

Multivariate Frequency Analysis of Peak Discharge and Suspended and Bed Sediment Load in Karaj Basin

A. Keihani¹, A.M. Akhondali^{2*}, and H. Fathian³

Abstract

Estimation of suspended and bed sediment load transferred by streamflow is important for planning and storing water in dam reservoirs, watershed management, coastal and environment protection. In this study, multivariate frequency analysis was performed between the maximum annual values of flood discharge, suspended sediment load and bed sediment load in Sierra Karaj hydrometric station with different copula functions. The common time period between the variables of suspended sediment load and bed sediment load was determined from the water year of 2009-2010 to 2019-2020. The results showed that the best copula functions in the analysis of dependency between the variables of flood discharge-suspended sediment load, flood discharge-bed sediment load and suspended sediment load-bed sediment load are Tawn, Shih-Louis and Gaussian, respectively. The results showed that for the joint return period equal to 10 years for the "OR" scenario, the values of flood discharge, suspended sediment load and bed sediment load are respectively equal to 125 cubic meters per second, 100 thousand tons per day and 2500 tons per day. Maximum probability of occurrence of suspended sediment load and bed sediment load for joint return period equal to 10 years for "AND" scenario are equal to 45000 tons per day and 1500 tons per day, respectively. According to the "AND" scenario for the joint return period, the multivariate design quantiles of the suspended and bed sediment loads are smaller than the univariate quantiles. Therefore, ignoring the correlation between suspended and bed sediment load and flood discharge may significantly overestimate the actual sediment value and, consequently, overestimate the corresponding occurrence probability.

Keywords: Copula Functions, Univariate Analysis, Bivariate Analysis, Dependence Analysis, Joint Return Period.

Received: November 19, 2020

Accepted: April 4, 2020

تحلیل فراوانی چندمتغیره دبی اوج، بار رسوب معلق و بستر در حوضه کرج

علیرضا کیهانی^۱، علی محمد آخوندعلی^{۲*} و حسین فتحیان^۳

چکیده

برآورد بار رسوب معلق و بستر حمل شده توسط جریان، برای برنامه‌ریزی و ذخیره منابع آب مخازن سدها، مدیریت آبخیز، حفاظت سواحل و محیط زیست حائز اهمیت است. در این تحقیق تحلیل فراوانی چندمتغیره بین مقادیر حداکثر سالانه دبی سیل، بار رسوب معلق و بار رسوب بستر در ایستگاه هیدرومتری سیرا کرج با توابع مفصل مختلف انجام شد. دوره زمانی مشترک بین متغیرهای بار رسوب معلق و بار رسوب بستر از سال آبی ۸۹-۱۳۸۸ تا ۹۹-۱۳۹۸ تعیین گردید. نتایج نشان می‌دهد که برترین توابع مفصل در تحلیل وابستگی بین متغیرهای دبی سیل- بار رسوب معلق، دبی سیل- بار رسوب بستر و بار رسوب معلق- بار رسوب بستر به ترتیب Tawn، Shih-Louis و Gaussian است. نتایج نشان می‌دهد که به ازای دوره بازگشت توأم با سناریو "OR" برابر با ۱۰ سال، مقادیر دبی سیل، بار رسوب معلق و بستر به ترتیب برابر با ۴۵۰۰۰ تن در روز و ۱۵۰۰ تن در روز است. نتایج نشان می‌دهد که بر اساس سناریو "AND" برای دوره بازگشت توأم، مقادیر طراحی چندمتغیره بار رسوب معلق و بستر کوچکتر از مقادیر تک متغیره هستند. بنابراین نادیده گرفتن همبستگی بین بار رسوب معلق و بستر و دبی سیل ممکن است بطور قابل توجهی مقدار واقعی رسوب را بیشتر برآورد کند، در نتیجه احتمال وقوع مناظر بیشتر برآورد شود.

کلمات کلیدی: توابع مفصل، تحلیل تک‌متغیره، تحلیل دو متغیره، تحلیل وابستگی، دوره بازگشت توأم.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۸/۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱/۱۶

1- Ph.D. Candidate of Water Resources Engineering, Department of Hydrology and Water Resources, Collage of Water Engineering and Environment, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Professor of Hydrology and Water Resources Engineering Department, Collage of Water Engineering and Environment, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: aliakh@scu.ac.ir

3- Department of Water Resources Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.1.4.5](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.1.4.5)

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- استاد گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

چندمتغیره در این مطالعات اغلب بر یک یا چند مورد از سه فرض اساسی زیر استوار بودند: ۱- متغیرها مستقل از هم بوده و با یکدیگر وابستگی ندارند؛ ۲- متغیرها از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند و یا قابل تبدیل به توزیع نرمال هستند؛ ۳- متغیرها از توزیع‌های حاشیه‌ای^۱ یکسانی تبعیت می‌کنند. ولی در عمل بر خلاف فرض اول برخی متغیرهای هیدرولوژیکی به یکدیگر وابسته و بر خلاف فرض دوم معمولاً از توزیع‌های غیرنرمال تبعیت می‌کنند. همین‌طور این متغیرهای هیدرولوژیکی بعضاً ممکن است از توزیع حاشیه‌ای یکسانی هم پیروی نمایند (Bacchi et al., 1994; Zhang and Singh, 2006). بنابراین، توزیع‌های چندمتغیره مرسوم برای تحلیل اغلب پدیده‌های هیدرولوژیکی از جمله وقایع سیلاب و انتقال رسوب ممکن است مناسب نباشند، زیرا مشخصه‌های تصادفی این پدیده معمولاً از توزیع‌های متفاوت تبعیت می‌کنند. به علاوه وابستگی پیچیده‌ای بین مشخصه‌های مختلف سیلاب و رسوب وجود دارد که توزیع‌های چندمتغیره مرسوم قادر به توصیف دقیق و واضح آن نیستند (De Michele et al., 2005; Chen et al., 2015). استفاده از توابع مفصل^۲ از جمله راهکارهای توصیه شده در جهت کاستن از نواقص روش‌های تحلیل چندمتغیره مرسوم می‌باشد (Salvadori et al., 2007). با توجه به قابلیت‌های توابع مفصل، پدیده‌های هیدرولوژیکی می‌توانند با کاربرد توزیع‌های توأم^۳ یا توأم شرطی^۴ دومتغیره یا مرتبه بالاتر مورد بررسی قرار گرفته و در عین حال کل ساختار وابستگی بین متغیرها حفظ شود. همچنین می‌توان مشخصه‌های همبسته متغیرهای هیدرولوژیکی را که ممکن است دارای توزیع‌های حاشیه‌ای متفاوت باشند، با استفاده از مفصل‌ها به هم پیوند داد. بنابراین، توزیع‌های توأم بدست آمده توصیف‌های دقیق‌تری از وضعیت رویدادهای هیدرولوژیکی در اختیار می‌گذارند.

Bezak et al. (2014) تحلیل فراوانی سه متغیره دبی پیک، حجم هیدروگراف و غلظت‌های رسوب معلق در یک ایستگاه هیدرولوژیکی در اسلوانیا و پنج ایستگاه در ایالات متحده آمریکا با مساحت حوضه از ۹۲۰ کیلومتر مربع تا ۲۴۹۹۶ کیلومتر مربع را انجام دادند. آنها پارامترهای توزیع‌های حاشیه‌ای مختلف را با روش گشتاورهای خطی برآورد کردند و با استفاده از روش گرافیکی و آزمونهای آماری بهترین مدل مفصل تعیین کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که تابع مفصل گمیل-هوگارد مناسب‌ترین تابع برای تمام ایستگاه‌ها است. آنها دریافتند که توابع مفصل ابزار ریاضی مفیدی هستند که می‌توانند جهت مدل‌سازی متغیرها بکار برده شوند. Rahimi et al. (2014) با استفاده از توابع مفصل ارشمیدسی، تحلیل ساختار وابستگی بین دو متغیر دبی بیشینه و حجم سیلاب‌های ثبت شده در ایستگاه آبسنجی ارازکوسه واقع بر روی رودخانه چهل‌چای استان گلستان را بررسی نمودند. نتایج

رسوبات رودخانه‌ای به عنوان یک ترکیب طبیعی و ضروری از محیط‌های آبی، نقش مهمی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب دارند. این رسوبات به رسوبات معلق و بار بستر تقسیم می‌شوند که حدود ۷۰٪-۹۹٪ به عنوان رسوبات معلق در رودخانه‌های طبیعی حمل می‌شوند (Yang, 1996; Babiński, 2005). رسوبات حمل شده در نهایت در مخازن سدها ته‌نشین گردیده و باعث کاهش عمر مفید آنها می‌شود. برآورد میزان رسوب حمل شده توسط جریان می‌تواند شاخصی برای نشان دادن فرسایش خاک حوضه باشد و در پروژه‌های آبی جهت برنامه‌ریزی و ذخیره منابع آب مخازن سدها و تغییرات بستر رودخانه‌ها، مدیریت آبخیز، حفاظت سواحل و محیط زیست و غیره حائز اهمیت است. رابطه رواناب و بار رسوبی با توسعه، بهره‌برداری و مدیریت منابع آب، بهره‌برداری ایمن از پروژه‌های مرتبط با آب و محیط‌زیست مرتبط است (Miao et al., 2011; Peng et al., 2010). رسوبات معلق متغیر مهم محیط زیستی و هیدرولوژیکی می‌باشد که به فرسایش خاک، شرایط اکولوژیکی حوضه، شرایط آبراهه‌ها، اقدامات هیدرولیکی و فراوانی وقایع حدی باران وابسته است (Bonacci and Oskorus, 2010). این واقعیت به خوبی شناخته شده است که اکثر بار رسوب معلق در چند واقعه بارندگی شدید منتقل می‌شوند (Rodríguez-Rodríguez et al., 2011; Tena et al., 2011). بنابراین منطقی است که وقایع غلظت رسوب معلق متناظر (تعریف شده بر مبنای دبی پیک) در تحلیل فراوانی سیل در نظر گرفته شود. درک تغییرات دراز مدت دبی رسوب معلق و عوامل مؤثر بر آن در حوضه‌های آبخیز برای مطالعه تخریب خاک، کیفیت آب، دوره‌های بیوشیمیایی زمین و پایداری کشاورزی بسیار مهم است (Walling, 2006; Syvitski and Walling, 2009; Pelletier, 2012; Vanmaercke et al., 2014).

انتقال رسوب در یک رودخانه به عنوان یک متغیر تصادفی بوده که از چندین مشخصه تصادفی همبسته شامل دبی جریان، بار معلق و بستر برخوردار است. با توجه به اینکه بار رسوب معلق و بستر به مشخصات جریان آب از جمله مقدار رواناب وابسته می‌باشد، بنابراین برآورد بار رسوب مبتنی بر تحلیل احتمالاتی تک متغیره معیارهای قابل اعتمادی نبوده و به نظر می‌رسد نگرش احتمالاتی چند متغیره به پدیده انتقال رسوب امری ضروری است. برای حل این مشکل می‌توان از توزیع‌های احتمالاتی دو یا چند متغیره استفاده نمود. Snyder (1962) و Wong (1963) برای اولین بار توزیع‌های احتمالاتی چندمتغیره مرسوم را در تحلیل‌های فراوانی هیدرولوژیکی بکار بردند و پس از آن شیوه چندمتغیره در مدل کردن مشخصه‌های باران، سیلاب و خشکسالی توسط محققین مختلف بکار برده شد. تحلیل فراوانی

این مطالعه نشان داد تحلیل یک متغیره وقایع هیدرولوژیک به علت عدم در نظر گرفتن تمامی مشخصه‌های مؤثر در یک پدیده، تحلیلی جامع و به دور از خطا نمی‌باشد و به همین دلیل تحلیل چندمتغیره وقایع هیدرولوژیک توصیه گردید. (Abbasian and Jalali (2015) با بهره‌گیری از توابع مفصل تحلیل فراوانی توأم چند مشخصه کلیدی رواناب را در یکی از رودخانه‌های واقع در شمال ایران انجام دادند و دوره بازگشت‌های توأم را محاسبه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد، توابع مفصل ابزاری قدرتمند برای تحلیل چندمتغیره و احتمالاتی متغیرهای هیدرولوژیکی هستند. (Salari et al. (2015) با استفاده از توابع مفصل تحلیل فراوانی توأم سه مشخصه دبی بیشینه، حجم و تداوم سیلاب‌های ثبت شده در ایستگاه آسنجی اهواز را بررسی کردند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش مفصل گامیل- هوگارد به عنوان تابع مفصل برتر انتخاب گردیده و مقایسه احتمالات و دوره بازگشت‌های توأم استخراج شد. (Bahremand et al. (2016) به بررسی و شناخت الگوریتم‌های محاسباتی، پارامترها و شکل توزیع توابع مفصل پر کاربرد و جایگاه آنها در هیدرولوژی استوکاستیک پرداختند. این مطالعه نشان داد توابع مفصل ابزار مفیدی در راستای شناخت احتمالاتی فرآیندهای هیدرولوژیکی بوده و قابلیت کاربرد در زمینه ارائه راهکارها و استراتژی‌های مدیریتی حوزه منابع آب را دارا هستند.

Ahmadi et al. (2017) تحلیل فراوانی سیلاب حوضه آبریز در محل اتصال دو ایستگاه سپیددشت- سزار و سپیددشت-زاز با استفاده از توابع مفصل بررسی کردند. نتایج نشان داد که مفصل فرانک برای جفت داده‌های ایستگاه‌های سپیددشت-سزار و سپیددشت-زاز بیشترین تطابق را با تابع مفصل تجربی داشته است. برای بررسی دوره بازگشت وقایع در حالت توأم، از دوره بازگشت توأم در دو حالت "یا" و "و" و دوره بازگشت توأم شرطی استفاده شد. براساس نتایج به دست آمده از تحلیل توأم سری‌های سیلاب دو سرشاخه متصل به هم مشخص شد که دو رودخانه سپیددشت سزار و سپیددشت زاز هر ۷۰ سال یک بار به صورت همزمان می‌تواند در معرض سیلاب شدید قرار گیرند. (Bezak et al. (2017) بار رسوبات معلق را با استفاده از بارش و دبی اندازه‌گیری شده با توابع مفصل برآورد کردند. آنها از مفصل فرانک برای ساخت مدل تک‌واقعه برآورد بار رسوبات معلق در حوضه کوزلوچ تورنت در اسلوانی با بکارگیری متغیرهای مجموع بارش، دبی اوج و بار رسوبات معلق استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل مفصل پیشنهادی بار رسوبات معلق را بصورت معنی‌دار برآورد می‌کند. بررسی معیارهای عملکرد آماری و آزمون‌ها نشان دادند که مدل مفصل نسبت به روشهای دیگر برآورد بهتری دارد. (Huang et al. (2017) از روش بر مبنای مفصل جهت تعیین نقاط تغییر احتمالی در رابطه بین رواناب و بار رسوب در حوضه رودخانه Wei در چین استفاده کردند. نتایج

نشان داد که رواناب و بار رسوب در رودخانه‌های Wei و Jinghe بطور کلی با روند قابل ملاحظه‌ای در هر دو مقیاس ماهانه و سالانه کاهش می‌یابد. همچنین هر دو رودخانه دارای یک نقطه تغییر مشترک (سال ۲۰۰۲) بودند، به این معنی که رابطه بین رواناب و بار رسوب در هر دو رودخانه ثابت نیست. علاوه بر این فعالیت‌های انسانی شامل افزایش مصرف آب و توسعه فعالیت‌های حفاظت خاک عوامل غالب بوده که منجر به عدم‌ایستایی در ارتباط بین رواناب و بار رسوب در حوضه رودخانه Wei می‌شوند. (Abdollahi Asadabadi et al. (2018) دوره بازگشت‌های توأم و شرطی تعدادی مشخصه وابسته آبنمود رواناب شامل حجم رواناب، دبی بیشینه، زمان پایه و زمان وقوع دبی بیشینه آبنمود در ایستگاه آسنجی ولیک‌بن واقع در خروجی حوضه آبریز معرف کسلیان در بازه زمانی ۱۳۸۶-۱۳۵۴ تحلیل کردند. از میان سه تابع مفصل در نظر گرفته شده شامل کلاپتون، علی میخائیل حق و فرانک، برای دو زوج مشخصه وابسته حجم رواناب و دبی بیشینه و حجم رواناب و زمان پایه آبنمود، تابع مفصل فرانک به عنوان مفصل برتر انتخاب شد. همچنین برای دو مشخصه وابسته دیگر یعنی زمان وقوع دبی بیشینه و زمان پایه آبنمود، تابع مفصل کلاپتون به عنوان مفصل برتر تشخیص داده شد. نهایتاً با ایجاد توزیع‌های توأم مفصل مبنا اطلاعات ارزشمندی از قبیل توزیع‌های احتمالاتی توأم، دوره بازگشت‌های توأم و توأم شرطی محاسبه و ترسیم کردند.

Godarzi et al. (2019) به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی ایستگاه دوگنبدان شهرستان گچساران، بارش و دمای آینده (۲۰۵۰-۲۰۳۰) با مدل CanESM2 تحت سناریو RCP8.5 برآورد کردند. سپس وضعیت خشکسالی با استفاده از شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۵) و آتی در سری‌های زمانی مختلف ارزیابی کردند. در نهایت متغیرهای شدت و مدت خشکسالی برای محاسبه احتمال و دوره بازگشت توأم، با تابع چند متغیره مفصل تحلیل کردند. نتایج نشان داد که دمای ماهانه تحت سناریو RCP8.5 به میزان ۲/۲ درجه سانتیگراد افزایش و بارش به میزان ۵/۵ درصد کاهش می‌یابد. نتایج ارزیابی خشکسالی نشان می‌دهد تعداد دوره‌های خشک و مرطوب با افزایش طول مقیاس کمتر می‌شوند، اما مدت زمان طولانی‌ترین دوره افزایش می‌یابد. همچنین تعداد دوره‌های خشکسالی تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. نتایج تحلیل توأم دوره بازگشت یک رویداد خشکسالی با میزان سختی ۱۰ و مدت ۱۰ ماهه برای دوره پایه و RCP8.5 بترتیب ۵ و ۴ سال می‌باشد که نشان‌دهنده کاهش دوره بازگشت خشکسالی‌های شدید و افزایش آن‌ها در آینده تحت سناریو RCP8.5 نسبت به دوره پایه است. (Khanitemeliyeh et al. (2020) به تحلیل سه‌متغیره خشکسالی در شرق ایران برای ۱۳

ایستگاه هواشناسی در دوره آماری ۲۰۱۷-۱۹۷۱ پرداختند. جهت استخراج پارامترهای شدت، مدت و پیک خشکسالی از شاخص SPImod استفاده کردند. آنها از روش تو در تو برای اتصال توابع مفصل دوبعدی و ایجاد تابع توزیع توأم سه بعدی استفاده کردند. نتایج نشان داد که تابع مفصل HRT بهترین عملکرد را در ایجاد توابع توزیع دومتغیره و سه متغیره دارد. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از شاخص SPImod تا حدود زیادی معایب SPI متداول را برطرف می کند و تغییرات فصلی بارش را در محاسبه شاخص SPI لحاظ می کند. نتایج شاخص SPImod نشان داد که بیشترین درصد تعداد ماه های خشک مربوط به ایستگاه سبزوار با ۵۲ درصد و کمترین آن مربوط به ایستگاه تربت حیدریه ۳۵ درصد بود که به ترتیب به عنوان مناطقی که بیشتر و کمتر در معرض خشکسالی قرار گرفته اند، شناخته شدند.

(Nazeri Tahroudi et al. (2020) تحلیل فراوانی بار معلق رسوب لحظه ای حوضه آبریز زربینه رود واقع در جنوب شرقی دریاچه ارومیه با در نظر گرفتن بیشینه دبی لحظه ای در محل ایستگاه هیدرومتری چالخماز با استفاده از توابع مفصل مورد بررسی قرار دادند. با مقایسه تحلیل دومتغیره و دوره بازگشت آن با حالت تک متغیره، نتایج نشان داد که برآورد بار معلق رسوب مبتنی بر مفصل به مقادیر بار معلق رسوب ایستگاه چالخماز نزدیکتر بوده و دقت بالاتری دارد. همچنین نتایج نشان داد که در حالت تک متغیره، برآورد بار معلق رسوب در ایستگاه چالخماز کمتر از مقدار واقعی آن در دوره بازگشت دو ساله است. با توجه به نتایج حاصله می توان از منحنی های دوره بازگشت تولید شده به عنوان منحنی های تیپ برای مدیریت و تخصیص منابع آب در حوضه استفاده کرد. (Peng et al. (2020) تحلیل فراوانی چندمتغیره برای وقایع حدی رسوب در رودخانه جینشا در چین با در نظر گرفتن رفتار توأم غلظت رسوب معلق (SSC) و دبی سیل (دبی پیک و حجم سیل) با استفاده از توابع مفصل بکار بردند. عدم قطعیت های مربوط به مدل سازی مفصل هم بررسی کردند. نتایج نشان داد که روش چندمتغیره بر مبنای مفصل یک ارزیابی جامع تر از SSC حدی و فواصل بازگشت نسبت به تحلیل فراوانی تک متغیره فراهم می کند. عدم قطعیت مدل سازی مفصل با دوره آماری مشاهداتی طولانی تر، کاهش یافته و با دوره بازگشت بزرگتر، افزایش می یابد. دامنه عدم قطعیت مقادیر کمی طراحی با بیشترین احتمال، با مفصل های مختلف تغییر کرده و دامنه عدم قطعیت برای بهترین مفصل، کوچکترین است.

بنابراین با توجه به بررسی های انجام شده، تاکنون در زمینه تحلیل

فراوانی چند متغیره بار رسوب معلق و بار رسوب بستر و همچنین دبی سیل و بار رسوب بستر تحقیقی انجام نشده است. در واقع استفاده از مقادیر بار رسوب بستر و تحلیل فراوانی چند متغیره توأم بار رسوب بستر با هر یک از متغیرهای بار رسوب معلق و دبی سیل از نوآوری این تحقیق است. هدف از این تحقیق تحلیل فراوانی چندمتغیره حداکثر سالانه دبی سیل، بار رسوب معلق و بار رسوب بستر است. همچنین مقادیر بار رسوب معلق و بستر به ازای دوره بازگشت های توأم مختلف حاصل از تحلیل دو متغیره با تحلیل تک متغیره مقایسه می گردد.

۲- روش تحقیق

حوضه سد کرج قسمتی از دامنه جنوبی ارتفاعات البرز در شمال غرب استان تهران بین طول شرقی ۵۱-۵ تا ۵۱-۳۰ و عرض شمالی ۳۵-۵۲ تا ۳۶-۱۱ قرار گرفته است. این حوضه در تقسیم بندی حوضه های آبریز کشور جزو حوضه دریاچه نمک قرار دارد که مساحت آن ۷۱۶ کیلومتر مربع در محل ایستگاه هیدرومتری سیرا کرج است. اقلیم منطقه بر اساس روش دومارتن از نوع مرطوب و بر اساس روش آمبرژه از نوع اقلیم ارتفاعات است و طی یک ارزیابی کلی در گروه سرد قرار می گیرد. رژیم بارندگی منطقه از نوع مدیترانه ای است. خاک های منطقه اغلب از نوع لیتوسل و رگوسل است و عمق خاک در بیش از نیمی از اراضی، کم عمق سنگریزه دار است. نیمرخ خاکها تحول کم تا ناچیز دارد و دارای مواد مادری توف، سازند کرج، ماسه سنگ و کنگلومرا است. بافت خاک در منطقه مورد مطالعه به طور عمده لومی شنی می باشد. شکل ۱ نقشه حوضه کرج و موقعیت ایستگاه های باران سنجی و هیدرومتری را نشان می دهد. تنها ایستگاه هیدرومتری در حوضه کرج که بار رسوبات بستر و معلق اندازه گیری می شود، ایستگاه سیرا کرج است. به منظور تحلیل فراوانی دو متغیره بین متغیرهای دبی جریان و بار رسوبات معلق و بستر در ایستگاه سیرا کرج، از سری زمانی حداکثر سالانه هر یک از متغیرها استفاده گردید. دوره زمانی مشترک بین متغیرهای دبی جریان و بار رسوب معلق از سال آبی ۶۶-۱۳۶۵ تا ۹۹-۱۳۹۸ است. همچنین دوره زمانی مشترک بین متغیرهای دبی جریان و بار رسوب بستر و بار رسوب معلق و بار رسوب بستر از سال آبی ۸۹-۱۳۸۸ تا ۹۹-۱۳۹۸ است. جدول ۱ مشخصات آماری متغیرهای مورد استفاده را نشان می دهد.

۲-۱- آزمون همبستگی بین متغیرها

در این مطالعه همبستگی داده های مورد بررسی در محل ایستگاه هیدرومتری سیرا کرج با استفاده از روش τ کندال و ρ اسپیرمن محاسبه شد. τ کندال یک ضریب همبستگی رتبه ای است که در

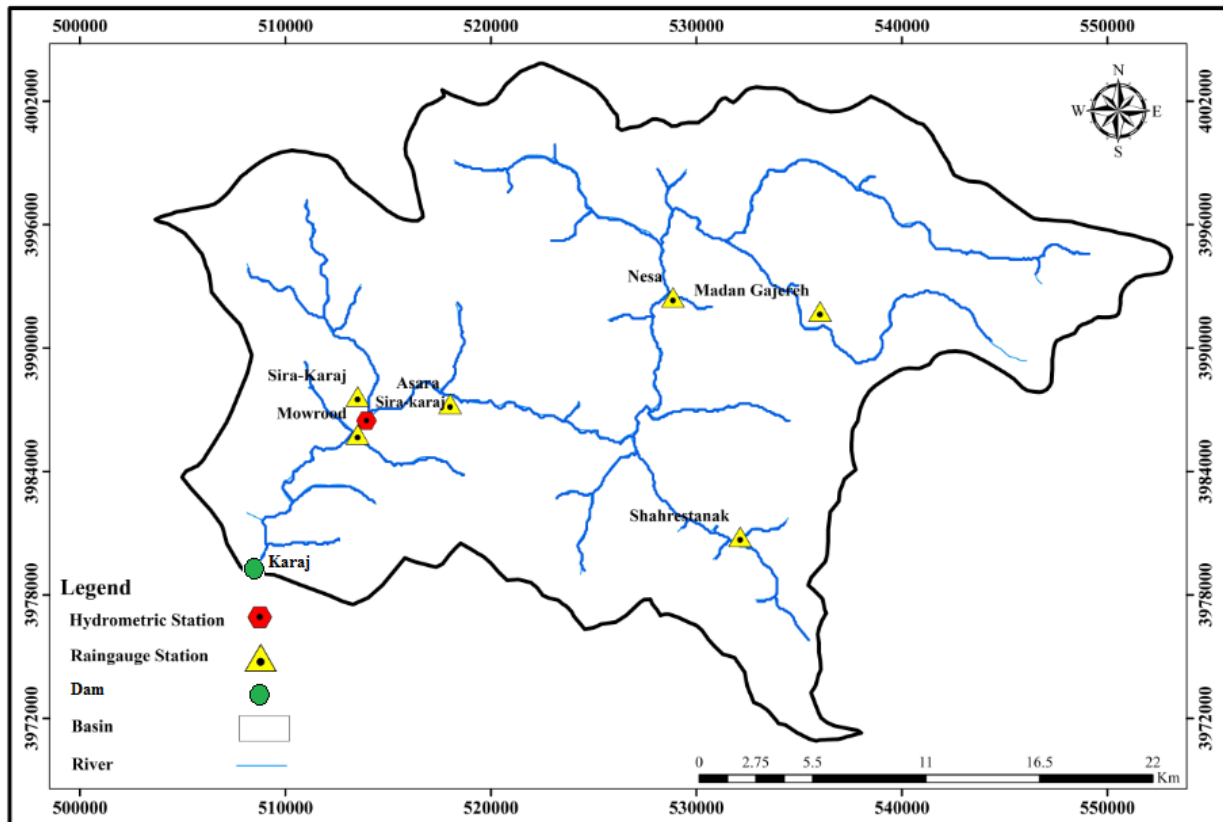


Fig. 1- Map of Karaj basin and location of rain-gauge and hydrometric stations

شکل ۱- نقشه حوزه کرج و موقعیت ایستگاه‌های باران سنجی و هیدرومتری

Table 1- Statistical criteria of the used variables

جدول ۱- معیارهای آماری متغیرهای مورد استفاده

Statistical Criteria	Flood discharge (m ³ /s)	Suspended sediment load (ton/day)	Bed sediment load (ton/day)
Min.	13.9	212.3	1.6
Max.	154.5	336329.3	8949.4
Range	140.6	336117.0	8947.8
Mean	68.3	24789.9	1185.3
Standard deviation	36.9	57255.0	2618.4
Variation coefficient	0.54	2.31	2.21
Skewness coefficient	0.88	5.02	2.84

که در آن n تعداد داده‌ها، $\text{sign}()$ تابع علامت و x و y جفت داده‌های مشاهداتی می‌باشد. مطالعات مختلف آماره τ کندال را برای ارزیابی همبستگی بین متغیرها توصیه کرده‌اند (Bezak et al., 2017; Bevacqua et al., 2017; Zhang et al., 2018; Brunner et al., 2019; Khan et al., 2020).

ρ اسپیرمن یک ضریب همبستگی رتبه‌ای دیگر همراه با τ کندال است. برای محاسبه ρ اسپیرمن، داده‌های هر دو متغیر به طور

مسائل مربوط به توابع مفصل به کار برده می‌شود. τ کندال حد رابطه یکنواخت بین x و y را اندازه‌گیری می‌کند. τ کندال یک ضریب همبستگی مبتنی بر رتبه بوده و به تأثیر تعداد اندک مقادیر غیرعادی مقاوم است و برای متغیرهایی که حول رابطه کلی چولگی را نشان می‌دهند، خیلی مناسب است. τ کندال به داده‌های پرت مقاوم بوده و تمام همبستگی‌های یکنواخت خطی و غیرخطی را اندازه‌گیری می‌کند.

$$\tau = \left(\frac{n}{2}\right)^{-1} \sum_{i < j} \text{sign}[(x_i - x_j)(y_i - y_j)] \quad (1)$$

مستقل در میان خودشان رتبه‌بندی می‌شوند. رابطه محاسبه rho اسپیرمن عبارت است از:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{x_i} R_{y_i}) - n \left(\frac{n+1}{2} \right)^2}{n(n^2 - 1)/12} \quad (2)$$

که در آن R_{x_i} و R_{y_i} به ترتیب رتبه‌های x و y هستند. n تعداد داده‌ها است.

۲-۲- انتخاب توزیع‌های حاشیه‌ای

برای برآورد احتمال وقوع مقادیر هر یک از متغیرها، توزیع‌های آماری مختلف بر سری داده‌ها برازش داده می‌شود. قابل توجه است که توزیع حاشیه‌ای هر متغیر با استفاده از بهترین توزیع آماری Beta، Extreme value، Exponential، Birnbaum-Saunders، Generalized، Generalized extreme value، Gamma، Log-logistic، Logistic، Inverse Gaussian، Pareto، Rayleigh، Normal، Nakagami، Lognormal، Weibull و location scale تعیین می‌شود. این توزیع‌های حاشیه‌ای برای تبدیل مجدد از فضای احتمال به فضای داده اصلی استفاده می‌شود. پس از برازش هر توزیع آماری بر سری داده‌ها، باید نکویی برازش هر توزیع با استفاده از آزمون‌های مناسب از جمله کای اسکویور مورد بررسی قرار گیرد. در صورتی که در سطح معنی‌داری ۵ درصد برازش توزیع‌ها توسط آزمون کای اسکویور مورد تأیید واقع شود، توزیع احتمالاتی موردنظر پذیرفته می‌شود. بهترین توزیع حاشیه‌ای با توجه به معیار اطلاعات بیزین BIC انتخاب می‌شود که به صورت رابطه زیر است:

$$BIC = k \log(n) - 2\ell \quad (3)$$

که در آن n تعداد داده‌ها، k تعداد پارامترهای مدل آماری و ℓ مقدار لگاریتم درست‌نمایی است. هر چه مقدار BIC توزیع آماری کوچکتر باشد، از برازش بهتری برخوردار است.

۲-۳- توابع مفصل

تابع مفصل، توزیع توأمی از متغیرهای تصادفی همبسته است که بصورت تابعی از توزیع‌های حاشیه‌ای تک متغیره بیان می‌شوند. به عبارت دیگر، یک مفصل تابعی است که توابع توزیع حاشیه‌ای تک متغیره را برای تشکیل یک تابع توزیع چندمتغیره، به هم پیوند می‌دهد. با استفاده از مفصل‌ها در ایجاد توزیع‌های چندمتغیره اثر وابستگی از اثرات توزیع‌های حاشیه‌ای تفکیک می‌شود. در استفاده از روش مفصل مشابه بودن نوع توزیع‌های حاشیه‌ای الزامی نیست (Nelsen, 2006). این مزیت انعطاف‌پذیری بیشتری را برای انتخاب توزیع‌های حاشیه‌ای تک متغیره مناسب که بخوبی بر داده‌های مشاهده شده برازش دارند،

ارائه می‌دهد. برای کمیت‌های تصادفی پیوسته d بعدی $\{X_1, \dots, X_d\}$ با توابع توزیع تجمعی حاشیه‌ای (CDF)، $F_{x_j}(x_j) = u_j$ که در آن $j = 1, \dots, d$ است، اسکالر نشان داد که یک مفصل d بعدی یکتای C_{u_1, \dots, u_d} وجود دارد بطوریکه:

$$C_{u_1, \dots, u_d}(u_1, \dots, u_d) = H_{X_1, \dots, X_d}(x_1, \dots, x_d) \quad (4)$$

که در آن، u_j تابع توزیع تجمعی برای متغیر j ام و $H_{X_1, \dots, X_d}(x_1, \dots, x_d)$ همان CDF توأم d متغیره برای مجموعه متغیرهای $\{X_1, \dots, X_d\}$ می‌باشد. از آنجاکه برای متغیرهای تصادفی پیوسته، حاشیه‌ها از صفر تا یک صعودی می‌باشند، بنابراین می‌توان مفصل C_{u_1, \dots, u_d} را بعنوان تبدیل H_{X_1, \dots, X_d} از $[-\infty, +\infty]^d$ به $[0, 1]^d$ در نظر گرفت. لازم به توضیح است که تئوری اسکالر به صورت n بعدی پیشنهاد شده، ولی بدلیل اینکه پیچیدگی مفصل‌ها با افزایش تعداد متغیرها بصورت فزاینده‌ای افزایش می‌یابد، ازین رو اغلب برای فهم روابط و مفاهیم مفصل توضیحات بر اساس مفصل‌های دومتغیره ارائه می‌گردد و نهایتاً به مراتب بالاتر تعمیم داده می‌شود (Nelsen, 2006; Salvadori et al., 2007). برای دو متغیر تصادفی و وابسته X و Y ، در صورتی که تابع توزیع تجمعی و توأم این دو متغیر که به ترتیب دارای توزیع احتمال حاشیه‌ای $F_X(x)$ و $F_Y(y)$ می‌باشند را به صورت $F_{X,Y}(x,y)$ بیان شود، آنگاه یک تابع مفصل C ، به صورت رابطه زیر وجود دارد:

$$F_{X,Y}(x,y) = C(F_X(x), F_Y(y)) \quad (5)$$

مشابه با توزیع‌های تک متغیره، برای توزیع‌های توأم حاصل از مفصل‌ها نیز مفهوم تابع توزیع چگالی احتمال توأم به صورت رابطه زیر قابل تعریف است:

$$f_{X,Y}(x,y) = c(F_X(x), F_Y(y)) f_X(x) f_Y(y) \quad (6)$$

که در آن، c تابع چگالی متناظر با مفصل توأم C بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$c(u,v) = \frac{\partial^2 C(u,v)}{\partial u \partial v} \quad (7)$$

که در آن، u و v به ترتیب توابع توزیع تجمعی دومتغیره موردنظر یعنی $F_X(x)$ و $F_Y(y)$ می‌باشند و دامنه تغییرات آنها بین صفر و یک است. بررسی‌ها نشان می‌دهد در این تحقیق برای ایجاد ساختار همبستگی دو متغیره حداکثر دبی جریان، بار رسوبات معلق و بار رسوبات بستر از ۲۶ تابع مفصل مختلف با ۱ تا ۳ پارامتر استفاده شد که در جدول ۲ نشان داده شده است.

معیارهای عملکردی مورد استفاده برای رتبه‌بندی توابع مفصل، ضریب ناش-ساتکلیف (NSE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) است. ضریب ناش-ساتکلیف بیانگر راندمان مدل بوده که می‌تواند مقادیری از منفی بی نهایت تا یک را به خود اختصاص دهد که عدد یک

Table 2- Used copula functions (Sadegh et al., 2018)
 جدول ۲- توابع مفصل مختلف مورد استفاده (Sadegh et al., 2018)

Name	Mathematical Description	Parameter Range
Gaussian	$\int_{-\infty}^{\phi^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{\phi^{-1}(v)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\theta^2}} \exp\left(\frac{2\theta xy - x^2 - y^2}{2(1-\theta^2)}\right) dx dy$	$\theta \in [-1, 1]$
Tt	$\int_{-\infty}^{t_{\theta_2}^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{t_{\theta_2}^{-1}(v)} \frac{\Gamma((\theta_2 + 2)/2)}{\Gamma(\theta_2/2) \pi \theta_2 \sqrt{1-\theta_1^2}} \left(1 + \frac{x^2 - 2\theta_1 + y^2}{2(1-\theta^2)}\right)$	$\theta_1 \in [-1, 1]$ $\theta_2 \in (0, \infty)$
Clayton	$\max(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1, 0)^{-1/\theta}$	$\theta \in [-1, \infty) \setminus 0$
Frank	$-\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(\exp(-\theta u) - 1)(\exp(-\theta v) - 1)}{\exp(-\theta) - 1} \right]$	$\theta \in \mathbb{R} \setminus 0$
Gumbel	$\exp\left\{-\left[(-\ln(u))^\theta + (-\ln(v))^\theta\right]^{1/\theta}\right\}$	$\theta \in [1, \infty)$
Independence	uv	
Ali-Mikhail-Haq (AMH)	$\frac{uv}{1 - \theta(1-u)(1-v)}$	$\theta \in [-1, 1]$
Joe	$1 - \left[(1-u)^\theta + (1-v)^\theta - (1-u)^\theta(1-v)^\theta\right]^{1/\theta}$	$\theta \in [1, \infty)$
Farlie-Gumbel-Morgenstern (FGM)	$uv [1 + \theta(1-u)(1-v)]$	$\theta \in [-1, 1]$
Gumbel-Barnett	$u + v - 1 + (1-u)(1-v)\exp[-\theta \ln(1-u) \ln(1-v)]$	$\theta \in [0, 1]$
Plackett	$\frac{1 + (\theta - 1)(u + v) - \sqrt{[1 + (\theta - 1)(u + v)]^2 - 4\theta(\theta - 1)uv}}{2(\theta - 1)}$	$\theta \in (0, \infty)$
Cuadras-Auge	$[\min(u, v)]^\theta (uv)^{(1-\theta)}$	$\theta \in [0, 1]$
Raftery	$\begin{cases} u - \frac{1-\theta}{1+\theta} u^{\frac{1}{1-\theta}} \left(\frac{v^{-\theta}}{v^{1-\theta} - v^{1-\theta}} \right), & \text{if } u \leq v \\ v - \frac{1-\theta}{1+\theta} v^{\frac{1}{1-\theta}} \left(\frac{u^{-\theta}}{u^{1-\theta} - v^{1-\theta}} \right), & \text{if } v \leq u \end{cases}$	$\theta \in [0, 1]$
Shih-Louis	$\begin{cases} (1-\theta)uv + \theta \min(u, v), & \text{if } \theta \in (0, \infty) \\ ((1+\theta)uv + \theta(u+v-1)\Psi(u+v-1)), & \text{if } \theta \in (-\infty, 0] \end{cases}$	
Linear-Spearman	$\begin{cases} [u + \theta(1-u)]v, & \text{if } v \leq u \text{ and } \theta \in [0, 1] \\ [v + \theta(1-v)]u, & \text{if } u < v \text{ and } \theta \in [0, 1] \\ (1+\theta)uv, & \text{if } u+v < 1 \text{ and } \theta \in [-1, 0] \\ uv + \theta(1-u)(1-v), & \text{if } u+v \geq 1 \text{ and } \theta \in [-1, 0] \end{cases}$	$\theta \in [-1, 1]$
Cubic	$uv [1 + \theta(u-1)(v-1)(2u-1)(2v-1)]$	$\theta \in [-1, 2]$
Burr	$u + v - 1 + [(1-u)^{-1/\theta} + (1-v)^{-1/\theta} - 1]^{-\theta}$	$\theta \in (0, \infty)$
Nelsen	$\frac{-1}{\theta} \log \left\{ 1 + \frac{[\exp(-\theta u) - 1][\exp(-\theta v) - 1]}{\exp(-\theta) - 1} \right\}$	$\theta \in (0, \infty)$
Galambos	$uv \exp\{(-\ln(u))^{-\theta} + (-\ln(v))^{-\theta}\}^{-1/\theta}$	$\theta \in [0, \infty)$
Marshall-Olkin	$\min[u^{(1-\theta_1)}v, uv^{(1-\theta_2)}]$	$\theta_1, \theta_2 \in [0, \infty)$
Fischer-Hinzmann	$\{\theta_1 [\min(u, v)]^{\theta_2} + (1-\theta_1)[uv]^{\theta_2}\}^{1/\theta_2}$	$\theta_1 \in [0, 1]$ $\theta_2 \in \mathbb{R}$

Roch-Alegre	$\exp\left\{1 - \left[\left(\left(1 - \ln(u)\right)^{\theta_1} - 1\right)^{\theta_2} + \left(\left(1 - \ln(v)\right)^{\theta_1} - 1\right)^{\theta_2}\right]^{1/\theta_2} + 1\right\}^{1/\theta_1}$	$\theta_1 \in (0, \infty)$ $\theta_2 \in [1, \infty)$
Fisher-Kock	$uv[1 + \theta_2(1 - u^{1/\theta_1})(1 - v^{1/\theta_1})]^{\theta_1}$	$\theta_1 \in [1, \infty)$ $\theta_2 \in [-1, 1]$
BB1	$\left\{1 + \left[(u^{-\theta_1} - 1)^{\theta_2} + (v^{-\theta_1} - 1)^{\theta_2}\right]^{1/\theta_2}\right\}^{-1/\theta_1}$	$\theta_1 \in (0, \infty)$ $\theta_2 \in (1, \infty)$
BB5	$\exp\left\{-\left[(-\ln(u))^{\theta_1} + (-\ln(v))^{\theta_1} - \left((-\ln(u))^{-\theta_1\theta_2} + (-\ln(v))^{\theta_1\theta_2}\right)^{-1/\theta_2}\right]^{1/\theta_1}\right\}$	$\theta_1 \in [1, \infty)$ $\theta_2 \in (0, \infty)$
Tawn	$\exp\left\{\ln(u^{(1-\theta_1)}) + \ln(v^{(1-\theta_2)}) - \left[(-\theta_1 \ln(u))^{\theta_3} + (-\theta_2 \ln(v))^{\theta_3}\right]^{1/\theta_3}\right\}$	$\theta_1, \theta_2 \in [0, 1],$ $\theta_3 \in [1, \infty)$

در این روابط، ω_T بیانگر متوسط مقادیر فاصله زمانی بین آغاز دو رویداد متوالی در کل مجموعه رویدادهای مورد بررسی است. لازم بذکر است که با تغییر نوع تابع مفصل این امکان وجود دارد که مقادیر دوره بازگشت محاسبه شده با روابط فوق با هم برابر نشوند (Vandenberghe et al., 2011).

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- ارزیابی همبستگی بین متغیرها

جدول ۳ نتایج آماره‌های τ کندال و $\rho_{\text{H}}^{\text{Spearman}}$ همبستگی بین متغیرهای مختلف شامل مقادیر حداکثر سالانه دبی سیل (Q_w)، بار رسوبات معلق (Q_{ss}) و بار رسوبات بستر (Q_{bs}) را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۳، بین متغیرهای مختلف همبستگی برقرار است و مقادیر p-value برای تمام متغیرها کمتر از ۰/۰۵ بوده و بنابراین همبستگی بین متغیرها در سطح خطا ۵ درصد قابل قبول است. با توجه به جدول ۳، مقدار τ کندال بین متغیرهای دبی سیل و بار رسوب معلق (Q_w - Q_{ss})، دبی سیل و بار رسوب بستر (Q_w - Q_{bs}) و بار رسوب معلق و بار رسوب بستر (Q_{ss} - Q_{bs}) به ترتیب برابر با ۰/۳۷، ۰/۵۷۵ و ۰/۶۳۶ است. این نشان می‌دهد که همبستگی بین هر جفت متغیرها مثبت است. همچنین همبستگی بین زوج دبی سیل - بار رسوب بستر بیشتر از همبستگی بین زوج دبی سیل - بار رسوب معلق است. علاوه بر این همبستگی بین زوج بار رسوب بستر - بار رسوب معلق بیشتر از همبستگی بین زوج بار رسوب بستر - دبی سیل است.

۳-۲- برآورد توزیع‌های حاشیه‌ای

پس از آماده‌سازی مقادیر حداکثر سالانه دبی سیل، بار رسوب معلق و بستر در محل ایستگاه هیدرومتری سیرا کرج، از ۱۷ تابع توزیع آماری رایج و پیشرفته برای انتخاب توزیع حاشیه‌ای متناسب با داده‌ها استفاده شد.

نشان‌دهنده برازش کامل و انطباق کامل بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده می‌باشد (Nash and Sutcliffe, 1970):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (C_p(i) - C_e(i))^2}{\sum_{i=1}^n (C_e(i) - \bar{C}_e)^2} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [C_p(i) - C_e(i)]^2} \quad (9)$$

که در آن n تعداد نمونه، C_p مقادیر محاسبه شده مفصل پارامتری، C_e مقادیر متناظر مفصل تجربی و \bar{C}_e میانگین مقادیر بدست آمده از مفصل تجربی است.

۴-۲- دوره‌های بازگشت توأم^۵ دو متغیره

برای حالت چند متغیره، دوره بازگشت توأم متغیرهای تصادفی X_1, X_2, \dots, X_n از طریق توزیع توأم چند متغیره آنها می‌تواند محاسبه شود. دوره بازگشت توأم چند متغیره می‌تواند به صورت سناریوهای "OR" و "AND" تعریف شود (Salvadori and De Michele, 2004; Gräler et al., 2013; Sraj et al., 2015). سناریو "OR" تحت شرایطی است که حداقل یکی از متغیرها (X_i ($i = 1, 2, \dots, n$)) از آستانه متناظر تجاوز کند. بنابراین دوره بازگشت توأم "OR" با احتمال $P(X_1 \geq x_1 \vee X_2 \geq x_2 \vee \dots \vee X_n \geq x_n)$ است. سناریو "AND" حالتی است که تمام متغیرها (X_i ($i = 1, 2, \dots, n$)) از مقادیر آستانه متناظر تجاوز کند. بنابراین دوره بازگشت توأم "AND" متناظر با احتمال $P(X_1 \geq x_1 \wedge X_2 \geq x_2 \wedge \dots \wedge X_n \geq x_n)$ است. با استفاده از مفصل‌ها دوره بازگشت توأم در حالت دو متغیره به صورت زیر بیان می‌شود:

$$T_{AND} = \frac{\omega_T}{1 - u - v + C_{uv}(u, v)} \quad (10)$$

$$T_{OR} = \frac{\omega_T}{1 - C_{uv}(u, v)} \quad (11)$$

Table 3- Results of Kendall τ and Spearman rho statistics in correlation between different variables

جدول ۳- نتایج آماره‌های τ کندال و rho اسپیرمن در همبستگی بین متغیرهای مختلف

Variables	Correlation type	Correlation Coefficient	p-value	Significant at 5%?
Qw-Qss	Kendall rank	0.370	0.0019	Yes
	Spearman's rank-order	0.528	0.0011	Yes
Qw-Qbs	Kendall rank	0.575	0.0088	Yes
	Spearman's rank-order	0.720	0.0110	Yes
Qss-Qbs	Kendall rank	0.636	0.0032	Yes
	Spearman's rank-order	0.797	0.0032	Yes

سیل- بار رسوب بستر، تابع مفصل Shih-Louis از کمترین ریشه میانگین مربعات خطا و بیشترین ضریب ناش-ساتکلیف برخوردار است. علاوه بر این با توجه به جدول ۵، تابع مفصل Gaussian از کمترین ریشه میانگین مربعات خطا و بیشترین ضریب ناش-ساتکلیف در تحلیل وابستگی بین متغیرهای بار رسوب معلق- بار رسوب بستر برخوردار است.

شکل ۳ ساختار وابستگی مقادیر دبی سیل- بار رسوب معلق، دبی سیل- بار رسوب بستر و بار رسوب معلق- بار رسوب بستر با بکارگیری بهترین توابع مفصل برای هر جفت متغیر نشان می‌دهد. در شکل ۳ (a, c)، خطوط هم‌احتمال توأم بصورت رنگی با چگالی توأم مختلف نشان داده شده‌اند که رنگ آبی بیانگر چگالی حداقل و رنگ قرمز بیانگر چگالی حداکثر است. همچنین نقاط آبی رنگ در شکل ۳، مقادیر مشاهداتی مربوط به متغیرهای موردنظر را نشان می‌دهند. در شکل ۳ با توجه به تمرکز داده‌های مشاهداتی، چگالی حداقل و حداکثر برای هر خط هم‌احتمال توأم مشخص می‌گردد. خطوط هم‌احتمال در نقاط با تمرکز بیشتر داده‌های مشاهداتی با رنگ قرمز تیره نشان داده شده که بیانگر چگالی حداکثر است. همچنین در محدوده‌ای که تمرکز داده‌های مشاهداتی کم و یا بدون داده مشاهداتی است، خطوط هم‌احتمال با رنگ آبی نشان داده شده که بیانگر چگالی حداقل است.

نکویی برازش توزیع‌های آماری مورد استفاده با استفاده از آزمون کای اسکوئر و کلموگروف-اسمیرنیوف از نظر آماری بررسی شد. نتایج بررسی نکویی برازش داده‌های مورد نظر با توزیع‌های آماری در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به جدول ۴، بهترین توزیع برای متغیرهای حداکثر سالانه دبی سیل، بار رسوب معلق و بستر به ترتیب Rayleigh، Inverse gaussian و Loglogistic است. در شکل ۲، e و c به ترتیب توزیع حاشیه‌ای برازش داده شده به مقادیر حداکثر سالانه دبی سیل، بار رسوب معلق و بار رسوب بستر را نشان می‌دهد. همچنین مقایسه احتمال تجربی و احتمال برازش داده شده به مقادیر حداکثر سالانه دبی سیل، بار رسوب معلق و بار رسوب بستر به ترتیب در شکل ۲ (b, d, f) نشان داده شده است.

۳-۳- تعیین بهترین تابع مفصل در تحلیل وابستگی بین متغیرها

برای انتخاب مناسب‌ترین تابع مفصل برای تحلیل وابستگی بین متغیرها، از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب ناش-ساتکلیف استفاده شد. مقادیر شاخص‌های آماری برای توابع مفصل مورد استفاده در تحلیل وابستگی بین متغیرهای مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۵، تابع مفصل Tawn از کمترین ریشه میانگین مربعات خطا و بیشترین ضریب ناش-ساتکلیف در تحلیل وابستگی بین متغیرهای دبی سیل- بار رسوب معلق برخوردار است. همچنین در تحلیل وابستگی بین متغیرهای دبی

Table 4- Fitting of statistical distribution functions on the maximum annual variables of flood discharge, suspended and bed sediment load

جدول ۴- برازش توابع توزیع آماری بر متغیرهای حداکثر سالانه دبی سیل، بار رسوبات معلق و بستر

Variable	Fitted distribution	χ^2 test		K-S test	
		Statistic	Critical value	Statistic	Critical value
(cms) Qw	Rayleigh	0.96	7.81	0.14	0.23
Qss (ton/day)	Inverse gaussian	4.03	9.48	0.19	0.23
Qbs (ton/day)	Loglogistic	0.35	3.84	0.19	0.36

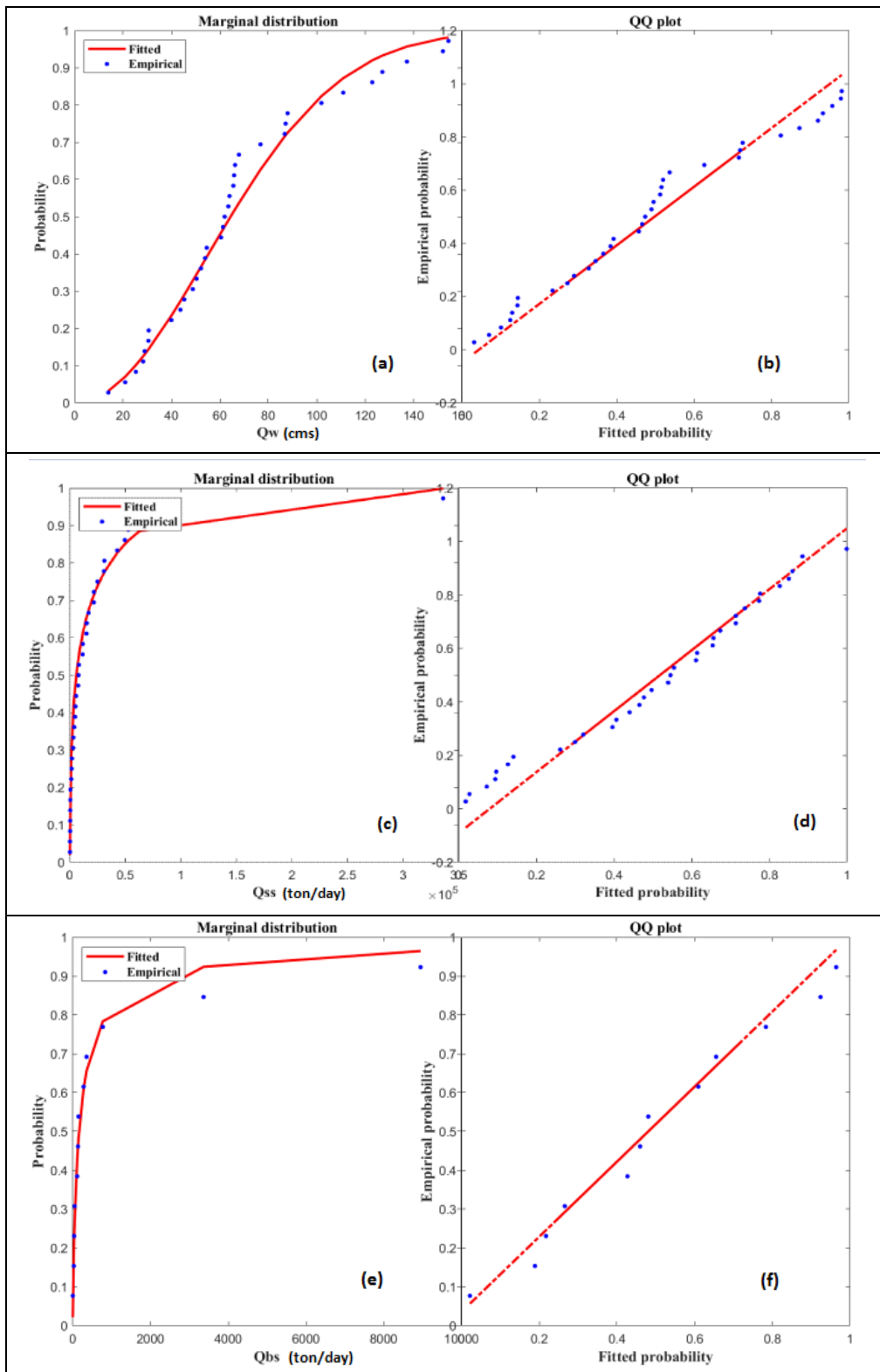


Fig. 2- Marginal distribution fitted to the maximum annual values of flood discharge (a), suspended sediment load (c) and bed sediment load (e), comparison of empirical probability and probability fitted to flood discharge (b), suspended sediment load (d) and bed sediment load (f)

شکل ۲- توزیع حاشیه‌ای برازش داده شده به مقادیر حداکثر سالانه دبی سیل (a)، بار رسوب معلق (c) و بار رسوب بستر (e)، مقایسه احتمال تجربی و احتمال برازش داده شده به دبی سیل (b)، بار رسوب معلق (d) و بار رسوب بستر (f)

می‌باشد، بنابراین منحنی‌های هم‌مفصل مقادیر متغیرهای دبی سیل - بار رسوب بستر بصورت ضخیم و به رنگ قرمز نشان داده شده است.

شکل ۴ خطوط هم‌احتمال دبی سیل - بار رسوب معلق، دبی سیل - بار رسوب بستر و بار رسوب معلق - بار رسوب بستر را نشان می‌دهد. در شکل ۴، متغیرها در محور x و y بصورت احتمال می‌باشد. در فضای احتمالاتی برای تحلیل وابستگی بین متغیرها، خطوط هم‌احتمال مفصل متقارن هستند. در شکل ۴ (a, c)، خطوط هم‌احتمال توأم بصورت رنگی با چگالی توأم مختلف نشان داده شده‌اند که رنگ آبی بیانگر چگالی حداقل و رنگ قرمز بیانگر چگالی حداکثر است. همچنین نقاط آبی رنگ در شکل ۴، بیانگر جفت مقادیر احتمال متناظر با

مقادیر چگالی احتمال توأم به منظور نمایش گرافیکی در دامنه صفر تا یک نرمال‌سازی شده‌اند. چگالی توأم حداکثر بیانگر شانس وقوع بیشتر برای جفت متغیر بوده و چگالی توأم حداقل بیانگر شانس وقوع کمتر برای جفت متغیر است. خطوط هم‌مفصل بین مقادیر دبی سیل - بار رسوب معلق در شکل ۳ (a) که با مفصل Tawn بدست آمده بطور مشهود در بخش پایین سمت راست نامتقارن است. به عبارتی برای دامنه تغییرات گسترده برای دبی سیل یک محدوده مشخص و کم برای تغییرات بار رسوب معلق وجود دارد. در واقع مفصل Tawn شکل خاصی از خانواده مفصل بنام مفصل Khoudraji است که برای تولید مفصل‌های نامتقارن طراحی شده است (Frees and Valdez, 1998). در شکل ۳ (b) بعلاوه این‌که عدم قطعیت در پارامترهای تابع مفصل زیاد

Table 5- Statistical indices of the used copula functions in the dependence analysis between different variables

جدول ۵- شاخص‌های آماری توابع مفصل مورد استفاده در تحلیل وابستگی بین متغیرهای مختلف

Copula Name	Qw-Qss		Qw-Qbs		Qss-Qbs	
	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE
Gaussian	0.104	0.9953	0.1088	0.9805	0.0682	0.9939
t	0.1038	0.9953	0.0892	0.9869	0.068	0.9939
Clayton	0.1427	0.9912	0.1091	0.9804	0.0792	0.9918
Frank	0.101	0.9956	0.1122	0.9793	0.082	0.9912
Gumbel	0.1071	0.995	0.1092	0.9804	0.0758	0.9925
Independence	0.4169	0.9246	0.4162	0.7148	0.4311	0.7566
AMH	0.1667	0.9879	0.2329	0.9107	0.243	0.9226
Joe	0.1284	0.9928	0.1107	0.9798	0.0962	0.9879
FGM	0.2177	0.9794	0.3	0.8518	0.3032	0.8796
Plackett	0.0994	0.9957	0.1237	0.9748	0.0834	0.9909
Cuadras-Auge	0.1097	0.9948	0.0976	0.9843	0.0907	0.9892
Raftery	0.1546	0.9896	0.1088	0.9805	0.083	0.991
Shih-Louis	0.1167	0.9941	0.0926	0.9859	0.0864	0.9902
Linear-Spearman	0.1167	0.9941	0.0926	0.9859	0.0864	0.9902
Cubic	0.4022	0.9298	0.3978	0.7395	0.4106	0.7792
Burr	0.1242	0.9933	0.1088	0.9805	0.0958	0.988
Nelsen	0.101	0.9956	0.1122	0.9793	0.082	0.9912
Galambos	0.1079	0.995	0.1092	0.9804	0.0756	0.9925
Marshal-Olkin	0.0985	0.9958	0.0947	0.9852	0.0756	0.9925
Fischer-Hinzmann	0.1094	0.9948	0.0889	0.987	0.0831	0.991
Roch-Alegre	0.103	0.9954	0.1088	0.9805	0.0672	0.9941
Fischer-Kock	0.2179	0.9794	0.3	0.8518	0.3032	0.8796
BB1	0.1048	0.9952	0.1053	0.9818	0.0631	0.9948
BB5	0.1071	0.995	0.1088	0.9805	0.0756	0.9925
Tawn	0.0929	0.9963	0.0949	0.9852	0.074	0.9928

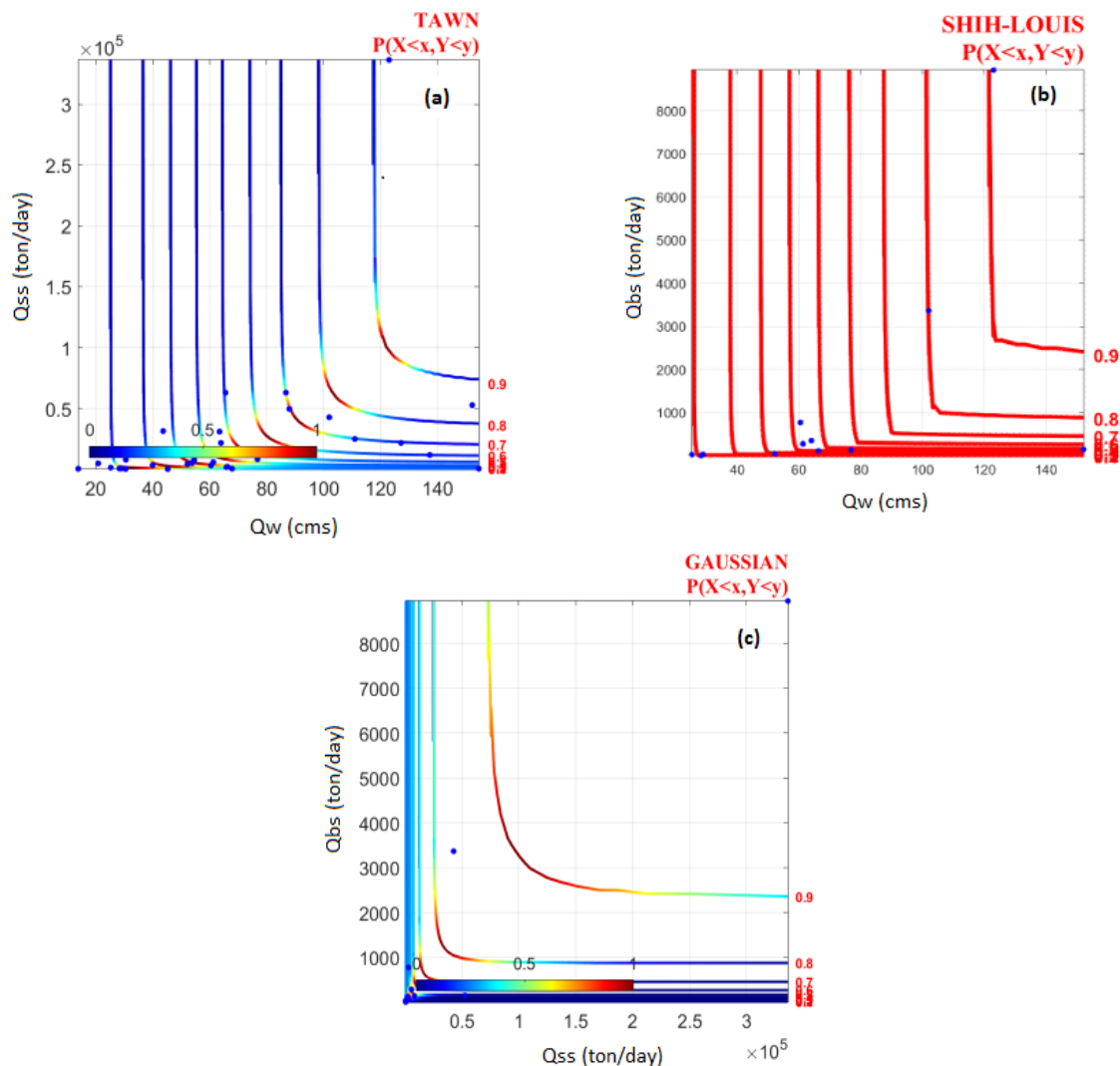


Fig. 3- Dependence structure of flood discharge-suspended sediment load (a), flood discharge-bed sediment load (b) and suspended sediment load-bed sediment load (c)

شکل ۳- ساختار وابستگی دبی سیل - بار رسوب معلق (a)، دبی سیل - بار رسوب بستر (b) و بار رسوب معلق - بار رسوب بستر (c)

محور Y در مقیاس لگاریتمی است. در شکل‌های ۵ تا ۷ (b)، خطوط هم دوره بازگشت توأم بصورت رنگی با چگالی توأم مختلف نشان داده شده‌اند که رنگ آبی بیانگر چگالی حداقل و رنگ قرمز بیانگر چگالی حداکثر است. همچنین نقاط آبی رنگ در شکل‌های ۵ (b) تا ۷ (b)، بیانگر جفت مقادیر مشاهداتی مربوط به متغیرهای مورد نظر را نشان می‌دهند. در شکل ۵ (a) و ۷ (a) نقاط متناظر با چگالی توأم حداکثر که با رنگ قرمز تیره مشخص شده، شانس وقوع بیشتری دارند.

در شکل ۵ (b)، با توجه به پراکندگی مقادیر مشاهداتی متناظر دبی سیل و بار رسوبات معلق، یک مقدار معین بار رسوب معلق به ازای دامنه تغییرات گسترده ای از دبی سیل منتقل می‌شود.

داده‌های مشاهداتی مربوط به متغیرهای مورد نظر را نشان می‌دهند. در شکل ۴ (a, c)، نقاط متناظر با چگالی توأم حداکثر که با رنگ قرمز تیره مشخص شده، شانس وقوع بیشتری دارند.

شکل ۵ دوره‌های بازگشت تک متغیره بار رسوب معلق و دبی سیل و خطوط هم دوره بازگشت توأم با سناریو "OR" حاصل از تابع مفصل TAWN را نشان می‌دهد. دوره‌های بازگشت تک متغیره بار رسوب بستر، دبی سیل و خطوط هم دوره بازگشت توأم با سناریو "OR" حاصل از تابع مفصل SHIH-LOUIS در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۷ دوره‌های بازگشت تک متغیره بار رسوب بستر، بار رسوب معلق و خطوط هم دوره بازگشت توأم با سناریو "OR" حاصل از تابع مفصل GAUSSIAN را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۵ تا ۷ (a, c)،

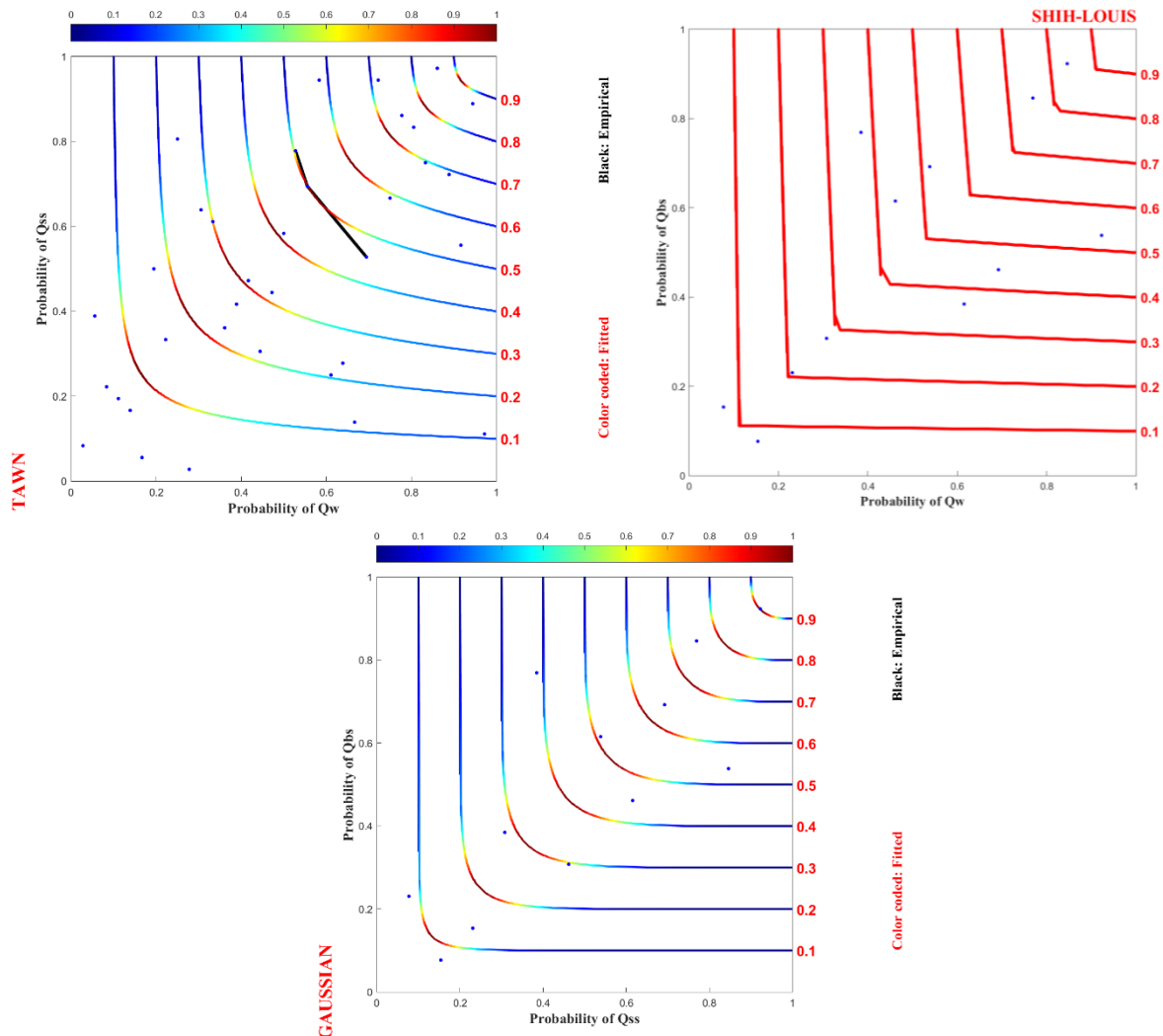


Fig. 4- Probability isolines of flood discharge - suspended sediment load (a), flood discharge - bed sediment load (b) and suspended sediment load - bed sediment load (c)
 شکل ۴- خطوط هم‌احتمال دبی سیل- بار رسوب معلق (a)، دبی سیل- بار رسوب بستر (b) و بار رسوب معلق- بار رسوب بستر (c)

است. نقاط متناظر با چگالی توأم حداکثر که با رنگ قرمز تیره مشخص شده، شانس وقوع بیشتری دارند. با توجه به شکل ۴ در شرایط عبور دبی سیل ۶۰ مترمکعب در ثانیه متناظر با دوره بازگشت توأم با سناریو "OR" برابر با ۲ سال، بار رسوب معلق و بستر انتقالی همراه با سیلاب به ترتیب برابر با ۲۰ هزار تن در روز و ۴۰۰ تن در روز است. همچنین به ازای سیلاب با دبی ۱۰۵ مترمکعب در ثانیه متناظر با دوره بازگشت توأم با سناریو "OR" برابر با ۵ سال، مقادیر بار رسوب منتقل شده به ترتیب برابر با ۶۰ هزار تن در روز و ۱۱۰۰ تن در روز است. در شرایط دبی سیلابی ۱۲۵ مترمکعب در ثانیه به ازای دوره بازگشت توأم با سناریو "OR" برابر با ۱۰ سال، بار رسوب معلق و بستر انتقالی به ترتیب برابر با ۱۰۰ هزار تن در روز و ۲۵۰۰ تن در روز می‌باشد.

همچنین در شکل ۵ (b)، با افزایش مقادیر توأم دبی سیل و بار رسوب معلق، دوره بازگشت توأم افزایش می‌یابد. در شکل ۶ (b)، با افزایش مقادیر توأم دبی سیل و بار رسوب بستر، دوره بازگشت توأم افزایش خواهد یافت. علاوه بر این با توجه به شکل ۷ (b)، با افزایش مقادیر توأم بار رسوب معلق و بار رسوب بستر، دوره بازگشت توأم افزایش یافته است.

مقادیر کمی چندمتغیره بار رسوب معلق پیک، دبی سیل پیک و بار رسوب بستر پیک برای دوره بازگشت‌های مختلف با سناریو "OR" در جدول ۶ نشان داده شده است. مقادیر در جدول ۶ برای جفت متغیرهای مختلف، مربوط به نقطه با حداکثر چگالی توأم بر روی خطوط هم دوره بازگشت توأم با سناریو "OR" در شکل‌های ۵ (b)، ۶ (b) و ۷ (b)

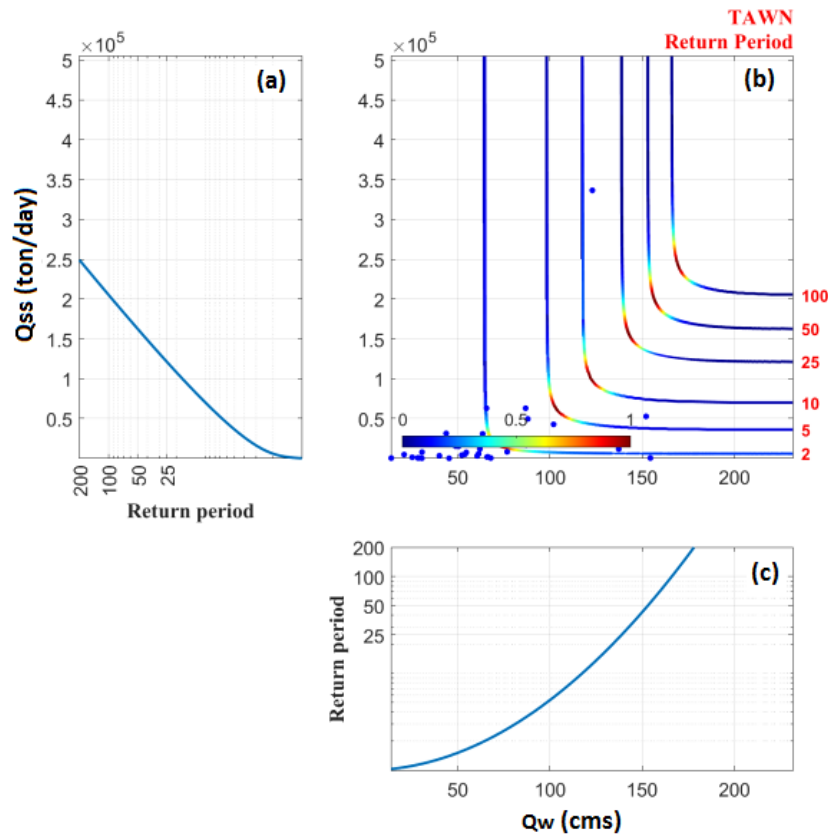


Fig. 5- Univariate return periods of suspended sediment load (a), flood discharge (c) and joint return period isolines with "OR" scenario resulting from the TAWN copula (b)

شکل ۵- دوره‌های بازگشت تک‌متغیره بار رسوب معلق (a)، دبی سیل (c) و خطوط هم دوره بازگشت توأم با سناریو "OR" حاصل از مفصل TAWN (b)

متغیرهای موردنظر را نشان می‌دهند. خطوط هم‌احتمال دو متغیره توأم متناظر با دوره بازگشت سناریو "AND"، مرزهای درونی دارند. به عبارتی محدوده توسط محورهای افقی و عمودی محدود می‌شوند.

با توجه به شکل ۸ (a)، با کاهش احتمال توأم سناریو "AND" (متناظر با افزایش دوره بازگشت سناریو "AND")، مقادیر توأم دبی سیل و بار رسوب معلق و بستر افزایش می‌یابد. به ازای دوره بازگشت توأم با سناریو "AND" برابر با ۵ سال در شکل ۸ (a)، مقادیر دبی سیل و بار رسوب معلق با حداکثر احتمال وقوع به ترتیب برابر با ۸۰ مترمکعب در ثانیه و ۲۵۰۰۰ تن در روز است. همچنین مقادیر با حداکثر احتمال وقوع دبی سیل و بار رسوب معلق با دوره بازگشت توأم با سناریو "AND" برابر با ۱۰ سال، به ترتیب برابر با ۱۰۰ مترمکعب در ثانیه و ۵۰۰۰۰ تن در روز است. به همین ترتیب به ازای دوره بازگشت توأم با سناریو "AND" برابر با ۲۰ سال، مقادیر دبی سیل و بار رسوب معلق با حداکثر احتمال وقوع به ترتیب برابر با ۱۱۵ مترمکعب در ثانیه و ۸۵۰۰۰ تن در روز است. به ازای دوره بازگشت توأم با سناریو

در نهایت در شرایط سیلاب با دبی ۱۴۰ مترمکعب در ثانیه به ازای دوره بازگشت توأم با سناریو "OR" برابر با ۲۵ سال، بار رسوب معلق و بستر انتقالی به ترتیب برابر با ۱۵۰ هزار تن در روز و ۸۷۰۰ تن در روز است.

خسارات جدی در طی وقایع حدی رسوب رخ می‌دهد، زمانی که هم دبی سیل و هم بار رسوب از یک مقدار معین تجاوز کند. بنابراین سناریو "AND" برای تحلیل در نظر گرفته شده است. با بکارگیری رابطه ۱۰، دوره بازگشت‌های توأم "AND" دو متغیره بر مبنای بهترین توابع مفصل بدست می‌آید. شکل ۸ خطوط هم‌احتمال دو متغیره توأم متناظر با دوره بازگشت سناریو "AND" برای متغیرهای دبی سیل، بار رسوب معلق و بستر را نشان می‌دهد. در شکل ۸، خطوط هم‌احتمال توأم بصورت رنگی با چگالی توأم مختلف نشان داده شده‌اند که رنگ آبی بیانگر چگالی حداقل و رنگ قرمز بیانگر چگالی حداکثر است. نقاط با مقادیر چگالی احتمال توأم حداکثر، شانس وقوع بیشتری دارند. همچنین نقاط آبی رنگ بیانگر جفت مقادیر مشاهداتی مربوط به

“AND” برابر با ۱۰۰ سال، مقادیر دبی سیل و بار رسوب معلق با حداکثر احتمال وقوع به ترتیب برابر با ۱۵۵ مترمکعب در ثانیه و ۱۸۰۰۰ تن در روز است. با توجه به شکل ۸ (b)، به ازای دوره بازگشت توأم با سناریو “AND” برابر با ۵ سال، مقادیر دبی سیل و بار رسوب بستر با حداکثر احتمال وقوع به ترتیب برابر با ۹۸ مترمکعب در ثانیه و ۸۰۰ تن در روز است.

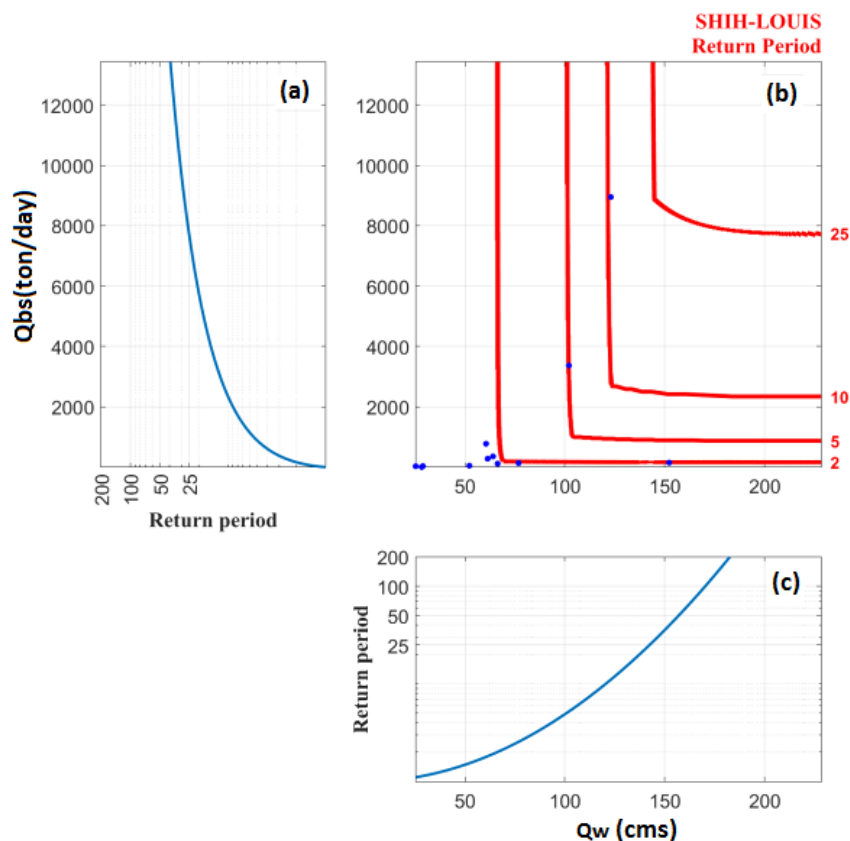


Fig. 6- Univariate return periods of bed sediment load (a), flood discharge (c) and joint return period isolines with "OR" scenario resulting from the SHIH-LOUIS copula (b)

شکل ۶- دوره‌های بازگشت تک‌متغیره بار رسوب بستر (a)، دبی سیل (c) و خطوط هم دوره بازگشت توأم با سناریو “OR” حاصل از مفصل SHIH-LOUIS (b)

Table 6- Multivariate quantile values of peak suspended sediment load (Qss), peak flood discharge (Qw) and peak bed sediment load (Qbs) for different return periods with “OR” scenario

جدول ۶- مقادیر کمی چندمتغیره بار رسوب معلق اوج (Qss)، دبی سیل اوج (Qw) و بار رسوب بستر اوج (Qbs) برای دوره بازگشت‌های مختلف با سناریو “OR”

Return period (year)	Bivariate quantile		Bivariate quantile		Bivariate quantile	
	Qw (cms)	Qss (10 ⁵ ton/day)	Qw (cms)	Qbs (ton/day)	Qss (10 ⁵ ton/day)	Qbs (ton/day)
2	60	0.2	60	400	0.15	350
5	105	0.6	105	1000	0.2	1100
10	125	1	125	2500	1	3500
25	140	1.5	140	8700	3.2	10000
50	155	2	155			
100	165	2.5	165			

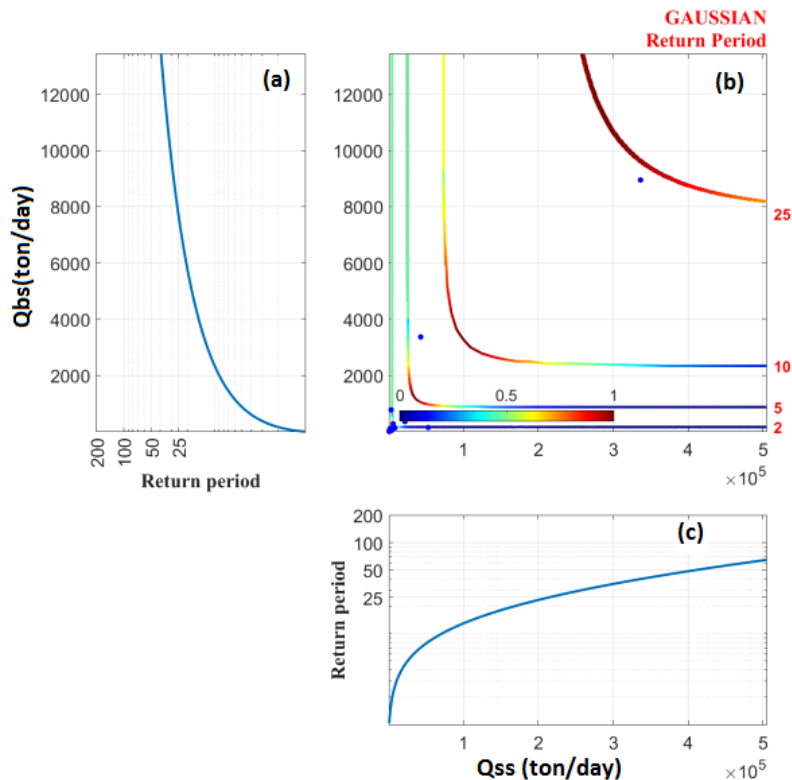


Fig. 7- Univariate return periods of bed sediment load (a), suspended sediment load (c) and joint return period isolines with "OR" scenario resulting from the GAUSSIAN copula (b)

شکل ۷- دوره‌های بازگشت تک‌متغیره بار رسوب بستر (a)، بار رسوب معلق (c) و خطوط هم دوره بازگشت توأم با سناریو "OR" حاصل از مفصل GAUSSIAN (b)

بنابراین برای پیش‌بینی رسوبگذاری در مخازن و رودخانه‌ها، مهم است که دوره بازگشت توأم یا چگالی احتمالاتی توأم از یک ترکیب مشخص بار رسوب معلق و بستر و دبی سیل در نظر گرفته شود. با استفاده از تحلیل فراوانی چند متغیره با توابع مفصل، می‌توان مقادیر کمی طراحی با بیشترین احتمال بار رسوب معلق و بستر و دبی سیل را با انتخاب نقاط با بزرگترین چگالی احتمال توأم بر مبنای دوره بازگشت توأم "AND" بدست آورد (Salvadori et al., 2011, 2014).

جدول ۷ مقادیر کمی تک‌متغیره و دو متغیره بار رسوب معلق پیک، دبی سیل اوج و بار رسوب بستر پیک برای دوره بازگشت‌های مختلف با سناریو "AND" را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه مقادیر کمی طراحی تک متغیره متناظر در جدول ۷ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۷، مقادیر کمی با بیشترین احتمال برآورده شده با دوره بازگشت توأم "AND" کوچکتر از مقادیر تک متغیره هستند. به عنوان مثال، با توجه به جدول ۷، مقادیر بار رسوب معلق اوج به ازای دوره بازگشت ۵ سال برای وابستگی دو متغیره زوج‌های دبی سیل- بار رسوب معلق و بار رسوب معلق- بار رسوب بستر به ترتیب برابر با

همچنین مقادیر با حداکثر احتمال وقوع دبی سیل و بار رسوب بستر با دوره بازگشت توأم با سناریو "AND" برابر با ۱۰ سال، به ترتیب برابر با ۱۱۷ مترمکعب در ثانیه و ۲۰۰۰ تن در روز است. به ازای دوره بازگشت توأم با سناریو "AND" برابر با ۲۰ سال، مقادیر دبی سیل و بار رسوب بستر با حداکثر احتمال وقوع به ترتیب برابر با ۱۳۴ مترمکعب در ثانیه و ۴۹۰۰ تن در روز است.

علاوه بر این به ازای دوره بازگشت توأم با سناریو "AND" برابر با ۵ سال در شکل ۸ (c)، مقادیر بار رسوب معلق و بار رسوب بستر با حداکثر احتمال وقوع به ترتیب برابر با ۱۲۰۰۰ تن در روز و ۷۰۰ تن در روز است. همچنین مقادیر با حداکثر احتمال وقوع بار رسوب معلق و بار رسوب بستر با دوره بازگشت توأم با سناریو "AND" برابر با ۱۰ سال، به ترتیب برابر با ۴۵۰۰۰ تن در روز و ۱۵۰۰ تن در روز است. به ازای دوره بازگشت توأم با سناریو "AND" برابر با ۲۰ سال، مقادیر بار رسوب معلق و بار رسوب بستر با حداکثر احتمال وقوع به ترتیب برابر با ۱۱۰۰۰۰ تن در روز و ۳۵۰۰ تن در روز است.

سال است. با توجه به اینکه بار رسوب بستر اوج به ازای دوره بازگشت ۵ سال برای تحلیل تک متغیره برابر با ۱۱۰۰ تن در سال است، بنابراین کاهش در بار رسوب بستر اوج به ازای دوره بازگشت ۵ سال برای زوج‌های دبی سیل- بار رسوب بستر و بار رسوب معلق- بار رسوب بستر به ترتیب برابر با ۲۷/۳ درصد و ۳۶/۴ درصد است.

بطور مشابه برای دوره بازگشت ۱۰ سال، درصد کاهش در بار رسوب معلق اوج برای زوج‌های دبی سیل- بار رسوب معلق و بار رسوب معلق- بار رسوب بستر به ترتیب برابر با ۵۰ درصد و ۵۵ درصد است.

۲۵۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ تن در سال است. با توجه به اینکه بار رسوب معلق اوج به ازای دوره بازگشت ۵ سال برای تحلیل تک متغیره برابر با ۶۰۰۰۰ تن در سال است، بنابراین کاهش در بار رسوب معلق اوج به ازای دوره بازگشت ۵ سال برای زوج‌های دبی سیل- بار رسوب معلق و بار رسوب معلق- بار رسوب بستر به ترتیب برابر با ۵۸/۳ درصد و ۸۰ درصد است.

همچنین با توجه به جدول ۷، مقادیر بار رسوب بستر اوج به ازای دوره بازگشت ۵ سال برای تحلیل دو متغیره دبی سیل- بار رسوب بستر و بار رسوب معلق- بار رسوب بستر به ترتیب برابر با ۸۰۰ و ۷۰۰ تن در

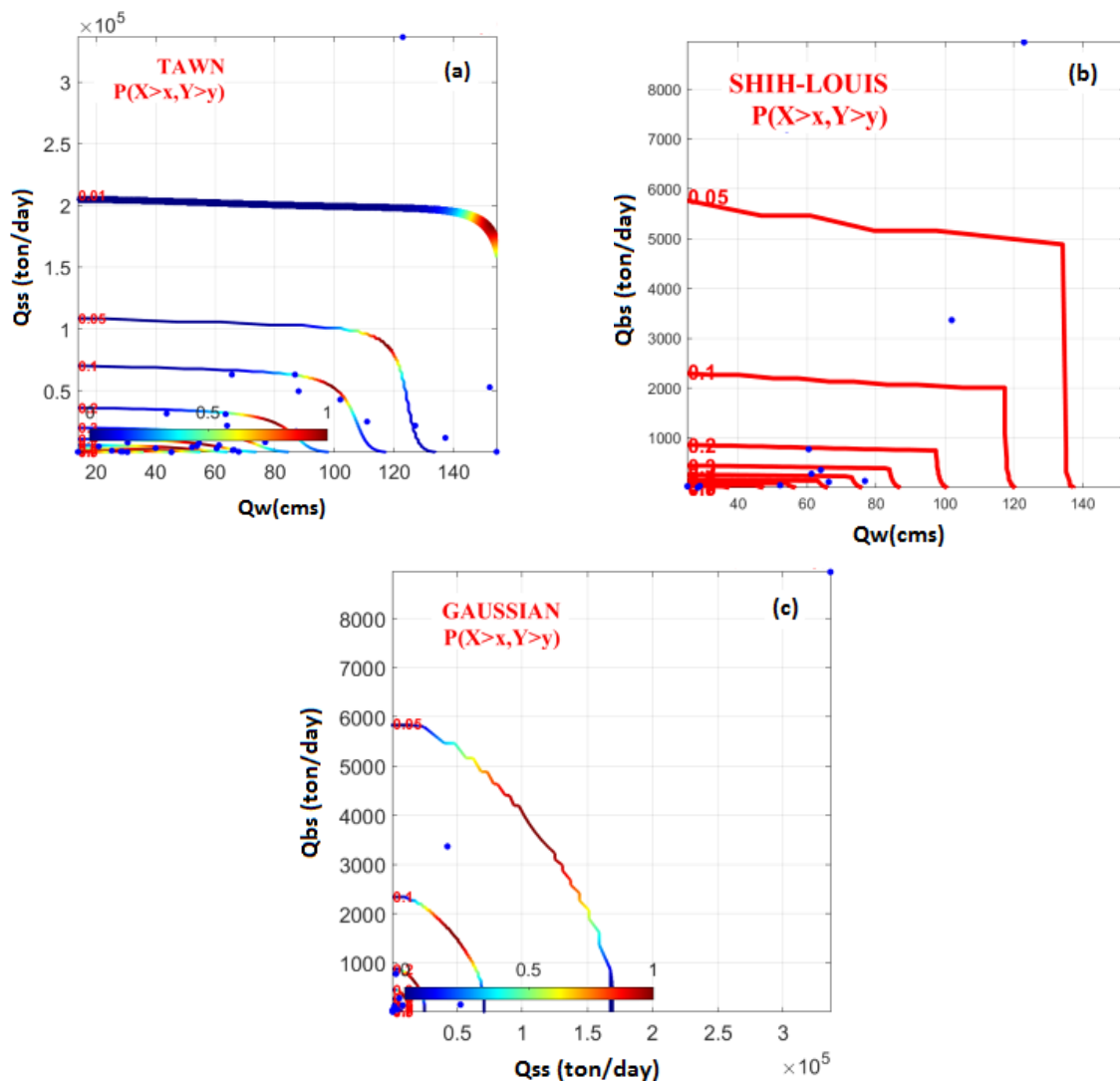


Fig. 8- Bivariate joint probability isolines corresponding to the return period with the “AND” scenario for flood discharge - suspended sediment load (a), flood discharge - bed sediment load (b) and suspended sediment load - bed sediment load (c)

شکل ۸- خطوط هم‌احتمال دو متغیره توأم متناظر با دوره بازگشت با سناریو “AND” برای دبی سیل- بار رسوب معلق (a)، دبی سیل- بار رسوب بستر (b) و بار رسوب معلق- بار رسوب بستر (c)

Table 7- Univariate and Bivariate quantile values of peak suspended sediment load (Qss), peak flood discharge (Qw) and peak bed sediment load (Qbs) for different return periods with "AND" scenario
 جدول ۷- مقادیر کمی چندمتغیره بار رسوب معلق پیک (Qss)، دبی سیل پیک (Qw) و بار رسوب بستر پیک (Qbs) برای دوره بازگشت‌های مختلف با سناریو "AND"

Return period (year)	Univariate quantile			Bivariate quantile		Bivariate quantile		Bivariate quantile	
	Qw (cms)	Qss (10 ⁵ ton/day)	Qbs (ton/day)	Qw (cms)	Qss (10 ⁵ ton/day)	Qw (cms)	Qbs (ton/day)	Qss (10 ⁵ ton/day)	Qbs (ton/day)
5	105	0.6	1100	80	0.25	98	800	0.12	700
10	125	1	3500	100	0.5	117	2000	0.45	1500
20	137	1.3	5700	115	0.85	134	4900	1.1	3500
100	165	2.5		155	1.8				

نشان می‌دهد که توزیع‌های Rayleigh، Inverse gaussian و Loglogistic، به ترتیب بهترین توزیع حاشیه‌ای برای متغیرهای حداکثر سالانه دبی سیل، بار رسوب معلق و بستر هستند. نتایج نشان می‌دهد که همبستگی بین زوج‌های دبی سیل - بار رسوب معلق، دبی سیل - بار رسوب بستر و بار رسوب معلق - بار رسوب بستر مثبت است. همچنین همبستگی بین زوج دبی سیل - بار رسوب بستر بیشتر از همبستگی بین زوج دبی سیل - بار رسوب معلق است. علاوه بر این همبستگی بین زوج بار رسوب معلق - بار رسوب بستر بیشتر از همبستگی بین زوج دبی سیل - بار رسوب معلق است. نتایج نشان می‌دهد که توابع مفصل Tawn، Shih-Louis و Gaussian به ترتیب بهترین توزیع‌های توأم برای زوج‌های دبی سیل - بار رسوب معلق، دبی سیل - بار رسوب بستر و بار رسوب معلق - بار رسوب بستر هستند. دوره بازگشت توأم معلوم مرتبط با ترکیبات متعدد بار رسوب معلق، بار رسوب بستر و دبی سیل با مقادیر چگالی احتمال توأم مختلف هستند. ترکیبات با مقادیر چگالی احتمال توأم بزرگتر، شانس بیشتری از لحاظ وقوع دارند. بر اساس سناریو "AND" مقادیر طراحی چندمتغیره بار رسوب معلق و بستر کوچکتر از مقادیر تک متغیره هستند. این نشان می‌دهد که در نظر نگرفتن همبستگی بین بار رسوب معلق و بستر و دبی سیل ممکن است بطور قابل توجهی وضعیت واقعی رسوب را بیشتر برآورد کند، در نتیجه احتمال وقوع متناظر را بیشتر برآورد کند. علاوه بر این، با توجه به درصد کاهش در مقادیر بار رسوب معلق و بستر اوج به علت در نظر گرفتن همبستگی بین متغیرها در تحلیل چندمتغیره، می‌توان دریافت که درصد کاهش در بار رسوب معلق اوج بیشتر از بار رسوب بستر اوج است. بنابراین احتمالات همزمانی ترکیبات بار رسوب معلق و بستر و دبی سیل اطلاعات مفیدی برای وقایع رسوب فراهم می‌کنند و برای کنترل و مدیریت عملی رسوبات مفید خواهند بود.

علاوه بر این، درصد کاهش در بار رسوب بستر اوج به ازای دوره بازگشت ۱۰ سال برای زوج‌های دبی سیل - بار رسوب بستر و بار رسوب معلق - بار رسوب بستر به ترتیب برابر با ۴۲/۹ درصد و ۵۷/۱ درصد است. همچنین برای دوره بازگشت ۲۰ سال، درصد کاهش در بار رسوب معلق اوج برای زوج‌های دبی سیل - بار رسوب معلق و بار رسوب معلق - بار رسوب بستر به ترتیب برابر با ۳۴/۶ درصد و ۱۵/۴ درصد است. همچنین درصد کاهش در بار رسوب بستر اوج به ازای دوره بازگشت ۲۰ سال برای زوج‌های دبی سیل - بار رسوب بستر و بار رسوب معلق - بار رسوب بستر به ترتیب برابر با ۱۴ درصد و ۳۸/۶ درصد است.

همچنین برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال، درصد کاهش در بار رسوب معلق اوج برای زوج دبی سیل - بار رسوب معلق برابر با ۲۸ درصد است. بنابراین با توجه به درصد کاهش در مقادیر بار رسوب معلق و بستر اوج به علت در نظر گرفتن همبستگی بین متغیرها در تحلیل چندمتغیره، می‌توان دریافت که درصد کاهش در بار رسوب معلق اوج بیشتر از بار رسوب بستر اوج است. بنابراین احتمالات همزمانی ترکیبات بار رسوب معلق و بستر و دبی سیل اطلاعات مفیدی برای وقایع رسوب فراهم می‌کنند و برای کنترل و مدیریت عملی رسوبات مفید خواهند بود.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

در این تحقیق تحلیل فراوانی چندمتغیره مقادیر حداکثر سالانه دبی سیل، بار رسوب معلق و بار رسوب بستر در ایستگاه هیدرومتری سیرا کرج با توابع مفصل مختلف انجام شد. همچنین دوره بازگشت توأم با سناریوهای "OR" و "AND" مربوط به زوج‌های دبی سیل - بار رسوب معلق، دبی سیل - بار رسوب بستر و بار رسوب معلق - بار رسوب بستر محاسبه شد و با دوره بازگشت تک متغیره مقایسه شد. نتایج

- do Iguazu Symo. Sediment Budgets 1, edited by D. E. Walling and A. J. Horowitz, 182–188. Wallingford, UK: IAHS Press
- Bacchi B, Becciu G, and Kottegoda NT (1994) Bivariate exponential model applied to intensities and durations of extreme rainfall. *Journal of Hydrology* 155(1-2):225–236
- Bezak N, Matjaž M, and Mojca S (2014) Trivariate frequency analyses of peak discharge, hydrograph volume and suspended sediment concentration data using copulas. *Water Resource Management* 28(8):2195–2212
- Bezak N, Rusjan S, Fijavž MK, Mikoš M, and Šraj M (2017) Estimation of suspended sediment loads using copula functions. *Water* 9(8):628
- Bevacqua E, Maraun D, Hobæk Haff I, Widmann M, and Vrac M (2017) Multivariate statistical modelling of compound events via pair-copula constructions: Analysis of floods in Ravenna (Italy). *Hydrology and Earth System Sciences* 21(6):2701-2723
- Brunner MI, Furrer R, and Favre AC (2019) Modeling the spatial dependence of floods using the Fisher copula. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(1):107-124
- Bonacci O and Oskoruš D (2010) The changes in the lower Drava River water level, discharge and suspended sediment regime. *Environmental Earth Sciences* 59(8):1661-1670
- Chen L, Singh VP, Guo S, Zhou J, and Zhang J (2015) Copula-based method for multisite monthly and daily streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 528:369–384
- De Michele C, Salvadori, G, Canossi M, Petaccia A, and Rosso R (2005) Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spillway. *Journal of Hydrologic Engineering* 10(1):50–57
- Frees EW and Valdez EA (1998) Understanding relationships using copulas. *North American Actuarial Journal* 2(1):1–25
- Goodarzi M, Fatehifar A, Avazpoor F (2019) Bivariate analysis of the impact of climate change on drought with SPEI index and Copula functions (Case study: Dugonbadan). *Iran-Water Resources Research* 15(4):352-365
- Gräler B, van den Berg M, Vandenberghe S, Petroselli A, Grimaldi S, De Baets B, and Verhoest N (2013) Multivariate return periods in hydrology: a critical and practical review focusing on synthetic design hydrograph estimation. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(4):1281-96
- فراهم می‌کند. (2020) Nazeri Tahroudi et al. با مقایسه تحلیل دومتغیره بیشینه دبی لحظه‌ای- بار معلق رسوب و دوره بازگشت آن با حالت تک متغیره، دریافتند که برآورد بار معلق رسوب مبتنی بر مفصل به مقادیر بار معلق رسوب مشاهداتی در ایستگاه چالخماز نزدیکتر بوده و دقت بالاتری دارد. همچنین نتیجه گرفتند که در حالت تک متغیره، برآورد بار معلق رسوب کمتر از مقدار واقعی آن در دوره بازگشت دو ساله است. بنابراین احتمالات همزمانی ترکیبات بار رسوب معلق و بستر و دبی سیل اطلاعات مفیدی برای وقایع رسوب فراهم می‌کنند و برای کنترل و مدیریت عملی رسوبات مفید خواهند بود. دوره بازگشت‌های توأم چندمتغیره وقایع شدید رسوب می‌تواند ویژگی‌های توأم بار رسوب معلق و بستر و دبی سیل را منعکس سازد و اطلاعات مفیدتری نسبت به تحلیل فراوانی تک‌متغیره تهیه کنند که برای ارزیابی ریسک وقایع شدید رسوب تحت شرایط سیلابی مفید است.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Marginal Distribution
- 2- Copula Functions
- 3- Joint Distribution
- 4- Conditional Joint Distribution
- 5- Joint Return Period

۵- مراجع

- Abbasian M and Jalali S (2015) Multivariate flood frequency analysis using copula with parametric and nonparametric marginal distribution function. *Modares Civil Engineering Journal* 14(4):81–92 (In Persian)
- Abdollahi Asadabadi S, Akhond-Ali AM, and Mirabbasi Najafabadi R (2018) Analysis of joint and conditional return periods for several dependent characteristics of runoff hydrograph using copula functions (Case study: Kasiliyan watershed). *Iran Water and Soil Research Journal* 49(2):425-437 (In Persian)
- Ahmadi F, Radmanesh F, Parham G, and Mirabbasi najafabadi R (2017) Application of archimedean copula functions in flood frequency analysis (Case study: Dez Basin). *Iran Water and Soil Research Journal* 48(3):477-489 (In Persian)
- Bahremand A, Alvandi E, Bahrami M, Dashti Marvili M, Heravi H, Khosravi GR, Kornejady A, Samadi Arghini H, Tajiki M, and Teimouri M (2015) Copula functions and their application in stochastic hydrology. *Journal of Conservation and Utilization of Natural Resources* 4(2):1-20
- Babiński Z (2005) The relationship between suspended and bed load transport in river channels. In Proc. Foz

- Rodríguez-Blanco, ML, Taboada-Castro MM, Palleiro L, and Taboada-Castro MT (2010) Temporal changes in suspended sediment transport in an Atlantic catchment, NW Spain. *Geomorphology* 123(1-2):181-188
- Sadegh M, Mofstakhari H, Gupta HV, Ragno E, Mazdiyasi O, Sanders, B, Matthew R, and AghaKouchak A (2018) Multihazard scenarios for analysis of compound extreme events. *Geophysical Research Letters* 45(11):5470-5480
- Salari M, AkhoundAli AM, Adib A, and Daneshkhah AR (2015) Bivariate flood frequency analysis using the copula functions. *Journal of Irrigation Science and Engineering* 37:29–38 (In Persian)
- Salvadori G, Michele CD, Kottegoda NT, Rosso R (2007) *Extremes in nature: An approach using copulas*. Springer Science & Business Media
- Salvadori G, Durante F, and De Michele C (2011) On the return period and design in a multivariate framework. *Hydrology Earth System Sciences* 15(11):3293–3305
- Salvadori G, Tomasicchio GR, and Alessandro FD (2014) Practical guidelines for multivariate analysis and design in coastal and offshore engineering. *Coastal Engineering* 88:1–14
- Salvadori G, and De Michele C (2004) Frequency analysis via copulas: Theoretical aspects and applications to hydrological events. *Water Resources Research* 40(12)
- Sraj M, Bezak N, and 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):225-38
- Snyder WM (1962) Some possibilities for multivariate analysis in hydrologic studies. *Journal of Geophysical Research* 67(2):721–729
- Syvitski JP and Milliman JD (2007) Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean. *The Journal of Geology* 115(1):1-19
- Tena A, Batalla RJ, Vericat D, and López-Tarazón JA (2011) Suspended sediment dynamics in a large regulated river over a 10-year period (the lower Ebro, NE Iberian Peninsula). *Geomorphology* 125(1):73-84
- Vandenberghe S, Verhoest NEC, Onof C, and De Baets B (2011) A comparative copula-based bivariate frequency analysis of observed and simulated storm events: A case study on Bartlett-Lewis modeled rainfall. *Water Resource Research* 47:1-16
- Huang S, Li P, Huang Q, and Leng G (2017) Copula-based identification of the non-stationarity of the relation between runoff and sediment load. *International Journal of Sediment Research* 32(2):221-30
- Khan F, Spöck G, and Pilz J (2020) A novel approach for modelling pattern and spatial dependence structures between climate variables by combining mixture models with copula models. *International Journal of Climatology* 40(2):1049-1066
- Khanitemeliyeh Z, Rezaie H, Mirabbasi R (2020) Frequency analysis of trivariate drought characteristics properties using nested copula functions (Case study: Eastern Iran). *Iran-Water Resources Research* 16(2):202-213
- Miao C, Ni J, Borthwick AG, and Yang L (2011) A preliminary estimate of human and natural contributions to the changes in water discharge and sediment load in the Yellow River. *Global and Planetary Change* 76(3-4):196-205
- Nash JE and Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual models; part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290
- Nelsen RB (2006) *An Introduction to Copulas*. Springer Science & Business Media, 120 p.
- Nazeri Tahroudi M, Ramezan Y, Michele CD, and Mirabbasi Najafabadi R (2020) Estimation of the joint frequency of peak flow discharge-suspended load of Zarinehrood Basin using two-dimensional analysis. *Journal of Water and Soil* 34(2):333-347 (In Persian)
- Peng Y, Shi Y, Yan H, and Zhang J (2020) Multivariate frequency analysis of annual maxima suspended sediment concentrations and floods in the Jinsha River, China. *Journal of Hydrologic Engineering* 25(9):05020029
- Peng J, Chen S, and Dong P (2010) Temporal variation of sediment load in the Yellow River basin, China, and its impacts on the lower reaches and the river delta. *Catena* 83(2-3):135-147
- Pelletier JD (2012) A spatially distributed model for the long-term suspended sediment discharge and delivery ratio of drainage basins. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117(F2)
- Rahimi L, Dehghani A, Abdolhosseini M, and Ghorbani K (2014) Flood frequency analysis using archimedean copula functions based on annual maximum series (Case study: Arazkuseh Hydrometric Station in Golestan Province). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 8(2):353–365 (In Persian)

- Annals of the Association of American Geographers
53(3):298–311
- Yang CT (1996) Sediment transport theory and practice.
New York: McGraw-Hill, 396 p
- Zhang L, and Singh VP (2006) Bivariate flood
frequency analysis using the copula method. Journal
of Hydrologic Engineering 11:150–164
- Zhang D, Yan M, and Tsopanakis A (2018) Financial
stress relationships among Euro area countries: An
R-vine copula approach. The European Journal of
Finance 24(17):1587-1608
- Vanmaercke M, Poesen J, Broeckx J, and Nysen J
(2014) Sediment yield in Africa. Earth-Science
Reviews 136:350-368
- Walling DE (2006) Human impact on land–ocean
sediment transfer by the world's
rivers. Geomorphology 79(3-4):192-216
- Walling DE (2009) The impact of global change on
erosion and sediment transport by rivers: Current
progress and future challenges. UNESCO 26 p
- Wong ST (1963) A multivariate statistical model for
predicting mean annual flood in new England.