زلزله، فشار استاتیک خاک و مایع است که ترکیب این بارها در طراحی بصورت حدی از آیین نامه نشریه ۱۲۳ سازمان مدیریت و برنامه ریزی ایران استفاده شده است. اثرات ناشی از وزن تجهیزات و لوله‌ها باید با توجه به اهمیت و بزرگی آن‌ها، بر اساس نظر طراح مورد محاسبه قرار گیرند. حداقل بار زنده، باید برابر بار برف در نظر گرفته شود. همچنین مقدار بار زنده در هیچ حالتی نباید کم‌تر از  $1.5 \text{ KN/m}^2$  باشد. فشار استاتیکی جانبی و قائم مایع نگهداری شده بر اساس تئوری‌های مکانیک سیالات و با استفاده از وزن مخصوص ( $\gamma_L$ ) و عمق تراز مورد نظر از سطح آزاد مایع نگهداری شده ( $h_L$ )، مطابق رابطه  $P_L = \gamma_L \times h_L$  محاسبه می‌شود. در هر حال مخازن باید برای حداکثر تراز ممکن مایع نگهداری شده محاسبه شوند. سازه مخازن برای تحمل نیروهای ناشی از اثرات خودکرنشی حاصل از تغییرات دما طراحی می‌شوند که البته با توجه به محدوده کاربرد این ضابطه، به طور معمول می‌توان از گرادیان حرارتی ناشی از تفاوت دمای مایع نگهداری شده با محیط پیرامون مخازن صرف نظر کرد. طبق نشریه ۱۲۳، به منظور ساده‌سازی محاسبات و با توجه به اثر خزش در بتن نارس و اثر چسبندگی فولاد به بتن، در بتن سخت شده، فرض می‌شود انجام تحلیل حرارتی سه بعدی مخزن بر مبنای مقادیر ارائه شده در مدلسازی کافی بوده و مخزن طرح شده در برابر ترک خوردگی بر اثر هر دو نوع تغییرات دمای ذکر شده مقاوم است. فشار استاتیکی جانبی خاک را در محاسبات برابر فشار هیدرواستاتیکی جانبی نظیر مایعی با وزن مخصوص  $15 \text{ KN/m}^3$  در قسمت‌هایی که خاک پایین تر از سطح آب زیرزمینی قرار دارد (کل فشار استاتیکی جانبی آب و خاک اشباع) و  $10 \text{ KN/m}^3$  در قسمت‌هایی که خاک بالاتر از سطح آب زیرزمینی قرار دارد، در نظر گرفت (Regulation No. 123, 1992). در این تحقیق شرایط محیطی معمولی برای خاک در نظر گرفته شده است. شرایط معمولی، شرایطی است که در آن عضو در تماس با خاک‌های غیرمهاجم و آب با  $\text{PH} > 5$  قرار گرفته و گاهی دچار تعریق می‌گردد. برای محاسبه اندرکنش مخزن و مایع نگهداری شده در آن، تنها روش تحلیل استاتیکی معادل بر اساس روش اصلاح شده هازنر مورد بررسی قرار می‌گیرد. زمان تناوب ارتعاش افقی جرم موج مایع نگهداری شده ( $T_c$ ) را می‌توان بر اساس رابطه (۵) تعیین کرد. مقدار ضریب  $\lambda$  نیز برای مخازن استوانه‌ای طبق رابطه (۷) محاسبه می‌شود (Regulation No. 123, 1992):

$$T_c = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \sqrt{L \text{ or } D} \quad (5)$$

$$\lambda = \sqrt{3.68g \times \tanh\left[3.68\left(\frac{H_L}{D}\right)\right]} \quad (6)$$

در رابطه بالا،  $D$  و  $H_L$  به ترتیب قطر داخلی مخزن و ارتفاع مایع درون آن است. همچنین حداقل ضریب اهمیت مخزن ( $I$ ) باید با توجه به مایع نگهداری شده، کاربری مخزن و محل قرارگیری آن بر اساس استاندارد 2800 ایران تعیین گردد. نسبت وزن معادل قسمت سخت ( $W_i$ ) و قسمت موج ( $W_e$ ) مایع نگهداری شده به وزن کل آن ( $W_L$ )، برای مخازن استوانه‌ای باید طبق رابطه (۷) محاسبه شوند (Regulation No. 123, 1992):

$$\frac{W_i}{W_L} = \frac{\tanh\left[0.866\left(\frac{D}{H_L}\right)\right]}{0.866\left(\frac{D}{H_L}\right)} \quad (7)$$

ضریب رفتار ( $R$ )، ضریبی است که نشان‌دهنده میزان نامعینی و شکل‌پذیری سیستم سازه‌ای و همچنین توانایی آن برای استهلاک انرژی زلزله می‌باشد و مقدار آن برای مخازن مدفون ۴ و برای مخازن غیر مدفون ۳ است. شکل ۱ کلیه آثار ناشی از ارتعاش افقی مایع نگهداری شده در مخازن نشان داده شده است. در این شکل ( $P_i$ ) فشار قائم استاتیکی آب و ( $P_b$ ) تغییر فشار در هنگام زلزله است. ارتعاش افقی مایع نگهداری شده در مخازن منجر به ایجاد فشار نامتوازن بر روی دال کف آن‌ها ( $P_b$ ) می‌شود. اثر این تغییرات فشار با تعریف ارتفاع‌های ظاهری  $h'_i$  و  $h'_e$  به جای ارتفاع‌های  $h_i$  و  $h_e$  در محاسبه لنگر و ازگونی مخازن بر روی دال کف ( $M_0$ ) در نظر گرفته می‌شود. این ارتفاع‌های ظاهری که نشان‌دهنده ارتفاع مرکز ثقل نیروهای جانبی ناشی از ارتعاش جرم سخت و موج مایع نگهداری شده از پای دیوار با در نظر گرفتن فشار نامتوازن وارد بر کف مخزن هستند. در مخازن استوانه‌ای طبق روابط ۸ تا ۱۰ محاسبه می‌گردند (Regulation No. 123, 1992).

$$\frac{D}{H_L} < 0.75 \quad \frac{h'_i}{H_L} = 0.45 \quad (8)$$

$$\frac{D}{H_L} \geq 0.75 \quad \frac{h'_i}{H_L} = \frac{0.866\left(\frac{D}{H_L}\right)}{2 \times \tanh\left[0.866\left(\frac{D}{H_L}\right)\right]} - \frac{1}{8} \quad (9)$$

$$\frac{h'_e}{H_L} = 1 - \frac{\cosh\left[3.68\left(\frac{H_L}{D}\right)\right] - 2.01}{3.68\left(\frac{H_L}{D}\right) \times \sinh\left[3.68\left(\frac{H_L}{D}\right)\right]} \quad (10)$$

### ۳-۲- ساختار برنامه نوشته شده برای بهینه‌سازی طراحی مخازن بتن آرمه

در ابتدا باید توابعی تولید کرد که بتواند مدل را در محیط SAP2000 ایجاد نموده و خواص مصالح مصرفی، مقاطع مورد استفاده و نیز بارگذاری مربوط به طرح مخازن را بر اساس نکات آیین‌نامه ۱۲۳ ایجاد نماید. این موارد در SAP2000 شامل تعریف بتن، تعریف فولاد، تعریف فنر، الگو و ترکیبات بارگذاری، محل نقاط تغییر مکان می‌باشد. در مدلسازی از تحلیل مودال با ۱۲ مود استفاده شده است. نوع بارگذاری با استفاده از موارد مندرج در آیین‌نامه ۱۲۳ انجام شده است. نوع ترکیبات بار از نوع خطی است و همچنین مدلسازی خاک پیرامون مخزن به صورت فنرهای وینکلر انجام شده است. در پژوهش حاضر عملیات مربوط به

ارتباط برقرار نمودن با نرم‌افزار SAP2000 توسط زبان برنامه‌نویسی C# انجام شده است و محاسبات مربوط به بهینه‌سازی توسط الگوریتم MCMC با زبان MATLAB کدنویسی شده است. ارتباط بین کد MATLAB با Console برنامه‌نویسی شده در C#، از طریق فرستادن دستور (Send Command) است؛ بدین صورت که پارامترهایی که باید به صورت تصادفی تولید و در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گیرند، توسط این روش به برنامه .exe فرستاده می‌شود. پس از اتمام عملیات، نتایج در فایل متنی نوشته شده تا برنامه MATLAB آن را بخواند و سپس برآورد توابع هدف و نیز قیود فنی موجود در مسئله را انجام دهد. اطلاعات نوشته شده در فایل متنی، شامل مقادیر مربوط به توابع هدف (شامل قیمت مصالح مصرفی سازه مخزن) و مقادیر مربوط به کنترل قیود بهره‌برداری (مانند ترک‌خوردگی)، کنترل قیود مربوط به خدمت‌پذیری (مانند تغییر مکان نقاط خاصی از سازه) و کنترل قیود مربوط به قیود مقاومتی (شامل کنترل ظرفیت خمشی و تقاضای خمشی ناشی از بارگذاری‌های مختلف در مقاطع حساس سازه) می‌باشد. هر کدام از این مقادیر با فرض مشخص در فایل متنی نوشته شده و سپس همین مقادیر توسط MATLAB خوانده و به الگوریتم بهینه‌سازی باز می‌گردد. ارتباط File.exe با روش تولید عدد تصادفی MCMC موجود در برنامه MATLAB منجر به رسیدن جواب بهینه یا همان کم‌ترین هزینه ساخت مخزن از لحاظ میزان بتن و آرماتور مصرفی خواهد شد. در برنامه نوشته شده به علت آن که طبیعت رفتار MCMC مورد استفاده برای بهینه‌سازی مقید است، از هرگونه توابع با ضرائب لاگرانژ استفاده نشده است. در نهایت مقدار فشار هیدرودینامیک وارد شده بر دیوارها و دال کف مخازن بر اثر شتاب قائم زلزله بر اساس روابط آیین نامه محاسبه می‌شوند. شکل ۲ نمای شماتیک از مقطع مخزن استوانه‌ای و نحوه قطعه بندی آن را نشان می‌دهد. المان مقطع مورد بررسی، دارای ۱۰ متغیر است که در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است که المان مورد نظر دارای عرض واحد، و ارتفاع المان نیز مطابق با ارتفاع مخزن 4m است. همچنین مطابق شکل ۲ قطعات ۳ با ۷، قطعات ۴ با ۶ و قطعات ۱ با ۲ با توجه به ماهیت رفتاری مشابه، به صورت قرینه و شبیه یکدیگر مدل می‌شوند.

شکل ۱. نیروها و لنگرهای ناشی از ارتعاشات افقی مایع در مخزن (Regulation No. 123, 1992)

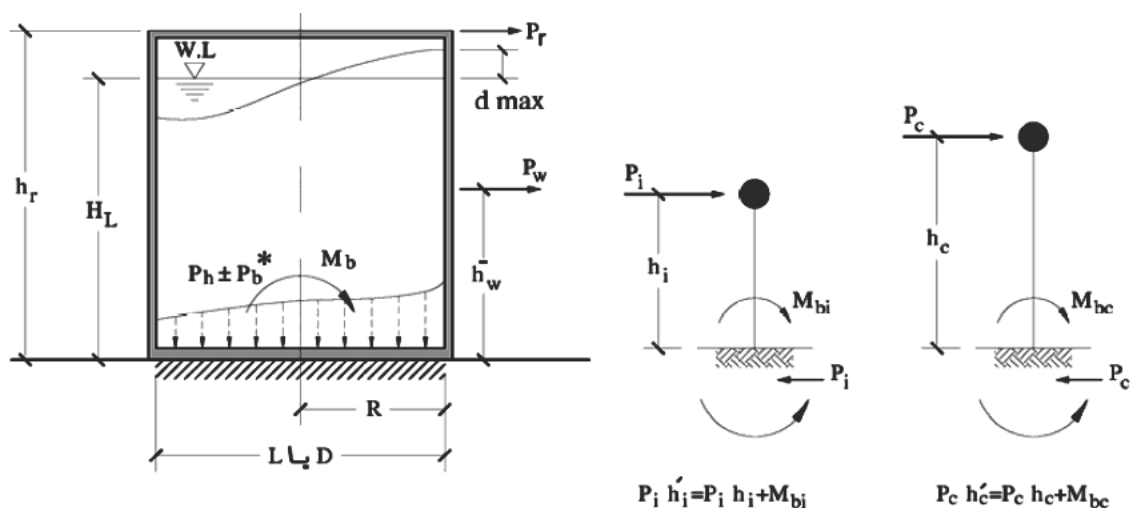


Fig 1. Forces and moments due to horizontal vibrations of the liquid in the tank (Regulation No. 123, 1992)

شکل ۲. شماتیک از مقطع مخزن استوانه‌ای و قطعه بندی آن

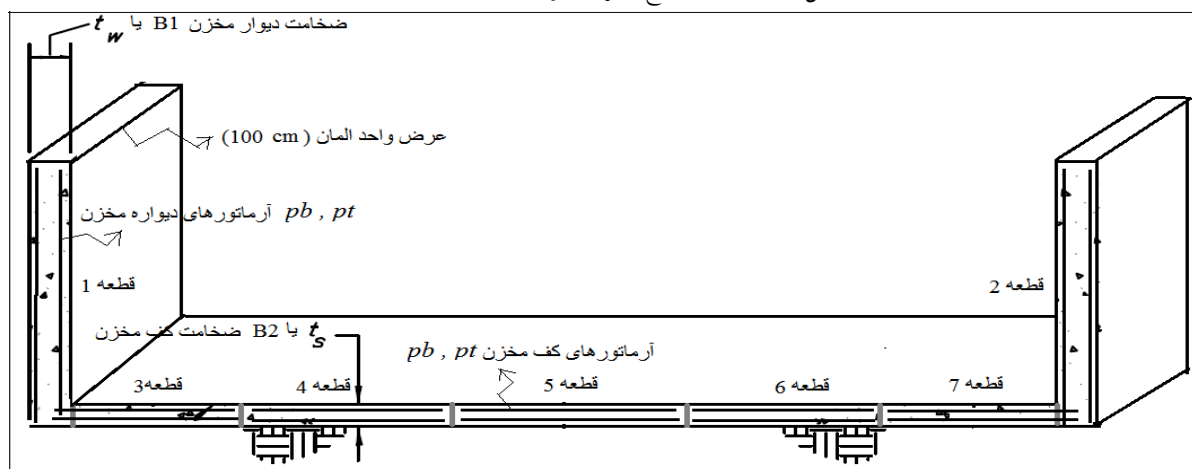


Fig 2. Schematic figure of the section of the cylindrical tank and its segmentation

جدول ۱. معرفی متغیرهای مؤثر در طراحی بهینه المان مخزن

Table 1. Introduction of effective variables in the optimal design of the tank element

$B_1$	ضخامت دیوارها یا المان عمودی مخزن
$B_2$	ضخامت کف یا المان افقی مخزن
$\rho_{t_1}$	درصد آرماتور یا چگالی آرماتور بالای المان‌های 3 و 7
$\rho_{b_1}$	درصد آرماتور یا چگالی آرماتور پایین المان‌های 3 و 7
$\rho_{t_2}$	درصد آرماتور یا چگالی آرماتور بالای المان‌های 4 و 6
$\rho_{b_2}$	درصد آرماتور یا چگالی آرماتور پایین المان‌های 4 و 6
$\rho_{t_3}$	درصد آرماتور یا چگالی آرماتور بالای المان‌های 5
$\rho_{b_3}$	درصد آرماتور یا چگالی آرماتور پایین المان‌های 5
$\rho_{t_w}$	درصد آرماتور یا چگالی آرماتور بالا در المان عمودی مخزن
$\rho_{b_w}$	درصد آرماتور یا چگالی آرماتور پایین در المان عمودی مخزن

در پژوهش حاضر آرماتورهای طولی در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است و آرماتورهای عرضی که به صورت کششی حلقوی عمل می‌کند براساس مقدار حداقل موجود در آیین‌نامه ۱۲۳ در نظر گرفته خواهد شد (شکل ۳).

تابع هدف موردنظر در این تحقیق هزینه ساخت مخزن بتن‌آرمه و قیود آن شامل قیود خدمت‌پذیری و مقاومتی می‌باشد. قیود خدمت‌پذیری نظیر تغییرشکل‌های سازه و ترک‌خوردگی بوده و قید مقاومتی همان نسبت تقاضا به ظرفیت مقاطع حساس در این مخزن است. همچنین جهت برآورد هزینه کل سازه نیاز است که مقادیر حجم و وزن بتن مصرفی، همچنین وزن آرماتورهای مصرفی در سازه تعیین گردد که این امر نیز توسط نرم‌افزار انجام می‌شود. نحوه محاسبه تابع هدف بدین صورت است که ابتدا حجم بتن مصرفی در مخزن مورد محاسبه قرار می‌گیرد و به دلیل آن‌که مخزن مورد بررسی در پژوهش حاضر به صورت استوانه-

ای است، بنابراین کافی است که یک قطاع از آن مورد بررسی قرار گیرد. با محاسبه حجم نهایی مخزن بهینه و ضرب این عدد در چگالی آرماتور و همچنین بهای تمام شده میلگرد مصرفی، قیمت فولاد کل مصرفی به دست می‌آید. در این پژوهش، قیمت بتن، به ازای هر تن ۵۵۰۰۰ تومان و قیمت فولاد، به ازای هر کیلوگرم ۵۵۰۰ تومان در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که این اعداد فرضی است ولی نسبت قیمت این دو متریکال تقریباً درست فرض شده است.

شکل ۳. وضعیت قرارگیری آرماتورهای کششی حلقوی و آرماتورهای عمودی مخزن

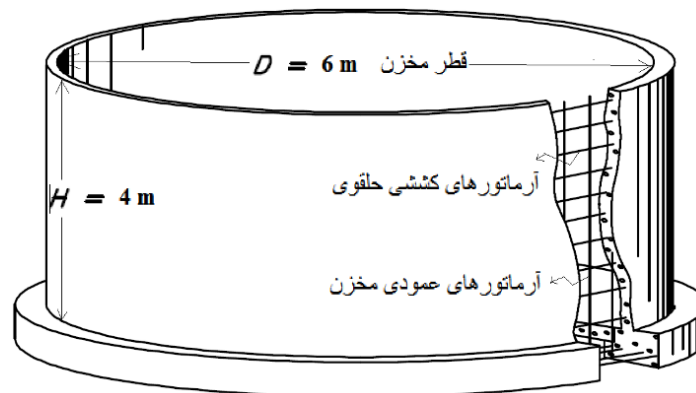


Fig 3. Positioning of circular tensile reinforcements and vertical reinforcements of the tank

در رابطه با تعیین مقادیر حدود متغیرها و همچنین توابع توزیع، مطابق جدول (۲) توزیع ابعاد هندسی به صورت یکنواخت و توزیع مقاومت به صورت نرمال در نظر گرفته شده است. تعداد متغیرهای طراحی ۱۰ عدد می‌باشد که مقادیر حداقل آن‌ها در آرایه b1 و مقادیر حداکثر آن‌ها در آرایه b2 تعیین گردیده است. تلرانس مورد قبول ۰/۰۰۰۱ تعیین گردیده است. تعداد نمونه‌هایی که زنجیره مارکوف چین مونت کارلو در هر سعی نمونه‌سازی می‌کند برابر ۱۰ عدد می‌باشد. در واقع حداکثر تعداد دور در چرخه شبیه‌سازی (MaxTry)، طبق مرجع (Li & Cao, 2016) مربوط به کد برنامه‌نویسی MCMC، برای رسیدن به حد تلرانس ۰/۰۰۰۱، برابر ۱۰۰ مرتبه در نظر گرفته شده است و پس از اتمام اجرای روند کلی شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط برنامه ثبت و سپس مطابق شکل (۴) ترسیم گردیده است:

جدول ۲. حدود متغیرها و توزیع مقاومت

Table 2. Range of variables and distribution of resistance

$0.3 \text{ m} < B_1 < 0.65 \text{ m}$
$0.35 \text{ m} < B_2 < 0.8 \text{ m}$
$0.01 \rho b < \rho t_i < 0.5 \rho b$
$0.01 \rho b < \rho b_i < 0.5 \rho b$
$\mu f'_c = 21 \text{ Mpa}$
$\sigma f'_c = 2.1 \text{ Mpa}$
$\mu F_y = 400 \text{ Mpa}$
$\sigma F_y = 40 \text{ Mpa}$



شکل ۴. اجرای روند برنامه‌نویسی و میل به سمت هزینه بهینه

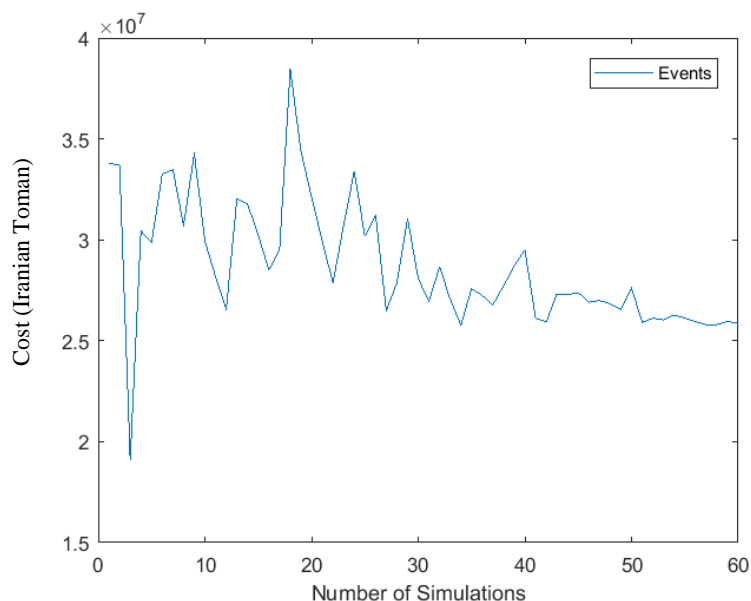


Fig 4. Implementation of the programming process and desire towards optimal cost

همان‌طور که از شکل (۴) نیز مشخص است، با حدود ۶۰ بار نمونه‌سازی انجام‌گرفته، مقادیر مربوط به معیارهای توقف الگوریتم که تلرانس و تعداد حداکثر نمونه‌سازی در یک مرحله است ارضا شده و پس از پایان مراحل بهینه‌سازی در فایل برنامه Matlab با نام RunOPT.m، نتایج به صورت جدول (۳) به دست آمد:

جدول ۳. نتایج حاصل از متغیرهای بهینه مخزن

Table 3. The results of optimal tank variables

Cost Function = 25773467 (Toman)	
$b_1 = 310.3905 \text{ mm}$	$b_2 = 393.2191 \text{ mm}$
$\rho t_1 = 0.014493$	$\rho b_1 = 0.011891$
$\rho t_2 = 0.011831$	$\rho b_2 = 0.0095131$
$\rho t_3 = 0.017364$	$\rho b_3 = 0.01127$
$\rho t_w = 0.015561$	$\rho b_w = 0.017027$

طبق جدول (۳)، ضخامت دیوارها بصورت تقریبی  $310/39$  mm و ضخامت فونداسیون برابر با  $393/2$  mm تعیین گردیده است. دیگر پارامترها نیز در ردیف ۲ تا ۵ جدول مربوط به چگالی آرماتورهای مصرفی در کف و دیواره‌های مخزن است. در نهایت با ۱۱ مرتبه شبیه‌سازی و کاهش انحراف از معیار در بین دسته نمونه‌های تصادفی که هر کدام نماینده یک مخزن است، معیارهای توقف الگوریتم ارضا شده‌اند و نتیجه نهایی مطابق شکل (۵) برابر با  $25/7$  میلیون تومان خواهد شد.

شکل ۵. نمایش تعداد مراحل شبیه‌سازی تا رسیدن به تابع هدف بهینه

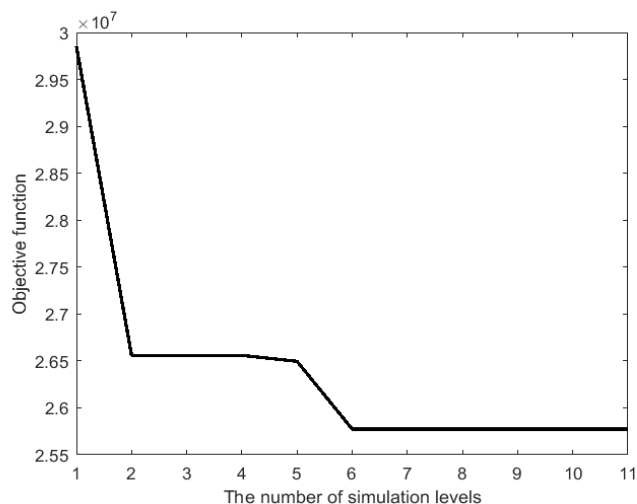


Fig 5. Display the number of simulation steps until reaching the optimal objective function

این مسئله با دسته‌های ۱۵ تایی مجدداً حل گردید و با تغییر تعداد نمونه‌ها در هر سطح شبیه‌سازی (MaxTry) به مقدار ۱۵، نتایج و نمودارهای تابع بهینه مخزن، همگرا تر نسبت به مقدار بهینه قبلی به دست خواهد آمد. با این تغییر، اجرای روند کلی شبیه‌سازی‌های انجام گردید و سپس توسط برنامه ثبت و به صورت شکل (۶) ترسیم شد. در نهایت جواب متغیرهای بهینه مخزن شامل ضخامت دیوار، کف و میزان آرماتورهای مخزن، مطابق جدول (۴) به دست آمد. همان‌طور که از شکل (۶) مشخص است پس از ۱۹۸ مورد نمونه شبیه‌سازی ضمن رعایت قیود آیین‌نامه و ارضا معیارهای توقف، همگرایی جواب مسئله به طور آشکار و گویا قابل ملاحظه است. ضمن آن‌که در کد بالا با توجه به مقادیر NumSam و MaxTry به ترتیب ۱۵ و ۱۰۰، استعداد ۱۵۰۰۰ مرتبه شبیه‌سازی مونت کارلو معمولی برای رسیدن به همین مقدار تابع هدف، وجود دارد و واضح است که با این زنجیره و استفاده از روش رد و قبول متروپولیس هستینگ، سریع‌تر به جواب بهینه و اقتصادی رسیده شد.

شکل ۶. اجرای روند برنامه‌نویسی و میل به سمت هزینه بهینه

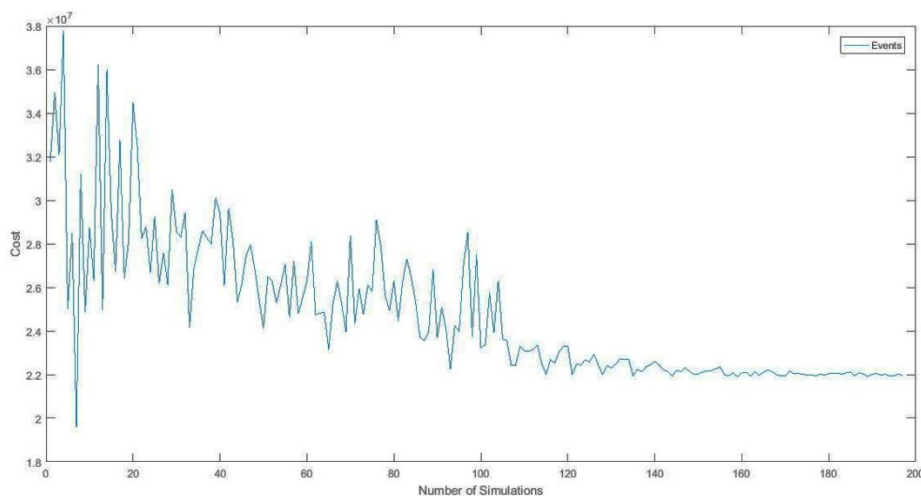


Fig 6. Implementation of the programming process and desire towards optimal cost

جدول ۴. نتایج حاصل از متغیرهای بهینه مخزن

Table 4. The results of optimal tank variables

Cost Function = 21904845 (Toman)	
$b_1 = 299.3426$	$b_2 = 432.2963$
$\rho t_1 = 0.011063$	$\rho b_1 = 0.0098963$
$\rho t_2 = 0.009943$	$\rho b_2 = 0.0081082$
$\rho t_3 = 0.012763$	$\rho b_3 = 0.010652$
$\rho t_w = 0.0164020$	$\rho b_w = 0.018241$

نتایج جدول (۴) که حاصل بهینه‌سازی متغیرهای موردنظر این پژوهش، به کمک روش MCMC است، در قالب شکل (۷) به نمایش درآمده است.

شکل ۷. نمایش متغیرهای مدنظر به دست آمده از روش MCMC

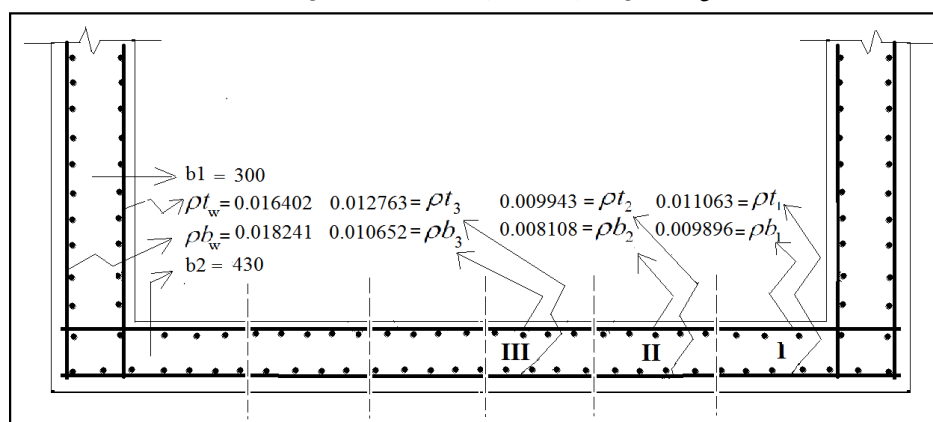


Fig 7. Display of considered variables obtained from MCMC method

در نهایت نمودار شکل (۸)، نشان می‌دهد که با ۲۷ مرتبه شبیه‌سازی با کاهش انحراف از معیار در بین دسته نمونه‌های تصادفی که هر کدام نماینده یک مخزن است، معیارهای توقف الگوریتم ارضا گردید و نتیجه نهایی برابر با ۲۱/۹ میلیون تومان خواهد شد.

شکل ۸. نمایش تعداد مراحل شبیه‌سازی تا رسیدن به تابع هدف بهینه

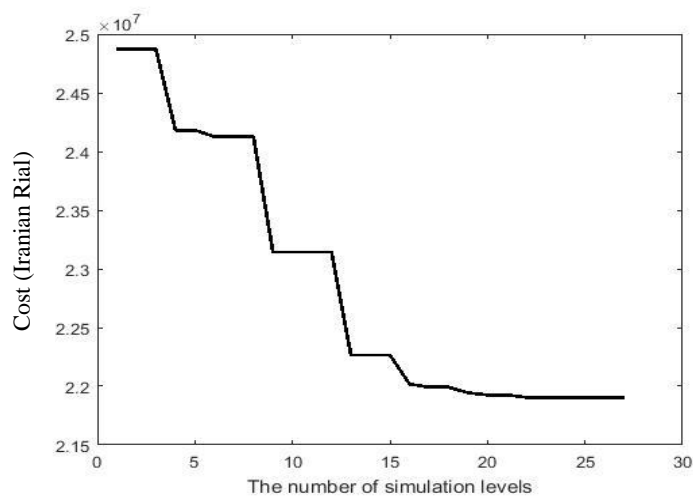


Fig 8. Display the number of simulation steps until the optimal objective function

لازم به ذکر است که حتی انتخاب NumSam یا همان تعداد نمونه‌ها در هر سطح شبیه‌سازی به مقادیر بالاتر، هزینه بهینه‌تر و همگراتر می‌گردد که البته در این مثال نزدیک به ۲۱/۹ میلیون تومان است اما به‌طور چشم‌گیر موجب اختلاف قیمت نسبت به طراحی با MaxTry=15 نخواهد شد؛ ضمن آن‌که با انتخاب تلرانس ۰/۰۰۰۱ که معادل شاخص قابلیت اطمینان آیین‌نامه ایران (مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث ۹) بر مبنای  $\beta=3.5$  می‌باشد، رعایت گردیده است. به همین دلیل می‌توان به همین میزان طرح بهینه و دستیابی به روش MCMC در زمینه طراحی مخزن که خاصیت تصادفی بودن متغیرهای طراحی نیز در آن رعایت گردیده، اکتفا نمود. در حالت بهینه‌سازی دوم، تعداد بازه‌های شبیه‌سازی ۱۰۰ مرتبه و تعداد دفعات قابل بهینه در هر بازه شبیه‌سازی ۱۵ مرتبه است و می‌توان گفت با روش مونت‌کارلو مستقیم استعداد ۱۵۰۰ بار نمونه‌سازی دارد ولی درنهایت به همین جواب بهینه‌ی ۲۱/۹ میلیون تومانی که با ۲۰۰ نمونه از زنجیره مارکوف‌چین به‌دست‌آمده، خواهیم رسید که در اتلاف زمان در رسیدن به تابع بهینه مؤثر است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش ضرورت عدم قطعیت و اعمال خصوصیت تصادفی بودن متغیرها در بحث تحلیل و طراحی با روشی به نام MCMC انجام شد. MCMC به کمک توابع توزیع احتمال، به‌ویژه توزیع نرمال در بحث مقاومت، به تولید عدد تصادفی پرداخت که البته در بحث توزیع بارهای لرزه‌ای حداکثر وارد بر سازه، همچنین تعداد زلزله‌هایی که ممکن است در طول یک فاصله‌ی زمانی اتفاق بیفتد، توصیف بار زنده دائمی، پدیده خستگی مصالح و پدیده‌های دیگر، توابع توزیع مختلفی وجود داشت. از فرضیات ساده‌کننده‌ای نیز استفاده گردید و برای تکمیل طراحی به‌ویژه در بحث آرماتورهای کششی حلقوی و توزیع بارهای لرزه‌ای، طبق آیین‌نامه ۱۲۳ انجام شد. طراحی بهینه ضخامت و آرماتور موجود در دیوار و کف مخزن مورد بررسی قرار گرفته و مشاهده شد که با استفاده از زنجیره مارکوف‌چین و روش رد و قبول MH در روش کلی تولید عدد تصادفی مونت‌کارلو مستقیم، با حدود ۲۰۰ نمونه مخزن و با تبادل اطلاعات بین روش MCMC موجود در برنامه Matlab و نرم‌افزار محاسبه‌گر SAP2000، نتیجه‌ای همگرا و بهینه، در حدود قیمتی ۲۲ میلیون تومانی رسید؛ و این یعنی بهینه‌کردن، اعمال تصادفی بودن متغیرها به کمک دو معیار میانگین و انحراف از معیار، اعمال قیود و محدودیت‌های مدنظر آیین‌نامه دلخواه و همچنین کم‌ترین زمان در RunOPT.m برنامه نسبت به روش‌هایی مانند مونت‌کارلو مستقیم.

#### ۵. تضاد منافع نویسندگان

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

#### ۶. مراجع

- Ahmadi, G. (2012) Optimization of construction of concrete water ground tanks by reducing the compressive strength of concrete and increasing the tensile strength of steel. *4<sup>th</sup> National Conference of Concrete*. Tehran, Iran. (In Persian)
- Chiti, H., Khatibinia, M., Akbarpoor, A., & Naseri, H. (2015). Optimal design of weighted dams based on reliability *2nd International & 6th National Conference on Earthquake and Structure*, Kerman, Iran. (In Persian)
- Dilip, D. M., & Sivakumar Babu, G. L. (2013). Methodology for pavement design reliability and back analysis using Markov chain Monte Carlo simulation. *Journal of Transportation Engineering*, 139(1), 65-74.

- Havaei, G. R., & Kia, S. (2015). Optimization of Reinforced Concrete Reservoir with Circumferential Stiffeners Strips by Particle Swarm Algorithm. *Structural Engineering and Construction*, 2(2), 28-42, (In Persian)
- Hastings, W.K. (1970). Monte Carlo Sampling Methods Using Markov Chains and Their Applications. *Biometrika*. 57 (1): 97–109.
- Jahanshahi, M., Fakhimi, B., Fakhimi, A. (2016). Application of New Optimization Methods in Concrete Structures. *4th International Congress on Civil Architecture and Urban Development*, Tehran, Iran. (In Persian)
- Jensen, H., Jerez, D., & Beer, M. (2021). A general two-phase Markov chain Monte Carlo approach for constrained design optimization: Application to stochastic structural optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 373, 113487.
- Khanmohammadi, M., Hejazi, F., & Hataminia, H. (2014). Investigating the Fundamentals of Design of Concrete Water Storage Tanks in Regulations EN 1998-4:2006(E), NZS 3106-2009, ACI 350.3-06, Publication 123, 8<sup>th</sup> National Congress on Civil Engineering, Babol, Iran, (In Persian)
- Kia, S. and Ghasemi, M.R., (2012). Durability-Based optimization of reinforced concrete reservoirs using artificial bee colony algorithm, *Global Journal of Researches in Engineering*, 12, 9-18.
- Li, H. S., & Au, S. K. (2010). Design optimization using subset simulation algorithm. *Structural Safety*, 32(6), 384-392.
- Li, H. S., & Cao, Z. J. (2016). Matlab codes of Subset Simulation for reliability analysis and structural optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54, 391-410.
- Li, H. S., & Ma, Y. Z. (2015). Discrete optimum design for truss structures by subset simulation algorithm. *Journal of Aerospace Engineering*, 28(4), 04014091.
- Lopez, R. H., & Beck, A. T. (2012). Reliability-based design optimization strategies based on FORM: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 34, 506-514.
- Mirsharifi, A., & Baba, H. (Safety of structures based on reliability theory. No-Avar publication, 2017.
- Nowak, A. S., & Collins, K. R. (2012). Reliability of structures. CRC press.
- National regulations of Iran, topic 9. Design and implementation of reinforced concrete buildings. Iran. Ministry of Roads and Urban Development. Office of National Building Regulations (In Persian).
- Proppe, C., (2017). Markov chain Monte Carlo simulation methods for structural reliability analysis. *Procedia Engineering*, 199, 1122-1127.
- Regulation No. 123, (1992). Rules and criteria for the design and calculation of underground water reservoirs, First revision, *Iran Management and Planning Organization*.
- Wankhede, S., Salunke, P. J., & Gore, N. G. (2015). Cost optimization of elevated circular water storage tank. *The International Journal of Engineering and Science*, 4(2015).
- Xiao, S., & Nowak, W. (2022). Reliability sensitivity analysis based on a two-stage Markov chain Monte Carlo simulation. *Aerospace Science and Technology*, 130, 107938.



Research Article



## Water cover change detection in Zayandeh-Rood watershed using remote sensing

Pantea Lotfi<sup>1</sup>, Mozhgan Ahmadi Nadoushan<sup>2,\*</sup>, Aliasghar Besalatpour<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Environmental Sciences, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

<sup>2</sup> Department of Environmental Sciences, Waste and Wastewater Research Center, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

<sup>3</sup> inter 3 GmbH - Institut für Ressourcenmanagement, Berlin, Germany.

\*Corresponding Author: [m.ahmadi1984@gmail.com](mailto:m.ahmadi1984@gmail.com)

Received: 14 Aug 2023

Accepted: 10 Oct 2023

Published: 14 Oct 2023

### Abstract

Water, as one of the most basic needs of life, currently includes our drinking, agriculture, industry, economic-social and security-political issues for survival and expansion. Due to the importance of this issue, the basic management and exploitation of water resources has become one of the important global issues. Nowadays, remote sensing technique has many uses in agriculture, such as determining the area under cultivation and predicting crop yield. In this research, the evaluation of the detection method of zones, water levels and rivers with Normalized Difference Water Index (NDWI) using Landsat 9 satellite images in the period of 1984-2022 was used to separate the water cover. The obtained results showed that there is a noticeable trend in reducing the water level in the desired points, which can be directly related to water harvesting for agricultural purposes in different parts of the route. In other words, the amount of water that the Normalized Difference Water Index index shows in each station has a significant difference with other stations, which indicates significant water extraction in all parts of the Zayandeh-Rood. Therefore, in the present study, it was found that the normalized differential water index was easily able to extract water from satellite images and is a suitable index for predicting the condition of the Zayandeh-Rood Watershed.

**Keywords:** Temporal-spatial changes, Remote sensing, Landsat, Normalized Difference Water Index



## آشکارسازی تغییرات پوشش آب حوضه‌ی زاینده‌رود با استفاده از سنجش از دور

پانته آ لطفی<sup>۱</sup>، مژگان احمدی ندوشن<sup>۲\*</sup>، علی اصغر بسالت پور<sup>۳</sup>

۱. گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

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

3. Inter 3 GmbH - Institut für Ressourcenmanagement, Berlin, Germany.

\*نویسنده مسئول: m.ahmadi1984@gmail.com

چاپ: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۸

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۳

### چکیده

آب به عنوان یکی از اساسی‌ترین نیازهای زندگی در حال حاضر برای ادامه حیات و گسترده‌گی موارد استفاده در مسائل شرب، کشاورزی، صنعت، اقتصادی - اجتماعی و امنیتی - سیاسی ما را شامل می‌شود. با توجه به اهمیت این موضوع، مدیریت و بهره‌برداری اصولی از منابع آب به یکی از موضوعات مهم جهانی تبدیل شده است. تکنیک سنجش از دور امروزه در کشاورزی کاربردهای فراوانی از جمله تعیین سطح زیرکشت و پیش‌بینی عملکرد محصول دارد، در این پژوهش، ارزیابی روش تشخیص پهنه‌ها، سطوح آبی و رودخانه‌ها با شاخص آب تفاضلی نرمال شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ در بازه زمانی ۱۴۰۱-۱۳۶۳ جهت تفکیک پوشش آب استفاده شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که روند محسوسی در کاهش سطح آب در نقاط موردنظر مشاهده می‌شود که می‌تواند ارتباط مستقیمی با برداشت آب برای مصارف کشاورزی در نقاط مختلف مسیر وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، مقدار آبی که شاخص آب تفاضلی نرمال شده در هر ایستگاه نشان می‌دهد تفاوت معنی‌داری با سایر ایستگاه‌ها دارد که نمایانگر استحصال آب معنی‌دار آب در تمام نقاط رودخانه زاینده‌رود است. بنابراین در مطالعه حاضر مشخص شد که شاخص آب تفاضلی نرمال شده به راحتی قادر به استخراج آب از تصاویر ماهواره‌ای بوده است و شاخص مناسبی برای پیش‌بینی وضعیت حوضه زاینده‌رود است.

**واژه‌های کلیدی:** تغییرات زمانی - مکانی، سنجش از دور، لندست، شاخص آب تفاضلی نرمال شده

## ۱. مقدمه

آب به‌عنوان مایه حیات و منشا زندگی، آثار قابل توجهی بر کیفیت زندگی بشر دارد. به‌نحوی که کمبود آن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مختل‌کننده توسعه در بسیاری از کشورها مطرح بوده و چالش بزرگی را در بخش کشاورزی پدید آورده است (Biniaz et al., 2021). از آنجایی که آب یکی از اصلی‌ترین نیازهای بشر است، خشکسالی و کمبود آب یکی از بزرگترین چالش‌هایی است که توسعه کشاورزی کشور در حال و آینده با آن روبه‌رو خواهد بود. خشکسالی دارای اثرات مخرب در سه بعد اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی است که منجر به بروز ناپایداری کشاورزی می‌گردد. بنابراین یکی از جنبه‌های مهم برنامه‌ریزی و کاهش اثرات خشکسالی و توسعه همه‌جانبه پایدار، شناخت اثرات این پدیده می‌باشد (Gaznayee et al., 2020; Rostamian & Khosravipour., 2018). زاینده‌رود یک رودخانه حیاتی برای استان اصفهان و فلات مرکزی ایران است که در حوزه آبخیز گاوخونی قرار گرفته و نقش مهمی در تامین آب شرب، صنعت و کشاورزی مناطق مرکزی ایران دارد (Rahpou et al., 2019)، به‌طوری که برای مصارف مختلف از جمله آب شرب برای حدود سه میلیون نفر را تامین می‌کند (Taheri Dehkordi., 2022). همچنین در معرض تخلیه گسترده فاضلاب و پساب از چندین منبع آلودگی نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای قرار گرفته است (Karimian et al., 2020). لازم به ذکر است در دهه‌های اخیر، منابع آبی حوضه کاهش یافته، به‌نحوی که بخشی از طول رودخانه در قسمت میانی و پایین‌دست جریان آب خشک شده یا به‌صورت موقتی در آمده و تخصیص آب کشاورزی به اراضی زراعی این بخش‌ها کاهش شدیدی پیدا کرده است (Rahmanifazli & Salehian., 2018). علاوه بر این برای افرادی که در پایین‌دست محل سد قرار دارند و همچنین حفاظت از منابع اقتصادی و زیست‌محیطی، برنامه‌های مدیریت ریسک در سراسر جهان لازم است (Abu-Abdullah et al., 2020). با پیشرفت فناوری، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به دلیل ویژگی‌های خاص خود مانند دید وسیع، یکپارچگی، استفاده از قسمت‌های مختلف طیف الکترومغناطیس برای ثبت خصوصیات پدیده‌ها، امکان به کارگیری سخت‌افزارها و نرم‌افزارها و کم هزینه و سریعتر بودن تجزیه و تحلیل باعث شده که به این منظور با استقبال خاصی روبه رو شود (Henderson et al., 1995). داده‌های ماهواره‌ای سنجنش از دور با قدرت تفکیک مکانی، طیفی و زمانی متفاوت، یک منبع ارزشمند را برای ارزیابی سطح آب و تغییرات آن در دهه‌های اخیر ارائه نموده است (Zhaohui et al., 2003; Jawak et al., 2015). سنجنش از دور ابزار بسیار مناسبی برای شناسایی پهنه‌های آبی بوده و از این رو یکی از مزایای شناسایی سطح آب به وسیله تصاویر ماهواره‌ای عدم نیاز به حضور فیزیکی در محل است (Ozesmi et al., 2002; Jawak et al., 2015). بنابراین روش‌های مختلف پردازش تصاویر مانند NDWI در دهه‌های اخیر برای استخراج عوارض آب معرفی شده است. تفاوت در عملکرد شاخص‌های پیشنهاد شده آب بر روی انواع داده‌های ماهواره‌ای توسط بسیاری از محققان، مطالعه شده است. Benzougagh و همکاران (2022) استفاده ترکیبی از Sentinel-2 و Landsat-8 برای نظارت بر سطح آب و ارزیابی شدت خطر خشکسالی با استفاده از گوگل ارث انجین را مورد بررسی قرار دادند. شاخص آب تفاضلی نرمال شده نوعی تحلیل طیفی آب بر اساس یک باند سبز و یک نمایش باند مادون قرمز نزدیک است. منطقه مورد مطالعه برای این کار سد ۱ ادریس در شمال شرقی مراکش است که در پایین‌دست زهکشی رودخانه اینائون واقع شده است. نتیجه این مطالعه نشان داد که نقشه‌برداری از آب‌های سد ادریس یکم و ارزیابی شدت و فراوانی خطر خشکسالی با دقت بالا انجام گرفته است. AI-Obaidi و همکاران (2022) در مطالعه‌ای بر روی دریاچه سد موصل با استفاده از سری داده‌های سنجنش از دور تصاویر لندست (TM5، ETM+7 و OLI8) به این نتیجه دست یافتند که داده‌های سنجنش از دور روشی کارآمد برای تشخیص تغییرات کمیت آب در منطقه مورد مطالعه با هزینه‌های کم را فراهم می‌کند و با استفاده از معادله شاخص



آب تفاضلی نرمال شده در دوره‌های (۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰)، حجم آب در منطقه مورد مطالعه به ترتیب (۲۸۱، ۳۲۰، ۲۲۵، ۲۷۶ و ۲۹۵) کیلومتر مربع بوده است. هدف از این مطالعه بررسی تغییرات پوشش آب حوضه‌ی زاینده‌رود با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز زاینده‌رود با وسعت ۴۱۵۵۰ کیلومتر مربع به‌عنوان بخشی از فلات مرکزی ایران در استان اصفهان و چهارمحال و بختیاری و بختیاری بین طول جغرافیایی ۳۲° ۵۰' تا ۳۲° ۱۸' عرض شمالی و ۵۱° ۴۲' تا ۵۰° ۵۲' طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). این منطقه از قسمت جنوب و جنوب غرب به کوه‌های دامنه‌ی رشته‌کوه زاگرس و از غرب به نواحی دشتی واحد هیدرولوژیک دشت کوهپایه و سگزی ختم می‌شود. از لحاظ توپوگرافی، قسمت عمده این منطقه به خصوص در قسمت مرکز شامل دشت‌های مسطح با شیب کمتر از ۸ درصد است که به مجموعه‌ای از کوه‌های پراکنده در حاشیه‌ی آن ختم شده و مرز منطقه را تشکیل می‌دهد.

شکل ۱. حوضه آبخیز زاینده‌رود در مرکز ایران

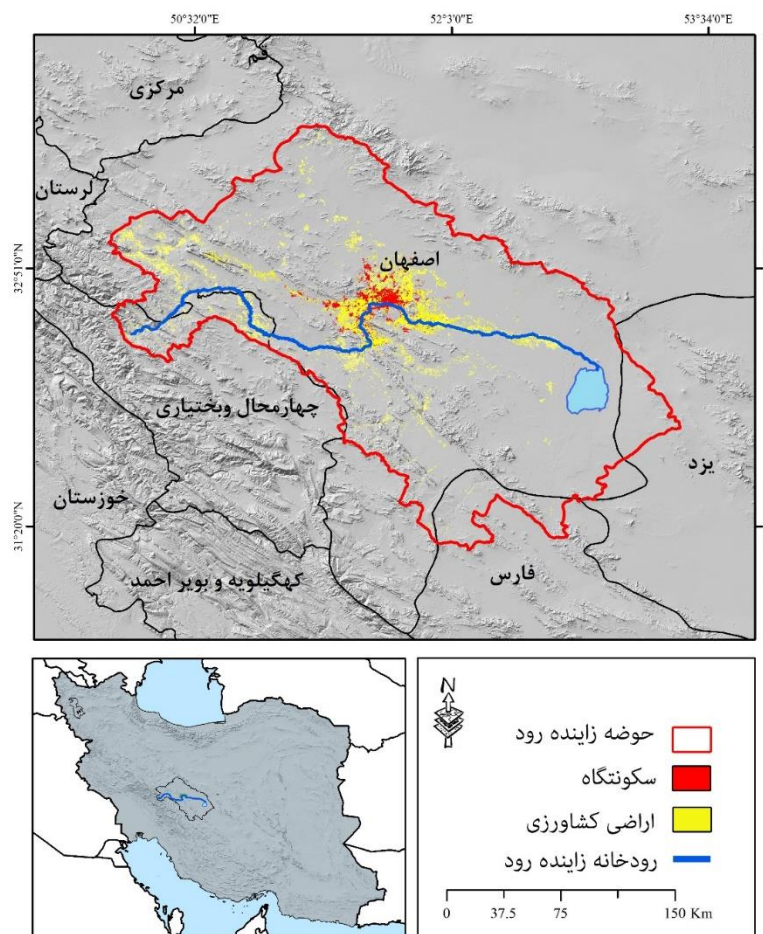


Fig 1. Zayandeh Rood watershed in central Iran

شکل ۲. نواحی منتخب برای شناسایی تغییرات آب رودخانه توسط تصاویر ماهواره لندست

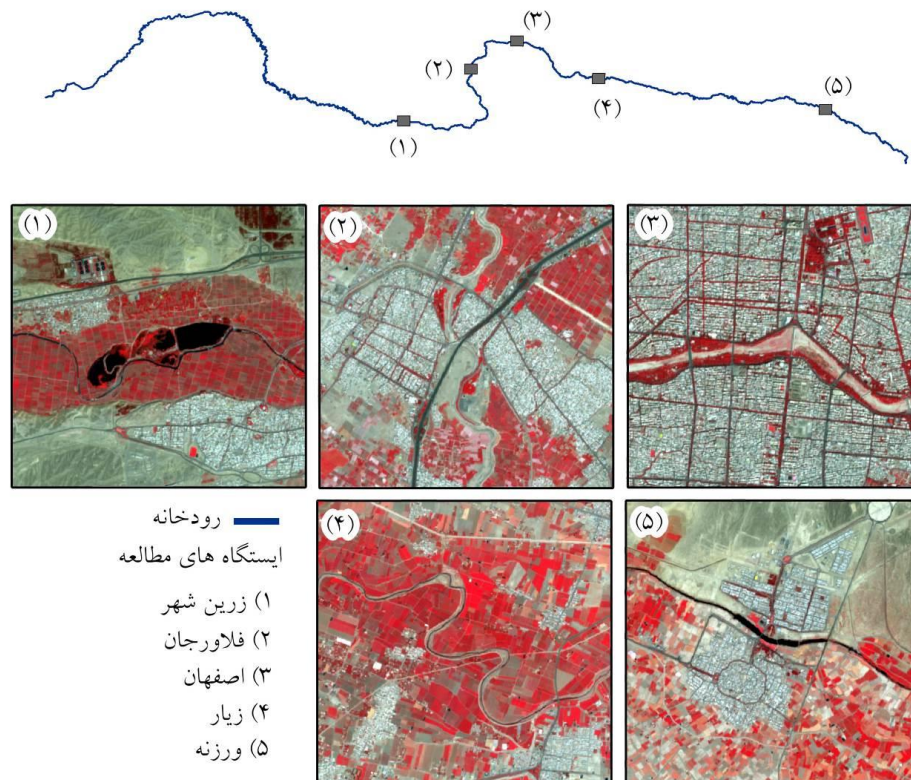


Fig 2. Selected areas to identify river water changes by Landsat satellite images

## ۲-۲- روش کار

در این مطالعه، تصاویر ماهواره‌ای به عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع دریافت داده‌های اولیه مورد استفاده قرار گرفت. پوشش زمانی و مکانی گسترده و همچنین دوره‌های گذر مجدد کوتاه مدت از مزایای اصلی سری ماهواره‌های لندست است که در این تحقیق به عنوان داده‌های ماهواره‌ای مرجع مورد استفاده قرار گرفتند. برای شناسایی گستره و تغییرات آب سطحی، از ماهواره‌ی لندست ۵ که از سال اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی به طور پیوسته به جمع‌آوری اطلاعات بازتابی از سطح زمین پرداخت است، ماهواره‌ی لندست ۸ که در سال ۲۰۱۴ جانشین این ماهواره شد، ماهواره‌ی لندست ۷ در سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۰ به جمع‌آوری داده‌های مشابه با ماهواره‌ی لندست ۵ پرداخت و در نهایت از ماهواره‌ی لندست ۹ که در سال ۲۰۲۲ به صورت ماهواره دوقلو به کمک ماهواره‌ی لندست ۸ آمد استفاده شد که در شکل (۳) نشان داده شده است.

تصحیح اولیه تصاویر یکی از مهم‌ترین مراحل آماده‌سازی تصاویر ماهواره‌ای در سنجش از دور است که اثر شگرفی در حصول نتایج صحیح دارد. از آنجایی که تصاویر ماهواره‌ی لندست به صورت خام برداشت و در اختیار کاربر قرار می‌گیرد، لازم است تا تصحیحات مورد نیاز برای تبدیل این مقادیر به بازتاب سطح زمین یا بازتاب بالای سطح زمین صورت گیرد. لزوم این امر به طور ویژه در زمانی احساس می‌شود که هدف، مقایسه‌ی تغییرات بازتاب و در نتیجه تغییرات پوشش سطح زمین در بین زمان‌های مختلف باشد.

شکل ۳. تصاویر ماهواره‌ی لندست در ردیف و گذرهای مختلف بر روی حوضه آبریز زاینده‌رود

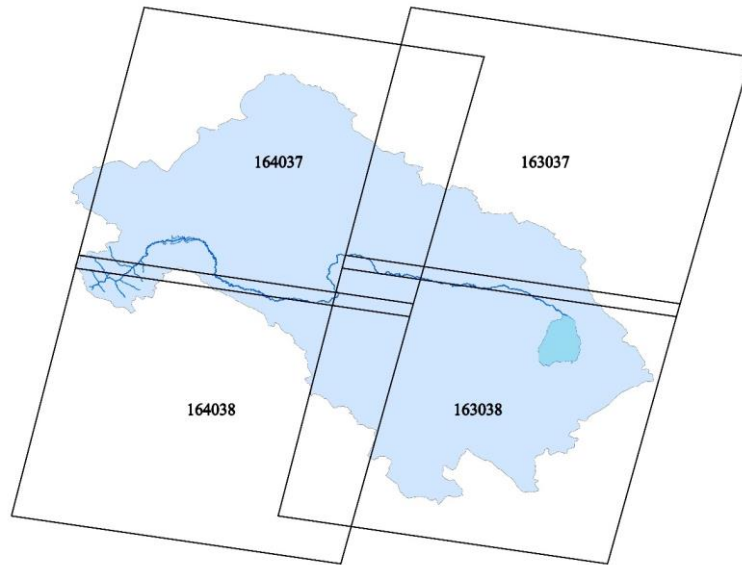


Fig 3. Landsat satellite images in different rows and passes on the Zayandeh-Rood watershed

### ۳-۲- شاخص آب تفاضلی نرمال شده

این شاخص به دلیل حساس بودن به خصوصیات مختلف مانند محتوای آبی گیاه انتخاب شد. در حالیکه NDVI اطلاعاتی در مورد میزان فتوسنتز و محتوای کلروفیل فراهم می‌کند، از NDWI می‌توان به عنوان شاخص محتوای آب گیاه بهره برد. NDWI به طور گسترده‌ای جهت مطالعه محتوای آب پوشش‌های گیاهی مورد استفاده قرار گرفته است (Mohamadi, 2022). شاخص آب تفاضلی نرمال شده بر مبنای بیشترین مقدار جذب آب و بیشترین مقدار بازتاب برای پوشش گیاهی در باند مادون قرمز نزدیک طراحی شده است. هدف از استخراج این رابطه توسط McFeeters (1996) مشخص کردن پهنه‌های آبی بوده است. در رابطه زیر NIR، باند مادون قرمز نزدیک و Green، باند سبز می‌باشد. محدوده شاخص بین ۱- تا ۱ قرار دارد. مقادیر صفر تا ۱ پهنه‌های آبی و مقادیر کمتر از صفر پوشش گیاهی را نشان می‌دهد.

$$NDWI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$$

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱- تغییرات پوشش آب در ایستگاه‌های مورد مطالعه

در این تحقیق، تغییرات حوضه‌ی زاینده‌رود را در بازه زمانی ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۱ شمسی با استفاده از داده‌های تصاویر لندست مورد بررسی قرار گرفت و شاخصی برای پیش‌بینی وضعیت حوضه ارائه گردید. ابتدا برای ارزیابی تغییرات از شاخص اختلاف آب نرمال شده استفاده شده است. در شکل (۴) روند مقادیر شاخص NDWI برای تشخیص نحوه‌ی توزیع آب رودخانه‌ی زاینده‌رود در ایستگاه زرین شهر، که آب آن اغلب برای مصارف فعالیت‌های کشاورزی استفاده می‌شود، به دست آمد. مهم‌ترین خصیصه‌ی این شاخص در ایستگاه مورد نظر نوسانات شدید فصلی آن است که نشان‌دهنده‌ی یک رودخانه

فصلی با نوسانات دبی بسیار بالا است. در این ایستگاه که در نواحی انتهایی بالادست رودخانه مشاهده می‌شود شاخص NDWI اغلب بالاتر از صفر قرار دارد. به طور خاص در سال‌های اخیر که رودخانه زاینده‌رود با خشکی بی‌سابقه‌ای روبرو شده است، این بخش از رودخانه دارای پوشش آب بوده است.

سطح آب در ایستگاه دوم شکل (۵) و ایستگاه سوم شکل (۶) نسبت به ایستگاه اول به شدت کاهش یافته است به طوری که مقادیر منفی زیادی در این شاخص در سال‌های اخیر به شدت به چشم می‌خورد. به طور خاص از سال ۱۳۹۰ تاکنون، مقدار این شاخص عموماً در محدوده‌های منفی قرار داشته که نشان‌دهنده‌ی خشک بودن کامل رسوبات بستر رودخانه است. این روند خشک‌شدگی در ایستگاه‌های چهارم شکل (۷) و پنجم شکل (۸) بسیار بارز و مشخص است به طوری که در ایستگاه پنجم، سطح آب تالاب به شدت کاهش یافته و به طور کامل در محدوده‌ی منفی قرار گرفته است.

با در نظر گرفتن تمامی نمودارها می‌توان روند محسوسی در کاهش سطح آب در نقاط نمونه مشاهده کرد که می‌تواند ارتباط مستقیمی با برداشت آب برای مصارف کشاورزی در نقاط مختلف مسیر وجود داشته باشد. شکل (۹) متوسط سالانه‌ی این شاخص در ایستگاه‌های مختلف را نشان می‌دهد. تا ایستگاه سوم، متوسط سالانه‌ی این شاخص بیشتر از صفر است که نشان‌دهنده‌ی غالبیت سطح مرطوب آن نسبت به سطح خشک رودخانه است حال آنکه در ایستگاه چهارم و پنجم به دلیل عدم وجود آب در مقاطع زمانی بسیار زیاد، متوسط سالانه‌ی این شاخص در محدوده منفی و نمایانگر خشک بودن پایین دست رودخانه است. علیرغم اینکه تبخیر و تعرق چنان اثر بارزی بر کاهش سریع مقدار آب رودخانه ندارد، بنابراین تغییرات رخ داده را می‌توان به استحصال و کانال کشی آب رودخانه نسبت داد. نکته بارز دیگر در این بخش، تفاوت معنی‌دار بین متوسط شاخص NDWI هر ایستگاه به ایستگاه مجاور است شکل (۹). به عبارت دیگر، مقدار آبی که شاخص NDWI در هر ایستگاه نشان می‌دهد تفاوت معنی‌داری با سایر ایستگاه‌ها دارد که نمایانگر استحصال آب معنی‌دار آب در تمام نقاط رودخانه زاینده‌رود است. در جدول (۱) مقادیر عددی این مقایسه در جدول مقایسه میانگین ANOVA نشان داده شده است که تفاوت بسیار معنی‌دار در سطح یک صدم را نشان می‌دهد. نتایج این تحقیق با تحقیقات (Nandi et al., 2018) در دریاچه چیلیکا در ایالت اودیشای هند، که در مطالعه تشخیص خودکار پهنه‌های آبی از خشکی، شاخص‌های NDWI، MNDWI و AWEI بهترین نتایج برای شناسایی پهنه‌ها و تغییرات زمانی دریاچه را داشتند، همخوانی دارد و در این منطقه برای شناسایی پهنه‌های آبی و تغییرات زمانی آن‌ها میتوان از شاخص‌های استخراج اتوماتیک آب و همچنین از شاخص اصلاح شده تفاضلی نرمال آب بهره برد. از تحقیقات داخلی نیز (Khosrovian et al., 2018) در پایش و بررسی تغییرات بر روی سطح آب دریاچه پریشان با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور، به این نتیجه رسیدند که؛ به دلیل حساسیت بیش از حد به مناطق آبی، زمین‌های مرطوب کشاورزی را هم جز محدوده دریاچه به حساب می‌آورد، درحالی‌که شاخص تفاضل نرمال شده آبی و شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی بالاترین نتایج را ارائه می‌دهند.

شکل ۴. مقادیر شاخص NDWI در ایستگاه اول از سال ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۱

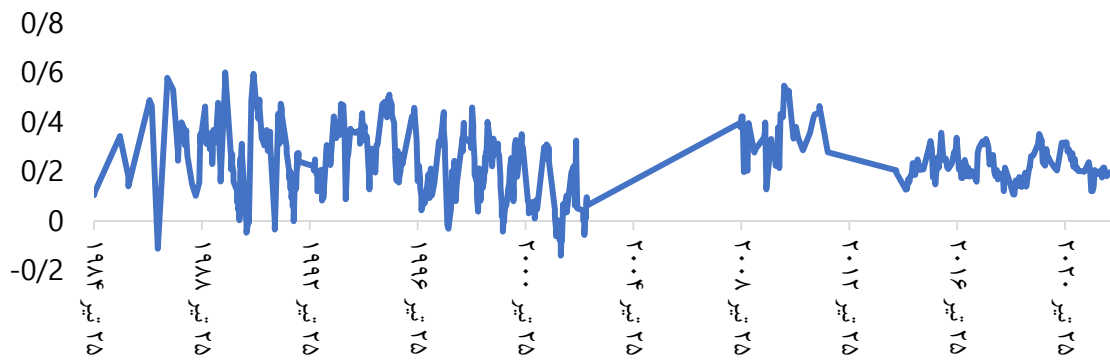


Fig 4. NDWI index values at the first station from 1984 to 2022

شکل ۵. مقادیر شاخص NDWI در ایستگاه دوم از سال ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۱

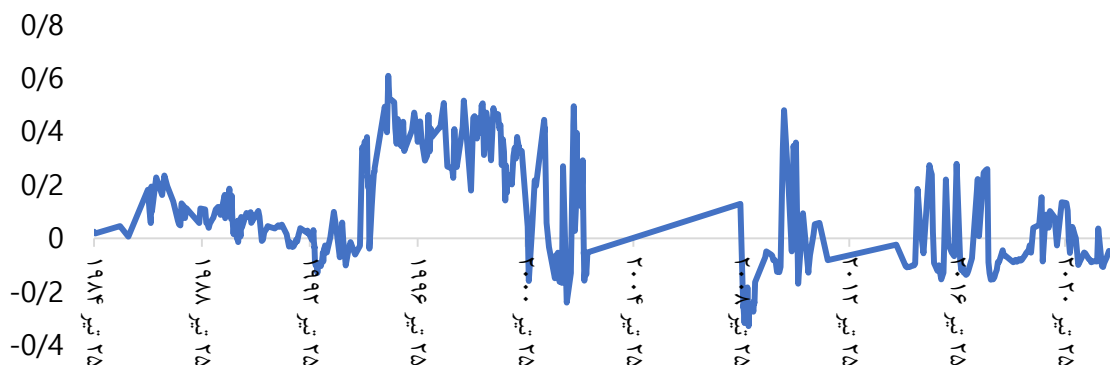


Fig 5. NDWI index values at the second station from 1984 to 2022

شکل ۶. مقادیر شاخص NDWI در ایستگاه سوم از سال ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۱

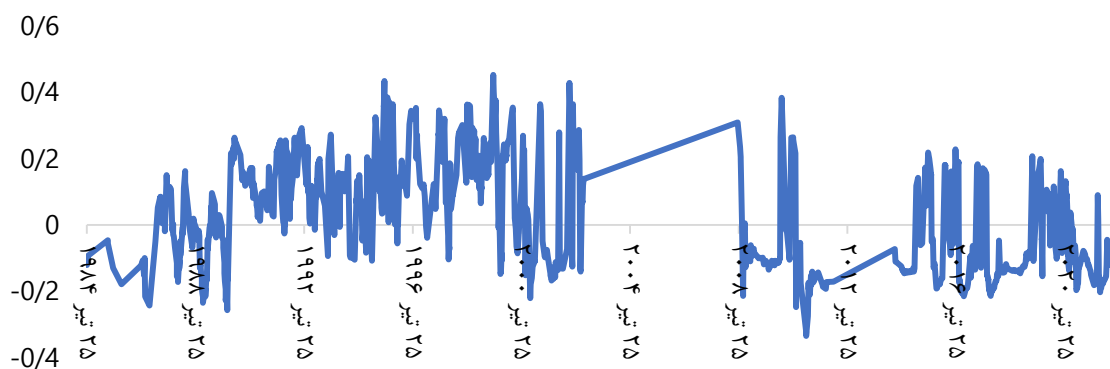


Fig 6. NDWI index values at the third station from 1984 to 2022

شکل ۷. مقادیر شاخص NDWI در ایستگاه چهارم از سال ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۱

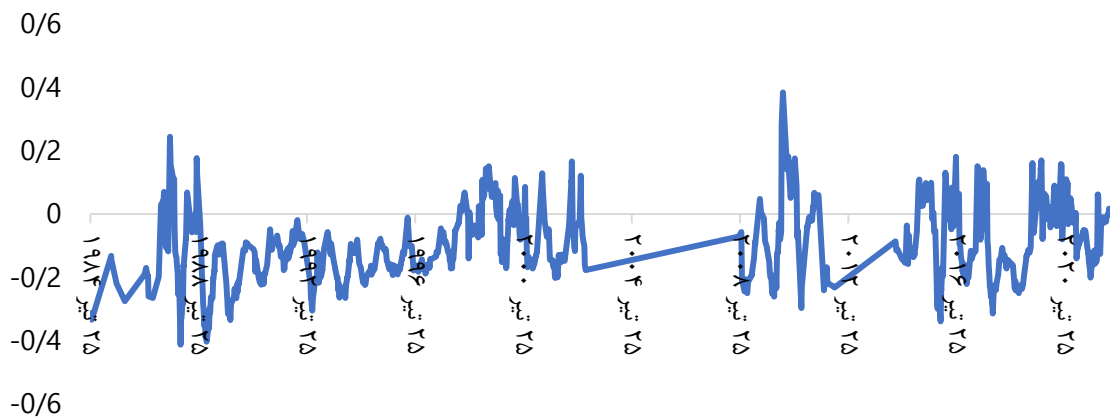


Fig 7. NDWI index values at the fourth station from 1984 to 2022

شکل ۸. مقادیر شاخص NDWI در ایستگاه پنجم از سال ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۱

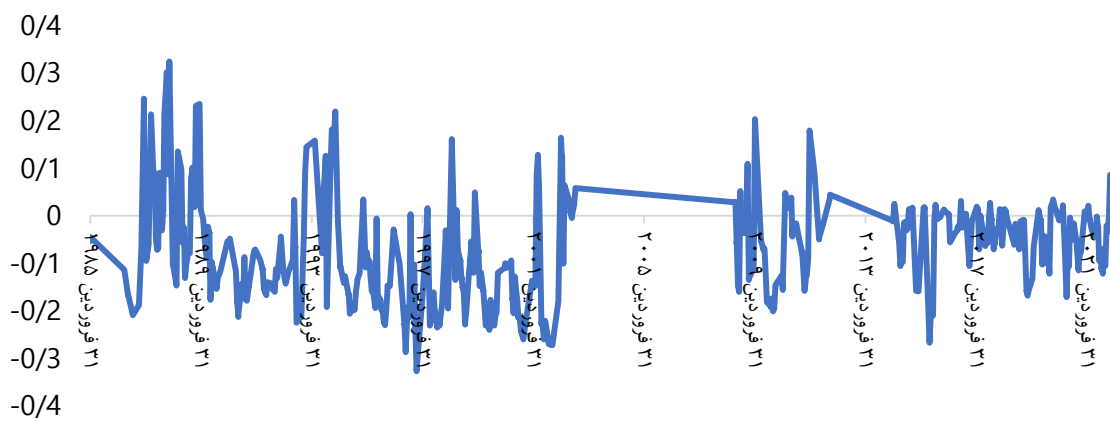


Fig 8. NDWI index values at the fifth station from 1984 to 2022

شکل ۹. متوسط شاخص NDWI در ایستگاه‌های مختلف (حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۱ درصد است)

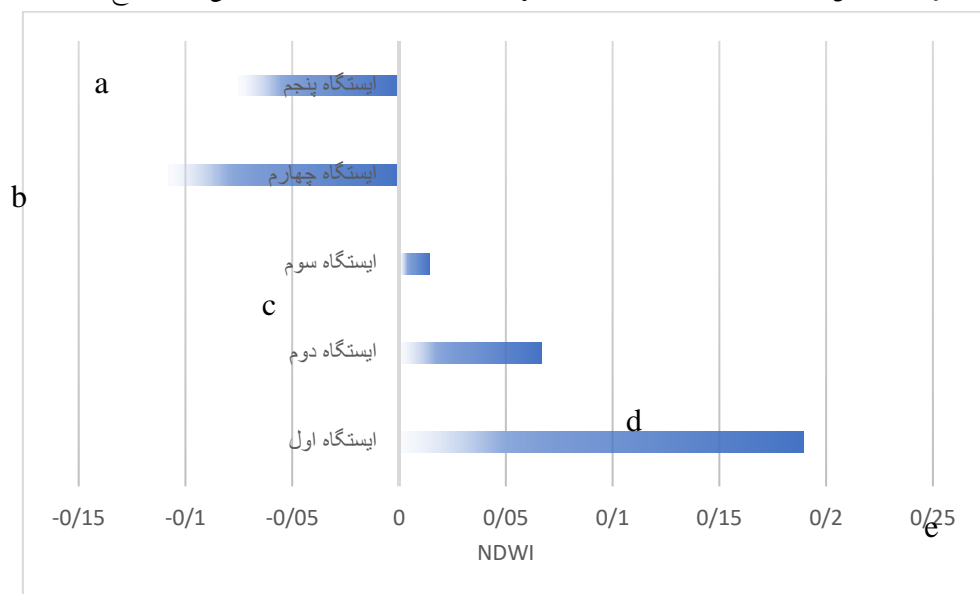


Fig 9. Average NDWI index at different stations (different letters indicate significant differences at the 1% level)

جدول ۱. جدول مقایسه میانگین شاخص NDWI بین ایستگاه‌های مختلف

Table 1. Comparison table of average NDWI index between different stations

Sig.	F	مربع میانگین	درجه آزادی	مجموع مربعات	
۰/۰۰	۷۸۹/۳۷	۱۳/۴۷	۴	۵۳/۸۹	بین گروه
		۰/۰۱۷	۴۷۰۳	۸۰/۲۷	درون گروه
			۴۷۰۷	۱۳۴/۱۶	مجموع

## ۴. نتیجه‌گیری

منبع اصلی تامین آب حوضه زاینده‌رود در استان اصفهان، بالادست سد زاینده‌رود می‌باشد. رودخانه‌ها از حساس‌ترین سامانه‌های محیطی محسوب می‌شوند که تحت تاثیر فرآیندهای هیدرودینامیکی حاکم، تغییرات آن‌ها تقریباً سریع بوده و شاید از این نظر قابل مقایسه با دیگر سامانه‌های ژئومورفولوژی نباشد. خشکسالی اولین تاثیر خود را در محیط طبیعی یک منطقه می‌گذارد. در این مطالعه، با روش NDWI، تغییرات پوشش آب حوضه زاینده‌رود بررسی شد. بررسی تغییرات در سال‌های ۱۳۶۳-۱۴۰۱ نشان می‌دهد که افزایش بهره‌برداری از ظرفیت منابع آب باعث ناپایداری منابع آب می‌شود و رودخانه از قسمت‌های میانی از حالت دائمی خارج می‌شود. بهره‌برداران قسمت‌های پایین‌تر حوضه کمبود آب خود را از منابع آب زیرزمینی جبران می‌کنند که باعث چرخه‌ی ناپایداری منابع آب، خشکسالی و... می‌شود. در واقع، افزایش بهره‌برداری موجب تخریب اکوسیستم طبیعی و برهم خوردن تعادل اکوسیستم، می‌شود و اکولوژی جانوری، گیاهی و انسانی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. روش سنجش از دور ماهواره‌ای از روش‌های معمول شناسایی آب‌های سطحی است که کارایی آن در مطالعات گوناگون به اثبات رسیده است. در این بین تصاویری برای شناسایی پهنه‌های آبی مناسب هستند که از ماهواره‌هایی تهیه شده باشند که دارای باندهای جذبی آب باشند. ماهواره لندست از جمله ماهواره‌های پرکاربرد در این زمینه است.

## ۵. تضاد منافع نویسندگان

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

## ۶. منابع

- Abu-Abdullah, M. M., Youssef, A. M., Maerz, N. H., Abu-AlFadail, E., Al-Harbi, H. M., & Al-Saadi, N. S. (2020). A flood risk management program of Wadi Baysh dam on the downstream area: An integration of hydro-logic and hydraulic models, Jizan region, KSA. *Sustain*, 12(3), 1069. <https://doi.org/10.3390/su12031069>
- Al-Obaidi, M. A., & Al-Timimi, Y. K. (2022). Change detection in Mosul dam lake, north of Iraq using remote sensing and GIS techniques. *Iraqi J Agric Sci*, 53(1), 38-47.
- Benzougagh, B., Meshram, S. G., El Fellah, B., Mastere, M., Dridri, A., Sadkaoui, D., Mimich, K., & Khedher, K. M. (2022). Combined use of Sentinel-2 and Landsat-8 to monitor water surface area and evaluated drought risk severity using Google Earth Engine. *Earth Sci Informatics*, 15(2), 929-940. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00761-9>
- Biniat A., Ahmadpour Borazjani M., Ziaee S., & Mohammadi H. (2021). Potential effects of agricultural water pricing and quota on productivity and use of agricultural inputs in Kohgiluyeh. *J Water Resear Agric*, 35(1): 89-106. <https://doi.org/10.22092/jwra.2021.352382.834>. (In Persian)
- Gaznayee, H., & Al-Quraishi, A. (2020). Identifying drought status in Duhok Governorate (Iraqi Kurdistan Region) from 1998 through 2012 using landsat time series dataset. *J Applied Sci Technol Trends*, 1(1), 17-23. <https://doi.org/10.38094/jastt1112>

- Henderson, F. M. (1995). Environmental factors and the detection of open surface water areas with X-band radar imagery. *Int J Remote Sensing*, 16(13), 2423-2437. <https://doi.org/10.1080/01431169508954567>
- Jawak, S. D., Kulkarni, K., & Luis, A. J. (2015). A review on extraction of lakes from remotely sensed optical satellite data with a special focus on cryospheric lakes. *Advances in Remote Sensing*, 4(03), 196.
- Karimian, S., Chamani, A., & Shams, M. (2020). Evaluation of heavy metal pollution in the Zayandeh-Rud River as the only permanent river in the central plateau of Iran. *Environ Monitor Assess*, 192, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8183-8>
- Khosrovian M., Inteziri A., Rahmani A., & Baaqideh M. (2018). Monitoring changes in the water level of Parshan Lake using remote sensing indicators. *Hydrogeomorphology*, 4(13): 99-120. (In Persian)
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int J Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mohamadi Monavar, H., & Zibazadeh, S. (2022). Distinguishing Rain-fed and Irrigated Crops in Hamadan Province Using Spectral Indices of Satellite Images. *J Agric Machinery*, 12(4), 529-542. (In Persian)
- Nandi D, Chowdhury R, Mohapatra J, Mohanta K, & Ray D. (2018). Automatic delineation of water bodies using multiple spectral indices. *Themed Section: Engineer Technol* 4(4): 498- 512.
- Ozesmi, S. L., & Bauer, M. E. (2002). Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands Ecol Manag*, 10, 381-402. <https://doi.org/10.1023/A:1020908432489>
- RahmaniFazli, A., & Salehian, S. (2018). Investigating the relationship between the spreading of human settlements and instability of agricultural water resources in the Zayandeh-Rud basin. *Town and Country Planning*, 10(1): 167-192. (In Persian)
- Rahpou, F., Ghayoor, H., & Rajabi, Z. (2019). Investigation the quality changes of Zayandehrud river water using fuzzy logic. *Geography Develop*, 16(53):1-3.
- Rostamian Z., & Khosravipour B. (2018). Investigating the impact of drought on sustainable development. The first international conference on applied research in agricultural sciences. *Natural Resour Environ*
- Taheri Dehkordi, A., Valadanouzj, M.J., & Safdarinezhad, A. (2022). Cropland mapping through integration of segmentation and classification techniques in google earth engine. *Iranian Remote Sensing & GIS*, 14(1): 1-20. (In Persian)
- Zhaohui, Z., Prinet, V., & Songde, M. A. (2003). Water body extraction from multi-source satellite images. In *IGARSS 2003. 2003 IEEE Int Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477)*, 6, 3970-3972. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1295331>





Review Article



## Survey the role of good governance in managing the water crisis of the Zayandeh Rood river

Elham Khosravipour

M.A in Human Resource Management, Azad University of Shushtar, Khuzestan, Iran.

*Corresponding Author:* khosravipour1400@gmail.com

Received: 28 Aug 2023

Accepted: 11 Oct 2023

Published: 14 Oct 2023

### Abstract

Many countries around the world are facing important problems in the field of water resources management. Due to reasons such as corruption, lack of civil society and inefficiency of the administrative structure in developing countries, and issues such as unsustainable consumption patterns, excessive use of resources, etc., have made the water governance system face challenges in industrialized or developed countries. In Iran, the problem of water shortage has become critical, serious and widespread, which has involved many sectors, including economy, society, environment, agriculture, etc. Because water governance refers to all the activities that are involved in the policy-making and decision-making process regarding the development and management of water resources, and It also represents a change in government-society relations in countries that have fundamentally developed water-related activities, Therefore, according to the current conditions and the global water crisis, the necessity of a fundamental change in the management of water resources is inevitable. The results of the research show that the water crisis in Iran, especially in the case of the Zayandeh River, is caused by the lack of water management and neglect of the role of water governance. On the other hand, good governance, as a type of governance that guarantees public welfare and individual rights, has indicators that are considered as the basic foundations needed to evaluate the state of water governance in each region. The Zayandeh River of Isfahan, has experienced an intensification of the drying process every year more than the previous year, which has had several consequences, and the solution to the water crisis in this region is to transition to good governance, efficient and compatible with historical, cultural, social and economic conditions of the region. This article was prepared in a review method with the help of library and internet sources, and its purpose is to examine the role of good governance in managing the water crisis of the Zayandeh Rood River in Isfahan.

**Keywords:** Zayandeh Rood, Isfahan, Water Crisis, Water governance



## بررسی نقش حکمرانی خوب در مدیریت بحران آب رودخانه زاینده‌رود

### الهام خسروی پور

گروه مدیریت، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جامع شوشتر، خوزستان، ایران.

نویسنده مسئول: khosravipour1400@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۹

چاپ: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

### چکیده

کشورهای زیادی در سراسر دنیا با مشکلات مهمی در زمینه مدیریت منابع آب روبه‌رو شده‌اند. کشورهای در حال توسعه به دلایلی مانند فساد، فقدان جامعه مدنی و ناکارایی ساختار اداری و در کشورهای صنعتی یا توسعه یافته مسایلی مانند الگوی مصرف ناپایدار، استفاده بیش از حد از منابع و ... نظام حکمرانی آب را با چالشهایی روبه‌رو ساخته است. در ایران نیز مشکل کم آبی به شکلی بحرانی، جدی و فراگیر شده که بسیاری از بخش‌ها اعم از اقتصاد، اجتماع، محیط زیست، کشاورزی و ... را درگیر ساخته است. از آنجا که حکمرانی آب به همهی فعالیت‌هایی که در فرایند سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری درباره‌ی توسعه و مدیریت منابع آب نقش دارند اطلاق می‌شود و بیانگر یک تغییر در مناسبات دولت - جامعه در کشورهایی است که فعالیت‌های مرتبط با آب را به شکل اساسی توسعه داده‌اند، باتوجه به شرایط موجود و بحران آب جهانی، ضرورت یک تغییر اساسی در مدیریت منابع آب اجتناب‌ناپذیر است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد بحران آب در ایران خصوصاً در مورد رودخانه زاینده‌رود در کنار سایر عوامل، ناشی از عدم مدیریت آب و بی‌توجهی به نقش حکمرانی آب است. از سویی حکمرانی خوب به عنوان نوعی از حکمرانی که رفاه عمومی و حقوق فردی را توأمان تضمین می‌کند شاخص‌هایی دارد که به عنوان پایه‌های اساسی موردنیاز ارزیابی وضعیت حکمرانی آب در هر منطقه به شمار می‌روند. پرآب‌ترین رودخانه‌ی فلات مرکزی ایران، رودخانه‌ی زاینده‌رود اصفهان، هر سال بیشتر از سال قبل دچار تشدید روند خشک شدن بوده که پیامدهای متعددی داشته و چاره‌ی بحران آب در این منطقه، گذار به حکمرانی خوب، کارآمد و سازگار با شرایط تاریخی، فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی منطقه است. هدف مقاله حاضر که به روش مروری و با کمک منابع کتابخانه‌ای و اینترنتی تهیه شده، بررسی نقش حکمرانی خوب در مدیریت بحران آب رودخانه زاینده‌رود اصفهان است.

**واژه‌های کلیدی:** زاینده‌رود، اصفهان، بحران آب، حکمرانی آب

## ۱. مقدمه

بسیاری از کشورها در کل دنیا با چالش‌های مهمی در مدیریت منابع آب به دلایل صنعتی شدن، توسعه شهرنشینی و اثر تغییر اقلیم روبرو شده‌اند که دسترسی به منابع آب در سراسر جهان را با نارضایتی و کشمکش در بین گروه‌های مختلف اجتماعی همراه کرده است. بعضی از این عوامل کشمکش در زمان‌های مختلف، باعث ایجاد اختلاف می‌شوند. ضروری است که دولت‌ها به دنبال الگوی نوینی در جهت تعامل و مشارکت سازنده با نهادهای مدنی و بخش خصوصی در جهت رشد اقتصادی باشند که تدارکات موفقیت آمیز این نهادها اغلب به عنوان حکمرانی خوب یاد می‌شود. حکمرانی می‌تواند ساختارهای مختلف داشته باشد، برای مثال جهت استقرار حقوق دارایی‌ها، قوانین و مقررات به کار رود. بیشتر قوانین عمومی در کالیفرنیا با هدف ایجاد حوضه‌ی آب‌های زیرزمینی برنامه ریزی شده است، یا در جنوب آفریقا در پایان حکومت آپارتاید حکمرانی باعث تغییرات قابل توجهی در قوانین آب شد. موارد زیادی در مورد تاثیر حکمرانی آب بر روی حکمرانی خارجی وجود دارد. بهترین مثال شناخته شده این مورد، توسعه همکاری هلند در بخش آب در اوایل قرن بیستم بوده است که نقش مهمی در زیرساخت رفاهی دولت مدرن هلند جهت ساخت کشور ایفا کرد (Dehghani et al., 2020).

امروز وضعیت آب در ایران به مرز اضطراب رسیده و کسری آن بالغ بر ۴۰ میلیارد متر مکعب شده است؛ البته استان‌هایی مانند فارس، سیستان و بلوچستان، اصفهان، کرمان، یزد و... بیشتر و زودتر از سایر مناطق کشور به مرز بحران و اضطراب در آب رسیده‌اند. چنانچه در این باره چاره‌اندیشی نشود، در آینده‌ی نزدیک رقابت بر سر آب، اختلافات قومی در کشور را در قالب درگیری‌های استانی و منطقه‌ای تشدید خواهد کرد. خطرناکتر از همه اینکه بی‌آبی، تداوم زندگی انسانی، کشاورزی و حیات زیست محیطی را به بن بست خواهد کشانید (Esmaeili, 2020). در ایران، تشدید مشکل کم‌آبی، پیچیدگی و تعدد جنبه‌های این مشکل، نشان از این واقعیت دارد که راهکارهای پیشین برای اداره‌ی منابع محدود آب کشور، از تنوع لازم برخوردار نبوده است. این موضوع، متولیان امور آب کشور را وادار ساخته است تا رویکردهای گذشته در زمینه‌ی مدیریت منابع آب کشور را مورد بازبینی و تجدیدنظر قرار دهند. بنابراین، در شرایط موجود مدیریت منابع آب در معرض یک تغییر اساسی قرار گرفته است که می‌بایست از رویکردهای مبتنی بر اصول مهندسی صرف که تنها بر تأمین آب تکیه دارد به رویکردهایی که به‌طور عمده بر مدیریت تقاضای آب استوار است، تغییر موضع دهد. بدیهی است که این امر با ایجاد تغییرات هدفمند در راستای استقرار نظام حکمرانی کارآمد منابع آب در کشور امکانپذیر است. بنا بر عقیده‌ی بسیاری از صاحب‌نظران بخش آب، تنها در سایه‌ی اصلاح ساختار حکمرانی موجود است که می‌توان امید داشت مشکلات بخش آب تا حدودی کاهش یابد. چاره‌ی بحران آب در شناخت ابعاد مختلف حکمرانی موجود و گذار به حکمرانی کارآمد، متناسب و سازگار با شرایط تاریخی، فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی هر منطقه نهفته است و راهکاری از پیش تعیین شده و نسخه‌ی واحد برای خروج از این شرایط وجود ندارد. از طرف دیگر، حل مشکل نیز تنها در قالب وظایف دولت و یا مسئولیت یک سازمان امکانپذیر نیست. به عبارتی، مواجهه با بحران آب نیازمند فهم مشترک از مشکل، اقدام جمعی ذی‌نفعان و یادگیری اجتماعی در عمل است. مطالعات حکمرانی آب در ایران هنوز در مراحل اولیه است و راهی طولانی در نهادینه سازی اهمیت این نوع بررسی‌ها و بالتبع اصلاحات نهادی متناظر در پیش رو است (Yadegari et al., 2018).

در هر برهه تاریخی دولت‌ها برای رفع مسائل و مشکلات سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی خود به سیاست‌های خاصی روی آورده‌اند و همیشه، چگونگی حکومت کردن مورد توجه اندیشمندان سیاسی، جامعه‌شناسان و صاحب‌نظران حقوق عمومی بوده است. رهبران و مسئولان سیاسی نیز همواره تلاش دارند که نظام سیاسی‌شان را کارآمدتر سازند یا کارآمد جلوه دهند. تمامی حکومت‌ها هدف خود را دستیابی به خیر و مصلحت بیشتر برای شهروندان اعلام می‌کنند. اندیشمندان حقوق

عمومی و علوم سیاسی نیز هدف سیاست و کارکرد نظام سیاسی را ایجاد نظم و ثبات از طریق کارآمدی نهادی می‌دانند. با این وجود، ناکارآمدی نهادهای سیاسی از جمله موضوعاتی است که همواره مطرح بوده است. اندیشمندان برای برون رفت از این وضعیت گاهی دولت حداقلی و زمانی دیگر دولت حداکثری و امروزه هم بحث حکمرانی خوب را مطرح کرده‌اند. نهادهای مالی بین‌المللی نظیر بانک جهانی و صندوق بین‌المللی پول همگی بر این باورند که حکمرانی خوب یک ضرورت حیاتی برای کمک به تحقق برنامه‌های توسعه است (Salmani et al., 2022). امروزه ارزش و جایگاه منحصر به فرد منابع آب در تأمین رفاه و بهزیستی جامعه، لزوم تداوم دسترسی به آب کافی و سالم برای همگان در هر زمان، و وجود پیوندهای قوی دوجانبه‌ی آب و توسعه، ضرورت پاسخگویی مناسب به نیازهای فزاینده و اصلاح ساختاری مدیریت منابع آب را گریزناپذیر کرده است. از ویژگی‌های حکمرانی ناسازگار و ناپایدار می‌توان به مدیریت بخشی مبتنی بر چانه‌زنی و تخصیص بالا به پایین، نبود آمار و اطلاعات مناسب و تأکید بر رویکردهای مهندسی و سخت‌افزاری اشاره کرد؛ بنابراین تدوین اصولی برای گذار به حکمرانی کارآمدتر در سطوح محلی، ملی و جهانی، امری ضروری است (Yousefi et al., 2017).

در کشورهایی که نهادهای دولتی کارآمد، درستکار و مبتنی بر شایسته‌سالاری‌اند، قوانین و مقررات ساده و روشن‌اند، حاکمیت قانون به گونه‌ای منصفانه اعمال می‌شود، سیاست‌ها و چارچوب‌های قانونی در تصرف گروه‌های ذی‌نفوذ نیست، جامعه مدنی و رسانه‌های گروهی صدای مستقلی دارند که پاسخگویی دولت‌ها را ارتقا می‌دهند؛ درآمدها و سرمایه‌گذاری‌ها و رشد افزایش می‌یابند و امید به زندگی طولانی‌تر پدیدار می‌شود (Zahiri, 2015). حکمرانی خوب نه تنها روایتی نو از مفاهیمی چون دموکراسی، حقوق بشر، پاسخگویی، مشارکت و حاکمیت قانون است، در عین حال چارچوبی ایجاد می‌کند که همه این اهداف و ارزش‌ها در یکجا جمع شوند و اهداف توسعه انسانی اعم از توسعه اقتصادی، سیاسی، اجتماعی و فرهنگی با محوریت مردم دنبال شود. از سوی دیگر در خدمات دولتی نوین به جای اینکه حکومت‌ها صرفاً نقش هدایتی را عهده‌دار باشند و به عنوان محرک نیروهای بازار عمل کنند به توانمندسازی شهروندان و خلق ارزش‌های مشترک میان آن‌ها پرداخته و ایجاد ائتلافی از سازمان‌های دولتی، خصوصی و نهادهای مدنی را مورد توجه قرار می‌دهند که نتایجی نظیر پاسخگویی، شفافیت، قانون‌مداری، مشارکت، مسئولیت‌پذیری، کارآیی، اثربخشی، عدالت و انصاف را به دنبال دارد و در اتخاذ سیاست‌های پیشبینی شده، آشکار و صریح دولت، بروکراسی شفاف، پاسخگویی شفاف دستگاه‌های اجرایی، مشارکت فعال مردم در امور مختلف اجتماعی و سیاسی و همچنین برابری همه افراد در برابر قانون تبلور پیدا می‌کند (Peyghan et al., 2022).

رودخانه‌ی زاینده‌رود به عنوان تنها رودخانه‌ی دائمی فلات مرکزی ایران، شریان حیاتی شهر اصفهان در طول تاریخ بوده است. این شهر اما امروزه در تأمین آب در بخش‌های آشامیدنی، کشاورزی و نیز محیط زیست به دلیل کمبود آب با مشکلاتی مواجه شده است. سایر پیامدهای خشک شدن زاینده‌رود به صورت کاهش رطوبت هوا، افزایش غبارات محلی و آلودگی هوا، افت سطح آب‌های زیرزمینی، خشک شدن تدریجی پوشش گیاهی و مراتع، کاهش فعالیت‌های کشاورزی و باغداری و در نهایت افزایش بیکاری و فقر اجتماعی به‌ویژه برای ساکنین اطراف رودخانه است. از سوی دیگر آسیب دیدن عامل مهم شکل‌گیری مفهوم اصفهان در ذهنیت مردم، از مهم‌ترین آسیب‌های وارده به ادراک مردم از منظر شهری اصفهان است که این شهر در دو دهه‌ی گذشته و به واسطه‌ی خشک شدن زاینده‌رود با آن دست به گریبان بوده است (Saberi & Mansouri, 2021). لذا باتوجه به مطالب بیان شده، مقاله‌ی حاضر در پی بررسی و پاسخگویی به این مساله است که آیا شاخص‌های حکمرانی خوب بر بحران آب رودخانه زاینده‌رود اثرگذار است؟

## ۲. ضرورت بررسی بحران آب در ایران

آب به عنوان ضروریترین ماده حیاتبخش اکوسیستم‌ها، پیش شرط هرگونه رفاه و اساسا زندگی موجودات محسوب می‌شود. امروزه پژوهشگران آب و حتی سیاستمداران کشورهای مختلف جهان از گمان به یقین رسیده‌اند که نحوه استفاده از منابع آب و چگونگی تقسیم آن یکی از عوامل بروز جنگ‌ها در اقصی نقاط جهان خواهد بود. برخی از کارشناسان دلایل بروز این بحران را دلایلی مانند بهره‌برداری بی‌رویه، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، افزایش جمعیت و غیره می‌دانند؛ اما در واقع حتی اگر کاهش نزولات جوی به عنوان یک علت در نظر گرفته نشود (علیرغم نظریاتی که آن را معلول افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرم شدن زمین می‌داند)، می‌توان گفت تمام موارد مذکور خود به نوعی معلول بوده و با مدیریت صحیح قابل کنترل می‌باشند. علاوه بر این برخی صاحب‌نظران با ایجاد ارتباط بین کمبود آب شیرین و تهدید امنیت ملی به‌ویژه در منطقه خاورمیانه که در زمینه‌ی مدیریت آب و نزولات جوی از وضعیت مناسبی برخوردار نمی‌باشند معتقدند کمبود منابع آب شیرین، تنش و تهدید امنیت ملی در کشورهای منطقه خلیج فارس را تشدید کرده است (Zakeri Mahabadi et al., 2022).

نگاه عمیق به موضوع آب و بحران ناشی از آن نشان می‌دهد بیشتر مسائل پیش آمده در این زمینه ناشی از سیاست‌گذاری غیرصحیح، غیرکارشناسانه، و شتابزده بوده است. سیاست‌های اعمال شده بعد از دهه‌ی ۱۳۴۰ ش، عملا موجب ایجاد، تقویت و تشدید بحران آب شده است. دنباله‌ی آن سیاست‌ها در قالبی دیگر، بعد از انقلاب هم دیده می‌شود. سیاست صنعتی‌سازی کشور که از جمله محورهای اصلی سیاست‌های رژیم گذشته بعد از اصلاحات ارضی بود، به همراه چندین سیاست دیگر، پیامدها و آثار متعدد و ماندگاری، نه تنها در حوزه‌ی آب بلکه در حوزه‌های اقتصادی، اجتماعی و سیاسی برجای گذاشت. اول اینکه اصلاحات ارضی موجب مهاجرت روستاییان به شهرهای بزرگ به ویژه تهران شد؛ در نتیجه آسیب‌های متعدد اجتماعی در کلانشهرها و کم‌رنگ شدن هویت زندگی و کار روستایی به وجود آمد؛ به‌طوری که کشت سنتی ایرانیان که مبتنی بر همکاری بود، آسیب جدی دید و بسیاری از قنات‌ها و آبخوان‌هایی که برای سالیان متمادی منبع اصلی آبیاری نظام-های کشت ایران بود، از بین رفت. دوم اینکه در طرف دیگر، شاهد رشد کارخانه‌ها و صنایعی هستیم که هر روز نیاز جدی به آب پیدا می‌کردند و حتی بسیاری از صنایع توجیه اقتصادی احداث و تأسیس نیز نداشتند، لیکن به علت سیاست رژیم گذشته بسیاری از این صنایع به رغم آب‌بر بودن، احداث شدند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان صنایع فولاد را نام برد. سوم اینکه افزایش و رشد گسترش جمعیت شهرنشین، از یک سو، و منافع صنایع و شرکت‌های سدساز (با تبلیغ این شرکت‌ها در زمینه‌ی کمبود آب) از سوی دیگر، باعث شد دولت سدهای متعددی احداث کند که این سیاست بعد از انقلاب نیز تشدید شد. نداشتن توجه اجتماعی چنین سدهایی و نیز بی‌توجهی به وضعیت جامعه‌ی بومی ساکن، عملا راه کارگزاران فنی و مهندسی را به عرصه‌ی سیاست‌گذاری باز کرد و آن‌ها در کنار دولت به عنوان ذی‌نفعان آب شناخته شدند که همراه با دولت بسیاری از جنبه‌های اجتماعی، فرهنگی، و حتی حقوقی پروژه‌ها را تعیین می‌کردند (البته اگر برای آب، حقوقی تصور کنیم). بعد از انقلاب هم، به‌ویژه از برنامه‌ی اول توسعه، روند سیاست‌گذاری نامناسب در حوزه‌ی آب تشدید شد؛ به‌طوری که پیامدهای کنونی سدسازی‌ها و سیاست‌های توزیع نامناسب آب که از برنامه‌ی اول کلید خورده بود، در سال‌های اخیر آشکار شده است (Afsari et al., 2017). بسیاری از صاحب‌نظران معتقدند بحران آب موجود در کشور بیشتر از آن که به کمبود آب مرتبط باشد به عدم مدیریت آب و کم‌رنگ بودن نقش حکمرانی آب در ایران مربوط است. مساله کمبود آب در ایران به شکلی بحرانی، جدی و فراگیر شده است که نه تنها از حالت تخصصی خارج شده، بلکه از زبان طبقات مختلف مردم و مسئولان شنیده می‌شود و موردی است که اقتصاد پرریسک، اجتماع، محیط زیست فراموش شده، کشاورزی و بسیاری از بخش‌ها را

درگیر کرده است. این بخش‌ها با تصمیمات مدیریتی ضعیف در مورد آب، نقشه‌های ضعیف و سیاست‌گذاری‌های نادرست بدتر خواهد شد (Dehghani et al., 2020).

### ۳. حکمرانی آب

امروزه نظام حکمرانی آب هم در کشورهای درحال توسعه و هم توسعه یافته با مشکلاتی روبرو است. در کشورهای درحال توسعه فساد، فقدان جامعه مدنی، و ناکارایی ساختار اداری و در مقابل، در کشورهای صنعتی و توسعه یافته نیز الگوی مصرف ناپایدار، تسلط اقتصاد بر محیط زیست، و استفاده‌ی بیش از حد از منابع، حکمفرما است. با وجود اهمیت حکمرانی آب، توافق چندانی در زمینه تعریف و نحوه اندازه‌گیری آن وجود ندارد و تعریف‌های مختلفی از حکمرانی ارائه شده است. مدیریت و حکمرانی منابع آب، دو مقوله‌ی متفاوت هستند. مدیریت آب به فعالیت‌هایی مانند تحلیل، نظارت، توسعه، و اقدامات لازم برای حفظ منابع آب در یک محدوده‌ی مشخص، در حالیکه حکمرانی آب به فعالان و شبکه‌های مختلفی که به تدوین، نظام‌مند کردن و اجرای سیاست‌های آب کمک می‌کنند، اطلاق می‌شود. علاوه بر این، حکمرانی، جنبه‌های کلان و راهبردی اداره‌ی منابع آب را دربرمی‌گیرد، درحالی‌که مدیریت آب با مقوله‌های مستمر و اجرایی‌تر سروکار دارد (Yousefi et al., 2017). "حکمرانی آب" اصطلاحی است که در دو دهه‌ی اخیر راه خود را به مکالمات معمول میان کارشناسان و افراد دانشگاهی فعال در حوزه‌ی آب باز کرده است. این واژه بیانگر تغییر در مناسبات دولت - جامعه در کشورهایی است که مسئولیت‌ها و فعالیت‌های مرتبط با مدیریت آب و خدمات آبی آن را به شکل اساسی افزایش و توسعه داده‌اند. حکمرانی آب به همه‌ی فعالیت‌ها و نظام‌هایی اطلاق می‌شود که در فرایند سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری درباره‌ی توسعه و مدیریت منابع آب نقش دارند. ماهیت اصلی حکمرانی آب سیاسی است و مشخص می‌کند چه کسی تا چه اندازه در استفاده از منابع آبی محق است. امروز، حضور فعالان غیردولتی، بخش خصوصی و سازمان‌های غیردولتی در مدیریت آب، تخصیص منابع و مدیریت خدمات مرتبط آبی، افزایش چشمگیری یافته است. شرکت جهانی آب دو مجموعه‌ی کلی از اصولی ارائه داد که حاکمیت مؤثر آب را پشتیبانی می‌کند: اول اینکه رویکردهای حاکمیت آب باید شفاف، فراگیر، منصفانه، منسجم و یکپارچه باشد؛ دوم اینکه عملیات یا اجرای حاکمیت آب باید پاسخگو، کارا، مسئول و پایدار باشد. بنابراین، می‌توان گفت حکمرانی آب شامل نظام‌هایی است که کنترل تصمیم‌سازی‌ها با توجه به توسعه و مدیریت منابع را برعهده دارند. پس، بیشتر در مورد روش تصمیمات اتخاذشده از قبیل: چطور؟ با چه کسی؟ تحت چه شرایطی؟ است. از طرف دیگر، حکمرانی آب روشی است در قوانین و مسئولیت‌هایی (طرح، ترتیبات و اجرا) که در مدیریت آب به کار گرفته می‌شوند و به‌طور وسیع‌تر نیز شامل نهادهای رسمی و غیررسمی است که به واسطه‌ی اقتدار عمل می‌کنند. ارکان عمومی حکمرانی که براساس چهارچوب‌های متفاوتی ترکیب و تدوین شده‌اند، از این قرار است:

- مشروعیت از اقتدار سازمانی به حاکمیت
- شفافیت در فرایند تصمیم‌سازی
- پاسخ‌گویی کنش‌گران و مسئولیت‌های آنان
- فراگیری سهامداران، ذی‌نفعان با سلايق و علايق متفاوت
- عدالت در توزيع خدمات یا اختصاص مصارف
- یکپارچگی سیاست‌گذاری آب در سطوح افقی و عمودی
- ظرفیت سازمان‌ها و افراد مدیریت‌کننده‌ی آب
- سازگاری با شرایط متغیر (Afsari et al., 2017).

## ۴. حکمرانی خوب و شاخص‌های آن

برنامه توسعه سازمان ملل متحد حکمرانی را نظامی از ارزش‌ها، نهادها و سیاست‌ها تعریف می‌کند که جامعه، مسایل اجتماعی خود را از طریق سه بخش دولت، جامعه مدنی و بخش خصوصی مدیریت می‌کند (UNDP, 2008).

بارنارد (۱۹۳۸) معتقد است که وظیفه مدیر ایجاد انگیزه در کارکنان و کمک به آن‌ها است تا منابع موردنیاز را برای انجام وظایف روزمره‌شان داشته باشند. سایمون در اثر خویش با عنوان "رفتار اداری" به تعادل نقش‌های ذی‌نفعان می‌پردازد و رسالت مدیر سازمان را برقراری تعادل میان ذی‌نفعان می‌داند. سرمنشأ دیدگاه حکمرانی خوب را می‌توان در اندیشه‌های چستر بارنارد یافت. از دیدگاه بارنارد راه‌حل بسیاری از مسائل اجتماعی مستلزم همکاری و مشارکت شبکه‌ای از بازیگران سازمان‌های دولتی، بخش خصوصی و نهادهای مردمی است. حکمرانی خوب مفهوم جدیدی است که در سال ۱۹۹۰ از سوی نهادهای بین‌المللی مطرح شده و در سایه حمایت سازمان ملل بسط و توسعه یافت. این آموزه با تأکید بر توانمندسازی دولت، معیارها و اصول حکومت‌داری که دولت‌ها از طریق آن‌ها به اداره امور عمومی و تضمین حقوق بشر می‌پردازند را در برمی‌گیرد. به عبارت دیگر حکمرانی خوب یعنی شفافیت، پاسخگویی، عدالت و ارتقای تساوی افراد در برابر قانون.

در سال‌های اخیر بانک جهانی به کمک دپارتمان توسعه بین‌المللی در انگلستان، شاخص‌های حکمرانی خوب را بازنگری کرده‌اند. این بازنگری براساس معیارهایی مانند، سطح پذیرش دولت‌ها، کیفیت، پوشش داده‌ها و ارتباط بین این شاخص‌ها با نتیجه‌ی بدست آمده از توسعه تأکید دارد و به دنبال توسعه‌ی شاخص‌های کمی، قابل پذیرش سیاسی و مرتبط با خط‌مشی است:

۱. پاسخ‌گویی و حق اظهارنظر: مقصود از این شاخص، میزان مشارکت شهروندان در انتخاب دولت و نظام سیاسی است. معیارهای بیانگر این شاخص، آزادی بیان، آزادی احزاب، تشکل‌ها، اجتماعات و آزادی رسانه‌های جمعی است. همچنین براساس این شاخص هرچه مردم در یک جامعه نقش بیشتری در تعیین زمامداران و هیأت حاکمه داشته باشند و یا اینکه نقش احزاب، تشکل‌ها، انجمن‌ها و رسانه‌های جمعی و نظایر آن‌ها در جامعه بیشتر باشد، گویای حکمرانی خوب در یک کشور است.

۲. ثبات سیاسی و نبود خشونت: این شاخص بیانگر آن است که یک حکومت و نظام سیاسی چه میزان احتمال دارد از راه‌های غیرقانونی یا ابزارهای خشونت آمیز در معرض بی‌ثباتی و سرنگونی و براندازی باشد. در اینجا عواملی همچون حضور گروه‌های تروریستی و بروز خشونت‌های سیاسی از جمله معیارهای اساسی ثبات و یا عدم ثبات سیاسی هستند. براساس این شاخص، هرچه احتمال حضور گروه‌های تروریستی و خشونت‌های سیاسی در یک جامعه بیشتر باشد، احتمال بی‌ثباتی سیاسی در کشور نیز بیشتر است و هرچه کشوری از ثبات سیاسی بیشتری برخوردار باشد، در زمینه حکمرانی خوب امتیاز بالاتری را کسب می‌کند در حالیکه هرچه عدم ثبات سیاسی در یک کشور بیشتر باشد، نشان‌دهنده‌ی حکمرانی ضعیف است.

۳. اثربخشی دولت: در این شاخص، کیفیت خدمات عمومی، خدمات شهروندی و میزان استقلال آن‌ها از فشارهای سیاسی مدنظر است. همچنین کیفیت تدوین و اجرای خط‌مشی‌های عمومی و دولتی و میزان تعهدی که دولت در برابر این سیاست‌ها دارد در این شاخص در کانون ارزیابی قرار می‌گیرد. در نتیجه هرچه کیفیت خدمات عمومی و شهروندی بهتر باشد و خط‌مشی‌های عمومی به دور از جنجال‌ها و خط و ربط‌های سیاسی وضع و اجرا شوند و تعهد نظام سیاسی در قبال آن‌ها بیشتر باشد، بیانگر وضعیت بهتری در حکمرانی خوب است.

۴. کیفیت تنظیم کنندگی: منظور از این شاخص، توانمندی دولت در تدوین و اجرای سیاست‌ها و مقررات و نظاماتی است که سبب گسترش نفوذ و دامنه فعالیت‌های بخش خصوصی می‌شود. هرچه دولت بتواند با تدوین و اجرای سیاست‌ها و نظامات مختلف، موجبات توسعه فعالیت‌های بخش خصوصی و اثرگذاری بیشتر آن بر اداره جامعه را فراهم آورد، شاهد سطح بالاتری از حکمرانی خواهیم بود.

۵. حاکمیت قانون: اینکه تا چه میزان قوانین در یک جامعه واقعی‌اند و می‌توان به اجرای آن‌ها اطمینان داشت با این شاخص ارزیابی می‌شود. در این شاخص به ویژه کیفیت اجرای قراردادها، عملکرد پلیس، محاکم قضایی و همچنین میزان احتمال جرم و خشونت در یک جامعه مدنظر است. اگر پس از انعقاد یک قرارداد نتوان چندان به اجرای آن امید داشت و جرم و تخلف به سبب عملکرد ضعیف پلیس و محاکم قضایی قابل پیگیری نباشد، نشان‌دهنده وجود حکمرانی ضعیف در یک کشور است.

۶. مهار فساد: آنچه در این شاخص مدنظر قرار می‌گیرد این است که قدرت عمومی و دولتی تا چه حد مورد سوءاستفاده و در خدمت تحقق منافع شخصی و خصوصی قرار می‌گیرد. این شاخص، هم فسادهای جزئی و کوچک و هم فسادهای بزرگ و کلان را شامل می‌شود. براساس این شاخص هرچه نظام سیاسی و دولت در تسخیر نخبگان و در خدمت منافع خصوصی باشد، نشان حکمرانی ضعیف و عکس آن بیانگر رتبه بالاتری از حکمرانی خوب است. این شش شاخص براساس گزارشی است که سه اقتصاددان برجسته بانک جهانی، یعنی کافمن، کری و ماستروزی در سال ۲۰۰۶ ارائه داده‌اند و اصولاً بانک جهانی از ابتدا تاکنون در گزارش‌های خود درباره حکمرانی خوب و مقایسه وضعیت آن در کشورهای مختلف همین شش شاخص را ذکر کرده و مدنظر داشته است.

موضوع حکمرانی خوب با هدف دستیابی به توسعه‌ی انسانی پایدار مطرح شده و در آن بر کاهش فقر، ایجاد شغل و رفاه پایدار، حفاظت و تجدید حیات محیط زیست و رشد و توسعه‌ی زنان تأکید می‌شود، که همه‌ی این‌ها با حکمرانی خوب امکان تحقق می‌یابد. همچنین حکمرانی خوب شامل طیف وسیعی از ساخت مفاهیمی مانند توسعه‌ی پایدار، توسعه‌ی روستایی و شهری، پیشرفت اقتصادی و اجتماعی با رویکرد مشارکتی و شفافیت و به موازات ویژگی‌های غالب استراتژی‌های اجرای خط‌مشی و برنامه‌ریزی‌هاست. حکمرانی دارای سه بعد یا رکن اقتصادی، سیاسی و اداری است. بعد اقتصادی شامل فرایندهایی است که فعالیت‌های یک کشور را تحت تأثیر قرار می‌دهد و با اقتصاد کشورهای دیگر در ارتباط است. بعد سیاسی همان فرایندهای تصمیم‌گیری برای تنظیم سیاست‌هاست و بعد اداری، همان سیستم اجرای خط‌مشی‌هاست. (Khosravipour, 2023).

## ۵. زاینده‌رود و ضرورت بازنگری در حکمرانی آب

رودخانه‌ی زاینده‌رود، از پای زردکوه بختیاری و هفت تنان و شعب آن‌ها در منطقه‌ی شوراب تنگ گزی از توابع استان چهارمحال و بختیاری سرچشمه می‌گیرد و پس از جذب آب‌های جاری بخش‌هایی از مناطق فریدن و فریدونشهر از استان اصفهان، به سمت شهر اصفهان و در نهایت مرداب گاوخونی، در طول مسیری حدوداً ۳۶۰ کیلومتری، از جنوب غربی به سمت مشرق جریان می‌یابد (شکل ۱). حدود یک سوم طول این مسیر، آب‌گیر و دو سوم آن آب‌خور رودخانه است. رودخانه‌ی زاینده‌رود را می‌توان از گروه رودخانه‌های تمدن‌ساز دانست، چراکه وجود تپه‌های باستانی و شکل‌گیری هسته‌ی زرتشتی - ساسانی اصفهان در جوار آن، زاینده‌رود را به یکی از گهواره‌های تمدن ایران بدل ساخته است. از سوی دیگر و با بررسی نقشه‌های تاریخی اصفهان مشخص می‌شود که تقریباً تا عصر صفوی این رودخانه نقش خندق و حصار جنوبی شهر را ایفا



می‌کرده و با ساخت باغ‌ها و پل‌های صفوی رفته رفته رودخانه از مرز طبیعی - دفاعی به یک رودخانه شهری بدل شده است. با خوانش سند مربوط به توزیع حقبه‌ی رودخانه‌ی زاینده‌رود - مشهور به طومار شیخ بهایی - مربوط به سال ۹۲۳ هجری قمری استنتاج می‌شود که از ۲۷۵ حقبه‌ی رودخانه، سهم اصفهان از طریق ۹ نهر اصلی (مادی) و شعب آن‌ها در سطح شهر توزیع می‌شده است و با توسعه‌ی این شبکه در عصر صفوی، اصفهان به صورت یک باغشهر درآمد و به یکی از برجسته‌ترین سکونتگاه‌های شهری خاورمیانه بدل شده است (Saberi & Mansouri, 2021). زاینده‌رود از اواسط دهه ۱۳۸۰ طی دوره‌های متناوب، جریان دائمی خود را در کل مسیر شهر اصفهان از دست داده است و این وضعیت، سبب بروز مشکلات امنیتی، اجتماعی، و سیاسی فراوانی بین استان‌های بهره‌بردار می‌شده است (talebi Somesarai et al., 2019). درحالی‌که برخی با استناد به کاهش نزولات جوی در تلاش هستند تا ریشه‌ی این بحران را در اقلیم خشک اصفهان جستجو نمایند، برخی دیگر با استناد به شواهد تاریخی معتقدند که مشکل آب در حوضه‌ی زاینده‌رود مشکل جدیدی نیست و پیگیری و مدیریت آن حداقل در دوران صفویه که شیخ بهایی مأمور اجرای طرح انتقال آب می‌شود، گویای ثبات شرایط اقلیمی خشک و کم بارش این حوضه بوده است. رودخانه‌ی زاینده‌رود به عنوان تنها رودخانه مهم و دائمی در فلات مرکزی ایران، محور توسعه در این منطقه از کشور بوده که بر اثر فشار ناشی از استفاده در بخش‌های کشاورزی، صنایع و شرب، به رودخانه‌ای غیردائم و فصلی تبدیل شده و با تأثیری که بر تالاب گاوخونی داشته، منجر به تشدید کانون گرد و غبار در فلات مرکزی شده است. همچنین در سال‌های اخیر با افزایش مصرف آب در بخش شرب و صنعت و نیز انتقال آب به شهرهای خارج از حوضه زاینده‌رود مانند یزد، کاشان، نایین و ... و برداشت‌های غیرقانونی که در فواصل پس از خروجی سد زاینده رود، صورت گرفته، آب اختصاصی به اراضی کشاورزی کاهش یافته و متعاقب آن، رودخانه نیز تقریباً بصورت مداوم خشک شده و آب زاینده‌رود و تونل اول کوه‌رنگ که از نظر قانونی متعلق به حقبه‌داران بود، به مصارفی که حتی از این آب نداشته‌اند، اختصاص یافته است. لذا توزیع عادلانه و پایدار آب در این حوضه با توجه به توسعه اقتصادی و اجتماعی، همواره چالشی اساسی بوده و به همین دلیل قواعد تخصیص برای منابع باارزش آب در این حوضه از حدود ۵۰۰ سال پیش توسعه یافته است که به احتمال زیاد، از اولین قواعد شکل گرفته از این نوع در ایران است. باید گفت بحران آب در حوضه‌ی زاینده‌رود، یکی از مهم‌ترین موضوعات فعلی است که در صورت بی‌توجهی به آن در سایه‌ی نبود آینده‌نگری و تدبیر، شاهد بروز مشکلات زیادی در حوزه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و امنیتی حتی در ابعاد ملی خواهیم بود. موضوعی که در سایه‌ی سیاست‌گذاری غلط یا عدم قرار گرفتن در دستور کار سیاست‌گذاری و عدم اجرای سیاست‌های اتخاذ شده و نیز عدم نظارت بر حسن اجرای آن‌ها موجب خسارت‌های بسیاری به‌ویژه به بهره‌برداران و ذی‌نفعان این حوزه شده است. تمامی این تعاریف موید تأثیر مدیریت منابع آب بر طیف گسترده‌ای از موضوعات اجتماعی و لزوم اتخاذ سیاست‌های مناسب در این زمینه است که می‌توان راهکار برون رفت از این بحران را در چارچوب اندیشه حکمرانی یافت (Zakeri Mahabadi et al., 2019).

با ایجاد شکاف‌هایی در حکمرانی آب حوضه آبریز زاینده‌رود که با بارگزاری‌های بیش از اندازه و غیرمنطقی و کارشناسی نشده انتقال آب از حوضه به دیگر حوضه‌ها همراه بوده و علاوه بر این با استقرار و رشد صنایع آب‌بر در کنار کشت محصولات پرآب در منطقه که هر کدام دلیلی موجه برای حاکمیت یک وضعیت بحرانی حکمرانی آب در حوضه زاینده‌رود هستند، سبب شده تا گذر آب طی دوره‌های متناوبی که از بستر زاینده‌رود می‌گذرد و در مواردی با کش و قوس‌های زیادی همراه بوده است؛ به "جنگ آب" ختم شود. با توجه به مسائل و مشکلات پیش‌روی حوضه آبریز زاینده‌رود و وضعیت منابع و مصارف آب در حوضه بر پایه اطلاعات و آمارهای موجود، هر گونه بارگذاری طرح‌های جدید انتقال آب در حوضه به منزله‌ی یک حکمرانی ضعیف بوده که منجر به تشدید بحران آب و افزودن بر دامنه ضعف‌ها و تهدیدات بررسی شده است. بنابراین، تبیین ضرورت انتقال آب از حوضه‌های پرآب نظیر منبع دائمی و پایدار آب از حوضه آبریز خلیج فارس و

دریای عمان به حوضه زاینده‌رود و همچنین انتقال آب از حوضه آبریز کارون بزرگ به استان‌های واقع در حوضه آبریز زاینده‌رود برای مهار تهدیدات و چالش‌های پیش آمده در ابعاد زیست محیطی، اقتصادی، سیاسی، امنیتی و اجتماعی یک استراتژی مهم تلقی شده است. لذا بارگذاری طرح‌های جدید انتقال آب از حوضه زاینده‌رود (مبدأ) به حوضه‌های مجاور به شدت مورد نقد واقع می‌شود که ملزم به یک بازنگری اساسی در نحوه حکمرانی آب حوضه است. در نهایت می‌توان ادعا نمود که هرگونه توسعه و بارگذاری طرح‌های جدید انتقال آب در حوضه زاینده‌رود منوط به وارد شدن به مرحله‌ی جدیدی از مدیریت و حکمرانی آب در حوضه آبریز زاینده‌رود بوده که با بروز خشکسالی‌ها طی چند دهه اخیر، برداشت‌های بی‌رویه آب در بالادست حوضه، توسعه طرح‌های انتقال آب از حوضه به استان‌های یزد و کاشان، عدم مکانیزه بودن کشاورزی و به شیوه غرقابی، کشت محصولات پرآب در برخی از مناطق حوضه، توسعه باغات در استان چهارمحال و بختیاری، افزایش دما در سطح زمین و... از عمده‌ترین مسائل و مشکلات این حوضه به شمار می‌روند که بر پتانسیل وقوع جنگ آب در ارتباط با شیوه حکمرانی آب در حوضه زاینده‌رود افزوده است. (Yousefi Shatori., 2022).

در واقع علت ریشه‌ای پیدایش مسائل فعلی در حوضه گاوخونی (زاینده‌رود) بر هم خوردن نظم زمانی و مکانی تسهیم آب رودخانه و تبدیل آن به نظام تخصیصی با حکمرانی آمرانه است که باعث افزایش تدریجی ولی عمیق شکاف منابع - مصارف این حوضه شده است. اتصال استان یزد به این حوضه آبریز (خط لوله انتقال آب یزد) به در هم تنیدگی مسائل آب زاینده-رود افزوده است و ذی‌مدخلان در دو استان اصفهان و یزد که روابط تجاری و فرهنگی دیرینه‌ای داشتند دچار اختلاف و تضاد منافع شدند. با اشتباهات پی در پی و تلاش‌های مشکل‌دار، به نظر می‌رسد تنش‌های هیدروسیستم حوضه زاینده‌رود به نقطه اوج خود رسیده است. چنین درهم‌آمیختگی، پیچیدگی و شبکه‌ای از بازیگران مختلف منجر به تنش و التهاب، حداقل بین سه استان کشور گشته است. (Fasihi Harandi, 2018).

شکل ۱. شمای کلی از حوضه‌ی آبریز زاینده رود (Safavi & Rastghalam, 2016)



Fig 1. An overview of the Zayandeh River watershed (Safavi & Rastghalam, 2016)

## ۶. بررسی تاثیر اصول حکمرانی خوب در مدیریت منابع آب زاینده‌رود

تعاریف متعددی برای حکمرانی در حوزه‌های مختلف ارائه شده است اما آنچه بین این تعاریف مشترک است، ضرورت وجود بازیگران و ساختارهایی به منظور تدوین و اجرای سیاست‌ها است. حکمرانی آب به کلیه فعالیت‌ها و نظام‌هایی اطلاق می‌شود که در فرآیند سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری برای توسعه و مدیریت منابع آب نقش دارند. حکمرانی خوب به نوعی از حکمرانی اطلاق می‌شود که در آن رفاه عمومی و حقوق فردی به صورت توأمان تأمین و تضمین شوند. حکمرانی خوب دارای شاخص‌هایی از قبیل حاکمیت قانون، مشارکت، اجماع محوری، کارآمدی و اثربخشی، شفافیت، پاسخ‌گویی و مسئولیت‌پذیری است. شاخص‌های حکمرانی خوب، به عنوان پایه‌های اساسی مورد نیاز در ارزیابی وضعیت حکمرانی آب در هر منطقه به شمار می‌روند. یکی از مهم‌ترین دلایل عدم موفقیت در اجرای سیاست‌های آبی اخذشده در نقاط مختلف دنیا (از جمله ایران)، عدم توجه به تجربیات چند هزارساله‌ای است که از متن و بطن شرایط اقلیمی و فرهنگی این کشورها برخاسته است. حکمرانی آب، برای اولین بار در سال ۲۰۰۰ میلادی در دومین مجمع جهانی آب در سطح بین‌المللی مطرح شد. به منظور تبیین جایگاه حکمرانی در فرآیند مدیریت منابع آب، بر این مطلب تأکید می‌شود که فرآیند مدیریت منابع آب در فضایی تهی انجام نمی‌شود بلکه نیازمند بستری با عنوان حکمرانی آب است (Sadeghizadeh Bafandeh et al., 2019).

برنامه اصلی ستاد احیای حوضه زاینده‌رود برای دستیابی به هدف خود بازتعریف "نظام حکمرانی آب حوضه آبریز زاینده-رود (گاوخونی)" و استقرار این نظام در جهت بازگرداندن پایداری آبی به حوضه است که طبیعتاً در صورت اجرا، موجب تحقق مواردی از قبیل کاهش تنش‌های اجتماعی موجود در حوضه، جاری شدن همیشگی آب در رودخانه و ... خواهد شد. اگر کلیدی‌ترین مساله موجود در حوضه در ارتباط با آب را افزایش شکاف بین منابع و مصارف حوضه و به عبارتی کاهش پایداری حوضه در زمینه منابع آب بدانیم (که مظاهر خود را در خشک شدن دائمی رودخانه زاینده‌رود، افزایش تنش‌های اجتماعی بر سر برداشت و دسترسی به آب و منابع سطحی و زیرزمینی، بیکاری و فقر شدید در جوامع پیرامونی، خشکی تالاب گاوخونی و ... نشان داده است)، ارائه هرگونه برنامه‌ای برای ستاد احیای حوضه زاینده‌رود نیازمند شناسایی علت ریشه‌ای موثر بر پیدایش وضعیت کنونی است که البته در این مورد کارها و مطالعات زیاد ولی پراکنده (و البته غیر همراستا) انجام شده است. در دیاگرام زیر روند تغییر و شکست حکمرانی تشریح شده است و در ادامه به‌طور خلاصه به این علت(های) ریشه‌ای اشاره می‌شود. علت ریشه‌ای پیدایش مسائل فعلی در حوضه گاوخونی (زاینده‌رود)؛ استقرار یک نظام حکمرانی آمرانه و ناکارآمد که مشخصاً از اواسط دهه ۴۰ (همزمان با تصویب قانون ملی شدن آب و اجرای اصل چهارم) به وجود آمده است. این نظام موجب تغییر تدریجی نظم زمانی و مکانی تسهیم آب رودخانه و تبدیل آن به یک نظام تخصیصی (دستوری از بالا به پایین) شده است. این منش حکمرانی آب باعث افزایش تدریجی ولی عمیق شکاف منابع - مصارف حوضه و مسائل متعاقب آن شده است. ایجاد تغییر در نقش دولت به عنوان جزئی از بازتعریف نظام حکمرانی آب حوضه زاینده‌رود برای گذر از مرحله "بی‌دولتی" فعلی که یک دولت دستور دهنده و کنترل کننده است، حیاتی است. وظیفه ذاتی دولت تسهیل‌گری و تنظیم‌گری است تا اعتماد از دست رفته اجتماعی و رشد اقتصادی را در بالادست و پایین دست با ایجاد ارزش جایگزین بازگرداند. این "کلید" حل مساله زاینده‌رود است. اگر مسائلی همچون تفکر تمرکزگرایی در نظام سیاسی کشور، فساد سیستماتیک، مسابقه برداشت از منابع، تحریم، نفتی بودن دولت، اقتصاد بسته و ... سایه سنگینی بر این دو موضوع دارند، ولی با توجه به مزیت‌ها و ظرفیت‌های حوضه زاینده‌رود، باید به صورت محلی به این دو موضوع پرداخت و برای آن‌ها راه‌حل پیدا کرد. با درس آموزی از تجارب گذشته می‌توان پیشینی کرد که موفقیت ستاد احیای حوضه زاینده-رود در گرو این موضوع است که بتواند رویکرد و گفتمان جدیدی برای نگاه به مسائل و راهکارهای حوضه زاینده‌رود ارائه

دهد و ذی‌نفعان مختلف را حول رویکرد جدید همراه کند تا به شکلی منسجم برای حل مساله زاینده‌رود گام بردارند (شکل ۲) (Fasihi Harandi, 2018).

شکل ۲. روند تغییر و شکست حکمرانی (Fasihi Harandi, 2018)

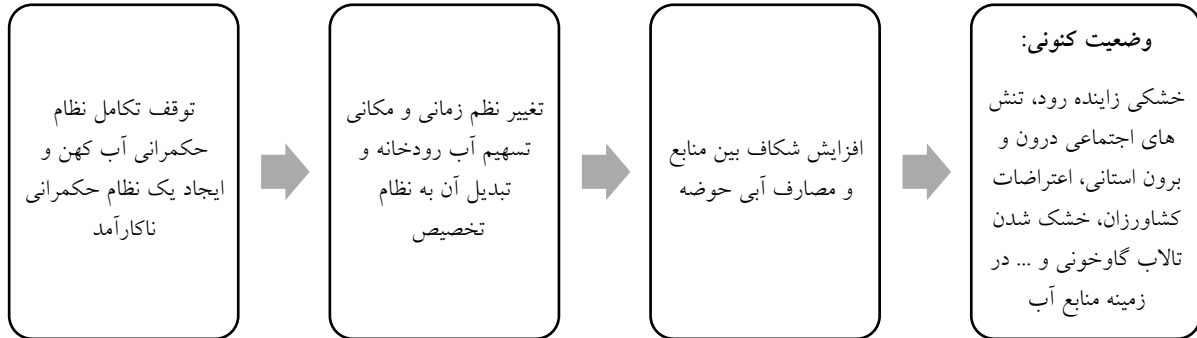


Fig 2. The process of governance change and failure (Fasihi Harandi, 2018)

#### ۷. پتانسیل‌های حوضه زاینده‌رود برای حل مساله:

در این بخش به برخی پتانسیل‌ها در حوضه اشاره می‌شود که "امید" برای حل مساله را به میزان قابل توجهی افزایش خواهد داد. زاینده‌رود با مسائل درهم تنیده سیاسی- اجتماعی و فنی روبروست. لذا حتی تعریف مساله سال به سال تغییر می‌کند، اما این حوضه مزیت‌ها و پتانسیل‌های منحصر به فردی دارد که می‌تواند دستیابی به راهکارها را تسهیل نماید:

- مصائب اجتماعی کنونی و سال‌های گذشته باعث شده برخلاف برخی از مناطق کشور، بسیاری از ذی‌مدخلان، احیای حوضه آبریز را مساله خود نیز بدانند و برای حل آن انگیزه مشارکت داشته باشند.
- گروه‌های اصلی درگیر در مساله زاینده‌رود سازمان یافتگی نسبتاً خوبی داشته و نمایندگان آن‌ها به نسبت مورد تایید اعضای جامعه هستند. حضور این نمایندگان (مخصوصاً نمایندگان صنف کشاورزان) کمک خواهد کرد توافق جمعی راحت‌تر و مسائل سریع‌تر در مسیر حل قرار بگیرند.
- حوضه آبریز زاینده‌رود به لحاظ اقتصادی توسعه یافته است و ظرفیت‌های بیشتری نسبت به سایر مناطق کشور برای خلق فرصت‌های توسعه اقتصادی کم آب بر خواهد داشت.
- به دلیل آثار منفی خشکی رودخانه بر کیفیت زیست در شهر اصفهان، برخلاف بسیاری از حوضه‌های دیگر، جامعه شهری نیز در کنار جامعه روستایی مطالبه‌گر احیا هستند و در این راستا ظرفیت بیشتری برای همکاری و مشارکت وجود دارند.
- مطالعات بسیاری در حوضه زاینده‌رود برای حل مساله انجام شده است، تشکیل ستاد می‌تواند سنتز این مطالعات و اقدامات پراکنده را به خوبی انجام دهد (Fasihi Harandi, 2018).

نتایج مطالعه‌ی Yousefi و همکاران (2017) با عنوان "پایداری نظام‌های حکمرانی آب حوضه زاینده‌رود در گذر توسعه" نشان داده که در نظام حکمرانی فعلی آب، اصول هشتمانی عدالت، اثربخشی و بازدهی، شفافیت، مسئولیت‌پذیری، پاسخ-دهی، انسجام، مشارکت، و حاکمیت قانون در شرایط مطلوبی نیست. مشکلات بحران آب در ایران از جمله در حوزه زاینده‌رود، از نوع بدخیم هستند که ابزارهای مهندسی و سخت‌افزاری مبتنی بر رویکرد خطی، چندان پاسخ‌گوی این چالش‌ها نخواهد بود. ارزیابی مؤلفه‌های هشتمانی حکمرانی نیز نشان داد که سطح پایداری شرایط فعلی بسیار ناپایدار تا ناپایدار

است و بحران فعلی، ناشی از حکمرانی ناکارآمد و مدیریت نادرست منابع آب بوده و عواملی مانند بخشی‌نگری، بودجه‌ریزی نادرست، عدم کفایت نهادها و سازمان‌های مرتبط و عدم مشارکت بهره‌برداران یا نقش آفرینان، از جمله موانع دستیابی به مدیریت پایدار منابع آب در این حوزه هستند. با توجه به قوانین و ساختار برنامه‌ریزی بالا به پایین در کشور، در حال حاضر ساز و کار تخصیص آب در کشور به صورت دستوری و دولتی است. علاوه بر این، مشترک بودن این حوزه بین دو استان اصفهان و چهارمحال و بختیاری و مدیریت استانی حوزه‌ی مشترک، منجر به ایجاد تعارض و در مواردی، کشمکش است. پیچیدگی نظام‌های منابع آب، حتمی و قطعی نبودن مقادیر عرضه‌ی آب، ناهمگونی و پویایی‌های اجتماعی و اقتصادی و همچنین تغییرات اقلیمی، دلالت بر این دارند که شیوه‌ی حکمرانی جاری، چندان پاسخ‌گوی تعارض در شرایط فعلی نیست؛ بنابراین، تحول در ساختار حکمرانی آب برای دستیابی به یک شیوه‌ی مدیریتی سازگار، منعطف، و متناسب، ضروری است (Yousefi et al., 2017).

## ۸. نتیجه‌گیری

آب به عنوان ضروری‌ترین ماده حیاتی‌بخش، پیش شرط رفاه و زندگی موجودات است و کمبود آن مسایل مختلفی مانند اختلافات قومی، درگیری‌های استانی، نارضایتی‌ها و ... را باعث شده و اقتصاد، اجتماع، محیط زیست فراموش شده، کشاورزی و سایر بخش‌ها را درگیر کرده است. وجود پیوند بین آب و توسعه، ضرورت پاسخ‌گویی به چالش‌ها و اصلاح ساختاری مدیریت منابع آب را گریزناپذیر ساخته است. چالش‌های متعددی به دلایل گوناگون در مدیریت منابع آب در سراسر دنیا از جمله کشور ایران به وجود آمده است، از جمله در خصوص رودخانه زاینده‌رود اصفهان که در دو دهه‌ی گذشته جریان دائمی خود را در کل مسیر از دست داده و بی‌توجهی به بحران آب در این حوضه موجب بروز پیامدهای منفی و همچنین خسارت‌های بسیاری به‌ویژه به بهره‌برداران و ذی‌نفعان این حوزه شده است.

بارگزاری طرح‌های انتقال آب از حوضه زاینده‌رود به دیگر حوضه‌ها و بسیاری دلایل ذکر شده در مقاله، هرکدام دلیلی موجه برای حاکمیت یک وضعیت بحرانی حکمرانی آب در این حوضه هستند. چاره‌ی بحران آب در شناخت ابعاد مختلف حکمرانی موجود و گذار به حکمرانی کارآمد، متناسب و سازگار با شرایط تاریخی، فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی هر منطقه نهفته است و راهکاری از پیش تعیین شده و نسخه‌ی واحد برای خروج از این شرایط وجود ندارد. در هر برهه‌ی تاریخی دولت‌ها برای رفع مسائل و مشکلات سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی خود به سیاست‌های خاصی روی آورده‌اند و همیشه، چگونگی حکومت کردن مورد توجه اندیشمندان سیاسی، جامعه‌شناسان و صاحب‌نظران حقوق عمومی بوده است. لزوم توجه به بازنگری اساسی در حکمرانی آب وجود دارد. حکمرانی آب به عنوان کلیه‌ی فعالیت‌ها و نظام‌هایی که در فرآیند سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری برای مدیریت منابع آب نقش دارد و همچنین حکمرانی خوب که به تضمین توان رفاه عمومی و حقوق فردی می‌پردازد و دارای ابعاد هشتگانه‌ای است، به عنوان پایه‌های اساسی موردنیاز در ارزیابی وضعیت حکمرانی آب در هر منطقه به شمار می‌رود. نهادهای مالی بین‌المللی نظیر بانک جهانی و صندوق بین‌المللی پول همگی بر این باورند که حکمرانی خوب یک ضرورت حیاتی برای کمک به تحقق برنامه‌های توسعه است. حکمرانی خوب نه تنها روایتی نو از مفاهیمی چون دموکراسی، حقوق بشر، پاسخگویی، مشارکت و حاکمیت قانون است، در عین حال چارچوبی ایجاد می‌کند که همه این اهداف و ارزش‌ها در یکجا جمع شوند و اهداف توسعه انسانی اعم از توسعه اقتصادی، سیاسی، اجتماعی و فرهنگی با محوریت مردم دنبال شود. در واقع مطابق تحقیقات انجام شده علت ریشه‌ای پیدایش مسایل فعلی در حوضه‌ی گاوخونی (زاینده‌رود)، استقرار یک نظام حکمرانی آمرانه و ناکارآمد است که از اواسط دهه‌ی ۴۰ بوجود آمده است. ظرفیت‌های بیشماری در این حوضه وجود دارد که امید به حل مساله را افزایش داده است. در شرایط موجود متولیان امور

آب باید راهکارهای قدیمی اداره منابع محدود آبی را کنار نهاده چراکه بحران آب در ایران خصوصاً حوضه‌ی زاینده‌رود از نوع بدخیم هستند که ابزارهای مهندسی مبتنی بر رویکرد خطی پاسخگوی چالش‌های آن نیست و ضروری است به رویکردهایی که مبتنی بر مدیریت تقاضای آب هستند تغییر موضع دهند که این امر از طریق تغییرات هدفمند در راستای استقرار نظام حکمرانی کارآمد شدنی است و به یک فهم مشترک از مشکل، اقدام جمعی ذی‌نفعان و یادگیری اجتماعی در عمل نیاز دارد.

نتایج مقاله حاضر با نتایج مقاله (Yousefi et al. (2017)، (Dehghani et al. (2020) و (Yadegari et al. (2018) همخوانی و مطابقت دارد. مطالعه‌ی Yousefi و همکاران (2017) نشان داده که در نظام حکمرانی فعلی آب، اصول هشتمگانه‌ی عدالت، اثربخشی و بازدهی، شفافیت، مسئولیت‌پذیری، پاسخ‌دهی، انسجام، مشارکت، و حاکمیت قانون در شرایط مطلوبی نیست. مشکلات بحران آب در ایران از جمله در حوزه‌ی زاینده‌رود، از نوع بدخیم هستند که ابزارهای مهندسی و سخت‌افزاری مبتنی بر رویکرد خطی، چندان پاسخ‌گوی این چالش‌ها نخواهد بود. ارزیابی مؤلفه‌های هشتمگانه‌ی حکمرانی نیز نشان داد که سطح پایداری شرایط فعلی بسیار ناپایدار تا ناپایدار است و بحران فعلی، ناشی از حکمرانی ناکارآمد و مدیریت نادرست منابع آب بوده و عواملی مانند بخشی‌نگری، بودجه‌ریزی نادرست، عدم کفایت نهادها و سازمان‌های مرتبط و عدم مشارکت بهره‌برداران یا نقش آفرینان، از جمله موانع دستیابی به مدیریت پایدار منابع آب در این حوزه هستند. نتایج مطالعه‌ی Dehghani و همکاران (2020) بیان می‌دارد که ایران بیش از آنکه با مشکل کمبود آب مواجه باشد به دلیل حکمرانی بد، در شرایط بحرانی تامین و تقاضای آب قرار گرفته است. نتایج مطالعات Yadegari و همکاران (2018) بیان داشته که شکاف نهادی حاکم بر بخش آب منجر به بروز مشکلاتی شده که از آن‌ها به عنوان "بحران حکمرانی آب" نام برده می‌شود.

لذا باتوجه به مطالب مطرح شده پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

- تاکید بر توجه به پتانسیل‌های منحصربفردی که در حوضه‌ی زاینده‌رود وجود دارد؛ چراکه باتوجه به اهمیت شاخص مشارکت افراد، و اینکه امروزه در میان گروه‌های اصلی درگیر در حل مسائل حوضه‌ی زاینده‌رود سازمان یافتگی قابل ملاحظه‌ای دیده می‌شود و نمایندگان آن‌ها از سوی اعضای جامعه موردتایید هستند، و اینکه برخلاف حوضه‌های دیگر، جامعه شهری در کنار جامعه‌ی روستایی مطالبه‌گر احیا هستند و ظرفیت بیشتری برای مشارکت و همکاری وجود دارد، به طور کلی امید به حل مشکلات بحران آب در حوزه‌ی زاینده‌رود نیز افزایش یافته است.
- از آنجا که باتوجه به نتایج تحقیقات، نظام حکمرانی تخصیصی یا آمرانه باعث پیدایش مسایل فعلی در حوضه‌ی زاینده‌رود شده است، تحول در ساختار حکمرانی آب برای دستیابی به یک شیوه‌ی مدیریتی سازگار، منعطف، و متناسب با شرایط حال حاضر حوضه‌ی زاینده‌رود توصیه می‌شود.
- توجه به بازنگری اساسی در نحوه حکمرانی آب حوضه‌ی زاینده‌رود و جلوگیری از بارگذاری طرح‌های جدید انتقال آب از حوضه‌ی زاینده‌رود (مبدأ) به حوضه‌های مجاور
- ایجاد تغییر در نقش دولت، تغییر نقش از دستوردهنده و کنترل کننده به تسهیلگری و تنظیم‌گری برای بازگرداندن اعتماد از دست رفته‌ی اجتماعی و رشد اقتصادی
- تدوین و اجرای سیاست‌ها و مقرراتی از سوی دولت که سبب گسترش نفوذ و دامنه فعالیت‌های بخش خصوصی شود.
- باتوجه به توقف تکامل نظام حکمرانی آب کهن و ایجاد یک نظام حکمرانی ناکارآمد که پیامدهای منفی همچون خشک شدن دائمی رودخانه زاینده‌رود، افزایش تنش‌های اجتماعی بر سر برداشت و دسترسی به آب و منابع سطحی و زیرزمینی، بیکاری و فقر شدید در جوامع پیرامونی، خشکی تالاب گاوخونی و ... داشته است، اتخاذ رویکرد جدیدی در

نگاه به مسائل و تلاش برای همراه ساختن ذی نفعان مختلف حول رویکرد جدید در جهت حل مشکلات فعلی پیشنهاد می‌شود.

- باتوجه به اینکه مطالعات حکمرانی آب در ایران در مراحل اولیه به سر می‌برد، انجام تحقیقات پژوهشی دانشگاهی آتی درباره موضوع موردنظر و ارزیابی سطح مؤلفه‌های هشتگانه‌ی حکمرانی آب بسیار بااهمیت و کاربردی می‌باشد.

#### ۹- منابع

- Afsari, A., Haji Naseri, S., Fazeli, M., & Feirahi, D. (2018). A sociological examination of water governance in Lake Urmia crisis: Grounded theory model. *Strategic Studies of public policy*, 7(25), 53-72. (In Persian).
- Dehghani, S., BANIHABIB, M. E., & Golabi, M. R. (2020). Water Governance in Iran: challenges and approaches. *Water Engineering*, 7(4), 238-254. (In Persian).
- Esmaeili, M. M. (2020). Water Supply Crisis in Zayandehrud Watershed; Social Issues and Solutions to Manage it (Demonstrations of 2011 to 2014). *Quarterly of Social Studies and Research in Iran*, 9(3), 567-585. (In Persian).
- Fasihi Harandi, M. (2018). Zayandeh Rood (Gavkhoni) watershed revitalization headquarters program, (executive measures to redefine the water governance system). Center for Presidential Strategic Studies. (In Persian).
- Khosravipour, E. (2023). The effect of good governance on the flourishing of social capital. The 5th National Conference of Professional Researches in Psychology and Counseling from the Teacher's Point of View, Hormozgan University. (In Persian).
- Perghan, V., Yaghoobi, N. M., & Keikha, A. (2022). Identifying and Prioritization of Good Governance Effective Factors Focused on a Sustained Development Approach. *Public Management Researches*, 15(55), 93-123.
- Saberi Nahreforouzani, A., & Mansouri, S. A. (2021). "New Zayanderood" Investigation Within the Zayandehrud Stream Recognition and Examination it as a Socio-Ecological System. *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, 18(102), 101-114. (In Persian).
- Sadeghizadeh Bafandeh, S., Mirhashemi Dehkordi, S. S., & Mianabadi, H. (2019). Investigating Principles of Good Governance in Tacit Knowledge of Qasabeh Gonabad Qanat. *Indigenous Knowledge*, 6(12), 503-533. (In Persian).
- Safavi, H. R., & Rastghalam, M. (2017). Solution to the water crisis in the Zayandehrud River basin; joint supply and demand management. *Iran-Water Resources Research*, 12(4), 12-22. (In Persian).
- Salmani, Z., Sharifi, A., & Farkish, H. (2022). Challenges of Citizenship Rights in the Iranian Administrative System in Light of Good Governance. *Culmination of Law*, 8(3), 199-229. (In Persian).
- Talebi, M., Zokaie, M., Fazeli, M. O. H. A. M. M. A. D., & Jomehpoor, M. A. H. M. O. U. D. (2019). Sociology of a crisis: The social pathology of the water crisis in the Zayandeh-Rood river basin. *Interdisciplinary Studies in Humanities*, 11(4), 133-165. (In Persian).
- UNDP (2008). UNDP, Human development report. Available at: <http://hdr.undp.org>.
- Yadegari, A., Yousefi, A., & Amini, A. M. (2018). Institutional Analysis of Water Governance Structure in Iran: A Case of Zayande-Rood Basin. *Iran-Water Resources Research*, 14(1), 184-197. (In Persian).
- Yousefi, A., Amini, A. M., Yadgari, A., & Fathi, A. (2017). Sustainability of Zayande-Rood's water governance regimes in the course of development. *Quarterly Journal of Interdisciplinary Studies in Humanities*, 9(4), 23-48. (In Persian).
- Yousefi Shatori, M. (2022). The need to change the way of water governance in Zayandeh Rood. *Geopolitics Media*, Geopolitics Association of Iran. Available at: <https://iag.ir>. (In Persian).
- Zahiri, A. (2015). Ecological Measurement of a Fine Governing Model. *Political Science*, 17(66), 87-112. (In Persian).
- Zaker Mahabadi, E., Yazdani Zazerani, M. R., & Mohammadi Kangarani, H. (2022). Analyzing the Casual Factors of the Crisis in the Water Policies of Zayandeh-Rud River Basin; Case Study of Western Cities of Isfahan Province. *Iranian Journal of Public Policy*, 8(1), 43-59. (In Persian).



## Frequency analysis of floods with joint functions, case study: Zayandehrood Dam

Zahra Valaei Esfahani, Fatemeh Valaei Esfahani, Mehran Iranpoor

<sup>1</sup> MS of Aqiq non-profit institute, Shahinshahr, Iran.

<sup>2</sup> Senior Expert in Water Resources Management, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Lanjan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

*Corresponding author: Valaei.esf@gmail.com*

Received: 23 Aug 2023

Accepted: 12 Oct 2023

Published: 14 Oct 2023

### Abstract

Analyzing the frequency of floods and understanding the probability of their occurrence, as well as the return period of this phenomenon, is crucial for reservoir management. Flood occurrences are inherently multivariate, and the use of classical multivariate functions for their analysis is limited. Therefore, it is recommended to employ copula functions for multivariate flood frequency analysis. These functions combine the distribution functions of univariate variables while considering the correlation between them. In the case of this phenomenon, the variables of peak discharge, flood volume, and flood duration are utilized. This study was conducted using statistical data from the Zayandehrood dam. The best function for each variable was determined based on goodness-of-fit criteria. The correlation between each pair of variables was calculated, and the copula function was selected using Akaike, NSE, and RMSE criteria. For the peak discharge-flood volume relationship, Joy's copula function was chosen, while the peak discharge-flood duration and flood volume-flood duration relationships used the AMH function. Subsequently, the univariate and combined return periods were calculated and can be used for risk estimation.

**Key words:** Joint distribution, Flood frequency, Return period, Probabilities





## تحلیل فراوانی دومتغیره سیلاب با استفاده از توابع مفصل، مطالعه موردی: سیلاب‌های ورودی به سد زاینده‌رود

زهرا ولائی اصفهانی<sup>۱</sup>، فاطمه ولائی اصفهانی<sup>۲\*</sup>، مهرا ن ایران‌پور<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مؤسسه غیرانتفاعی عقیق، شاهین‌شهر، ایران.

۲. کارشناس ارشد مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۳. استادیار گروه مهندسی عمران، واحد لنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

\*نویسنده مسئول: [Valaei.esf@gmail.com](mailto:Valaei.esf@gmail.com)

چاپ: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۱

### چکیده

تحلیل فراوانی سیل و اطلاع داشتن از احتمال وقوع و دوره بازگشت این پدیده در چگونگی بهره‌برداری از مخزن حائز اهمیت است. این پدیده، ذاتاً چند متغیره است و استفاده از توابع چند متغیره کلاسیک برای تحلیل این پدیده با محدودیت همراه است. بنابراین توصیه شده است که از توابع کاپولا جهت تحلیل فراوانی چند متغیره سیلاب استفاده شود. این توابع با در نظر گرفتن نوع همبستگی متغیرها از تابع توزیع تک متغیره تابع توزیع توأم می‌سازد. معمولاً برای تحلیل فراوانی سیلاب از متغیرهای دبی اوج، حجم و تداوم سیلاب استفاده می‌شود. این مطالعه بر روی ۵۲ سال داده آماری ورودی سد زاینده‌رود واقع در استان اصفهان انجام شده است. جهت برازش تابع توزیع حاشیه‌ای مناسب از معیارهای نیکویی برازش مانند آزمون‌های کلموگروف اسمیرنوف، اندرسون دارلینگ و کای مربع بر روی هر یک از متغیرهای دبی اوج، حجم و تداوم سیلاب استفاده شده است و به ترتیب توابع گوسین، نمایی، پارتو بر روی داده‌ها برازش داده شده است. سپس، همبستگی هر جفت متغیر به روش‌های پیرسون، اسپیرمن و کندال تاو محاسبه شده است و پارامتر تابع کاپولا با روش حداکثر درستنمایی محاسبه شده است و در نهایت تابع کاپولا بر اساس معیار آکائیکه، NSE و RMSE انتخاب شده است. برای دبی پیک-حجم سیلاب تابع کاپولا جو و برای دبی پیک-تداوم و حجم سیلاب-تداوم تابع علی-میکائیل-حق انتخاب شده است. پس از آن، دوره بازگشت تک متغیره و توأم به‌دست آمده با هم مقایسه شده و نمایش داده شده است از این نتایج می‌توان برای برآورد ریسک سیلاب استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: احتمالات شرطی، تحلیل فراوانی دو متغیره، توابع کاپولا، دوره بازگشت دو متغیره، سد زاینده رود

## ۱. مقدمه

سیل یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی در جهان است که سالانه منجر به خسارات مالی و جانی زیادی می‌شود. بیش از نیمی از خسارات سیل در جهان در آسیا رخ می‌دهد. عوامل طبیعی و انسانی زیادی می‌تواند باعث پدیدار شدن این واقعه شود که از بین آن‌ها می‌توان به بارندگی شدید، جزر و مد، استفاده نامناسب از زمین، جنگل‌زدایی و ... اشاره کرد. تحلیل فراوانی سیلاب اطلاعات مفیدی راجع به بزرگی و احتمال وقوع سیل با دوره بازگشت‌های متفاوت را فراهم می‌کند، بنابراین در مدیریت منابع آب به خصوص مدیریت مخازن لازم است که با تحلیل فراوانی سیلاب به این اطلاعات دست یافت تا بتوان خسارات سیل را کاهش داد و استفاده از آورد سیل را به حداکثر رساند و ریسک کمبود آب در زمان کم‌آبی را کاهش داد (Samantaray & Sahoo 2020). فرایندهای زیست محیطی و هیدرولوژیکی مانند سیل با بیش از یک متغیر تصادفی همبسته مشخص می‌شوند. این وقایع پیچیده، چندمتغیره هستند و برای تحلیل فراوانی آن‌ها باید از توابع چندمتغیره کمک گرفت، بنابراین استفاده از توابع کلاسیک تک‌متغیره در بسیاری از موارد محدودکننده هستند و باعث دست بالا یا دست پایین گرفتن نتایج می‌شوند. از طرفی در توابع توزیع چند متغیره کلاسیک فرض بر این است که هر یک از متغیرهای تصادفی دارای یک نوع توزیع احتمال حاشیه‌ای مشابه باشند، متغیرها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند و متغیرها مستقل فرض می‌شوند. در صورتی که در واقعیت این مفروضات لزوماً صحیح نیستند (Zhang & Singh 2006). بنابراین توصیه شده است که از توابع کاپولا جهت ساخت تابع توزیع توأم استفاده شود. تا کنون تحقیقات زیادی با استفاده از توابع کاپولا بر روی وقایع هیدرولوژیک انجام شده است. از این بین می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. Shiao (2006) برای تحلیل فراوانی خشکسالی از دو متغیر شدت خشکسالی و تداوم خشکسالی از هفت تابع کاپولا خانواده ارشمیدسی بر روی یک منطقه در جنوب تایوان استفاده کردند و پارامترهای توابع کاپولا را بر اساس روش گشتاورها محاسبه کردند. Zhang و Singh (2007) از توابع کاپولا برای تحلیل فراوانی بارش با سه متغیر شدت، مدت، عمق بارش برای داده‌های بارش ساعتی در حوضه رودخانه آمیت لوژیانا استفاده کردند و نتایج آن را با توابع کلاسیک چند متغیره مقایسه کردند. تابع گامبل-هوگارد به عنوان بهترین تابع بر اساس معیار آکائیکه انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد که تابع کاپولا سه متغیره بهتر از تابع توزیع نرمال سه متغیره عمل می‌کند. Reddy و Ganguli (2012) برای تحلیل فراوانی جریان رودخانه گداواری در هند از یک روش مبتنی بر توابع کاپولا استفاده کردند. ایشان با استفاده از توابع ارشمیدسی متغیرهای دبی پیک سالانه، حجم سیل و تداوم سیل را تجزیه و تحلیل کردند. برای تعیین بهترین تابع احتمال حاشیه‌ای، توزیع احتمال‌های پارامتری و ناپارامتری مورد بررسی قرار گرفت و بهترین مدل برای برازش تابع کاپولا انتخاب شد. چهار خانواده تابع ارشمیدسی علی-میکائیل-حق، کلاپتون، گامبل-هوگارد و فرانک برای مدل‌سازی ساختار وابستگی دبی-حجم و حجم-تداوم استفاده شده که از این بین تابع فرانک بر اساس آزمون‌های آماری استاندارد بهترین نتیجه را ارائه داد. ۵۸ رویداد سیل به روش حداکثر سالانه در یکی از ایستگاه‌های رودخانه ساوا در اسلوونی توسط Sraj و همکاران (2015) مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای دبی، حجم، تداوم سیلاب از روی هیدروگراف داده‌های تاریخی استخراج شد و توابع مختلفی از خانواده کاپولا مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مقایسه بر اساس معیارهای آماری و گرافیکی نشان می‌دهد که تابع گامبل-هوگارد مناسب‌ترین تابع برای متغیرهای دبی و حجم است و تابع مفصل Student-t بهترین عملکرد را برای توزیع مشترک دبی و تداوم سیلاب دارد. روابط بین احتمالات شرطی و دوره بازگشت توأم محاسبه و مقایسه شده که تفاوت قابل توجهی را بین توابع کاپولا نشان می‌دهد. Zhou و همکاران (2019) یک رویکرد یکپارچه برای برآورد رسیک مخزن با توابع کاپولا پیشنهاد دادند. در این مقاله با سناریوهای مختلف به بررسی تحلیل فراوانی سیلاب و ریسک بهره‌برداری از سد پرداختند و چگونگی عملکرد این سناریوها بر تحلیل فراوانی سیل در مخزن میشان چین را در نظر گرفتند. مجموعه‌ای از هیدروگراف‌های سیل با احتمال وقوع ۰/۰۱ تحت توابع کاپولا ساخته شد و خطرات سیل بالادست و پایین‌دست برای هر سناریو محاسبه شد. مقایسه بین خطرات سیل در تحلیل

فراوانی تک متغیره و دو متغیره نشان داد که تحلیل فراوانی سیل دو متغیره تنوع کمتری در نتایج ایجاد می‌کند، بنابراین نتایج توابع کاپولا در ارزیابی ریسک قابل اعتمادتر هستند. Jafry و همکاران (2023) برای یافتن بهترین توزیع دو متغیره بین متغیرهای سیل در حوضه رودخانه جوهور، مالزی، از شش مدل تابع کاپولا گاوسین، Student-t، کلاپتون، گامبل، فرانک، و جو استفاده کردند. بر روی متغیرهای دبی اوج و حجم سیلاب تابع پیرسون نوع سه برازش داده شده است. بر اساس معیار آکائیکه تابع فرانک بهترین ارتباط را بین دبی و حجم سیلاب برقرار می‌کند. تاکنون مطالعات زیادی بر روی تحلیل فراوانی دو متغیره و سه متغیره سیلاب انجام شده است. Klaho و همکاران (2022) تحلیل فراوانی دو و سه متغیره سیلاب را بر روی ۵۵ سال داده حجم و دبی پیک و تداوم سد دز در ایران انجام دادند نتایج نشان داد که دوره بازگشت شرطی دو متغیره به دست آمده برای دوره‌های کوتاه مدت قابل اعتمادتر از دوره بازگشت شرطی سه متغیره است؛ بنابراین در این تحقیق از کاپولا دو متغیره برای تحلیل فراوانی سیلاب استفاده شده است.

این تحقیق جهت تحلیل فراوانی سیلاب بر روی ورودی‌های سد زاینده رود در شهرستان اصفهان انجام شده است و دوره بازگشت تک متغیره و دو متغیره به دست آمده است و نتایج با هم به صورت گرافیکی مقایسه شده است. در این مقاله ابتدا همبستگی بین جفت متغیرهای دبی-پیک-حجم سیلاب، دبی-تداوم و حجم سیلاب-تداوم بر اساس سه روش تاو کندال، اسپیرمن و پیرسون محاسبه شده است. سپس بر روی هر یک از متغیرها تابع توزیع حاشیه‌ای مناسب برازش داده شده است. پس از آن با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی و معیارهای نکویی برازش تابع مفصل مناسب انتخاب شده است. سپس دوره بازگشت در حالت تک متغیره و دو متغیره برای هر جفت متغیر محاسبه شده است و نتایج آن نمایش داده شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

سد زاینده‌رود اصفهان بر روی رودخانه زاینده‌رود اصفهان ساخته شده است. سد ذکر شده در سال ۱۳۴۹ آماده بهره‌برداری قرار گرفت و مختصات جغرافیایی این سد  $23^{\circ}30'$  شمالی  $50^{\circ}74'$  شرقی است. این سد در فاصله‌ی ۱۱۰ کیلومتری غرب اصفهان در شهرستان چادگان اصفهان واقع شده است. حداکثر حجم مخزن، ۱۴۷۰ میلیون متر مکعب و حجم مفید آن ۱۰۹۰ میلیون متر مکعب و همچنین مساحت دریاچه سد، ۵۴ کیلومتر مربع در تراز حداکثر است. میانگین بارندگی سالانه در این حوضه ۱۳۰ میلی‌متر است و دما بین ۳ تا ۳۰ درجه سانتیگراد است. میزان تبخیر و تعرق بالقوه ۱۵۰۰ میلی‌متر در سال است. از اهداف ساخت سد زاینده‌رود می‌توان به تولید سالیانه ۲۵۰ میلیون کیلووات ساعت انرژی برق‌آبی، کنترل سیلاب‌های فصلی، تنظیم آب کشاورزی مورد نیاز ۱۰۰ هزار هکتار از اراضی کشاورزی پایین دست اشاره کرد. در این مطالعه از داده‌های دبی اوج طی دوره آماری ۵۲ ساله، از سال آبی ۱۳۵۱-۱۳۵۰ به عنوان متغیر تحلیل فراوانی استفاده شده است که بر اساس آن متغیر حجم سیلاب و تداوم سیلاب برای هر سال از روی هیدروگراف روزانه محاسبه شده است.

### ۲-۲- ارزیابی میزان همبستگی

پیش از استفاده از توابع کاپولا باید میزان همبستگی متغیرها را سنجید تا از این طریق بتوان شدت رابطه بین متغیرها و همچنین نوع رابطه متغیرها که مستقیم یا معکوس است را ارزیابی کرد. محدوده ضرایب همبستگی در بازه +۱ تا -۱ هست. اگر ضریب همبستگی به مثبت یک نزدیک باشد، متغیرها به هم وابستگی مستقیم دارند و اگر به منفی یک نزدیک باشد، متغیرها با هم همبستگی معکوس دارند. در صورتی که این عدد به صفر نزدیک باشد؛ یعنی رابطه معناداری بین متغیرها وجود ندارد و متغیرها

از یکدیگر مستقل هستند. ضرایب همبستگی ناپارامتری کندال تاوو اسپیرمنو ضریب پارامتری پیرسون از معروف‌ترین ضرایب همبستگی هستند که در روابط ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده اند (She & Xia, 2018).

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}((x_i - x_j)(y_i - y_j)) \quad (2)$$

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

در روابط بالا n تعداد داده‌های مشاهداتی و sgn تابع علامت و  $\bar{x}$  و  $\bar{y}$  میانگین حسابی دو متغیر x و y است.

شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز سد زاینده رود در ایران (Zareian, 2015)



Fig 1. Geographic Location of the Zayandeh Rood Dam Basin in Iran (Zareian, 2015)

#### ۳-۲- برآزش تابع توزیع حاشیه‌ای

هدف از توزیع‌های آماری ارتباط دادن بزرگی وقایع حدی با فراوانی وقوع آن‌ها است؛ بنابراین لازم است که پیش از تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب، بر روی هر یک از متغیرهای سیلاب تابع توزیع حاشیه‌ای مناسب برآزش داده شود. در این مطالعه توابع مختلف بر روی متغیرهای دبی پیک، تداوم و حجم سیلاب برآزش داده شده است و سپس برای انتخاب بهترین تابع توزیع از آزمون‌های کلموگروف اسمیرنوف، اندرسون دارلینگ و کای مربع استفاده شده است.

#### ۴-۲- توابع مفصل

تابع کاپولا یا مفصل یک تکنیک ریاضی انعطاف‌پذیر است که توزیع‌های احتمالاتی تجمعی تک متغیره را ترکیب می‌کند و از ترکیب آن‌ها توزیع‌های احتمال تجمعی چند متغیره می‌سازد. در حقیقت از توابع کاپولا برای ایجاد توزیع‌های توام بر اساس ترکیب توزیع‌های حاشیه‌ای هر یک از متغیرها در بازه [۰،۱] استفاده می‌شود. توابع مفصل دارای خانواده‌های متعددی هستند. در

این مطالعه از توابع خانواده ارشمیدسی استفاده شده است. تابع کاپولا برای دو متغیر تصادفی  $x$  و  $y$  که از توزیع حاشیه‌ای دلخواه  $F_X(x)$  و  $F_Y(y)$  پیروی می‌کنند، مطابق رابطه (۴) است.

$$F_{X,Y}(x,y) = C(F_X(x), F_Y(y)) \quad (4)$$

این رابطه نشان می‌دهد که یک تابع کاپولا می‌تواند با کمک توزیع‌های تک‌متغیره، تابع چندمتغیره را توصیف کند. در صورتی که توزیع حاشیه‌ای متغیرها پیوسته باشد، تابع کاپولا متغیرها یک تابع منحصر به فرد است و تابع احتمال مشترک آن‌ها مطابق رابطه (۵) است (Shiau et al., 2006).

$$f_{X,Y}(x,y) = c(F_X(x), F_Y(y))f_X(x)f_Y(y) \quad (5)$$

در این رابطه  $f_X(x)$  و  $f_Y(y)$  تابع چگالی احتمال متناظر با  $F_X(x)$  و  $F_Y(y)$  هستند.  $c$  تابع چگالی احتمال  $C$  است و به صورت رابطه (۶)، تعریف می‌شود.

$$c(u,v) = \frac{\partial^2 C(u,v)}{\partial u \partial v} \quad (6)$$

در جدول (۱) تعدادی از مشهورترین توابع خانواده ارشمیدسی ذکر شده است.

جدول ۱. توابع مفصل خانواده ارشمیدسی

Table 1. Archimedean copula family functions

فضای پارامتر	رابطه تابع کاپولا	نام توابع
$0 \leq \theta$	$(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	Clayton
$-1 \leq \theta \leq 1$	$\frac{uv}{1 - \theta(1-u)(1-v)}$	Ali-Mikhail-Haq
$\theta \neq 0$	$-\frac{1}{\theta} \ln(1 + \frac{(e^{\theta u} - 1)(e^{\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1})$	Frank
$1 < \theta$	$1 - [1 - \prod_{i=1}^d (1 - (1 - u_i)^\theta)]^{1/\theta}$	Joe
$0 \leq \theta$	$uv \exp((( -\ln u)^{-\theta} + (-\ln v)^\theta)^{-\frac{1}{\theta}})$	Galambos
$1 \leq \theta$	$\exp((( -\ln u)^{-\theta} + (-\ln v)^\theta)^{\frac{1}{\theta}})$	Gumble-Hougaard

## ۵-۲- برآورد پارامتر توابع مفصل و آزمون نیکویی برازش

برای تخمین پارامترهای توابع مفصل روش‌های زیادی وجود دارد. در این مطالعه از روش حداکثر درست‌نمایی برای برآورد پارامتر تابع مفصل استفاده شده است. این روش متداول‌ترین روش پارامتری برای تخمین پارامترهای توابع مفصل شناخته می‌شود. در این روش پارامترهای توزیع حاشیه‌ای تابع مفصل به طور هم‌زمان تخمین زده می‌شوند. به عبارت دیگر حداکثر درست‌نمایی، حاصل ضرب احتمالات برای کلیه داده‌های مشاهده شده است. بنابراین اگر  $X_1, X_2, \dots, X_n$  داده‌های مشاهداتی

مستقل از هم باشند و مقدار چگالی احتمال برای  $X=x_i$  را  $f(x_i)$  در نظر گرفته شود، احتمال اینکه متغیر تصادفی در دسته‌ی مورد نظر اتفاق بیفتد برابر است با  $\int f(x_i)dx$  و احتمال مرکب مطابق رابطه (۷) است.

$$f(x_1)dx f(x_2)dx \dots f(x_n)dx = \prod_{i=1}^n f(x_i)(dx)^n \quad (7)$$

با ثابت در نظر گرفتن طول دسته‌ها ( $dx$ )، حداکثر درست‌نمایی مطابق رابطه (۸) است.

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i) \quad (8)$$

برای نیکویی برازش تابع مفصل از معیارهای آکائیکه، معیار نش-ساتکلیف و معیار خطای جذر میانگین مربعات (روابط ۹-۱۱) استفاده شده است. معیار نش-ساتکلیف در بازه (۱ و  $-\infty$ ) قرار دارد و مقدار بیش‌تر از یک نشان‌دهنده عملکرد بهتر این معیار است در حالی که مقادیر منفی نشان‌دهنده ضعف مدل پیش‌بینی است. معیار خطای جذر میانگین مربعات به طور معمول در بازه مثبت قرار دارد. اگر مدل پیش‌بینی دقیق باشد و هیچ خطایی وجود نداشته باشد، این مقدار برابر صفر است. هر چه مقدار این خطا به صفر نزدیک‌تر باشد به این معنی است که دقت مدل پیش‌بینی بیش‌تر بوده است.

$$AIC = N \log(MSE) + 2(p) \quad (9)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (11)$$

$x_i$ : مقادیر مشاهده شده (واقعی)  $\hat{x}_i$ : مقادیر پیش‌بینی شده

MSE: میانگین مربعات خطا P: تعداد پارامترها

$Q_m^t$ : مقادیر پیش‌بینی شده  $Q_o^t$ : مقادیر مشاهده شده

$\bar{Q}_o$ : میانگین مقادیر مشاهده شده N: تعداد مشاهدات

## ۶-۲- دوره بازگشت توأم

تجزیه و تحلیل و بررسی پارامترهای سیلاب درک خوبی از دوره بازگشت این پدیده فراهم می‌کند که به کمک آن می‌توان در زمینه مدیریت مخازن و کاهش ریسک سیلاب برنامه‌ریزی کرد. از آنجایی که در پدیده سیلاب چندین متغیر دخیل است، بهتر است که این ارتباط را به صورت توأم (مشترک) مورد بررسی قرار داد. بنابراین؛ بعد از انتخاب تابع مفصل مناسب در حالت دو متغیره، توابع توزیع تجمعی دو متغیره به دست می‌آید. رابطه (۱۲) احتمال وقوع پدیده را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان دوره بازگشت دو متغیره را در دو حالت «و» و «یا» با استفاده از روابط (۱۳ و ۱۴) محاسبه کرد. برای دوره بازگشت توأم در حالت «و» اگر  $F_{x,y}(x,y) = C(F_x(x), F_y(y))$  آنگاه:

$$P(x \leq X, y \leq Y) = 1 - F_x(x) - F_y(y) + F_{x,y}(x, y) \quad (12)$$

$$T_{x,y}^{and} = \frac{1}{P(x \leq X, y \leq Y)} = \frac{1}{1 - F_x(x) - F_y(y) + F_{x,y}(x, y)} \quad (13)$$

برای دوره بازگشت توأم در حالت «یا» داریم:

$$T_{x,y}^{or} = \frac{1}{1 - F_{x,y}(x, y)} \quad (14)$$

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مشخصات آماری و ضریب همبستگی متغیرها

پس از استخراج متغیرها از روی هیدروگراف روزانه سد زاینده رود، مشخصات آماری داده‌ها محاسبه شده است و در جدول (۲) نمایش داده شده است. همچنین همبستگی بین متغیرها بر اساس سه روش کندال تاو، اسپیرمن و پیرسون محاسبه شده است و در جدول (۳) نمایش داده شده است.

جدول ۲. مشخصات آماری داده‌های دبی اوج، حجم سیلاب و تداوم از سال ۱۳۵۰-۵۱ تا ۱۴۰۱-۰۲

Table 2. Statistical characteristics of peak discharge, flood volume, and duration data from 1350-1401 (1971- 2022)

کور توسیسی	چولگی	انحراف معیار	حداکثر	حداقل	میانگین	
4.202	1.878	1.878	788.86	81.3	251.965	دبی اوج (m <sup>3</sup> /s)
-0.081	1.064	1.064	167752.828	1506.35	49351.292	حجم سیلاب (MCM)
-0.85	-0.013	-0.013	170	15	96.980	تداوم سیلاب (day)

جدول ۳. ضرایب همبستگی

Table 3. Correlation coefficients

کندال تاو	اسپیرمن	پیرسون	متغیر
0.054	0.0867	0.0463	دبی اوج - حجم
-0.1674	-0.2236	-0.2739	دبی اوج - تداوم
0.4203	0.5906	0.5405	حجم سیلاب - تداوم

همانطور که از جدول (۳) مشخص است ضریب همبستگی مستقیم و معناداری بین حجم سیلاب و تداوم سیلاب وجود دارد که نشان دهنده وابستگی قوی بین این دو متغیر است و این در حالی است که همبستگی بین دبی اوج و حجم نزدیک به صفر است و این نشان می‌دهد که این دو متغیر از یکدیگر مستقل هستند.

## ۲-۳- برازش تابع توزیع حاشیه‌ای مناسب

بر روی هریک از متغیرها تابع توزیع مناسب برازش داده شده است و جهت ارزیابی و انتخاب بهترین تابع توزیع حاشیه‌ای از معیارهای کلموگروف اسمیرنف، اندرسون دارلینگ و کای مربع مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج برازش تابع توزیع حاشیه‌ای منتخب در جدول (۴) قابل مشاهده است.

جدول ۴. برآورد پارامترهای توابع توزیع حاشیه‌ای منتخب

Table 4. Estimated parameters of selected marginal distribution functions

پارامترهای تابع توزیع منتخب				تابع توزیع منتخب		متغیر
$\mu$	$\lambda$	k	$\sigma$	$\theta$		
251.9656	846.9905				گوسین	دبی اوج
49351.2918	-				نمایی	حجم سیلاب
		-1.0571	163.8524	15	پارتو	تداوم سیلاب

## ۳-۳- برازش تابع مفصل مناسب

برای تخمین پارامتر تابع مفصل از روش حداکثر درستمایی استفاده شده است و تابع مفصل مناسب با توجه به آزمون نیکویی برازش آکائیکه، RMSE و NSE انتخاب شده است. تابع جو برای جفت متغیر دبی اوج- حجم سیلاب انتخاب شده است و تابع مفصل علی میکائیل حق برای جفت متغیر دبی اوج-تداوم و حجم-تداوم انتخاب شده است. جدول (۵) نتایج انتخاب تابع مفصل را نشان می‌دهد.

جدول ۵. تابع مفصل منتخب و نتایج آزمون نیکویی برازش

Table 5. Selected copula function and goodness-of-fit test results

حجم-تداوم	دبی اوج-تداوم	دبی اوج- حجم سیلاب	
AMH	AMH	Joe	بهترین تابع مفصل
1.0000	-0.4208	1.2314	پارامتر تابع مفصل
0.1834	0.1274	0.1527	RMSE
0.9901	0.9905	0.9918	NSE

## ۴-۳- تابع کاپولای برازش داده شده و دوره بازگشت توأم

در شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) به ترتیب تابع توزیع مشترک که بر اساس تابع توزیع حاشیه‌ای متغیرها به دست آمده است. مطابق با جدول (۵) تابع مفصل انتخاب شده بر روی هر جفت متغیر برازش داده شده است. بر روی جفت متغیرهای دبی اوج- حجم سیلاب تابع جو و بر روی جفت دبی اوج-تداوم و حجم-تداوم تابع علی میکائیل حق برازش داده شده است.



شکل ۲. تابع توزیع مشترک برازش داده شده بر روی دبی پیک- حجم سیلاب با تابع مفصل جو

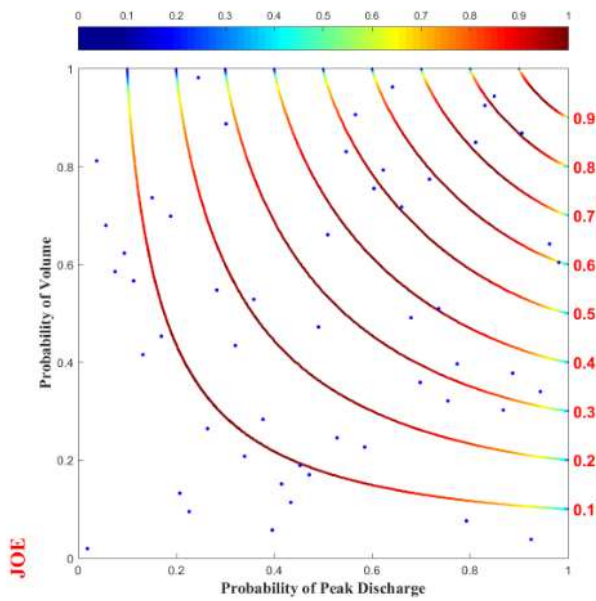


Fig 2. Fitted joint distribution function for peak discharge - flood volume using the Joy Copula

شکل ۳. تابع توزیع مشترک برازش داده شده بر روی دبی پیک- تداوم سیلاب با تابع مفصل علی-میکائیل-حق

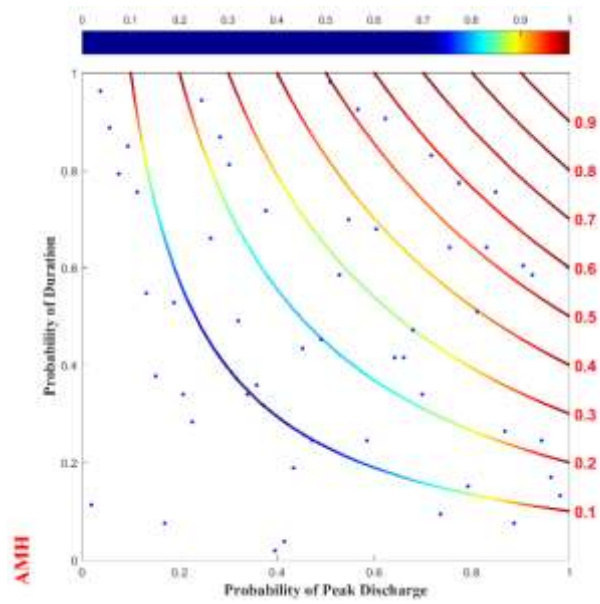


Fig 3. Fitted joint distribution function for peak discharge - flood duration using the Ali-Mikhail-Haq Copula

شکل ۴. تابع توزیع مشترک برازش داده شده بر روی حجم سیلاب- تداوم سیلاب با تابع مفصل علی-میکائیل-حق

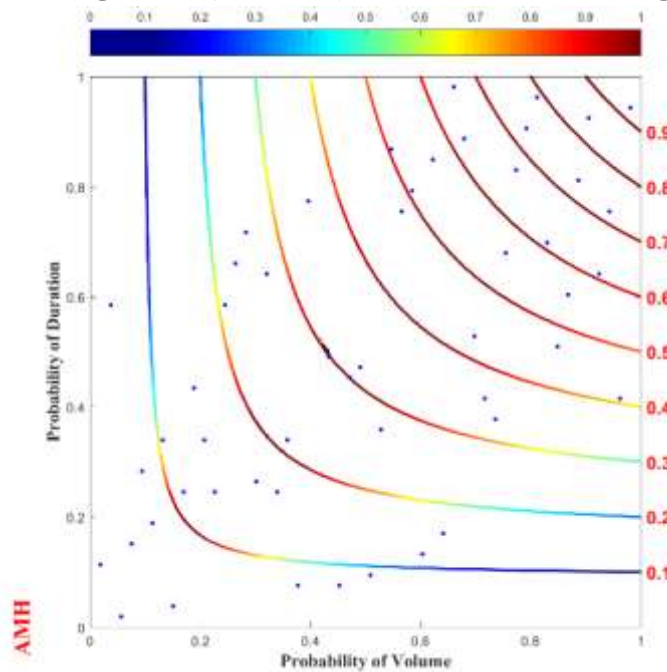


Fig 4. Fitted joint distribution function for flood volume - flood duration using the Ali-Mikhail-Haq Copula

در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) به ترتیب دوره بازگشت تک متغیره در نمودارهای آبی رنگ و توأم در نمودارهای رنگی برای هر جفت متغیرهای دبی اوج-حجم سیلاب، دبی اوج-تداوم و حجم-تداوم بر اساس تابع کاپولا منتخب قابل مشاهده است.

شکل ۵. دوره بازگشت تک متغیره و دو متغیره دبی اوج-حجم سیلاب

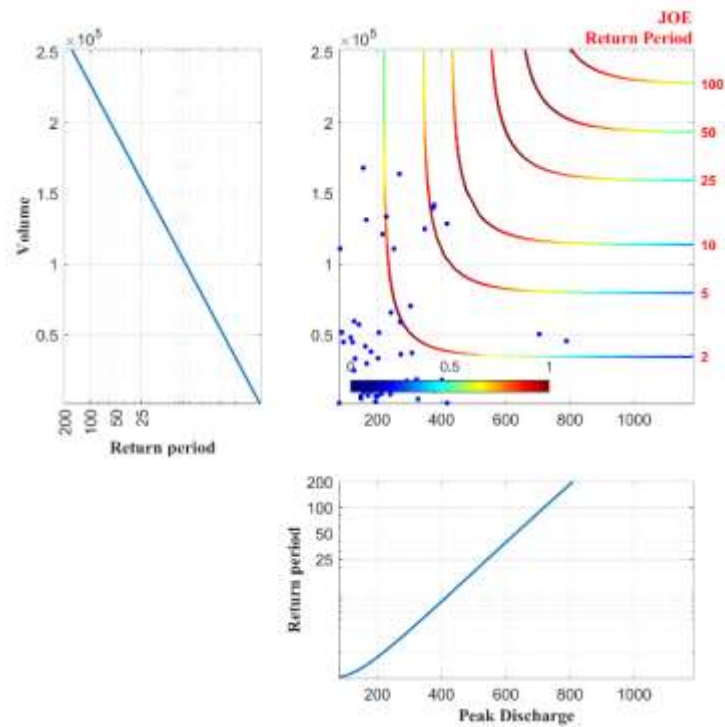


Fig 5. Return periods for single and two-variable peak discharge - flood volume

شکل ۶. دوره بازگشت تک متغیره و دو متغیره دبی اوج-تداوم

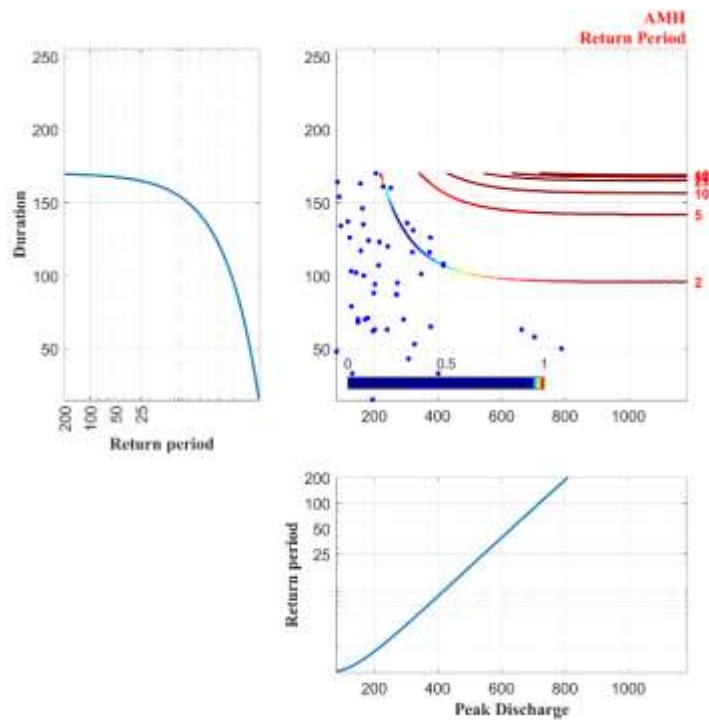


Fig 6. Return periods for single and two-variable peak discharge - flood duration

شکل ۷. دوره بازگشت تک متغیره و دو متغیره حجم سیلاب- تداوم

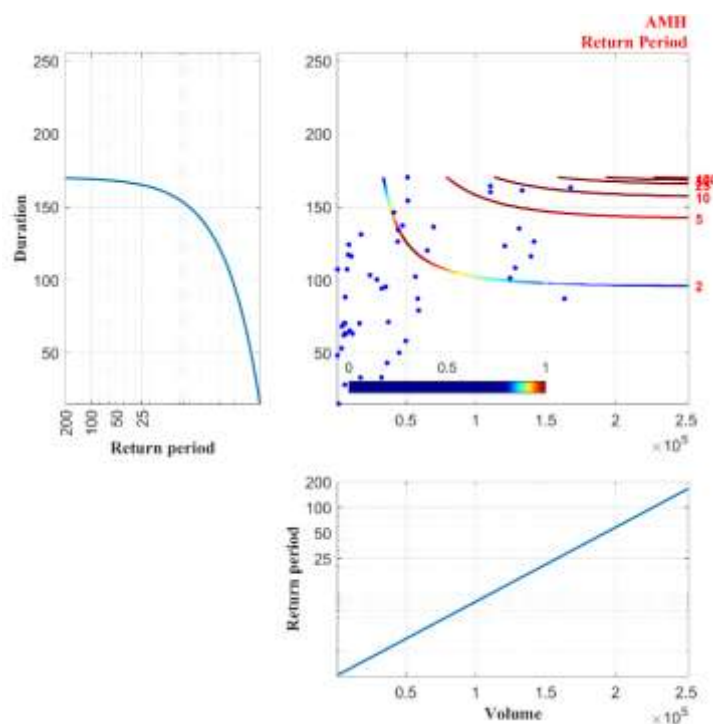


Fig 7. Return periods for single and two-variable flood volume - flood duration

## ۴- نتیجه‌گیری

در طول تاریخ سیلاب باعث خسارات مالی و جانی فراوانی شده است. بنابراین لازم است که با تحلیل فراوانی سیلاب از احتمال وقوع و دوره بازگشت این پدیده اطلاع داشت. این پدیده چند متغیره است و استفاده از توابع کلاسیک باعث دست بالا گرفتن یا دست پایین گرفتن نتایج می‌شود. بنابراین بهتر است که از توابع مفصل چند متغیره برای تحلیل فراوانی این پدیده استفاده کرد. در این مطالعه تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب با در نظر گرفتن سه متغیره دبی اوج، حجم سیلاب و تداوم سیلاب انجام شد. این مطالعه بر روی ۵۲ سال داده آماری ورودی سد زاینده‌رود از سال آبی ۱۳۵۲-۱۳۵۱ تا ۱۴۰۲-۱۴۰۱ انجام شد. ابتدا همبستگی بین متغیره‌ها بر اساس روش تاو کندال، اسپیرمن و پیرسون اندازه‌گیری شد و نتایج نشان می‌دهد که جفت متغیره دبی اوج و حجم سیلاب همبستگی نزدیک به صفر دارند و بدین معنی است که این دو متغیره از یکدیگر مستقل هستند. در حالی که همبستگی معناداری بین حجم سیلاب و تداوم وجود دارد. بر اساس معیارهای نیکویی برازش بر روی متغیره‌های دبی اوج، حجم و تداوم سیلاب به ترتیب توابع گوسین، نمایی، پارتو برازش داده شده است. تابع کاپولا بر اساس معیار آکائیکه، NSE و RMSE برای هر جفت متغیره انتخاب شده است که این توابع بین توزیع حاشیه‌ای هر یک متغیره‌ها ارتباط برقرار می‌کند و توزیع توأم می‌سازد. برای دبی پیک-حجم سیلاب تابع کاپولا جو و برای دبی پیک-تداوم و حجم سیلاب-تداوم تابع علی-میکائیل-حق انتخاب شده است. پس از آن دوره بازگشت تک متغیره و توأم به دست آمده با هم مقایسه شده و نمایش داده شده است. نتایج حاصل از دوره بازگشت این پدیده نشان می‌دهد که هر چه مقادیر متغیره‌های سیلاب بزرگ‌تر باشند این وقایع حدی‌تر هستند و احتمال وقوع کمتری دارند و این به این معنی است که دوره بازگشت توأم آن‌ها نیز بیشتر خواهد بود. همچنین در مقایسه بین دوره بازگشت تک متغیره و دو متغیره مشخص است که نتایج دوره بازگشت دو متغیره قابل اعتمادتر است و دوره بازگشت تک متغیره معمولاً دست بالا یا دست پایین در نظر گرفته شده است.

## ۵- تضاد منافع نویسندگان

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

## ۶- منابع

- Jafry, N. A., Suhaila, J., Yusof, F., Nor, S. R. M., & Alias, N. E. (2023, May). Bivariate copula for flood frequency analysis in Johor river basin. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1167, No. 1, p. 012018). IOP Publishing.
- Klaho, M. H., Safavi, H. R., Golmohammadi, M. H., & Alkntar, M. (2022). Comparison between bivariate and trivariate flood frequency analysis using the Archimedean copula functions, a case study of the Karun River in Iran. *Natural Hazards*, 112(2), 1589-1610.
- Reddy, M. J., & Ganguli, P. (2012). Bivariate flood frequency analysis of upper Godavari River flows using Archimedean copulas. *Water resources management*, 26(14), 3995-4018.
- Samantaray, S., & Sahoo, A. (2020). Estimation of flood frequency using statistical method: Mahanadi River basin, India. *h2oj*, 3(1), 189-207.
- She, D., & Xia, J. (2018). Copulas-based drought characteristics analysis and risk assessment across the Loess Plateau of China. *Water Resources Management*, 32, 547-564.
- Shiau, J. T., Wang, H. Y., & Tsai, C. T. (2006). Bivariate frequency analysis of floods using copulas. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 42(6), 1549-1564.
- Shiau, J. T. (2006). Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water resources management*, 20, 795-815.
- Sraj, M., Bezak, N., & Brilly, M. (2015). Bivariate flood frequency analysis using the copula function: a case study of the Litija station on the Sava River. *Hydrological Processes*, 29(2), 225-238.
- Zhang, L., & Singh, V. P. (2007). Trivariate flood frequency analysis using the Gumbel-Hougaard copula. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(4), 431-439.
- Zhang, L. S. V. P., & Singh, V. P. (2006). Bivariate flood frequency analysis using the copula method. *Journal of hydrologic engineering*, 11(2), 150-164.
- Zhou, T., Liu, Z., Jin, J., & Hu, H. (2019). Assessing the impacts of univariate and bivariate flood frequency approaches to flood risk accounting for reservoir operation. *Water*, 11(3), 475.



## Research Article



## Experimental study of the effect of obstacles on flow energy loss in piano key weir

Shimaa Ezzaldine Ibrahim<sup>1</sup>, Ali Khoshfetrat<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup> MS, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Professor of Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

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

Received: 06 Sept 2023

Accepted: 08 Oct 2023

Published: 14 Oct 2023

### Abstract

Piano key weirs have a longer crown length than linear weirs. Increasing the length of the weir crest in a limited width increases the water flow coefficient. Considering the importance of these weirs and the solution to increase the energy loss and finally reduce scour in them; therefore, in this research, it used a C-type trapezoidal piano key weir. Four flow rates of 0.025, 0.03, 0.035 and 0.04 cubic meters per second were also used. Three barriers with heights of 0.01, 0.03 and 0.05 meters were also used at the end of the overflow output keys. The results show that with the increase in the height of the obstacles, the amount of energy loss also increases. Also, by increasing the flow rate, the amount of energy loss is reduced. In barriers of 0.01, 0.03 and 0.05 meters, the amount of energy loss increases by 1.20, 2.13 and 2.53%, respectively, compared to the weir without obstacles. The average energy loss in weirs with barriers of 0, 0.01, 0.03 and 0.05 meters at the end of the outlet switches is equal to 57.8, 58.5, 59.06 and 59.3, respectively. At the end, a relationship was obtained to calculate the amount of energy loss in the C-type trapezoidal piano key weir along with the barrier at the end of the output keys with a correlation coefficient of 98.9%.

**Keywords:** Energy loss, Experimental study, Obstacle, Piano key weir (PKW), Type C



## مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر موانع بر اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی

شیماء عزالدین ابراهیم<sup>۱</sup>، علی خوش فطرت<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

\*نویسنده مسئول: [khoshfetrat@khuisf.ac.ir](mailto:khoshfetrat@khuisf.ac.ir)

چاپ: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۵

### چکیده

سرریزهای کلیدپیانویی، دارای طول تاج بیشتر نسبت به سرریزهای خطی است. افزایش طول تاج سرریز در عرض محدود، باعث افزایش ضریب آبگذری می‌گردد. با توجه به اهمیت این سرریزها و راهکار برای کاهش اتلاف انرژی و در نهایت کاهش آبشستگی در آنها؛ در این تحقیق از یک سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای نوع C، چهار دبی ۰/۰۲۵، ۰/۰۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴ متر مکعب بر ثانیه و سه مانع با ارتفاع‌های ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ متر در انتهای کلیدهای خروجی سرریز استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع موانع، میزان اتلاف انرژی نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دبی جریان، از میزان اتلاف انرژی کاسته می‌شود. در موانع ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ متر، میزان اتلاف انرژی نسبت به سرریز بدون مانع به ترتیب ۱/۲۰، ۲/۱۳ و ۲/۵۳ درصد افزایش می‌یابد. میانگین اتلاف انرژی در سرریزهای با موانع ۰، ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ متر در انتهای کلیدهای خروجی، به ترتیب برابر ۵۷/۸، ۵۸/۵، ۵۹/۰۶ و ۵۹/۳ است. در انتها رابطه‌ای برای محاسبه میزان اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C همراه با مانع در انتهای کلیدهای خروجی با ضریب همبستگی ۹۸/۹ درصد، به دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** اتلاف انرژی، سرریز کلیدپیانویی، مطالعه‌ی آزمایشگاهی، مانع، نوع C.

## ۱. مقدمه

سرریزهای کلیدپیانویی توسعه یافته‌ی سرریزهای کنگره‌ای هستند. تفاوت این دو سرریز، وجود شیب در کلیدهای ورودی و خروجی در سرریز کلیدپیانویی است. سرریزهای کلیدپیانویی دارای چهار تیپ A، B، C و D هستند. نوع اول دارای لبه آویزان در بالادست و پایین دست سرریز، نوع دوم و سوم به ترتیب دارای لبه آویزان در بالادست و پایین دست سرریز و نوع چهارم، بدون لبه آویزان است. همچنین سرریزهای کلیدپیانویی دارای شکل‌های مستطیلی، مثلثی و ذوزنقه‌ای هستند. به دلیل راندمان بالای سرریزهای کلیدپیانویی در ضریب آبگذری و دارا بودن پی سبک؛ لذا راهکار برای کاهش میزان اتلاف انرژی در این سازه‌های هیدرولیکی و در نهایت کاهش آبشستگی در آن‌ها، حائز اهمیت است. افرادی مانند Leite Ribeiro et al., 2007; Khanh et al., 2010; Bieri et al., 2011; Erpicum et al., 2013 روی اتلاف انرژی و ضریب آبگذری سرریزهای کنگره‌ای و کلیدپیانویی تحقیقات ارزشمندی انجام دادند. Sajadi و همکاران (2017)، با بررسی عددی و آزمایشگاهی روی اتلاف انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، به این نتیجه رسیدند که وجود بلوک در کلیدهای خروجی سرریز باعث اتلاف انرژی بیشتر می‌شود. Al-Shukur و Al-Khafaji (2018) با بررسی آزمایشگاهی روی اتلاف انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، دریافتند که با افزایش شیب‌های کلیدهای خروجی سرریز، میزان انرژی کمتر می‌شود. ایشان همچنین رابطه‌ای برای ضریب آبگذری سرریز ارائه دادند که ضریب همبستگی در آن ۰/۹۸۴ است. Naghibzadeh و همکاران (2020)، با بررسی آزمایشگاهی و عددی روی میزان اتلاف انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، به این نتیجه رسیدند که وجود پله و بلوک در کلیدهای خروجی سرریز، باعث بیشتر شدن میزان اتلاف انرژی می‌شود. ایشان تأثیر عدد وبر را بر میزان اتلاف انرژی در نظر گرفتند که بازه‌ی آن بین ۳۵ تا ۱۵۰۰ است. Eslinger و Crookston (2020)، با بررسی آزمایشگاهی روی میزان اتلاف انرژی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، به این نتیجه رسیدند که با کاهش دبی جریان، مقدار اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. همچنین در سرریزهای با ارتفاع کمتر، مقدار اتلاف انرژی بیشتر است و نسبت عرض کلید ورودی به عرض کلید خروجی سرریز، تأثیر زیادی بر میزان اتلاف انرژی ندارد. Singh و Kumar (2022)، با بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی، به این نتیجه رسیدند که وجود پله در کلیدهای خروجی سرریز، باعث افزایش میزان اتلاف انرژی می‌شود. ایشان همچنین میزان اتلاف انرژی در سرریز ساده و بدون پله را نیز مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که با کاهش دبی جریان، مقدار اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. Fathi و همکاران (2023)، با بررسی آزمایشگاهی سرریز کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای پله‌ای، به این نتیجه رسیدند که وجود پله در کلیدهای خروجی سرریز، باعث اتلاف انرژی بیشتر می‌شود. ایشان تعداد صفر، پنج، ۱۰ و ۱۵ پله در کلیدهای خروجی سرریز استفاده کردند و دریافتند که میزان اتلاف انرژی در سرریز ۱۰ پله‌ای به مراتب بیشتر از مابقی سرریزها است. همچنین بیان داشتند که با افزایش دبی جریان، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. Challoob Mshali و همکاران (2023)، با بررسی آزمایشگاهی روی سرریز کلیدپیانویی همراه با جامپ در کلیدهای خروجی سرریز، به این نتیجه رسیدند که وجود جامپ باعث اتلاف انرژی بیشتر می‌شود. همچنین بیان داشتند که با کاهش دبی جریان، میزان اتلاف انرژی افزایش می‌یابد.

با توجه به مطالعات ارزشمند انجام شده روی میزان اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی و راهکار برای افزایش آن؛ لذا تحقیقی بر مبنای تأثیر موانع در انتهای کلیدهای خروجی سرریز، صورت گرفته است. در این تحقیق از یک سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C، با چهار دبی جریان ۰/۰۲۵، ۰/۰۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴ متر مکعب بر ثانیه و سه مانع به ارتفاع‌های ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ متر استفاده شد.

## ۲. آنالیز ابعادی

رابطه (۱) پارامترهای موثر بر میزان اتلاف انرژی جریان را نشان می‌دهد که در آن چگالی آب،  $\rho$  ضریب کشش سطحی،  $\sigma$  لزجت دینامیکی،  $\mu$   $V_1$  سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز،  $H$  عمق جریان به‌علاوه انرژی جنبشی در بالادست سرریز،  $P$  ارتفاع سرریز و  $h$  ارتفاع موانع هستند.

$$E_L = f(\rho, \sigma, \mu, V_1, H, P, h) \quad (1)$$

با توجه به تئوری باکینگهام و با در نظر گرفتن سه متغیر تکراری چگالی آب، سرعت متوسط جریان و عمق جریان به‌علاوه انرژی جنبشی در بالادست سرریز، میزان اتلاف انرژی جریان، تابع پارامترهای زیر می‌شود.

$$E_L = f(\mathbf{We}, \text{Re}, \frac{H}{p}, \frac{H}{h}) \quad (2)$$

به دلیل آشفتگی زیاد جریان و به دلیل بیشتر از ۰/۰۳ متر بودن عمق جریان روی تاج سرریز؛ لذا از عدد رینولدز  $(\text{Re} = \frac{\rho V_1 H}{\mu})$  و ویر  $(\text{We} = \frac{\rho V_1^2 H}{\sigma})$  صرف نظر خواهد شد (Sumer & Fredsoe, 1991; Novák & Čabelka, 1981). در نهایت میزان اتلاف انرژی جریان تابع رابطه (۳) می‌شود.

$$E_L = f(\frac{H}{p}, \frac{h}{H}) \quad (3)$$

## ۳. موارد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان (خوراسگان) انجام شد. پس از روشن کردن پمپ و تنظیم دبی جریان، جریان از آرام‌کننده‌ها عبور کرده و پس از طی حدود ۶ متر، وارد سرریز می‌شد. پمپ با خطای ۰/۰۱ درصد راندمان نسبتاً بالایی دارد. عرض، طول و ارتفاع فلوم آزمایشگاهی برابر ۰/۶ متر، ۱۰ متر و ۱/۱ متر هستند (شکل ۱). از چهار دبی جریان ۰/۰۲۵، ۰/۰۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴ متر مکعب بر ثانیه استفاده شد. در کمترین دبی جریان، عمق روی تاج سرریز بیشتر از ۰/۰۳ متر برداشت شد و شرایط جریان به نحوی بود که از کشش سطحی صرف نظر شد. از یک سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای استفاده شد. سرریز دارای دو سیکل و با عرض ۰/۶ متر است. ارتفاع سرریز (P): ۰/۲ متر، عرض کلیدهای ورودی



سرریز  $(W_i)$ : ۰/۲۱۵ متر، عرض کلیدهای خروجی سرریز  $(W_o)$ : ۰/۰۷۵ متر، طول دیواره‌های جانبی سرریز  $(B)$ : ۰/۵ متر و ضخامت  $(T_s)$ : ۰/۰۱ متر است. عمق پایین دست سرریز توسط دریچه انتهایی فلوم آزمایشگاهی، تنظیم نشد. پس از تنظیم دبی و عبور جریان از روی سرریز، عمق بالادست، عمق روی تاج سرریز و عمق پایین دست سرریز، توسط سه سنسور متصل روی کانال، برداشت شد. عمق بالادست سرریز در فاصله  $4y$  و عمق پایین دست سرریز در فاصله  $10P$  از پنجه سرریز، برداشت شد (Fathi et al., 2023).  $y$  عمق جریان روی تاج سرریز و  $P$  همان ارتفاع سرریز است. جدول (۱)، پارامترهای هیدرولیکی و موثر بر میزان اتلاف انرژی را نشان می‌دهد. که در آن  $Q$  دبی جریان است.

شکل ۱. فلوم آزمایشگاهی



Fig 1. The laboratory channel

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی جریان

Table 1. Hydraulic characteristics of the flow

ROW	Q (m <sup>3</sup> /s)	H/P	h/H	E <sub>L</sub>
1	0.025	0.163	0	0.633
2	0.03	0.204	0	0.585
3	0.035	0.249	0	0.567
4	0.04	0.297	0	0.527
5	0.025	0.163	0.306	0.636
6	0.03	0.204	0.245	0.589
7	0.035	0.249	0.201	0.571
8	0.04	0.297	0.168	0.545
9	0.025	0.163	0.919	0.637
10	0.03	0.204	0.736	0.594
11	0.035	0.249	0.602	0.576
12	0.04	0.297	0.5054	0.555

#### ۴. نتایج و بحث

جریان از روی کلیدهای ورودی به پایین دست و در داخل کلیدهای خروجی می‌ریخت. همچنین جریان از کلیدهای خروجی به صورت جت مایل به پایین دست منتقل می‌شد. پس از رسیدن جریان به انتهای کلیدهای خروجی، جریان پشت موانع به گیر افتاده و سپس با یک پرش نسبتاً ضعیف، وارد پایین دست می‌شد. این پرش هیدرولیکی و جمع شدن جریان پشت موانع،

باعث کاهش سرعت جریان و در نهایت افزایش اتلاف انرژی می‌شود. شکل (۲-الف) و شکل (۲-ب)، میزان اتلاف انرژی را بر حسب پارامترهای بدون بعد شده  $H/P$  و  $h/H$  نشان می‌دهند. با افزایش نسبت عمق جریان به علاوه ارتفاع نظیر انرژی جنبشی در بالادست سرریز به ارتفاع سرریز، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. یا به اصطلاح دیگر، با افزایش دبی جریان، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. با وجود موانع، میزان اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت ارتفاع موانع به عمق جریان به علاوه ارتفاع نظیر انرژی جنبشی در بالادست سرریز، میزان اتلاف انرژی نیز افزایش می‌یابد.

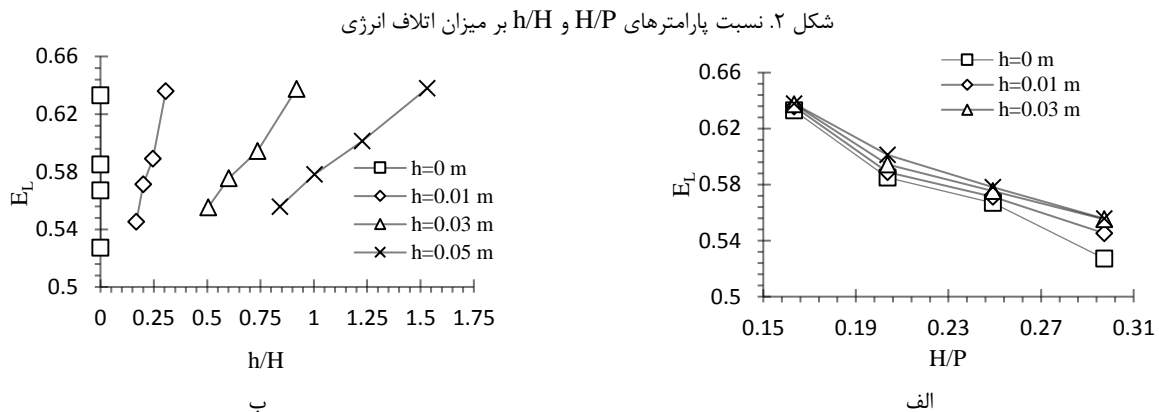


Fig. 2. The ratio of  $H/P$  and  $h/H$  parameters on the amount of energy loss

میانگین اتلاف انرژی در سرریز ساده و بدون مانع در انتهای کلیدهای خروجی، برابر  $۵۷/۸$  است. همچنین در سرریزهای با ارتفاع مانع در انتهای کلیدهای خروجی برابر  $۰/۰۱$ ،  $۰/۰۳$  و  $۰/۰۵$  متر، به ترتیب میانگین اتلاف انرژی حدود  $۵۹/۰۶$  و  $۵۹/۳$  است. در سرریزهای با ارتفاع مانع برابر  $۰/۰۱$ ،  $۰/۰۳$  و  $۰/۰۵$  متر نسبت به سرریز بدون مانع، میزان اتلاف انرژی حدود  $۱/۲۰$ ،  $۲/۱۳$  و  $۲/۵۳$  درصد افزایش یافته است.

رابطه (۴)، برای محاسبه اتلاف انرژی در سرریز کلیدپیانویی با و بدون مانع در انتهای کلیدهای خروجی ارائه شده است که ضریب همبستگی در آن برابر  $۹۸/۹$  درصد خواهد بود. همچنین شکل (۳)، میزان اتلاف انرژی محاسبه شده با رابطه (۴) و میزان اتلاف انرژی مشاهده شده را نشان می‌دهد که با خطای قابل قبولی مورد پذیرش است.

$$E_L = \left(\frac{H}{p}\right)^{k_1} \left(\frac{h}{H} + k_2\right)^{k_3} \quad (4)$$

ضرایب  $K$  موجود در رابطه (۴)، با توجه به اندازه‌های ارتفاع موانع، محاسبه می‌شوند که در جدول زیر به آن پرداخته شده است.

جدول ۲. محاسبه مقادیر  $K$  در رابطه (۴)

Table 2. Calculation of $K$ values in relation (4)				
ROW	$h$ (m)	$K_1$	$K_2$	$K_3$
1	0	0.1	$K_2 = 0.0368 (H/P)^{-1.269}$	0.28
2	0.01	0.2	0	0.6
3	0.03	0.07	0	0.28
4	0.05	0.4	0	0.8

شکل ۳. مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده اتلاف انرژی

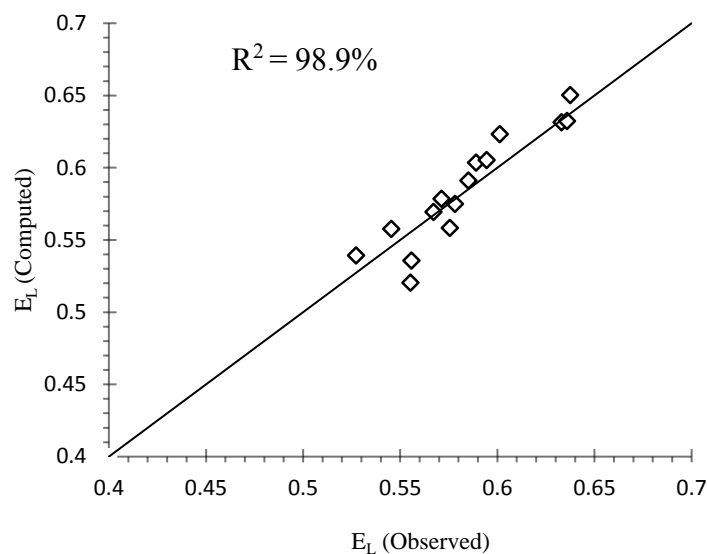


Fig 3. Observed and Computed energy loss values

#### ۵. نتیجه‌گیری

با افزایش دبی جریان، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت  $H/P$ ، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. نتایج چنین بود که وجود مانع در انتهای کلیدهای خروجی سرریز، باعث اتلاف انرژی بیشتر می‌شود. افزایش نسبت  $h/H$  میزان اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. در سرریزهای با ارتفاع موانع  $0/01$ ،  $0/03$  و  $0/05$  متر، نسبت به سرریز بدون مانع، میزان اتلاف انرژی حدود  $1/20$ ،  $2/13$  و  $2/53$  درصد بیشتر است. در نهایت رابطه‌ای برای محاسبه میزان اتلاف انرژی در سرریزهای با و بدون مانع در انتهای کلیدهای خروجی با ضریب همبستگی  $98/9$  درصد ارائه شد.

#### ۶. تضاد منافع نویسندگان

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

#### ۷. مراجع

- Al-Shukur, A. H. K., & Al-Khafaji, G. H. (2018). Experimental study of the hydraulic performance of piano key weir. *International Journal of Energy and Environment*, 9(1), 63-70.
- Bieri, M., Federspiel, M., Boillat, J. L., Houdant, B., Faramond, L., & Delorme, F. (2011). Energy dissipation downstream of Piano key weirs—Case study of Gloriettes Dam (France). *Labyrinth and Piano key weirs*, 123-130.
- Erpicum, S., Laugier, F., Pfister, M., Pirotton, M., Cicero, G. M., & Schleiss, A. J. (Eds.). (2013). *Labyrinth and piano key weirs II*. CRC Press.
- Fathi, A., Abdi Chooplou, C., & Ghodsian, M. G. (2023). An Experimental Study of Flow Energy Loss in Trapezoidal Stepped Piano Key Weirs (PKWs). *Modares Civil Engineering journal*, 23(4), 0-0.
- Kadhim Challoor, m., Khoshfetrat, A., Fathi ah (2023). Analysis of energy loss in a C-type trapezoidal Piano key weir with outlet key jumps. *Technical Strategies in Water Systems*, 1(1): 27-36

- Khanh, M. H. T., Hien, T. C., & Quat, D. S. Study and construction of PK Weirs in Vietnam (2004 to 2011).
- Naghibzadeh, S. M., Heidarneshad, M., Masjedi, A., & Bordbar, A. (2020). Experimental and Numerical Analysis of Energy Dissipation in Piano Key Weirs with Stepped and Baffled Barriers at Downstream Slope. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(10), 2431-2442.
- Novák, P., & Čabelka, J. (1981). Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications. *Monographs & surveys in water resources engineering*.
- R. Eslinger, K., & Crookston, B. M. (2020). Energy dissipation of type a piano key weirs. *Water*, 12(5), 1253.
- Ribeiro, M. L., Boillat, J. L., Schleiss, A., Laugier, F., & Albalat, C. (2007). Rehabilitation of St-Marc dam. Experimental optimization of a piano key weir. In *Proc. of 32nd Congress of IAHR. Vince. Italy*.
- Sajadi, S. M. (2017). Effect of baffled outlet keys at Piano Key Weir on dissipating energy. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(69), 77-92.
- Singh, D., & Kumar, M. (2022). Gene expression programming for computing energy dissipation over type-B piano key weir. *Renewable Energy Focus*, 41, 230-235.
- Sumer, B. M., & Fredsoe, J. (1991, August). Onset of scour below a pipeline exposed to waves. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-I). ISOPE.