ارزیابی طراحی هیدرولوژیک سرریز سد با استفاده از دوره بازگشت‌های دو متغیره مبتنی بر توابع کاپولا (مطالعه موردی: سد گلستان ۲، استان گلستان)

زینب افشاری‌پور[۱]، محمد عبدالحسینی[۲]، عبدالرضا بهره‌مند[۳*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۲۳
تاریخ پذیرش:۱۳۹۶/۰۹/۰۷

چکیده

برای طراحی برخی از سازه‌های آبی مانند سدها، تجزیه و تحلیل چندمتغیره بر اساس متغیرهای دبی و حجم سیل مفید و کاربردی می‌باشد. با توجه به وابستگی میان متغیرهای سیل، لازم است تا این ویژگی در تحلیل همزمان پدیده مد نظر قرار گیرد. در این تحقیق برای تحلیل همزمان متغیرها و تعیین دوره بازگشت‌های توأم از توابع کاپولا استفاده شد. همچنین حداکثر ارتفاع آب بالای سرریز و خطر سرریز کردن سد در دوره بازگشت‌های یک متغیره و دومتغیره با توجه به روندیابی مخزن مورد مقایسه قرار گرفت. برای این منظور از داده‌های رواناب ثبت شده در یک دوره آماری ۴۰ ساله در ایستگاه هیدرومتری تمر واقع بر رودخانه گرگانرود در بالادست سد بوستان (گلستان ۲) به همراه مشخصات فنی سد و مخزن آن استفاده شد. نتایج به دست آمده حاکی از مقادیر متفاوتی برای دبی و تراز آب بالای سرریز در دوره بازگشت‌های مختلف به دست آمده از دو شیوه تحلیل فراوانی یک متغیره و دو متغیره می‌باشد. تراز آب بالای سرریز متناظر با دبی اوج خروجی (روندیابی شده) بر اساس تحلیل یک متغیره برای دوره بازگشت ۵۰ سال برابر ۱/۴۲ متر است. اما زمانی که از خروجی توابع کاپولا (دبی و حجم) جهت روندیابی مخزن استفاده شد، تراز آب بالای سرریز برای دوره بازگشت دو متغیره ۵۰ ساله «یا» و «و» به ترتیب برابر ۱/۷۰ متر و ۱/۵۵ متر برآورد گردید. در تحلیل دو متغیره با در نظر گرفتن اثر متقابل وابستگی متغیرهای سیلاب، مقادیر دبی و حجم در دوره بازگشت مورد نظر تعیین می‌گردد که می‌تواند در طراحی یک سازه امن و مقرون بصرفه از اهمیت زیادی برخوردار باشد. همچنین در این تحقیق با تأکید بر طراحی مبتنی بر سیل طرح روندیابی شده، نشان داده شده است که سیل در دوره بازگشت‌های توأم و روندیابی شده می‌تواند منجر به طراحی صحیح‌تر ابعاد سرریز شود.

واژه های کلیدی: تحلیل دو متغیره فراوانی سیل، کاپولا، دوره بازگشت دو متغیره، روندیابی مخزن.

[۱] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان Email: zeynab.afsharypour@gmail.com
[۲] استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان Email: abd.phd@gmail.com
[۳] دانشیار گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان Email: abdolreza.bahremand@yahoo.com
[*] نویسنده مسئول

مقدمه

سیلابی که بر اساس آن طراحی یک سازه آبی انجام می‌گیرد سیل طرح نامیده می‌شود. محاسبه سیل طرح یکی از مهم‌ترین مراحل در مطالعات مهندسی سدهای بزرگ می‌باشد (De Michele and Salvadori, 2005). در طراحی سازه‌های آبی، سیل طرح بر اساس دبی اوج در دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه می‌شود اما در واقع در سیل طرح و بخصوص در طراحی سرریز و مخازن حجم رواناب نیز در کنار دبی حداکثر سیل دارای اهمیت است. تحلیل فراوانی در صورت وجود آمار کافی و امکان برازش تابع توزیع مناسب، یکی از روش‌های مطمئن در برآورد سیلاب طرح به حساب می‌آید. رایج‌ترین روش برای تحلیل فراوانی سیل، تحلیل یک متغیره است که به طور گسترده‌ای در تحلیل دبی اوج برای طراحی بیشتر سازه‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در عین حال که با تحلیل یک متغیره ارزیابی کاملی از احتمال وقوع حوادث هیدرولوژیکی حاصل نمی‌شود (Chebana and Ouarda, 2011)، بسیاری از مسائل هیدرولوژیکی به دانش و اطلاعات کافی درباره دبی اوج سیل، حجم سیل، مدت سیل و شکل هیدروگراف نیاز دارند (Goodarzi et al., 2012). تاکنون به دلایلی از قبیل کمبود داده‌ها، پیچیدگی محاسبات و محدودیت تعداد مدل‌های آماری موجود، تحقیقات قابل توجهی در زمینه تحلیل دو یا چند متغیره پدیده‌های هیدرولوژیکی صورت نگرفته است. یکی از روش‌های سنتی انجام تحلیل‌های چندمتغیره، استفاده از توابع توزیع چند متغیره کلاسیک است که بهره‌گیری از آنها با محدودیت‌های قابل ملاحظه‌ای همراه خواهد بود. از جمله اینکه باید از توزیع آماری یکسانی برای هر دو متغیر دبی و حجم استفاده شود. بعلاوه این توزیع‌ها، متغیرها را مستقل از هم فرض می‌کنند و نمی‌توان وابستگی بین دو متغیر با دو توزیع حاشیه‌ای متفاوت را لحاظ نمود (Salvadori and De Michele, 2004 و بهره‌مند و همکاران، ۱۳۹۴). افزایش تعداد متغیرها در این نوع از توزیع‌ها نیز بر پیچیدگی محاسبات ریاضی می‌افزاید تا جایی که جداسازی رفتار حاشیه‌ای و توأم متغیرها را دشوار خواهد ساخت. برای رفع این محدودیت‌ها، مناسب‌ترین روشی که برای انجام تحلیل‌های چند متغیره پیشنهاد شده است، استفاده از توابع کاپولا می‌باشد. توابع کاپولا در سال ۱۹۵۹ توسط اسکلار معرفی شده (Sklar, 1959) و پس از آن در تحقیقات فراوانی از علم آمار و احتمالات مورد استفاده قرار گرفت. این توابع می‌توانند تابع توزیع مشترک را به توابع توزیع حاشیه‌ای متصل کنند (Zhang et al., 2014). کاربرد مدل‌سازی با توابع کاپولا در هیدرولوژی اولین بار توسط De Michele and Salvadori (2003) با مدل‌سازی همبستگی متغیرهای شدت و مدت بارش مطرح شد. پس از آن این توابع برای تحلیل‌های چند متغیره در زمینه‌های مختلف علم هیدرولوژی از جمله تحلیل پدیده‌های سیل و خشکسالی بکار گرفته شده است (Salvadori and De Michele, 2004، Genest et al. 2007، Wong et al. 2008، Zhao et al. 2017). عبدالحسینی (۱۳۹۱) از توابع کوپلا در تحلیل فراوانی چندمتغیره‌ی جریان‌های کم در ایستگاه‌های منتخب حوزه‌ی آبخیز دریای خزر استفاده نمود. بهره‌مند و همکاران (۱۳۹۴) مروری بر کاربرد این توابع در هیدرولوژی استوکاستیک نمودند. با توجه به اینکه پارامترهای سیل طرح (دبی اوج و حجم) بهم وابسته هستند، با استفاده از توابع کاپولا که توانایی لحاظ نمودن این وابستگی را دارند لزومی به فرض استقلال متغیرها نخواهد بود. با تأکید بر این نکته که تحلیل یک متغیره سیل بر پایه دبی حداکثر باید به تحلیل چندمتغیره با در نظرگیری سایر متغیرها تعمیم داده شده و سایر ویژگی‌ها نیز به همراه دبی برای دوره بازگشت معین برآورد گردد (Mediero et al., 2010)، بوسیله‌ی کاپولای مناسب می‌توان مشخصات سیلاب در دوره بازگشت‌های مشترک مختلف را برآورد نمود (Requena et al., 2013). در واقع دوره بازگشت یک متغیره حاصل از تحلیل دبی اوج یا حجم سیل باعث دست کم گرفتن یا دست بالا گرفتن خطر مربوط به یک رویداد خاص می‌شود (De Michele and Salvadori, 2005). از طرف دیگر به استناد Requena et al. (2013) هیدروگرافی برای

طراحی سد مناسب است که در آن فرایند روندیابی لحاظ گردیده و در واقع دبی ورودی به دبی خروجی از سرریز تبدیل شود. Mediero et al. (2010) طراحی هیدروگراف سیل را با توجه به رابطه بین دبی اوج و حجم سیلاب در مخازن سانتیلانا، انتریپیناس، بوئندیا (غرب اسپانیا) انجام دادند. نتایج نشان داد که با روندیابی مخزن هیدروگراف مصنوعی می‌توان حداکثر تراز سطح آب و حداکثر پخش‌شدگی جریان را برای هر هیدروگراف بدست آورد. بدین ترتیب دوره بازگشت را می‌توان از لحاظ حداکثر تراز سطح آب در مخزن یا حداکثر پخش‌شدگی جریان در نظر گرفت. خروجی این کار هیدروگراف واحد نبوده بلکه یک منحنی با ترکیبات متفاوت از دبی و حجم است. در نهایت طول سرریز را می‌توان بر پایه احتمال تجاوز سطح معینی از آب طراحی کرد. Requena et al. (2013) از توابع کاپولا برای بدست آوردن توزیع مشترک دو متغیره دبی اوج و حجم به منظور طراحی سد در دوره بازگشت‌های دو متغیره در مخزن سانتیلانا (اسپانیا) استفاده کردند. Volpi and Fiori (2014) چارچوب یک ساختار برای طراحی و ارزیابی خطر از یک سازه هیدرولیکی را در یک محیط دو متغیره نشان دادند. Peng et al. (2017) از شبیه‌سازی مونت کارلو با توابع کاپولا جهت بهبود تحلیل ریسک سیلاب برای کنترل برخورد سیلابهای حاصل از شاخه اصلی و شاخه فرعی در پایین دست مخازن اکسیلوجیو و اکسیانگ‌جیاب در رودخانه‌های مین و جینشا استفاده کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از توابع کاپولا قوی‌تر از شبیه‌سازی مونت کارلو به صورت مرسوم می‌باشد چرا که استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو به روش مرسوم باعث دست کم گرفتن ریسک سیلاب می‌شود. محمدپور و همکاران (۱۳۹۵) تحلیل ریسک احتمالاتی حوادث سیل را با استفاده از توابع کاپولای سه متغیره انجام دادند. براساس نتایج حاصل از کار ایشان، دوره بازگشت ثانویه (کندال) ملاک مناسب‌تری برای ارزیابی ریسک حوادث سیل فوق بحرانی می‌باشد.

در تحقیق حاضر، از توابع کاپولا برای تحلیل دو متغیره سیل و تأثیر آن در طراحی سرریز با لحاظ اثر روندیابی مخزن در یک مطالعه موردی با استفاده از دبی‌های ورودی به سد گلستان ۲ استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

حوزه‌ی آبخیز سد گلستان ۲ (بوستان) یکی از مهم‌ترین حوزه‌های سیل‌خیز استان گلستان به شمار می‌آید. این حوزه در شرق استان گلستان بین عرض‌های جغرافیایی ′۲۵ °۳۷ تا ′۴۷ °۳۷ شمالی و طول‌های ′۲۶ °۵۵ تا ′۴ °۵۶ شرقی واقع شده است. مساحت حوزه مورد مطالعه ۱۵۷۸/۷۷ کیلومتر مربع، طول آبراهه اصلی ۸۸ کیلومتر و دارای دامنه ارتفاع ۱۰۰ الی ۲۱۰۰ متر می‌باشد. سد بوستان از نوع خاکی همگن، ارتفاع از پی آن ۳۵ متر، طول تاج آن ۶۶۵ متر و عرض تاج آن ۱۰ متر می‌باشد. سطح مخزن در تراز سرریز ۵۶۰ هکتار است. سرریز سد بوستان از نوع آزاد با طول ۴۰ متر است. همچنین در بدنه سد، یک سیستم تخلیه کننده تحتانی که شامل دو لوله فلزی به قطر ۱۶۰۰ میلی‌متر تعبیه شده است. برای انجام این تحقیق از ۴۰ سال (۱۳۹۲-۱۳۵۳) داده‌های رواناب ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری تمر واقع در بالادست سد بوستان استفاده شد. تحلیل فراوانی سیلاب در مقیاس زمانی روزانه و بر اساس سری حداکثر سالانه انجام شد. برای هر سال، یک واقعه سیل انتخاب شده و دو مؤلفه‌ی دبی اوج و حجم سیل استخراج گردید. بنابراین با توجه به طول دوره آماری یک سری شامل ۴۰ واقعه سیلابی با دو مؤلفه‌ی دبی اوج و حجم متناظر با آن ایجاد شد.

- تعریف کاپولا

یک تابع کاپولا احتمال مشترک از وقایع را به احتمال حاشیه‌ای هر کدام از وقایع برمی‌گرداند بطوریکه رفتار حاشیه‌ای یک متغیره از متغیرهای تصادفی می‌توانند به طور اختصاصی بوسیله وابستگی

آنها مدل‌سازی شود و این امر باعث کابردی‌تر شدن توابع کاپولا می‌شود (Kojadinovic and Yan, 2010). توجه به حالت دو متغیره با رویکرد کاپولا جهت مدل‌سازی وابستگی بین آنها ریشه در قضیه اسکلار دارد. تابع توزیع تجمعی مشترک H(x,y) از هر جفت (x,y) از متغیرهای تصادفی پیوسته به فرم زیر نوشته می‌شود:

$$H(x,y)=C\{F(x),G(y)\}\ ,\ x,y\in R \qquad (۱)$$

که در آن $F(x)$ و $G(y)$ توزیع حاشیه‌ای و دارای تابع چگالی احتمال یکنواخت $U[0,1]$ و $C:[0,1]^2\rightarrow[0,1]$ تابع کاپولا می‌باشد. اسکلار نشان داد که وقتی H مشخص شده باشد $F(x)$، $G(y)$ و C به صورت مجزا تعیین می‌شوند و یک مدل معتبر برای X و Y از معادله (۱) بدست می‌آید (Genest and Faver, 2007).

- **انواع کاپولا**

در جدول (۱) مهم‌ترین توابع کاپولای خانواده مقادیر حدی و ارشمیدسی بکار برده شده در این تحقیق آورده شده است.

جدول (۱) انواع توابع کاپولا

خانواده ارشمیدسی	کلایتون	$C(u_1,u_2;\theta)=(U_1^{-\theta}+U_2^{-\theta}-1)^{-1/\theta}$
	فرانک	$C(u_1,u_2;\theta)=-\theta^{-1}\log\left\{1+\frac{(e^{-\theta u_1}-1)(e^{-\theta u_2}-1)}{e^{-\theta}-1}\right\}$
	گامبل	$C(u,v)=\exp\left\{-[(-\ln u)^{\alpha}+(-\ln v)^{\alpha}]^{1/\alpha}\right\}$
خانواده مقادیر حدی	گالامبوس	$C(u,v)=uv\exp\left([(-\ln u)^{\alpha}+(-\ln v)^{-\alpha}]^{-1/\alpha}\right)$
	هاسلر- ریس	$C(u,v)=\exp\left(-\hat{u}\Phi\left[\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{2}\alpha\log\left(\frac{u}{v}\right)\right]-\hat{v}\Phi\left[\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{2}\alpha\log\left(\frac{u}{v}\right)\right]\right)$
	t-EV	$C_{\rho,v}(u,v)=\exp\left(\log(uv)A_{\rho,v}\frac{\log(u)}{\log(uv)}\right)$

لازم به ذکر است که Demarta and McNeil (2005) دریافتند که کاپولای تی- استیودنت از خانواده بیضوی دارای انطباق با کاپولای مقادیر حدی هم می‌باشد بنابراین کاپولای t-EV را برای این خانواده معرفی کردند.

مراحل انتخاب نوع کاپولا شامل: ۱- ارزیابی وابستگی اولیه ۲- تخمین پارامتر توابع کاپولا ۳- آزمون نیکویی برازش می‌باشد. در این تحقیق از نرم‌افزار R و Matlab جهت تحلیل فراوانی سیل به صورت دو متغیره استفاده شده است.

ارزیابی وابستگی اولیه

سنجش وابستگی برای درک مقدار کمی وابستگی بین متغیرها ضروری است (Genest and Faver, 2007). در این تحقیق از ضرایب همبستگی رئو اسپیرمن و تاو کندال که بصورت ناپارامتریک و بر اساس رتبه می‌باشند برای تعیین وابستگی اولیه متغیرهای دبی و حجم استفاده شد.

- **تخمین پارامتر توابع کاپولا**

تخمین پارامتر (θ) تابع کاپولا $C(u,v)$ می‌تواند به روش‌های مختلف انجام شود. روش‌های عکس تاو

کندال، عکس رئو اسپیرمن و حداکثر شبه‌درستنمایی از جمله روش‌های مبتنی بر رتبه هستند که در آنها تخمین پارامتر مستقل از توزیع حاشیه‌ای می‌باشد. روش‌های عکس تاو کندال و عکس رئو اسپیرمن مبتنی بر گشتاورها هستند. روش حداکثر شبه‌درستنمایی، مشابه روش مرسوم حداکثر درستنمایی است اما در آن از توزیع حاشیه‌ای تجربی به جای توزیع حاشیه‌ای پارامتری استفاده می‌شود (Requena et al., 2013).

- **آزمون نیکویی برازش کاپولا**

هدف از انجام آزمون نیکویی برازش، انتخاب مناسب‌ترین کاپولا است که ساختار وابستگی بین متغیرها را به خوبی نشان دهد. ابزارهای گرافیکی و آزمون‌های عددی برای رسیدن به این هدف وجود دارد. اگرچه ابزارهای گرافیکی مفهوم کلی آزمون نیکویی برازش را بیان می‌کنند اما آزمون‌های عددی برای تعیین کمیت آن مورد نیاز خواهند بود. Kojadinovic and Yan (2009) روش ضرایب در محاسبه مقدار p برای آماره کرامر- ون مایسس (S_n) را ارائه کردند که از دقت و کارایی بالایی برخوردار است. نتایج نشان می‌دهد که بطور کلی آزمون کرامر- ون مایسس (S_n) که بر اساس کاپولای تجربی می‌باشد رفتار مناسبی برای همه مدل‌های کاپولا دارد. این روش به صورت زیر ارائه می‌شود:

(۲)
$$S_n = \sum_{i=1}^{n}\left\{C_n\left(\frac{R_i}{n+1},\frac{S_i}{n+1}\right)-C_{\theta_n}\left(\frac{R_i}{n+1},\frac{S_i}{n+1}\right)\right\}^2$$

بطوریکه C_n کاپولای تجربی (ناپارامتریک و بر اساس رتبه) می‌باشد که رابطه آن به صورت زیر است:

(۳)
$$C_n(u,v)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}1\left(\frac{R_i}{n+1}\le u,\frac{S_i}{n+1}\le v\right),\ u,v\in[0,1]$$

و در آن $1(A)$ شمارنده تعداد دفعات برقراری تابع است. این نوع کاپولا نقش مهمی در برازش توابع کاپولا بر داده‌های مشاهداتی دارد. همچنین به محاسبه مقدار p مربوط به آزمون نیکویی برازش برای انتخاب بهترین مدل کاپولا تأکید می‌شود (عبدالحسینی، ۱۳۹۱). مقدار p می‌تواند برای طبقه‌بندی مدل‌های کاپولا و پذیرفتن و رد کردن آنها استفاده شود (Salvadori and De Michele, 2011). مقدار تقریبی آماره p با توجه به رابطه زیر می‌باشد:

$$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}1\left(S_n^k \le S_n\right) \qquad (۴)$$

در نتیجه برای انتخاب شدن، تابع کاپولا باید کمترین مقدار S_n و مقدار p قابل قبول را داشته باشد ($p>0.05$). در این تحقیق به منظور ایجاد ابزار گرافیکی لازم از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای تولید داده‌های تصادفی استفاده شده است. در این روش تعداد ۱۰،۰۰۰ نمونه تصادفی بر مبنای کاپولای مورد نظر تولید شده و به همراه داده‌های مشاهداتی بر روی یک نمودار ترسیم می‌گردد.

- **دوره بازگشت دو متغیره**

یک مسئله مهم در برنامه‌های کاربردی برای شناسایی حوادث، داشتن یک دوره بازگشت معین است. چندین روش برای برآورد دوره بازگشت با استفاده از توابع کاپولا وجود دارد که با توجه به شرایط مورد نظر، کاربردهای متفاوتی دارند از جمله Salvadori et al., (2007):

۱- دوره بازگشت «یا»
۲- دوره بازگشت «و»
۳- دوره بازگشت ثانویه (کندال)
۴- دوره بازگشت شرطی

در این تحقیق دوره بازگشت‌های «یا» و دوره بازگشت «و» جهت تحلیل فراوانی دو متغیره سیل بکار برده شده است.

در دوره بازگشت $T^{\wedge}_{X,Y}$ که آن را دوره بازگشت « و» گویند، مطابق رابطه زیر، هر دو متغیر تصادفی X و Y از حد آستانه x و y بیشتر هستند:

$$T^{\wedge}_{X,Y}=\frac{\mu}{P(X>x\wedge Y>y)}=\frac{\mu}{1-F(x)-G(y)+C(F(x),G(y))} \qquad (۵)$$

که در آن C کاپولای منتخب است و به صورت $C(F(x),G(y))=P(X>x\wedge Y>y)$ می‌باشد. μ نیز میانگین فاصله زمانی بین دو رویداد متوالی است و برای رویدادهای حداکثر سالانه برابر یک در نظر گرفته می‌شود. x و y مقادیر حد آستانه برای دو متغیر حاشیه‌ای دبی و حجم می‌باشد. $F(x)$ و $G(y)$ مقادیر توزیع حاشیه‌ای برای متغیرهای حاشیه‌ای دبی و حجم هستند. در این حالت مقادیری از سری داده‌های دبی و حجم که هر دو از حد آستانه مد نظر بیشتر هستند به عنوان خطر در نظر گرفته می‌شود.

در دوره بازگشت $T^{\vee}_{X,Y}$ که به آن دوره بازگشت «یا» گویند، مطابق رابطه زیر یکی از متغیرهای Y یا X از حد آستانه x یا y بیشتر می‌باشد (Requena et al., 2013):

$$T^{\vee}_{X,Y}=\frac{\mu}{P(X>x\vee Y>y)}=\frac{\mu}{1-C(F(x),G(y))} \quad (۶)$$

که در آنها C، کاپولا منتخب می‌باشد و عبارت است از: $C(F(x),G(y))=P(X>x\vee Y>y)$. در این حالت در سری داده‌ها هر کدام از پارامترهای دبی یا حجم که از حد آستانه مورد نظر بیشتر هستند به عنوان خطر در نظر گرفته می‌شوند.

روندیابی مخزن

در روندیابی سیل مخزن با داشتن هیدروگراف سیل در بالا دست مخزن، هیدروگراف در پایین دست مخزن تعیین می‌شود. طراحی سرریز سد بر اساس دبی طراحی برای یک دوره بازگشت مشخص از روی آمار دبی ورودی به سد انجام می‌شود، در حالی‌که مخزن سد حتی با فرض پر بودن، تأثیر بسزائی بر مقدار این دبی دارد. بهره‌مند (۱۳۷۶) روش‌های مختلف هیدرولوژیکی روندیابی مخزن را با یکدیگر مقایسه کرده و تکنیک‌های مختلف حل اعم از گرافیکی، جدولی و عددی را ارائه نمود. وی به خوبی نشان داد که چگونه مخازن بزرگ حتی با فرض پر بودن، همچنان در کاهش دبی پیک سیلاب ورودی تأثیر زیادی دارند. بر این اساس، در طراحی سرریزها، در نظر گرفته شدن اثر روندیابی منجر به یک طراحی مقرون به صرفه‌تر و باعث کاهش هزینه می‌شود. چون میزان تأثیر مخزن بر کاهش دبی سیل ورودی، هم به دبی اوج سیل بستگی دارد و هم به حجم آن (بهره‌مند، ۱۳۷۶) و نیز با توجه به اینکه توابع کاپولا صحیح‌ترین شیوه تحلیل در مواجه با پدیده‌های دو یا چند متغیره که در آنها وابستگی بین متغیرها جدی است را ارائه می‌کنند، در این تحقیق این نکته مهم از طریق توابع کاپولا لحاظ شده است.

در این مطالعه از روش پالس به منظور روندیابی یک متغیره و دو متغیره مخزن سد بوستان استفاده شد. لازم به ذکر است که برای روندیابی مخزن ابتدا باید هیدروگراف واحد سیل ورودی به مخزن ترسیم گردد. یک هیدروگراف مصنوعی که ویژگی‌های آماری از مشاهدات دبی، حجم و مدت را در خود حفظ می‌کند طی سه مرحله تولید می‌شود (Mediero et al., 2010):

۱- تولید دبی پیک مصنوعی

۲- تولید حجم مصنوعی از دبی پیک مصنوعی

۳- تولید یک هیدروگراف برای هر جفت دبی و حجم که دارای مدت زمان معلوم است.

با توجه به این که هدف صرفاً نشان دادن تأثیر لحاظ کردن روندیابی در طراحی است، لذا به منظور حفظ سادگی در این تحقیق از هیدروگراف واحد مثلثی استفاده شده است (قاعدتاً برای تولید یک هیدروگراف تیپیک می‌توان از مدل‌های هیدرولوژیک نیز بهره گرفت). در تهیه هیدروگراف واحد مثلثی از زمان تمرکز حوزه و دبی‌های پیک در دوره بازگشت‌های مختلف استفاده شد (مهدوی، ۱۳۸۸). بعد از رسم هیدروگراف واحد مثلثی می‌توان روندیابی مخزن را به روش پالس انجام داد (مهدوی، ۱۳۸۸ و بهره‌مند، ۱۳۷۶).

نتایج و بحث

انتخاب کاپولا

به منظور انجام تحلیل فراوانی به صورت دو متغیره لازم است تا توزیع حاشیه‌ای حاکم بر هر کدام از متغیرهای دبی و حجم تعیین شود. برای این منظور از نرم‌افزار EasyFit که تخمین پارامتر آن بر پایه روش حداکثر درستنمایی (MLE) می‌باشد، استفاده شد. نتایج حاصل از نیکویی برازش آنها در جدول (۲) آورده

شده است. هر چقدر مقدار آماره‌های کلموگروف- اسمیرنوف، کای- اسکوئر و اندرسون- دارلینگ کمتر باشد در صورتی که مقدار P قابل قبولی ($p>0.05$) داشته باشند نشان دهنده برازش بهتر آن توزیع بر روی داده‌های مورد نظر است. سپس باید ساختار وابستگی اولیه بین این متغیرها تعیین شود زیرا تعیین نوع وابستگی اولیه در انتخاب نوع کاپولا می‌تواند مؤثر باشد. بین دو متغیر دبی اوج و حجم مقدار همبستگی بر اساس ضریب تاو کندال (τ_k) برابر ۰/۸۱ و با توجه به ضریب رئو اسپیرمن (ρ_s) برابر ۰/۹۳ برآورد شد. با توجه به اینکه مقدار همبستگی بین دو متغیر دبی اوج و حجم نزدیک به یک می‌باشند، بنابراین کاپولای منتخب می‌تواند از خانواده مقادیر حدی و یا ارشمیدسی باشد.

مهم‌ترین بخش تحلیل فراوانی چند متغیره با استفاده از توابع کاپولا، آزمون نیکویی برازش برای انتخاب بهترین نوع کاپولا می‌باشد. نتایج حاصل از تخمین پارامتر و نیکویی برازش توابع کاپولا در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول (۲) نتایج حاصل از آزمون نیکویی برازش توابع توزیع حاشیه‌ای

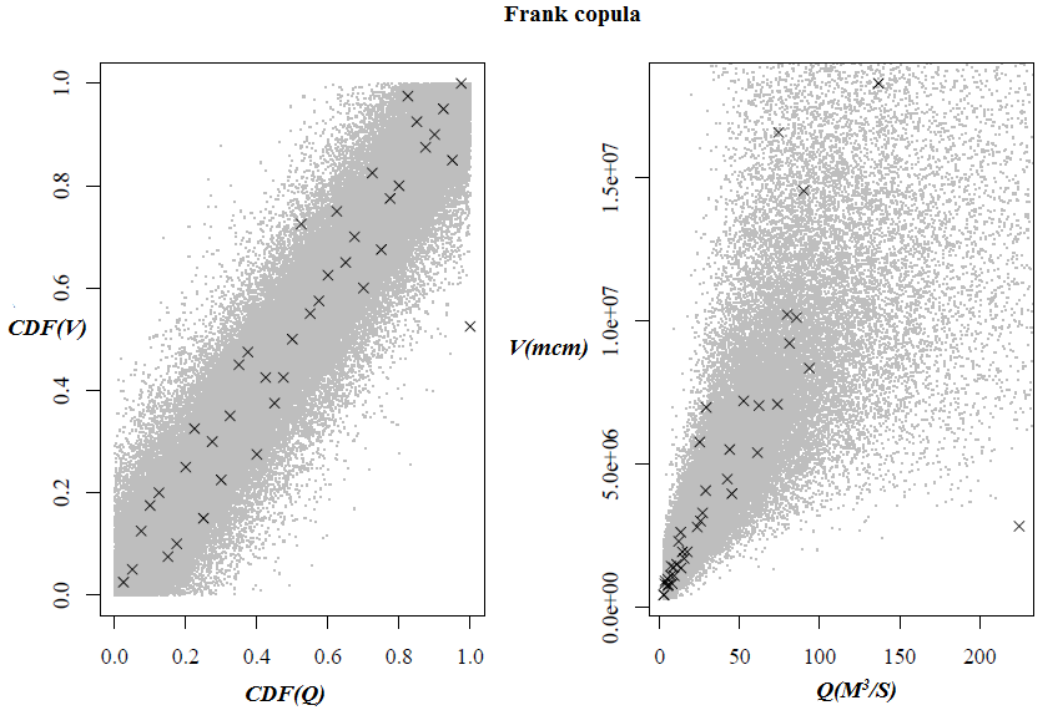
متغیر حاشیه‌ای		توزیع منتخب	آزمون نیکویی برازش			مقدار P
			کلموگروف- اسمرینف	کای- اسکوئر	اندرسون- دارلینگ	
	دبی اوج	ویبول سه پارامتری	۰/۰۸۱۳	۱/۰۹۳	۴/۱۲۸	۰/۹۳۴۳
	حجم	لوگ نرمال سه پارامتری	۰/۰۹۳	۲/۳۶۳	۰/۳۳۲	۰/۸۴۱۳

جدول (۳) مقادیر مربوط تخمین پارامتر و نیکویی برازش توابع کاپولا

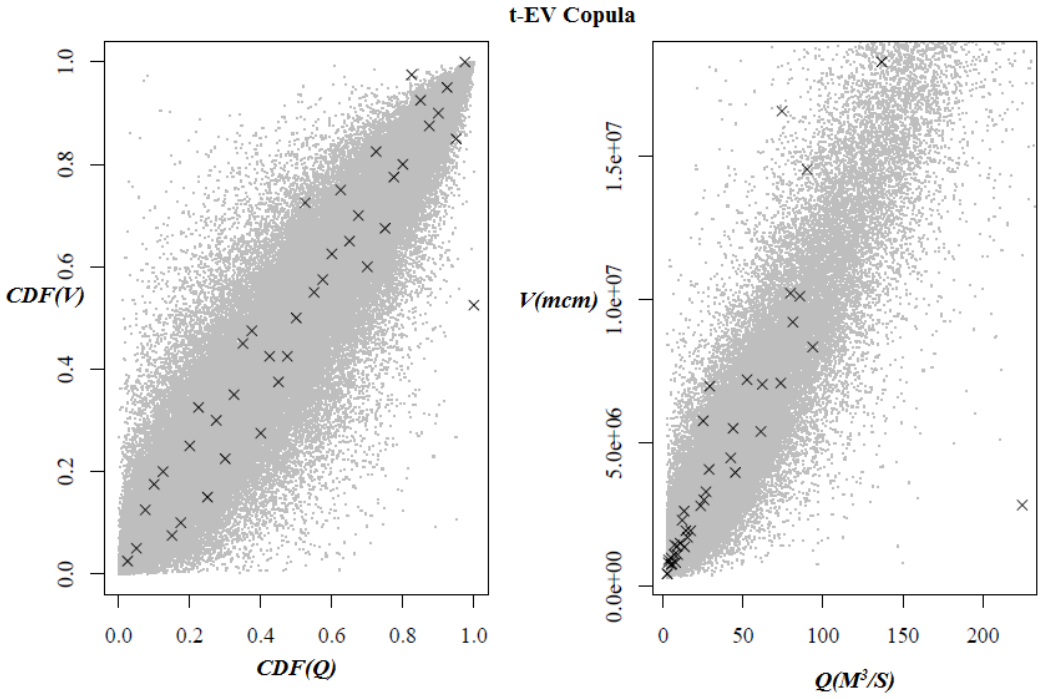
کاپولا	روش تخمین پارامتر			معیار نیکویی برازش	
	پارامتر	حداکثر شبه درستنمایی	معکوس تاو کندال	معکوس رئو اسپیرمن	آماره S_n	مقدار P
گامبل	θ	۳/۹۶۷۰	۵/۲۷۰۲	۴/۵۹۸۴	۰/۰۳۴۷	۰/۰۲۳۴
گالامبوس	θ	۳/۲۵۱۱	۴/۵۶۰۹	۳/۸۶۹۲	۰/۰۳۷۷۴	۰/۰۴۰۴
هاسلر- ریس	θ	۲/۷۸۲۳	۵/۵۴۰۱	۴/۶۸۴۱	۰/۰۸۸۴	۰/۰۱۶۴
t-EV	θ	۰/۹۸۲۴	۰/۹۸۶۴	۰/۹۸۲۱	۰/۰۲۴۸	۰/۲۴۴۲
کلایتون	θ	۵/۴۷۰۷	۸/۵۴۰۵	۷/۳۵۶۹	۰/۰۴۶۸	۰/۰۴۳۴
فرانک	θ	۱۸/۶۱۵۳	۱۹/۲۸۲۷	۱۵/۴۵۹۰	۰/۰۱۶۰	۰/۱۶۶۳

تأیید نهایی برای انتخاب مناسب‌ترین نوع کاپولا با استفاده از ابزارهای گرافیکی صورت می‌گیرد. برای جلوگیری از ارائه تعداد زیادی از تصاویر فقط نمودارهای مربوط به شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای کاپولاهای فرانک و t-EV نشان داده می‌شود. همانطور که در شکل‌های (۱ و ۲) مشاهده می‌شود، نقاط با علامت × نشان‌دهنده داده‌های مشاهداتی و هاله ابرمانند نشان‌دهنده نقاط شبیه‌سازی شده است که در ستون سمت راست این شکل‌ها آورده شده است. همچنین مقادیر احتمال تجمعی تجربی داده‌ها و مقادیر احتمال تجمعی ۱۰،۰۰۰ داده شبیه‌سازی شده به روش مونت‌کارلو با توجه به کاپولای مورد نظر بر روی نمودار ترسیم شده‌اند که در سمت چپ این شکل‌ها آورده شده است. با تحلیل این نمودارها و مقادیر آماره بدست آمده از معیارهای نیکویی براش می‌توان مناسب‌ترین تابع کاپولای برازش داده شده بر روی داده‌ها را جهت تعیین وابستگی بین متغیرهای حاشیه‌ای تعیین نمود. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون نیکویی برازش به صورت عددی و گرافیکی، کاپولای مناسب، کاپولای فرانک و بعد از آن کاپولای t-EV می‌باشد زیرا مقدار P

آنها بالاتر از ۰/۰۵ بوده و مقدار آماره S_n آنها در مقایسه با سایر توابع کاپولا دارای مقدار کمتری است. کاپولای فرانک که مربوط به خانواده ارشمیدسی است، وابستگی بین متغیرهای دبی و حجم را در دنباله پایین نشان می‌دهد. اما خانواده مقادیر حدی وابستگی مثبت بین متغیرها را در دنباله بالا نشان می‌دهند. از آنجا که برای طراحی سد و ارزیابی خطر سر ریز کردن سد، کاپولایی مناسب است که وابستگی بین متغیرهای حاشیه‌ای را در دنباله بالا نشان دهد، در بین کاپولاهای مقادیر حدی، کاپولای t-EV، نسبت به بقیه توابع این خانواده برازش بهتری را نشان می‌دهد.



شکل (۱) نمودار شبیه‌سازی شده مربوط به کاپولای فرانک



شکل (۲) نمودار شبیه‌سازی شده مربوط به کاپولای t-EV

- **تعیین دوره بازگشت دو متغیره**

بعد از انتخاب نوع کاپولا می‌توان دوره بازگشت‌های توأم حالت «یا» و «و» را بر اساس کاپولای منتخب محاسبه نمود. لازم به ذکر است که حد آستانه در محاسبه دوره بازگشت‌های توأم برای هر یک از متغیرهای دبی و حجم برابر مقدار متناظر با دوره بازگشت‌های مختلف در حالت یک متغیره می‌باشد. دوره بازگشت‌های یک متغیره و توأم (بر اساس کاپولای فرانک و t-EV) و نیز مقادیر دبی و حجم متناظر با آنها در جدول (۴) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای هر دو کاپولای منتخب، دوره بازگشت دو متغیره در حالت «یا» مقدار کمتری نسبت به دوره بازگشت در حالت یک متغیره و همین‌طور نسبت به حالت «و» دارد. دوره بازگشت دو متغیره در حالت «و» نسبت به دوره بازگشت در حالت یک متغیره و حالت «یا» مقدار بیشتری دارد. چنانچه بخواهیم در حالت «یا» به دوره بازگشت برابر با حالت یک متغیره برسیم، مقادیر دبی و حجم متناظر، بیشتر از مقدار مربوطه در حالت یک متغیره می‌شود. با افزایش مقدار دبی و حجم در این حالت، طراحی سد با اطمینان بیشتری نسبت به حالت یک متغیره و حالتی که دوره بازگشت «و» باشد صورت می‌گیرد. در دوره بازگشت دو متغیره حالت «و» در هر واقعه سیلابی باید هر دو پارامتر دبی و حجم از حد آستانه مورد نظر بیشتر شود که احتمال وقوع چنین حالتی کمتر است. در نتیجه مقدار دوره بازگشت در این حالت بیشتر از حالت یک متغیره می‌شود. اگر بخواهیم از دوره بازگشت دو متغیره حالت «و» به دوره بازگشت یک متغیره برسیم، مقادیر دبی و حجم کمتر از مقادیر متناظر در حالت یک متغیره می‌شود. با کاهش مقادیر در این حالت، طراحی سد با ریسک بالاتری صورت می‌گیرد زیرا احتمال وقوع سیلابی که هم دبی و هم حجم هر دو از حد آستانه بیشتر باشد کمتر است. اما به هر حال از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر می‌باشد.

جدول (۴) مقادیر دوره بازگشت‌های مختلف و حجم و دبی متناظر با آنها

دوره بازگشت یک‌متغیره	کاپولای فرانک		کاپولای t-EV		دبی (m^3/s)	حجم (mcm)
	دوره بازگشت توأم «یا»	دوره بازگشت توأم «و»	دوره بازگشت توأم «یا»	دوره بازگشت توأم «و»		
۵۰	۲۸/۹۵	۱۸۳/۱۷۷	۴۳/۲۳	۵۹/۲۸	۲۱۵/۴۵	۲۷/۲۹۱
۱۰۰	۵۴/۲۶	۶۳۵/۸۸	۸۶/۳۹	۱۱۸/۶۹	۲۷۲	۳۷/۶۱۸
۵۰۰	۲۵۴/۵۶	۱۳۹۲۷	۴۳۱/۷۰	۵۹۳/۹۶	۴۱۷/۹۲	۷۲/۱۸
۱۰۰۰	۵۰۴/۶۱	۱۰۰۰۰۰۰۰	۸۶۳/۳۳	۱۱۸۸/۰۷	۴۸۶/۴۴	۹۲/۷۶۹

در این تحقیق با دو کاپولای فرانک و کاپولای t-EV روبرو هستیم که دارای مقدار دوره بازگشت‌های متفاوتی با توجه به مقادیر یکسان دبی و حجم می‌باشند. با مقایسه ریسک مربوط به کاپولای فرانک و کاپولای t-EV می‌توان کاپولای مناسب جهت طراحی سرریز سد را انتخاب کرد. با توجه به جدول (۴) اگر چه مقدار دوره بازگشت «یا» حاصل از کاپولای t-EV بیشتر از مقدار دوره بازگشت «یا» حاصل از کاپولای فرانک می‌باشد و این تفاوت در دوره بازگشت‌های بالاتر نیز بیشتر می‌شود، اما مقدار دوره بازگشت «و» حاصل از کاپولای t-EV کمتر از مقدار دوره بازگشت «و» حاصل از کاپولای فرانک است. جهت طراحی سد و خطر شکست یک سازه، باید هر دو متغیر دبی اوج و حجم، بالاتر از حد آستانه مورد نظر باشند لذا دوره بازگشت دو متغیره «و» مد نظر است. بنابراین بر عکس آنچه که از کاپولای مقادیر حدی (t-EV) انتظار می‌رود، کاپولای فرانک ریسک را در ارتباط با دوره بازگشت ناچیز می‌گیرد. از این رو این تحلیل نشان می‌دهد که در نظر نگرفتن وابستگی دنباله بالا در مدل‌سازی توأم رویدادهای شدید (سیلابی که دبی و حجم آن بالاتر از حد آستانه باشد) می‌تواند منجر به کم برآورد شدن ریسک گردد. بنابراین بهترین نوع کاپولا در این تحقیق، کاپولای t-EV می‌باشد.

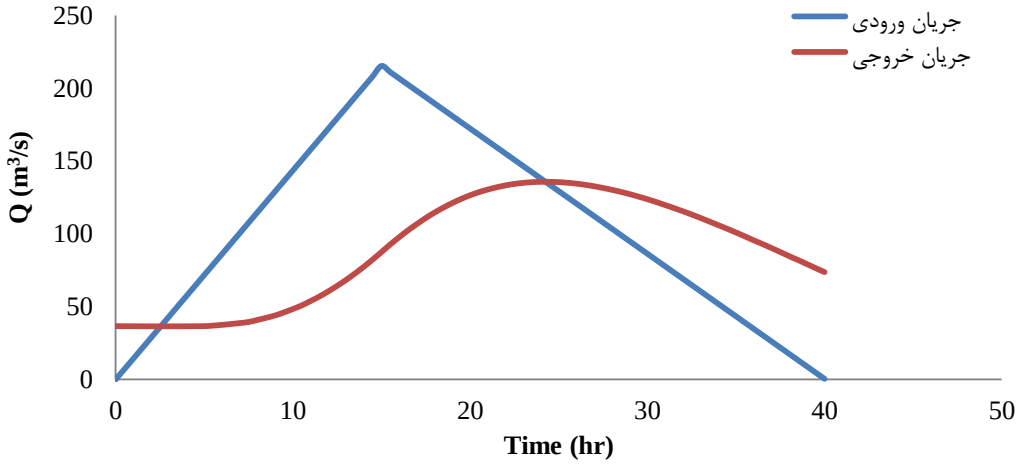
روندیابی مخزن

به منظور روندیابی مخزن سد بوستان ابتدا باید هیدروگراف ورودی به مخزن سد ترسیم گردد. در این مطالعه با توجه به اطلاعات در دسترس، روش هیدروگراف واحد مثلثی از بین روش‌های موجود انتخاب گردید. برای رسم این هیدروگراف در حالت یک متغیره، باید دبی اوج که نقش ارتفاع هیدروگراف را ایفا می‌کند در یک دوره بازگشت مشخص که با توجه به طراحی سد بوستان دوره بازگشت ۵۰ ساله می‌باشد تعیین شود. همچنین برای بدست آوردن زمان تا اوج و زمان پایه که همان قاعده هیدروگراف است به زمان تمرکز حوزه نیاز داریم که با توجه به پژوهش ایزدی (۱۳۹۱) که به شناسایی و رتبه‌بندی پهنه‌های سیل‌خیز با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa پرداختند، زمان تمرکز حوزه سد بوستان با استفاده از مدل برابر ۱۵ ساعت محاسبه شده است. حال با داشتن زمان پایه و دبی اوج می‌توان ابعاد هیدروگراف ورودی به مخزن را در حالت یک متغیره ترسیم نمود (مهدوی، ۱۳۸۸). برای ترسیم هیدروگراف ورودی با استفاده از خروجی‌های کاپولا (دبی و حجم)، ابتدا لازم است که دوره بازگشت ۵۰ ساله حالت «یا» و «و» محاسبه شود تا بتوان مقادیر متناظر دبی و حجم آنها را تعیین کرد. مقدار دوره بازگشت دو متغیره ۵۰ ساله «یا » و «و»، بر اساس کاپولای t-EV محاسبه گردید. با توجه به این موضوع که حد آستانه در محاسبه دوره بازگشت‌های توأم برای هر یک از متغیرهای دبی و حجم برابر مقدار متناظر با دوره بازگشت در حالت یک متغیره می‌باشد، مقادیر دبی و حجم متناظر با دوره بازگشت‌های یک متغیره با توجه به توزیع حاشیه‌ای آنها (توزیع ویبول سه پارامتری برای متغیر دبی اوج و توزیع لوگ نرمال سه پارامتری برای متغیر حجم) تعیین شد که در جدول (۵) آورده شده است.

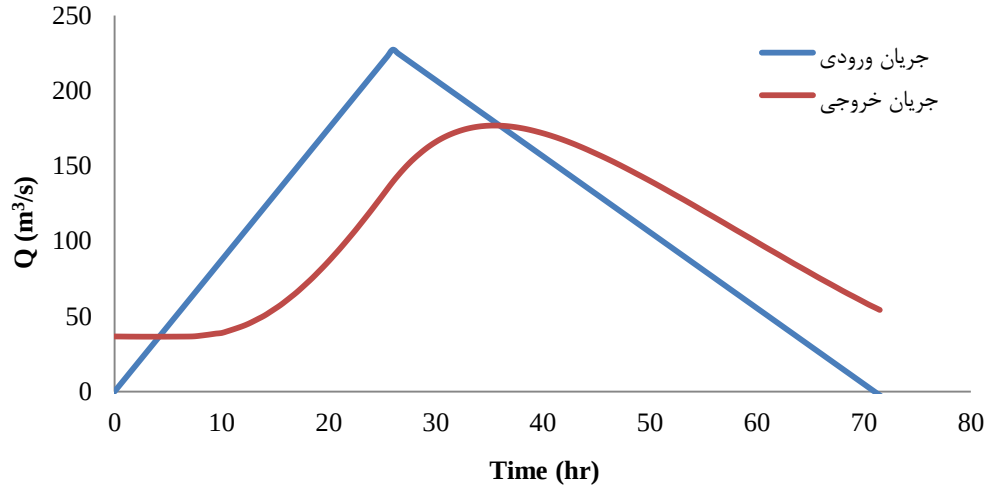
جدول (۵) مقادیر دبی و حجم مربوط به دوره بازگشت ۵۰ ساله

دوره بازگشت در حالت یک‌متغیره	دوره بازگشت در حالت «یا»	دوره بازگشت در حالت «و»	دبی (m^3/s)	حجم (m^3)
۵۰	-	-	۲۱۵/۴۵	-
۵۸	۵۰	-	۲۲۷/۲۱	۲۹۴۸۸۰۰۰
۴۲	-	۵۰	۲۰۱/۸۸	۲۵۰۴۸۰۰۰

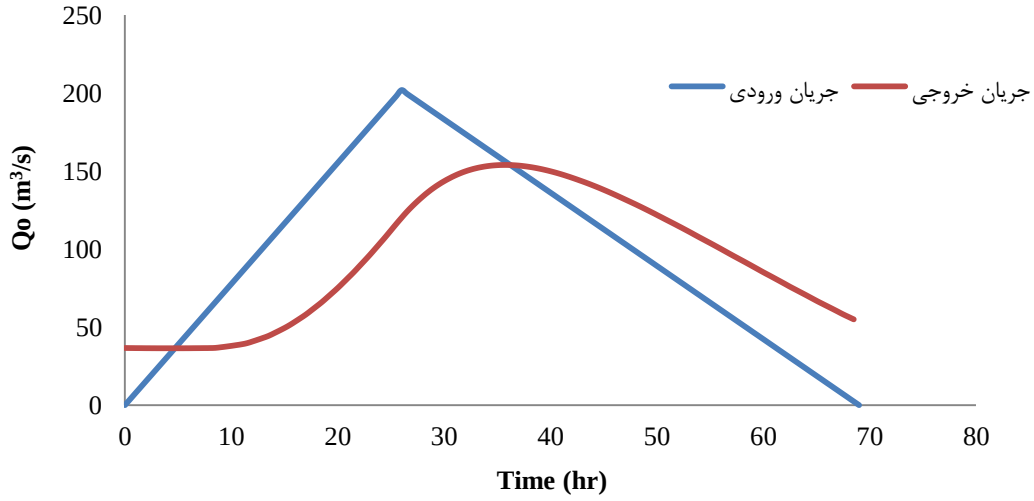
همانطور که در جدول(۵) ذکر شده است، دوره بازگشت ۵۰ ساله در حالت «یا» معادل دوره بازگشت ۵۸ ساله یک متغیره و دوره بازگشت ۵۰ ساله در حالت «و» معادل دوره بازگشت ۴۲ ساله حالت یک متغیره می‌باشد. با داشتن مقادیر دبی و حجم متناظر با دوره بازگشت‌های توأم ۵۰ ساله، مدت زمان پایه هیدروگراف محاسبه گردید. سپس هیدروگراف ورودی به مخزن سد ترسیم شد و روندیابی مخزن سد بوستان در دوره بازگشت‌های یک متغیره و توأم ۵۰ ساله با فرض پر بودن مخزن سد انجام شد. منظور از فرض مخزن پر اینست که تراز آب در ابتدای روندیابی کف سرریز بالایی در نظر گرفته شود. شکل‌های ۳ تا ۵ نمودارهای روندیابی مخزن سد بوستان را در دوره بازگشت‌های یک متغیره و توأم نشان می‌دهند. نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان می‌دهند که مخزن سد با وجود پر بودن در کاهش دبی اوج سیل تأثیر دارد و با ذخیره کردن موقت آب در سطح مخزن و ارتفاع بالاتر از کف سرریز، دبی خروجی از سد را کمتر از دبی ورودی به مخزن می‌کند، هر چند که تغییری در حجم سیلاب ایجاد نمی‌شود. این کار نشان می‌دهد که روندیابی مخزن در طراحی سد و همچنین خطر سرریز کردن سد و خسارات پایین دست نقش مهمی دارد. بنابراین با توجه به مخزن، طول تاج سرریز و اینکه سرریز به صورت کنترلی یا غیر کنترلی باشد هر یک از دو پارامتر دبی یا حجم می‌تواند اثر بیشتری در تعیین ریسک داشته باشد. مجموعه‌ای از هیدروگراف‌ها با مشخصه‌های متفاوت (دبی پیک مشابه و حجم سیل متفاوت) یا (دبی پیک متفاوت و حجم سیل مشابه) می‌توانند دارای دوره بازگشت یکسانی باشند (بر حسب اینکه معیار حدی بر کدام یک استوار باشد دبی یا حجم). بنابراین دبی و حجم به طور مستقل نمی‌توانند به عنوان آستانه ارزیابی خطر سرریز کردن سد بکار گرفته شوند. آستانه باید به عنوان تراز آب که در برگیرنده حجم و دبی در مخزن سد است تعریف شود. در این تحقیق با فرض اینکه سرریز، دبی خروجی حاصل از روندیابی را به طور کامل از خود عبور دهد، ارتفاع آب بالای سرریز در دوره بازگشت‌های یک متغیره و توأم حالت «یا» و «و» با توجه به فرمول سرریز تعیین گردید که در جدول (۶) ارائه شده است.



شکل (۳) نمودار روندیابی مخزن سد بوستان در دوره بازگشت ۵۰ ساله در حالت یک متغیره



شکل (۴) نمودار روندیابی مخزن سد بوستان در دوره بازگشت ۵۰ ساله در حالت دو متغیره «یا»



شکل (۵) نمودار روندیابی مخزن سد بوستان در دوره بازگشت ۵۰ ساله در حالت دو متغیره «و»

جدول (۶) تراز آب بالای سرریز در دوره بازگشت‌های ۵۰ ساله در حالت یک متغیره و دومتغیره

دوره بازگشت ۵۰ ساله در حالت:	دبی اوج هیدروگراف ورودی (m^3/s)	دبی اوج هیدروگراف خروجی (m^3/s) (روندیابی شده)	ارتفاع آب بالای سرریز متناظر با دبی اوج ورودی (m) (روندیابی نشده)	ارتفاع آب بالای سرریز متناظر با دبی اوج خروجی (m) (روندیابی شده)
یک‌متغیره	۲۱۵	۱۳۶	۱/۹۴	۱/۴۲
دومتغیره حالت «یا»	۲۲۷	۱۷۷	۲/۰۰	۱/۷۰
دومتغیره حالت «و»	۲۰۲	۱۵۴	۱/۸۵	۱/۵۵

همانطور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود در دوره بازگشت یک متغیره و همچنین دوره بازگشت‌های توأم حالت «یا» و «و» ارتفاع آب بالای سرریز با توجه به دبی ورودی به مخزن (روندیابی نشده) بیشتر از ارتفاع آب بالای سرریز با توجه به دبی خروجی از مخزن (روندیابی شده) می‌باشد. این امر لدان معناست که با در نظر گرفتن جریان ورودی به تنهایی، حجم ذخیره موقت آب در مخزن نادیده گرفته می‌شود ولی با انجام روندیابی مخزن، ذخیره موقت آب در مخزن در نظر گرفته شده و می‌تواند در طراحی ابعاد سرریز سد به طور مؤثر مورد استفاده قرار گیرد. در دوره بازگشت حالت «یا» ارتفاع آب بالای سرریز بیشتر از حالت یک متغیره و توأم «و» است. در حالی که در دوره بازگشت دو متغیره «و» تراز آب بالای سرریز کمتر از دو دوره بازگشت یک متغیره و توأم «یا» می‌باشد. بنابراین بر اساس هدف مورد نظر در احداث سازه سد می‌توان ابعاد سرریز را با استفاده از روندیابی مخزن در دوره بازگشت‌های توأم «یا» و «و» که دارای دقت بیشتری نسبت به حالت یک متغیره هستند محاسبه نمود.

نتیجه‌گیری

تحلیل فراوانی سیلاب مطمئن‌ترین روش در برآورد سیلاب طرح می‌باشد. در سیل طرح علاوه بر دبی اوج، حجم رواناب هم بخصوص در طراحی ابعاد سد مهم است. استفاده از توابع توزیع چندمتغیره کلاسیک دارای محدودیت‌هایی از جمله این مورد است که هر یک از متغیرهای دبی اوج و حجم باید دارای توزیع حاشیه‌ای یکسانی بوده و نمی‌توان وابستگی بین دو متغیر را با توزیع‌های حاشیه‌ای متفاوت لحاظ کرد. این در حالی است که توابع کاپولا این محدودیت‌ها را ندارند. در تحلیل فراوانی به صورت یک متغیره تنها یک عدد برای دبی و یا حجم را در دوره بازگشت مورد نظر به دست می‌آید اما در تحلیل فراوانی به صورت چند متغیره با استفاده از توابع کاپولا می‌توان با در نظر گرفتن اثر متقابل متغیرهای مربوط به سیلاب، مقادیری از دبی و حجم را برای هر دوره بازگشت تعیین نمود. در طراحی سرریزها، لحاظ کردن اثر روندیابی مخزن سد منجر به طراحی مقرون به صرفه‌تر می‌شود. با انجام روندیابی مخزن، تأثیر ذخیره موقتی حجم آب در مخزن در نظر گرفته شده و می‌تواند در طراحی ابعاد سد به طور مفیدی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اینکه میزان تأثیر مخزن سد بر کاهش دبی سیل ورودی هم به دبی اوج و هم حجم بستگی دارد، در این تحقیق این نکته مهم از طریق توابع کاپولا لحاظ گردید. همچنین می‌توان دوره بازگشت‌های توأم را به درستی با استفاده از این توابع محاسبه نمود.

نتایج نشان می‌دهد که مقادیر دبی و تراز آب بالای سرریز در دوره بازگشت‌های مختلف به دو روش تحلیل یک متغیره و تحلیل دو متغیره متفاوت هستند. دوره بازگشت دو متغیره «یا» و «و» نشان می‌دهند که طراحی بر اساس هیدروگراف ورودی روندیابی نشده با در نظر گرفتن یکی از پارامترهای هیدروگراف (مثلا دبی اوج) به تنهایی، منجر به بیش برآورد دبی طراحی و متعاقباً تحمیل هزینه اضافی می‌شود. از این رو چنانچه در طراحی سد، هزینه خسارات پایین‌دست سد در اولویت باشد می‌توان طراحی را بر اساس روندیابی مخزن در دوره بازگشت دو متغیره حالت «یا» انجام داد

که از ضریب اطمینان بالاتری نسبت به دوره بازگشت یک متغیره برخوردار است. اگر هزینه احداث سد مد نظر باشد می‌توان از روندیابی مخزن در دوره بازگشت دو متغیره حالت «و» استفاده کرد. بدین ترتیب، هر دو پارامتر سیل یعنی دبی و حجم در طراحی در نظر گرفته شده و همچنین با کمک روندیابی، تأثیر ذخیره آب در مخزن در نظر گرفته شده و ارتفاع آب بالای سرریز نسبت به حالتی دبی ورودی به مخزن بدون روندیابی، کمتر به دست می‌آید. بنابراین روندیابی مخزن بر اساس دوره بازگشت‌های توأم می‌تواند در طراحی صحیح‌تر ابعاد سرریز، کاهش هزینه‌های مربوط به طراحی و خطر سرریز کردن سد نقش مهم و کاربردی داشته باشد.

در پایان پیشنهاد می‌شود موضوع لحاظ توأم دبی و حجم در طراحی‌ها به همراه لحاظ شدن اثر روندیابی مخزن، استانداردسازی شود تا دستگاه‌های اجرایی این مسئله مهم را در طراحی و ساخت سدها مد نظر قرار دهند.

منابع

ایزدی، ا. ۱۳۹۱. شناسایی و رتبه‌بندی پهنه‌های سیل‌خیز با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی Wetspa (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سد بوستان، استان گلستان، ایران). پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده مرتع و آبخیزداری.

بهره‌مند، ع.، خسروی، غ.، تیموری، م.، صمدی، ح، کورنژاد، آ.، الوندی، ا.، هروی، ح.، بهرامی، م.، تاجیکی، م.، دشتی، م. ۱۳۹۴. مروری بر توابع کاپولا در علم هیدرولوژی، نشریه حفاظت و بهره‌برداری از منابع طبیعی، جلد ۴، شماره ۲.

بهره‌مند، ع. ۱۳۷۶. بررسی مقایسه روش‌های هیدرولوژیکی روندیابی سیل مخزن در سد جیرفت. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده منابع طبیعی آبخیزداری. دانشگاه تهران، ۱۴۲ ص.

عبدالحسینی، م. ۱۳۹۱. کاربرد کوپلا در تحلیل فراوانی چند متغیره‌ی جریان‌های کم و ارزیابی رگرسیون کوپلایی به منظور استفاده در تحلیل متغیرهای غیر مستقل. رساله دکتری. دانشگاه صنعتی اصفهان. دانشکده کشاورزی. ۲۳۲ ص.

مهدوی، م. ۱۳۹۰. هیدرولوژی کاربردی (جلد دوم). انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران

محمدی‌پور، ع. حسن‌زاده، ی. خدادادی، ا. و ب. ثقفیان، ۱۳۹۵. تحلیل ریسک احتمالاتی حوادث سیل با استفاده از تابع مفصل سه متغیره. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۶، شماره ۴: ۷۸-۶۳.

Chebana, F. and T. Ouarda, 2011. Multivariate quantiles in hydrological frequency analysis, *Environmetrics*, 22(1): 63-78.

De Michele, C., and G. Salvadori. 2003. A Generalized Pareto intensity-duration model of storm rainfall exploiting Copulas. *J. Geophys. Res.*, 108(D2): 1-11.

De Michele, C., Salvadori G, Canossi M, Petaccia A, and R. Rosso, 2005. Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spillway. *J. Hydrologic Eng.*, 10(1): 50-57.

Demarta, S. and A.J. McNeil, 2005. The t copula and related copulas. *Int. Stat. Review*, 73(1): 111-129 p.

Genest, C., and A.C. Favre, 2007. Everything you always wanted to know about Copula modeling but were afraid to ask. *J. Hydrologic Eng.*, 12(4): 347- 368.

Genest, C., Favre. A.C., Beliveau. J., Jacques.C. 2007. Metaelliptical Copulas and their use in frequency analysis of multivariate hydrological data. *Water Resour. Res.*, 43(9).

Goodarzi, E. Mirzaei, M. and M. Ziaei, 2012. Evaluation of dam overtopping risk based on univariate and bivariate flood frequency analyses. *J. Civ. Eng.*, 39: 374-387.

Kojadinovic, I. and J. Yan, 2009. Package Copula. Version 0.9-7, May 28, 2010.

Kojadinovic, I. and J. Yan, 2010. Modeling Multivariate Distributions with Continuous Margins Using the copula R Package. *J. Stat. Soft*. 34(9): 1-20.

Mediero, L. Jimenez-Alvarez, A. and Garrote, L. 2010. Design flood hydrograph from the relationship between flood peak and volume. *J. Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14: 2495-2505.

Peng, Y. Chen, K., Yan, H., YU, X. 2017. Improving Flood-Risk Analysis for Confluence Flooding Control Downstream Using Copula Monte Carlo Method. *J. Hydrologic Eng.*, (8):73-89.

Requena, A.I., Mediero, L and Garrote, L. 2013. A bivariate return period based on copulas for hydrologic dam design: accounting for reservoir routing in risk estimation. *J. Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17: 3023-3038.

Salvadori, G. and De Michele, C., 2004. Frequency analysis via Copula: Theoretical aspects and applications to hydrological events. *Water Resource Research*, 40(12): 1-17.

Salvadori, G. and DeMichele, C. 2011. Estimating strategies for multiparameter Multivariate Extreme Value copulas. *J. Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 141–150.

Salvadori, G., C. DeMichele, N.T. Kottegoda and R. Rosso. 2007. *Extremes in Nature: An Approach Using Copulas*. Water Science and Technology Library. Vol. 56. Springer, Netherland, 292 pp.

Sklar, A., 1959. Fonction de re'partition a'n dimensions et leurs marges. [Distribution functions, dimensions and margins]. Publications of the Institute of Statistics, University of Paris, Paris, pp. 229–231. (In French).

Volpi, E., and Fiori, A. 2014. Hydraulic structures subject to bivariate hydrological loads: Return period, design, and risk assessment, *Water Resour. Res*., 50: 885-897.

Wong. G., Lmbert. M.E., and Metacalfe, A.V.2008. Trivariate Copula for characterization of droughts. *J. Anziam*, 49: 306-323.

Zhang, J., Ding, Z. and You. 2014. The joint probability distribution of runoff and sediment and its change characteristics with multi - time scales. *J. Hydrol. Hydromech*. 62(3): 218-225.

Zhao, P., Lu, H., Fu, G., Zhu, Y., Su, J., Wang, J. 2017. Uncertainty of Hydrological Drought Characteristics with Copula functions and probability Distributions: A Case Study of Weihe River, China. *Water 2017*, 9(334).

Evaluation of hydrological design of dam spillway using copula based bivariate return periods (Case study: Golestan 2 dam, Golestan Province)

Z. Afsharipour[1], M. Abdolhosseini[2], A. Bahremand[3] *

Abstract

Multivariate analysis based on the flood discharge and volume variables can be useful, practical and really more accurate in designing some of the water structures such as dams. Due to the interdependency among the flood variables, it is necessary to consider this feature in the simultaneous analysis of the phenomenon. In this research, the Copula functions were used to simultaneously analyze the variables and to determine the joint return periods. Also, according to the reservoir routing, the maximum height of water above the dam and the risk of dam overflow were compared in the univariate and joint return periods. Therefore, the runoff data of a 40-year statistical period of the Tamer hydrometric station located in Gorganroud River at the upstream of Boostan Dam (Golestan 2) as well as the technical characteristics of this dam were used to meet the aim of the research. The results indicate that discharge and level of water over dam are different for different return periods based on two methods of univariate and bivariate frequency analysis. Water level above the weir corresponding to the output (routed) peak discharge based on the univariate analysis for the 50- year return period equals to 1.42 m. But when the output of the Copula functions (duscharge and volume) were used to storage routing, water level above the weir for the 50-year bivariate return period of "or" and "and" were estimated to be 1.70 and 1.55 m, respectively. in the bivariate analysis, the interdependence of flood variables is considered in determining the values of discharge and volume in a given return period. It can be so important to design a safe and affordable structure. Also, with emphasize on the designing based on routed design flood, this research indicates that the routed flood in the joint return periods can be led to more accurate designing of the weir dimensions.

Keywords: Bivariate flood frequency analysis, Copula, Bivariate return period, Reservoir routing

[1] MSc Graduated of Watershed Management, Department of Watershed Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Email: zeynab.afsharypour@gmail.com

[2] Assistant Prof., Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Email: abd.phd@gmail.com

[3] Associate Prof., Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Email: abdolreza.bahremand@yahoo.com. * Corresponding author