بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده کشاورزی

کاربرد کوپلا در تحلیل فراوانی چند متغیره‌ی جریان‌های کم و ارزیابی رگرسیون کوپلایی به منظور استفاده در تحلیل متغیرهای غیرمستقل

رساله دکتری تخصصی مهندسی آب

محمد عبدالحسینی

اساتید راهنما

دکتر سید سعید اسلامیان

دکتر سید فرهاد موسوی

۱۳۹۱

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده کشاورزی

رساله دکتری تخصصی مهندسی آب آقای محمد عبدالحسینی

تحت عنوان

کاربرد کوپلا در تحلیل فراوانی چند متغیره‌ی جریان‌های کم و ارزیابی رگرسیون کوپلایی به منظور استفاده در تحلیل متغیرهای غیرمستقل

در تاریخ ۱۳۹۱/۱۰/۶ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنما	دکتر سید سعید اسلامیان
۲- استاد راهنما	دکتر سید فرهاد موسوی
۳- استاد مشاور	دکتر محمدرضا آشوری
۴- استاد مشاور	دکتر سالواتوره گریمالدی
۵- استاد داور	دکتر منوچهر حیدرپور
۶- استاد داور	دکتر سعید سلطانی کوپایی
۷- استاد داور	دکتر سید حسن طباطبایی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمد مهدی مجیدی

تشکر و قدردانی

شکر و سپاس آفریدگاری را سزاست که بشر را قدرت تعقل و تفکر عطا فرمود. یقین که الطاف بی‌کران آن دانای بی‌همتا مرا یاری نمود تا قدم در راه تحصیل گذاشته و هم او بود که دستم بگرفت و پا به پا برد.

اکنون که به پایان مرحله‌ای دیگر از این مسیر رسیدم بر خود لازم می‌دانم تا از کسانی که در این راه با من یار بودند تشکر نمایم. از استاد بسیار عزیز و ارجمندم جناب آقای **دکتر سید سعید اسلامیان** که در تمامی مراحل انجام این رساله، بهترین راهنما و پشتیبان من بودند و در طی این مدت از محضرشان کسب فیض نمودم تشکر می‌کنم. از استاد بزرگوارم جناب آقای **دکتر سید فرهاد موسوی** که با راهنمایی‌ها و همراهی‌هایشان مرا یاری نمودند قدردانی می‌کنم. از دوست عزیز و استاد مهربانم **دکتر سالواتوره کریمالدی** که علاوه بر مشاورت بسیار پرارزش و ثمربخش این رساله، در طی یک سال فرصت مطالعاتی در کشور ایتالیا از همه لحاظ مرا پشتیبانی کردند سپاسگزارم. همچنین از اساتید محترم، **دکتر سعید سلطانی**، **دکتر منوچهر حیدرپور** و **دکتر سید حسن طباطبایی** که زحمت داوری رساله را عهده‌دار شدند صمیمانه تشکر می‌کنم. همچنین، از دیگر اعضای محترم هیئت علمی گروه مهندسی آب خصوصاً اساتید گران‌قدر، **دکتر حسین افضلی‌مهر**، **دکتر جهانگیر عابدی**، **مهندس اسماعیل لندی**، **مهندس حسین سقائیان نژاد**، **دکتر مهدی قیصری** و **دکتر بهروز مصطفی‌زاده** و دوستان و اساتید عزیزم در دانشگاه توشا در ایتالیا **دکتر آندره پتروسلی**، **دکتر فرانچسکو سرینالدی** و **پروفسور گانفوستو سالوادوری** که افتخار شاگردی در محضرشان نصیبم شده و با رهنمودهای خود مرا یاری دادند قدردانی می‌نمایم.

از خانواده عزیز و صبور خود و همسرم که در تمامی مراحل زندگی، همواره مشوق و پشتیبانم بودند صمیمانه سپاسگزارم و امیدوارم بتوانم قدردان زحماتشان باشم.

از همسر عزیز و مهربانم به خاطر تمام فداکاری‌هایش که از آغاز زندگی مشترکمان خالصانه نثارم نمود و با الطاف بی‌شائبه خود طی طریق را برایم سهل و لذت‌بخش کرد تشکر می‌کنم.

از دوستان بسیار خوبم، **دکتر شهریار کارگر**، **دکتر محمدرضا فرزانه**، **دکتر رضا کیخائی**، **دکتر محمد آریانا**، **مهندس هادی حسن‌زاده**، **مهندس مهدی حسن‌زاده** و **دکتر یاسین اسروش** و دوست عزیزم در ایتالیا **دکتر ایمان یوسفی جوان** که مرا در طی این مدت صمیمانه یاری کردند تشکر می‌کنم. یاد دیگر دوستان خوبم که ذکر نامشان در این نوشته کوتاه نمی‌گنجد در خاطرم خواهد ماند و برای ایشان آرزوی توفیق روزافزون دارم.

محمد عبدالحسینی

دی ماه ۱۳۹۱

دانشگاه صنعتی اصفهان

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع
این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

همسرم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
فهرست شکل‌ها ..... یازده
فهرست جدول‌ها ..... شانزده
چکیده ۱

فصل اول مقدمه

۱-۱ تحلیل فراوانی وقایع حدی ۳
۱-۲ تحلیل فراوانی چند متغیره و توابع کوپلا ۴
۱-۳ تحلیل فراوانی جریان کم ۶
۱-۴ تحلیل وقایع چند متغیره در حالت غیر حدی ۷
۱-۵ اهداف مطالعه ۸
۱-۶ ضرورت انجام تحقیق ۹
۱-۷ ساختار رساله ۹

فصل دوم مفاهیم پایه و بررسی منابع

۲-۱ مقدمه ۱۰
۲-۲ خشکسالی و خشکی ۱۱
۲-۲-۱ مفهوم خشکسالی ۱۱
۲-۲-۲ مفهوم خشکی ۱۲
۲-۳ انواع خشکسالی ۱۲
۲-۳-۱ خشکسالی هواشناسی ۱۳
۲-۳-۲ خشکسالی کشاورزی ۱۳
۲-۳-۳ خشکسالی هیدرولوژیک ۱۴
۲-۳-۴ خشکسالی اقتصادی - اجتماعی ۱۴
۲-۴ روش‌های مطالعه‌ی خشکسالی ۱۵
۲-۴-۱ روش مطالعه‌ی بیلان آبی ۱۵
۲-۴-۲ روش‌های تحلیل سینوپتیک ۱۵
۲-۴-۳ روش تحلیل داده‌های بارندگی ۱۶
۲-۴-۴ روش‌های تحلیل جریان ۱۶
۲-۴-۵ روش استفاده از اطلاعات ژئومورفولوژیک و تاریخی ۱۷
۲-۵ نمونه مطالعات انجام شده در ایران در زمینه خشکسالی ۱۷
۲-۶ جریان کم ۱۹
۲-۶-۱ فرایندهای طبیعی و نیروهای مؤثر در هیدرولوژی جریان کم ۲۱
۲-۶-۲ شاخص‌ها و روش‌های مطالعه‌ی جریان کم ۲۴

۲-۷ تحلیل مقادیر حدی: توابع توزیع و استنباط آماری ۳۵
۲-۷-۱ توزیع‌های احتمالی مورد استفاده در تحلیل وقایع هیدرولوژیک ۳۶
۲-۷-۲ روش‌های تخمین پارامتر ۴۵
۲-۷-۳ صحت‌سنجی مدل: آزمون‌های نیکویی برازش ۵۳
۲-۸ تولد و گسترش کوپلا و کاربرد آن در مطالعات ۵۸
۲-۹ کاربرد غیر حدی کوپلا ۶۲

فصل سوم مواد و روش‌ها

۳-۱ مقدمه ۶۶
۳-۲ داده‌های مورد استفاده در این پژوهش ۶۷
۳-۲-۱ داده‌های مورد استفاده در تحلیل جریان کم ۶۷
۳-۲-۲ داده‌های مورد استفاده در تحلیل حجم چوب تولیدی درختان ۷۳
۳-۳ کوپلا ۷۴
۳-۳-۱ تعریف کوپلا ۷۵
۳-۳-۲ تابع چگالی کوپلا ۷۸
۳-۳-۳ محدوده تغییرات کوپلا ۷۹
۳-۳-۴ معیارهای سنجش وابستگی ۸۰
۳-۴ کوپلاهای مهم ۸۲
۳-۴-۱ کوپلاهای استقلال و وابستگی کامل ۸۲
۳-۴-۲ کوپلای تجربی ۸۳
۳-۴-۳ خانواده کوپلاهای ارشمیدسی ۸۴
۳-۴-۴ خانواده کوپلای بیضوی (الیپتیکال) ۸۸
۳-۵ تخمین پارامتر کوپلا ۹۲
۳-۵-۱ روش‌های تخمین گشتاوری ۹۴
۳-۵-۲ روش حداکثر شبه درستنمایی ۹۹
۳-۶ آزمون نیکویی برازش کوپلا ۱۰۱
۳-۶-۱ روش بوتسترَپ پارامتری در محاسبه P- مقدار آزمون نیکویی برازش کوپلا بر مبنای آماره S_n ۱۰۳
۳-۶-۲ روش ضرایب در محاسبه P- مقدار آزمون نیکویی برازش کوپلا بر مبنای آماره S_n ۱۰۴
۳-۷ توسعه مدل (تئوری): دوره‌ی بازگشت در چارچوب چند متغیره ۱۰۵
۳-۷-۱ کلیات بحث و مفاهیم پایه ۱۰۵
۳-۷-۲ مقدار طراحی متناظر با دوره بازگشت کندال ۱۱۰
۳-۷-۳ مقدار طراحی در چارچوب چند متغیره ۱۱۱
۳-۸ توسعه مدل (کاربرد): ارائه راهکار بهینه در استفاده از کوپلا ۱۱۳
۳-۸-۱ تخمین پارامترهای توابع توزیع یک متغیره‌ی حاشیه‌ای ۱۱۴
۳-۸-۲ تعیین بهترین توابع توزیع حاشیه‌ای با استفاده از آزمون‌های نیکویی برازش ۱۱۴

۳-۸-۳ تحلیل اولیه ساختار وابستگی داده‌های ورودی با استفاده از سنجش همبستگی متغیرها ۱۱۷
۳-۸-۴ تخمین پارامترهای کوپلا ۱۱۷
۳-۸-۵ آزمون نیکویی برازش کوپلا ۱۲۰
۳-۸-۶ دوره‌ی بازگشت چند متغیره و برآورد مقدار طراحی در فضای چند بعدی ۱۲۰
۳-۹ ارزیابی روش رگرسیون کوپلایی ۱۲۶
۳-۹-۱ مدل‌های رگرسیون ۱۲۶
۳-۹-۲ ارزیابی کارایی ۱۳۳
۳-۱۰ زبان برنامه‌نویسی R ۱۳۶
فصل چهارم نتایج و بحث
۴-۱ نتایج تحلیل جریان کم ۱۴۰
۴-۱-۱ توابع توزیع یک متغیره‌ی حاشیه‌ای ۱۴۱
۴-۱-۲ تحلیل اولیه ساختار وابستگی داده‌ها ۱۶۴
۴-۱-۳ تخمین پارامترهای توابع کوپلا ۱۶۷
۴-۱-۴ انتخاب مناسب‌ترین نوع کوپلا با استفاده از آزمون‌های نیکویی برازش کوپلا ۱۶۷
۴-۱-۵ تخمین دوره‌ی بازگشت سه متغیره و مقادیر طراحی در فضای سه بعدی ۱۷۵
۴-۲ نتایج ارزیابی روش رگرسیون کوپلایی با استفاده از داده‌های جنگل ۱۸۲
۴-۲-۱ تحلیل اولیه ۱۸۲
۴-۲-۲ سنجش دقت برآوردهای نقطه‌ای ۱۸۴
۴-۲-۳ سنجش دقت برآوردهای فاصله‌ای ۱۸۷
فصل پنجم نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادها
۵-۱ دستاوردهای حاصل از این پژوهش ۱۹۰
۵-۱-۱ تحلیل جریان کم ۱۹۰
۵-۱-۲ ارزیابی رگرسیون کوپلایی ۱۹۲
۵-۲ پیشنهادها ۱۹۳
پیوست الف ۱۹۶
پیوست ب ۲۰۲
ب-۱ ایستگاه نیر ۲۰۳
ب-۲ ایستگاه هراتبر ۲۰۷
ب-۳ ایستگاه شیرگاه ۲۱۱
ب-۴ ایستگاه گالیکش ۲۱۵
فهرست منابع ۲۱۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ نمودار تابع کوانتایل x_F در برابر دوره بازگشت T برای چند توزیع سه‌پارامتری با $\lambda_1 = ۴۰$، $\tau = ۰/۳$ و $\tau_۳ = ۰/۳$ ۵۳

شکل ۲-۲ توزیع‌های احتمالی روی نمودار چولگی خطی (*L-kurtosis*) در برابر کشیدگی خطی (*L-skewness*) ۵۳

شکل ۳-۱ حوضه‌ی آبریز دریای خزر و موقعیت مکانی ایستگاه‌های انتخاب شده ۶۶

شکل ۳-۲ حوضه‌ی بالادست ایستگاه هیدرومتری استور ۶۷

شکل ۳-۳ شکل شماتیک هیدروگراف جریان به همراه مشخصات جریان کم ۶۹

شکل ۳-۴ نمودار کوپلاهای M، Π و W ۸۲

شکل ۳-۵ نمودار کنتوری کوپلاهای M، Π و W ۸۲

شکل ۳-۶ تعبیر هندسی رابطه $K_C(t) = t - (\varphi(t)/\varphi'(t))$ ۸۳

شکل ۳-۷ نمودار چگالی کوپلاهای گامبل (سمت راست بالا)، کلایتون (سمت چپ بالا) و فرانک (پایین) هر سه با $\theta = ۲$ ۸۹

شکل ۳-۸ نمودار چگالی کوپلاهای نرمال (گوسی) (سمت راست) و تی- استیودنت (سمت چپ) هر دو با ضریب همبستگی $\rho = ۰/۳$ و درجه آزادی کوپلای تی برابر ۲ ..... ۸۹

شکل ۳-۹ نمایش گرافیکی مفهوم ناحیه بحرانی (ناحیه طوسی رنگ) در حالت «و» ۱۰۷

شکل ۳-۱۰ فلوچارت راهکار بهینه در استفاده از کوپلا در تحلیل چند متغیره ۱۱۱

شکل ۳-۱۱ (الف) تخمین تابع K_C (خط پیوسته) متناظر با کوپلای C به همراه تخمین تجربی (نقاط آبی) محاسبه شده با استفاده از مشاهدات در دسترس و (ب) بازه‌ی کوچک‌تر نمودار تخمین تابع K_C با تفکیک بالاتر ۱۲۰

شکل ۳-۱۲ نمودار جفت متغیرهای $(D^۲H,V)$ (الف) در فضای اصلی، (ب) در فضای تبدیل شده لگاریتمی، (ج) در فضای تبدیل شده T_{BC} ، (د) در فضای تبدیل شده T_{NQ}. هر کدام از بخش‌ها نشان‌دهنده هیستوگرام‌های زوج مقادیر متغیرهای تصادفی حاشیه‌ای هستند. در بخش‌های (ج) و (د) نمودارهای کنتوری و نمودارهای چگالی یک متغیره (خطوط مقطع) توزیع‌های نرمال حاشیه‌ای و مشترک با پارامترهای تخمین زده شده از داده‌ها نیز نشان داده شده است. ۱۲۶

شکل ۴-۱ نمودار گشتاورهای خطی و داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۵۴

شکل ۴-۲ نیکویی برازش گرافیکی توزیع ویکبی برای Q_m داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ۱۵۴

شکل ۴-۳ نیکویی برازش گرافیکی توزیع ویکبی برای V_d داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۵۵

شکل ۴-۴ نیکویی برازش گرافیکی توزیع ویکبی برای D_l داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۵۵

شکل ۴-۵ نمودار گشتاورهای خطی و داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۵۶
شکل ۴-۶ نیکویی برازش گرافیکی توزیع مقدار حدی تعمیم‌یافته برای Q_m داده‌های روزانه و حد آستانه ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۵۶
شکل ۴-۷ نیکویی برازش گرافیکی توزیع کاپا برای V_d داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۵۷
شکل ۴-۸ نیکویی برازش گرافیکی توزیع ویکبی برای D_l داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۵۷
شکل ۴-۹ نمودار گشتاورهای خطی و داده‌های ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۵۸
شکل ۴-۱۰ نیکویی برازش گرافیکی توزیع ویکبی برای Q_m داده‌های ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۵۸
شکل ۴-۱۱ نیکویی برازش گرافیکی توزیع ویکبی برای V_d داده‌های ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۵۹
شکل ۴-۱۲ نیکویی برازش گرافیکی توزیع ویکبی برای D_l داده‌های ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۵۹
شکل ۴-۱۳ نمودار گشتاورهای خطی و داده‌های ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۶۰
شکل ۴-۱۴ نیکویی برازش گرافیکی توزیع مقدار حدی تعمیم یافته برای Q_m داده‌های ۷ روزه و حد ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۶۰
شکل ۴-۱۵ نیکویی برازش گرافیکی توزیع کاپا برای V_d داده‌های ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور..... ۱۶۱
شکل ۴-۱۶ نیکویی برازش گرافیکی توزیع ویکبی برای D_l داده‌های ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۶۱
شکل ۴-۱۷ ماتریس نمودار همبستگی متغیرهای حاشیه‌ای مربوط به داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۶۳
شکل ۴-۱۸ ماتریس نمودار همبستگی متغیرهای حاشیه‌ای مربوط به داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۶۳
شکل ۴-۱۹ ماتریس نمودار همبستگی متغیرهای حاشیه‌ای مربوط به داده‌های ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۶۴
شکل ۴-۲۰ ماتریس نمودار همبستگی متغیرهای حاشیه‌ای مربوط به داده‌های ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۶۴
شکل ۴-۲۱ تصاویر شبیه‌سازی کوپلای منتخب مربوط به داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۷۱
شکل ۴-۲۲ تصاویر شبیه‌سازی کوپلای منتخب مربوط به داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۷۱
شکل ۴-۲۳ تصاویر شبیه‌سازی کوپلای منتخب مربوط به داده‌های ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۷۲
شکل ۴-۲۴ تصاویر شبیه‌سازی کوپلای منتخب مربوط به داده‌های ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۷۲

شکل ۴-۲۵ (الف) تخمین تابع K_C (خط پیوسته) متناظر با کوپلای C به همراه تخمین تجربی (نقاط آبی) محاسبه شده با استفاده از داده‌های روزانه و حد آستانه ۷۰٪ ایستگاه استور و (ب) بازه‌ی کوچک‌تر نمودار تخمین تابع K_C با تفکیک بالاتر ۱۷۴

شکل ۴-۲۶ (الف) تخمین تابع K_C (خط پیوسته) متناظر با کوپلای C به همراه تخمین تجربی (نقاط آبی) محاسبه شده با استفاده از داده‌های روزانه و حد آستانه ۸۰٪ ایستگاه استور و (ب) بازه‌ی کوچک‌تر نمودار تخمین تابع K_C با تفکیک بالاتر ۱۷۴

شکل ۴-۲۷ (الف) تخمین تابع K_C (خط پیوسته) متناظر با کوپلای C به همراه تخمین تجربی (نقاط آبی) محاسبه شده با استفاده از داده‌های ۷ روزه و حد آستانه ۷۰٪ ایستگاه استور و (ب) بازه‌ی کوچک‌تر نمودار تخمین تابع K_C با تفکیک بالاتر ۱۷۵

شکل ۴-۲۸ (الف) تخمین تابع K_C (خط پیوسته) متناظر با کوپلای C به همراه تخمین تجربی (نقاط آبی) محاسبه شده با استفاده از داده‌های ۷ روزه و حد آستانه ۷۰٪ ایستگاه استور و (ب) بازه‌ی کوچک‌تر نمودار تخمین تابع K_C با تفکیک بالاتر ۱۷۵

شکل ۴-۲۹ نمودارهای نمایانگر مدل‌های رگرسیونی شامل: مقادیر باقیمانده در برابر مقادیر V برازش یافته (سمت چپ)، نمودارهای Q-Q نرمال (ستون وسط) و قدر مطلق مقادیر باقیمانده استاندارد در برابر مقادیر V برازش یافته (سمت راست) ۱۸۱

شکل ۴-۳۰ مقادیر اندازه‌گیری شده V در برابر مقادیر به دست آمده برای آن از مدل (نقاط) و بازه‌های پیش‌بینی ۹۵٪ (خطوط مقطع) برای شش مدل مورد مطالعه شامل: (الف) SPU، (ب) SHA، (ج) BC1، (د) BC2، (ه) MGp، (و) MGn. ۱۸۵

شکل ۴-۳۱ (الف) مقایسه بازه‌های پیش‌بینی ۹۵٪ برای شش مدل مورد مطالعه و (ب) مقایسه تبدیل‌های لگاریتمی، T_{BC} و T_{NQ} . هر دو نوع تخمین پارامتری و ناپارامتریِ F_V برای تبدیل T_{NQ} در نظر گرفته شده‌اند. ۱۸۶

شکل الف-۱ نیکویی برازش گرافیکی توزیع پارتوی تعمیم یافته برای Q_m داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۹۵

شکل الف-۲ نیکویی برازش گرافیکی توزیع ویبول برای V_d داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور..... ۱۹۵

شکل الف-۳ تصاویر شبیه‌سازی کوپلاهای برازش یافته بر داده‌های حاصل از سری روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۹۶

شکل الف-۴ تصاویر شبیه‌سازی کوپلاهای برازش یافته بر داده‌های حاصل از سری روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۹۷
شکل الف-۵ تصاویر شبیه‌سازی کوپلاهای برازش یافته بر داده‌های حاصل از سری ۷ روزه، حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۹۸
شکل الف-۶ تصاویر شبیه‌سازی کوپلاهای برازش یافته بر داده‌های حاصل از سری ۷ روزه، حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۹۹
شکل ب-۱ تصاویر شبیه‌سازی کوپلای منتخب مربوط به داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه نیر ۲۰۲
شکل ب-۲ تصاویر شبیه‌سازی کوپلای منتخب مربوط به داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه نیر ۲۰۲
شکل ب-۳ (الف) تخمین تابع K_C (خط پیوسته) متناظر با کوپلای C به همراه تخمین تجربی (نقاط آبی) محاسبه شده با استفاده از داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه نیر و (ب) بازه‌ی کوچک‌تر نمودار تخمین تابع K_C با تفکیک بالاتر ۲۰۳
شکل ب-۴ (الف) تخمین تابع K_C (خط پیوسته) متناظر با کوپلای C به همراه تخمین تجربی (نقاط آبی) محاسبه شده با استفاده از داده‌های سری روزانه و حد ۸۰٪ ایستگاه نیر و (ب) بازه‌ی کوچک‌تر نمودار تخمین تابع K_C با تفکیک بالاتر ۲۰۳
شکل ب-۵ تصاویر شبیه‌سازی کوپلای منتخب مربوط به داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه هرات‌بر ۲۰۶
شکل ب-۶ تصاویر شبیه‌سازی کوپلای منتخب مربوط به داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه هرات‌بر ۲۰۶
شکل ب-۷ (الف) تخمین تابع K_C (خط پیوسته) متناظر با کوپلای C به همراه تخمین تجربی (نقاط آبی) محاسبه شده با استفاده از داده‌های روزانه و حد ۷۰٪ ایستگاه هرات‌بر و (ب) بازه‌ی کوچک‌تر نمودار تخمین تابع K_C با تفکیک بالاتر ۲۰۷
شکل ب-۸ (الف) تخمین تابع K_C (خط پیوسته) متناظر با کوپلای C به همراه تخمین تجربی (نقاط آبی) محاسبه شده با استفاده از داده‌های سری روزانه و حد ۸۰٪ ایستگاه هرات‌بر و (ب) بازه‌ی کوچک‌تر نمودار تخمین تابع K_C با تفکیک بالاتر ۲۰۷
شکل ب-۹ تصاویر شبیه‌سازی کوپلای منتخب مربوط به داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه هرات‌بر ۲۱۰
شکل ب-۱۰ تصاویر شبیه‌سازی کوپلای منتخب مربوط به داده‌های روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه هرات‌بر ۲۱۰
شکل ب-۱۱ (الف) تخمین تابع K_C (خط پیوسته) متناظر با کوپلای C به همراه تخمین تجربی (نقاط آبی) محاسبه شده با استفاده از داده‌های سری روزانه و حد ۷۰٪ ایستگاه هرات‌بر و (ب) بازه‌ی کوچک‌تر نمودار تخمین تابع K_C با تفکیک بالاتر ۲۱۱

شکل ب-۱۲ (الف) تخمین تابع K_C (خط پیوسته) متناظر با کوپلای C به همراه تخمین تجربی (نقاط آبی) محاسبه شده با استفاده از داده‌های سری روزانه و حد ۸۰٪ ایستگاه هرات‌بر و (ب) بازه‌ی کوچک‌تر نمودار تخمین تابع K_C با تفکیک بالاتر ۲۱۱
شکل ب-۱۳ تصاویر شبیه‌سازی کوپلای منتخب مربوط به داده‌های روزانه و حد آستانه ۷۰٪ ایستگاه گالیکش ۲۱۴
شکل ب-۱۴ تصاویر شبیه‌سازی کوپلای منتخب مربوط به داده‌های روزانه و حد آستانه ۸۰٪ ایستگاه گالیکش ۲۱۴
شکل ب-۱۵ (الف) تخمین تابع K_C (خط پیوسته) متناظر با کوپلای C به همراه تخمین تجربی (نقاط آبی) محاسبه شده با استفاده از داده‌های سری روزانه و حد ۷۰٪ ایستگاه گالیکش و (ب) بازه‌ی کوچک‌تر نمودار تخمین تابع K_C با تفکیک بالاتر ۲۱۵
شکل ب-۱۶ (الف) تخمین تابع K_C (خط پیوسته) متناظر با کوپلای C به همراه تخمین تجربی (نقاط آبی) محاسبه شده با استفاده از داده‌های سری روزانه و حد ۸۰٪ ایستگاه گالیکش و (ب) بازه‌ی کوچک‌تر نمودار تخمین تابع K_C با تفکیک بالاتر ۲۱۵

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱ توزیع‌های آماری متداول در هیدرولوژی ۳۶

جدول ۲-۲ ادامه‌ی توزیع‌های آماری متداول در هیدرولوژی ۳۷

جدول ۲-۳ ادامه‌ی توزیع‌های آماری متداول در هیدرولوژی ۳۸

جدول ۲-۴ گشتاورها و گشتاورهای خطی توزیع‌های معمول مورد استفاده در هیدرولوژی ۴۸

جدول ۲-۵ ادامه‌ی گشتاورها و گشتاورهای خطی توزیع‌های معمول مورد استفاده در هیدرولوژی ۴۹

جدول ۲-۶ ادامه‌ی گشتاورها و گشتاورهای خطی توزیع‌های معمول مورد استفاده در هیدرولوژی ۵۰

جدول ۳-۱ مشخصات پنج ایستگاه منتخب در حوضه‌ی آبریز دریای خزر ۶۶

جدول ۳-۲ مشخصات آماری داده‌های سری مقادیر حدی ایستگاه استور ۷۱

جدول ۳-۳ مشخصات آماری ویژگی‌های درختان چنار ۷۲

جدول ۳-۴: معیارهای کارایی مورد استفاده در این پژوهش ۱۳۲

جدول ۴-۱ نتایج تخمین پارامتر توزیع‌های یک متغیره‌ی برازش یافته بر داده‌های حداکثر کمبود دبی (Q_m) حاصل از سری روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۴۰

جدول ۴-۲ نتایج تخمین پارامتر توزیع‌های یک متغیره‌ی برازش یافته بر داده‌های حجم کمبود (V_d) حاصل از سری روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۴۱

جدول ۴-۳ نتایج تخمین پارامتر توزیع‌های یک متغیره‌ی برازش یافته بر داده‌های مدت جریان کم (D_l) حاصل از سری روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۴۲

جدول ۴-۴ نتایج تخمین پارامتر توزیع‌های یک متغیره‌ی برازش یافته بر داده‌های حداکثر کمبود دبی (Q_m) حاصل از سری روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۴۳

جدول ۴-۵ نتایج تخمین پارامتر توزیع‌های یک متغیره‌ی برازش یافته بر داده‌های حجم کمبود (V_d) حاصل از سری روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۴۴

جدول ۴-۶ نتایج تخمین پارامتر توزیع‌های یک متغیره‌ی برازش یافته بر داده‌های مدت جریان کم (D_l) حاصل از سری روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۴۵

جدول ۴-۷ نتایج تخمین پارامتر توزیع‌های یک متغیره‌ی برازش یافته بر داده‌های حداکثر کمبود دبی (Q_m) حاصل از سری میانگین متحرک ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۴۶

جدول ۴-۸ نتایج تخمین پارامتر توزیع‌های یک متغیره‌ی برازش یافته بر داده‌های حجم کمبود (V_d) حاصل از سری میانگین متحرک ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۴۷
جدول ۴-۹ نتایج تخمین پارامتر توزیع‌های یک متغیره‌ی برازش یافته بر داده‌های مدت جریان کم (D_l) حاصل از سری میانگین متحرک ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۴۸
جدول ۴-۱۰ نتایج تخمین پارامتر توزیع‌های یک متغیره‌ی برازش یافته بر داده‌های حداکثر کمبود دبی (Q_m) حاصل از سری میانگین متحرک ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۴۹
جدول ۴-۱۱ نتایج تخمین پارامتر توزیع‌های یک متغیره‌ی برازش یافته بر داده‌های حجم کمبود (V_d) حاصل از سری میانگین متحرک ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۵۰
جدول ۴-۱۲ نتایج تخمین پارامتر توزیع‌های یک متغیره‌ی برازش یافته بر داده‌های مدت جریان کم (D_l) حاصل از سری میانگین متحرک ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۵۱
جدول ۴-۱۳ توزیع‌های منتخب حاشیه‌ای سری مقادیر حدی ایستگاه استور ۱۵۳
جدول ۴-۱۴ مقادیر همبستگی بین پارامترهای حاشیه‌ای داده‌های ایستگاه استور ۱۶۲
جدول ۴-۱۵ نتایج تخمین پارامتر و آزمون نیکویی برازش توابع کوپلا برای سری روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۶۶
جدول ۴-۱۶ نتایج تخمین پارامتر و آزمون نیکویی برازش توابع کوپلا برای سری روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۶۷
جدول ۴-۱۷ نتایج تخمین پارامتر و آزمون نیکویی برازش توابع کوپلا برای سری ۷ روزه و حد آستانه ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۶۸
جدول ۴-۱۸ نتایج تخمین پارامتر و آزمون نیکویی برازش توابع کوپلا برای سری ۷ روزه و حد آستانه ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۶۹
جدول ۴-۱۹ کوپلاهای انتخاب شده بر اساس آزمون نیکویی برازش ایستگاه استور ۱۷۰
جدول ۴-۲۰ مقادیر کوانتایل کندال متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۷۶
جدول ۴-۲۱ مقادیر کوانتایل کندال متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۷۶

جدول ۴-۲۲ مقادیر کوانتایل کندال متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور ۱۷۷
جدول ۴-۲۳ مقادیر کوانتایل کندال متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور ۱۷۷
جدول ۴-۲۴ مقادیر طراحی خروجی متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور و تابع وزن‌دهی مبتنی بر حداکثر اطمینان و محتمل‌ترین واقعه ۱۷۸
جدول ۴-۲۵ مقادیر طراحی خروجی متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور و تابع وزن‌دهی مبتنی بر حداکثر اطمینان و محتمل‌ترین واقعه ۱۷۸
جدول ۴-۲۶ مقادیر طراحی خروجی متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه استور و تابع وزن‌دهی مبتنی بر حداکثر اطمینان و محتمل‌ترین واقعه ۱۷۹
جدول ۴-۲۷ مقادیر طراحی خروجی متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری ۷ روزه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه استور و تابع وزن‌دهی مبتنی بر حداکثر اطمینان و محتمل‌ترین واقعه ۱۷۹
جدول ۴-۲۸ مقادیر معیارهای کارایی برای شش مدل مورد مطالعه ۱۸۳
جدول ۴-۲۹ نتایج آزمون دو به دو علامت برای شش مدل مورد مطالعه ۱۸۴
جدول ۴-۳۰ درصد نقاط قرار گرفته در خارج از بازه‌ی پیش‌بینی با احتمال اسمی $(1-\alpha)$٪۱۰۰ برابر با ۵۰٪، ۷۵٪، ۹۰٪ و ۹۵٪ برای شش مدل مورد مطالعه ۱۸۷
جدول ب-۱ مشخصات آماری داده‌های سری مقادیر حدی حاصل از داده‌های روزانه در ایستگاه نیر ۲۰۱
جدول ب-۲ توابع توزیع حاشیه‌ای منتخب برای سری مقادیر حدی حاصل از داده‌های روزانه در ایستگاه نیر ۲۰۱
جدول ب-۳ توابع کوپلای انتخاب شده برای سری مقادیر حدی حاصل از داده‌های روزانه در ایستگاه نیر ۲۰۱
جدول ب-۴ مقادیر طراحی خروجی متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه نیر و توابع وزن‌دهی مبتنی بر حداکثر اطمینان و محتمل‌ترین واقعه ۲۰۴
جدول ب-۵ مقادیر طراحی خروجی متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه نیر و تابع وزن‌دهی مبتنی بر حداکثر اطمینان و محتمل‌ترین واقعه ۲۰۴
جدول ب-۶ مشخصات آماری داده‌های سری مقادیر حدی حاصل از داده‌های روزانه در ایستگاه هرات‌بر ۲۰۵
جدول ب-۷ توابع توزیع حاشیه‌ای منتخب برای سری مقادیر حدی حاصل از داده‌های روزانه در ایستگاه هرات‌بر ۲۰۵
جدول ب-۸ توابع کوپلای انتخاب شده برای سری مقادیر حدی حاصل از داده‌های روزانه در ایستگاه هرات‌بر ۲۰۵

جدول ب-۹ مقادیر طراحی خروجی متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه هرات‌بر و تابع وزن‌دهی مبتنی بر حداکثر اطمینان و محتمل‌ترین واقعه..... ۲۰۸
جدول ب-۱۰ مقادیر طراحی خروجی متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه هرات‌بر و تابع وزن‌دهی مبتنی بر حداکثر اطمینان و محتمل‌ترین واقعه..... ۲۰۸
جدول ب-۱۱ مشخصات آماری داده‌های سری مقادیر حدی حاصل از داده‌های روزانه در ایستگاه شیرگاه ۲۰۹
جدول ب-۱۲ توابع توزیع حاشیه‌ای منتخب برای سری مقادیر حدی حاصل از داده‌های روزانه در ایستگاه شیرگاه..... ۲۰۹
جدول ب-۱۳ توابع کوپلای انتخاب شده برای سری مقادیر حدی حاصل از داده‌های روزانه در ایستگاه شیرگاه ۲۰۹
جدول ب-۱۴ مقادیر طراحی خروجی متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه شیرگاه و تابع وزن‌دهی مبتنی بر حداکثر اطمینان و محتمل‌ترین واقعه ۲۱۲
جدول ب-۱۵ مقادیر طراحی خروجی متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه شیرگاه و تابع وزن‌دهی مبتنی بر حداکثر اطمینان و محتمل‌ترین واقعه ۲۱۲
جدول ب-۱۶ مشخصات آماری داده‌های سری مقادیر حدی حاصل از داده‌های روزانه در ایستگاه گالیکش ۲۱۳
جدول ب-۱۷ توابع توزیع حاشیه‌ای منتخب برای سری مقادیر حدی حاصل از داده‌های روزانه در ایستگاه گالیکش... ۲۱۳
جدول ب-۱۸ توابع کوپلای انتخاب شده برای سری مقادیر حدی حاصل از داده‌های روزانه در ایستگاه گالیکش ۲۱۳
جدول ب-۱۹ مقادیر طراحی خروجی متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری روزانه و حد آستانه‌ی ۷۰٪ ایستگاه گالیکش و تابع وزن‌دهی مبتنی بر حداکثر اطمینان و محتمل‌ترین واقعه ۲۱۶
جدول ب-۲۰ مقادیر طراحی خروجی متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف برای داده‌های سری روزانه و حد آستانه‌ی ۸۰٪ ایستگاه گالیکش و تابع وزن‌دهی مبتنی بر حداکثر اطمینان و محتمل‌ترین واقعه ۲۱۶

چکیده

تحلیل فراوانی جریان کم به عنوان معیار خشکسالی هیدرولوژیک از کاربرد ویژه‌ای در برنامه‌ریزی و طراحی سیستم‌های تأمین آب و تخمین حداقل جریان قابل دسترس برای فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی، زیست محیطی و... برخوردار است. از آنجا که جریان‌های کم نیز مانند بسیاری از وقایع هیدرولوژیک، بر حسب چندین مشخصه نامستقل تعریف می‌شوند، اطلاعات حاصل از تحلیل فراوانی یک متغیره در غالب اوقات نمی‌تواند برای اهداف بالا کافی باشد. به علاوه، کاربرد خانواده‌های کلاسیک توزیع‌های چند متغیره نیز شدیداً دچار محدودیت است. این در حالی است که مدل‌های کوپلا به واسطه وجود ویژگی‌هایی چون توانایی مدل‌سازی متغیرها بدون نیاز به فرض استقلال آماری از قابلیت کاربرد بالایی در تحلیل وقایع حدی و مدل‌سازی ساختار وابستگی برخوردار بوده و به ابزاری مؤثر در موضوعات هیدرولوژی تبدیل شده‌اند. در این پژوهش با هدف ارائه راهکار بهینه برای کاربرد کوپلا، از مهم‌ترین توابع کوپلای موجود شامل کوپلاهای ارشمیدسی و نیمه بیضوی با ترکیب‌های مختلف ماتریس همبستگی استفاده شده و توابع و پارامترهای آن‌ها با استفاده از کارآمدترین روش‌های موجود برآورد گردید. بر خلاف بسیاری از مطالعات قبلی، کوپلاهای مورد استفاده در این پژوهش از نظر برقراری فرض صفر طبعیت داده‌ها از تابع کوپلای مورد نظر مورد آزمون قرار گرفته و بر اساس آزمون نیکویی برازش، مناسب‌ترین نوع کوپلا برای بیان ساختار وابستگی بین متغیرها تعیین شد. به علاوه تلاش شد تا بتوان به راهکاری کارآمد در زمینه‌ی کاربردی‌تر کردن نتایج خروجی حاصل از کوپلا دست یافته و گامی در جهت کاهش پیچیدگی مربوط به مفهوم دوره‌ی بازگشت در چارچوب چند متغیره و نیز مقدار طراحی در فضای چندبعدی برداشته شود. این کار با استفاده از مفهوم دوره‌ی بازگشت کندال و به‌کارگیری توابع وزن‌دهی روی لایه بحرانی تعریف شده بر اساس دوره‌ی بازگشت مفروض انجام شد. به منظور دستیابی به نتایج خروجی نیز از شیوه‌های بهینه‌سازی سرتاسری استفاده گردید. راهکار به دست آمده از فرایند فوق بر روی داده‌های جریان کم مربوط به پنج ایستگاه هیدرومتری انتخاب شده از بین ۴۰۰ ایستگاه هیدرومتری حوضه آبریز دریای خزر شامل ایستگاه‌های نیر، استور، هرات‌بر، شیرگاه و گالیکش که دارای آمار جریان روزانه بلند مدت با حداکثر صحت ممکن بودند اعمال گردیده و نتایج نهایی مربوط به مقدار طراحی حاصل گردید. نتایج این بخش نشان‌دهنده ارجحیت کامل کوپلاهای نیمه بیضوی برای مدل‌سازی ساختار وابستگی داخلی بین متغیرهای تشکیل‌دهنده جریان‌های کم به عنوان نمونه‌ای از وقایع هیدرولوژیک می‌باشد. در بخش دوم پژوهش، روش رگرسیون کوپلایی با بررسی تأثیر تبدیلات حاشیه‌ای روی برآوردهای فاصله‌ای و نقطه‌ای با استفاده از داده‌های حجم چوب تولیدی در برابر قطر ارتفاع سبنه و ارتفاع کل درخت از روی زمین تا نوک مربوط به ۱۳۸۶ درخت چنار جمع‌آوری شده در جنگل ناحیه آلتوملیس در مرکز ایتالیا مورد ارزیابی قرار گرفت. انتخاب مدل‌های مورد مقایسه بر اساس این منطق که آیا مدل جدید، قدرت توصیفی بیشتری نسبت به سایر تکنیک‌های معیار ساده‌تر دارد، به کمک فرآیندهای آزمون مدل انجام شد. نتایج نشان‌دهنده عدم کارایی بهتر روش رگرسیون کوپلایی در برابر روش‌های متداول ساده‌تر با توجه به فرضیات آماری بیشتر آن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: کوپلا، تحلیل فراوانی چندمتغیره، جریان کم، خشکسالی هیدرولوژیک، رگرسیون کوپلایی، وابستگی

فصل اول

مقدمه

از آنجا که بررسی کامل تغییرات و بر هم کنش عوامل فیزیکی مؤثر بر پدیده‌های هیدرولوژیک شامل عوامل اقلیمی، زمین‌شناسی، بیولوژیکی و انسانی امکان‌پذیر نیست، رفتار این پدیده‌ها به طور عمده به عنوان یک فرایند تصادفی مورد مطالعه قرار گرفته و برای این منظور عموماً از روش‌های آماری استفاده می‌شود. باید توجه داشت که هر کدام از پدیده‌های هیدرولوژیک، خود دارای چندین خصوصیت و ویژگی مختلف هستند که مطالعه و تحلیل هر یک از این مؤلفه‌ها می‌تواند به صورت مستقل یا همراه با سایرین انجام شود. از آنجا که تغییرات موجود در این پدیده‌ها توسط همین مؤلفه‌ها بیان می‌گردند، همواره امکان وجود دو واقعه‌ی کاملاً متفاوت که در یکی از آنها یکسان هستند وجود دارد. به عبارت دیگر آزادی عمل یک واقعه در تغییر مشخصات خود منجر به لزوم درنظرگیری همزمان تمامی مشخصات تعیین‌کننده‌ی پدیده یا حتی‌المقدور مهم‌ترین آن‌ها می‌گردد. این مؤلفه‌ها که می‌توان هر کدام را به عنوان یک متغیر تصادفی در نظر گرفت به گونه‌ای با یکدیگر در ارتباط هستند که تغییر یکی بر دیگری تأثیرگذار بوده و از هم مستقل نخواهند بود. لذا نتایج حاصل از تحلیل فراوانی یک متغیره به علت عدم درنظرگیری تأثیر متقابل این متغیرهای تصادفی، همواره توأم با مقداری خطا خواهد بود [۲۹۸]. اما تحلیل ساختار ارتباط بین دو یا چند مشخصه در حالتی که از هم مستقل نیستند، نسبت به حالتی که تنها یک مشخصه‌ی خاص مورد مطالعه قرار می‌گیرد دشوارتر است. همین دشواری موجود در روش‌های