



وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری



نشریه فنی

**ارزیابی روش درونیابی پیشرفته
Topological Kriging در پیش‌بینی متغیرهای
هیدرولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک**

نویسندگان:
زهرا شیخ، علیرضا مقدم‌نیا، محمدرضا یزدانی

شماره ثبت: ۶۸۳۶۵

۱۴۰۴

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

نشریه فنی:

ارزیابی روش درونیابی پیشرفته Topological Kriging در پیش‌بینی متغیرهای
هیدرولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک

نویسندگان:

زهرا شیخ، علیرضا مقدم‌نیا، محمدرضا یزدانی

شماره ثبت: ۶۸۳۶۵

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

عنوان: ارزیابی روش درونیابی پیشرفته Topological Kriging در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک

نویسندگان: زهرا شیخ، علیرضا مقدم‌نیا، محمدرضا یزدانی

ویراستار ادبی: سعید نبی‌پی لشکریان

صفحه‌آرایی و طراحی جلد: عباس صدیق

ناشر: پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

شمارگان: ۱۰ نسخه

تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۴

این اثر در مورخه ۱۴۰۴/۰۸/۲۹ با شماره فروست ۶۸۳۶۵ در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است. حق چاپ محفوظ است. نقل مطلب، تصاویر، جداول، منحنی‌ها و نمودارها با ذکر ماخذ بلامانع است.

فهرست مطالب

چکیده.....	۱
۱- مقدمه.....	۲
۲- مرور ادبیات و منابع.....	۴
رواناب و دبی جریان.....	۴
جریان کمینه.....	۵
سیلاب.....	۶
کیفیت آب.....	۶
دمای آب.....	۷
۲- مبانی نظری.....	۷
۲-۱- درون‌یابی مکانی زمین‌آماري.....	۷
۲-۲- درون‌یابی مکانی در هیدرولوژی.....	۸
۲-۳- اصول کریجینگ توپولوژیکی.....	۱۱
۲-۴- مبانی تئوری روش Top-Kriging.....	۱۲
۲-۵- واریوگرافی و درون‌یابی در Top-Kriging.....	۱۷
۳- کاربرد کریجینگ توپولوژیکی در ایران.....	۲۰
۴- پیاده‌سازی کریجینگ توپولوژیکی.....	۲۴
۴-۱- مدل‌سازی واریوگرام براساس فواصل توپولوژیکی.....	۲۴
۴-۲- برآوردگر کریجینگ.....	۲۵
۴-۳- جنبه‌های پیاده‌سازی و محاسباتی کریجینگ توپولوژیکی.....	۲۵
توابع کلیدی بسته rtop در محیط R.....	۲۶
۵- چالش‌ها، محدودیت‌ها و مسیرهای پژوهشی آینده در کریجینگ توپولوژیکی.....	۲۶

۲۶	۵-۱ چالش‌ها و محدودیت‌های اصلی
۲۶	نیازمندی‌های داده‌ای و کیفیت اطلاعات
۲۷	پیچیدگی محاسباتی و مدیریت داده
۲۷	فرضیات مدل و محدودیت‌های روشی
۲۷	۵-۲- راهکارها و راهبردهای کاهش چالش‌ها
۲۸	۵-۳- مسیرهای پژوهشی آینده
۲۸	۶- خلاصه و نتیجه‌گیری
۳۱	منابع:
۳۴	Abstract

فهرست شکل‌ها

۱۳	شکل ۱- فرآیند تولید رواناب (Laaha و همکاران، ۲۰۱۴)
	شکل ۲- محاسبه واریوگرام منظم شده برای دو حوزه آبخیز تودرتو. حوزه i درون حوزه j ساختار تودرتو یافته، Ai و Aj بیانکننده مساحت‌های حوزه‌ها و s و u نقاط متمایزکننده در هر حوزه (Laaha و همکاران، ۲۰۱۴)
۱۶	شکل ۳- اثر اندازه آبخیز (چپ) و ساختار تودرتو (مرکز و راست) بر وزن‌های کریجینگ λ_i در برآوردهای Top-Kriging
۱۷	شکل ۴- نمونه‌ای از واریوگرام نقطه‌ای در روش Top-Kriging با توجه به مساحت‌های مختلف حوزه‌های آبخیز
۱۹	شکل ۵- محدوده مطالعاتی و پراکنش ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب (شیخ، ۱۳۹۸)
۲۱	شکل ۶- مقایسه مقادیر سمیواریوگرام مشاهده‌ای و منظم‌شده (ابعاد دایره‌ها نشان‌دهنده تعداد نسبی جفت‌ها در هر گام) (شیخ، ۱۳۹۸)
۲۲	شکل ۷- برآوردهای منطقه‌ای بر پایه روش Top-Kriging در سطح حوزه آبخیز دریاچه نمک (شیخ، ۱۳۹۸)

چکیده

به دلیل پراکندگی و کمبود داده‌های هیدرولوژیکی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، پیش‌بینی و برآورد متغیرهای مرتبط با منابع آب با چالش‌های جدی مواجه است. این کمبود داده، مانع تحلیل دقیق وضعیت منابع آب و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مؤثر شده است. هدف از پژوهش حاضر، معرفی و ارزیابی کاربرد روش کریجینگ توپولوژیکی^۱ به‌عنوان یک راهکار زمین‌آماري پیشرفته در پیش‌بینی و برآورد متغیرهای هیدرولوژیکی در شبکه‌های رودخانه‌ای، به‌ویژه در شرایط کمبود داده در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در این پژوهش، مبانی نظری و روش‌شناسی کریجینگ توپولوژیکی تشریح شده و نحوه مدل‌سازی همبستگی‌های مکانی براساس ساختار توپولوژیکی شبکه رودخانه‌ای و مساحت حوزه‌های آبخیز مورد بحث قرار گرفته است. در ادامه، نتایج کاربرد این روش در برآورد متغیرهای جریان کمینه در حوزه آبخیز دریاچه نمک ایران ارائه شده است. همچنین، چالش‌ها و محدودیت‌های این روش در مناطق خشک و نیمه‌خشک و راهکارهای کاهش آن‌ها بررسی شده است. نتایج کسب‌شده در حوزه آبخیز دریاچه نمک نشان داد که تراکم ایستگاه‌ها در سطح حوضه و چگونگی توزیع و پراکنش آن‌ها و همچنین کیفیت داده‌های ورودی از عوامل اصلی تعیین‌کننده دقت این روش است. ارزیابی نتایج سایر مطالعات نیز نشان داد که کریجینگ توپولوژیکی با در نظر گرفتن ساختار توپولوژیکی و جهت‌دار شبکه‌های رودخانه‌ای، امکان برآورد دقیق‌تر و کم‌خطاتری از متغیرهای هیدرولوژیکی در نقاط فاقد اندازه‌گیری را فراهم می‌کند. این روش همچنین امکان کمی‌سازی عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها را ارائه می‌دهد که برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در مدیریت منابع آب و محیط زیست بسیار حائز اهمیت است. نیازمندی به داده‌های دقیق توپولوژی شبکه رودخانه‌ای و مرزهای حوزه‌های آبخیز، تراکم و توزیع مناسب ایستگاه‌های اندازه‌گیری و ثبات زمانی متغیرهای هیدرولوژیکی از جمله مهم‌ترین چالش‌ها در کاربرد این روش است.

واژه‌های کلیدی: درون‌یابی مکانی، زمین‌آمار، شبکه رودخانه‌ای، کریجینگ توپولوژیکی.

^۱ Top-Kriging

۱- مقدمه

داده‌های با پیوستگی مکانی نقش به‌سزایی در علوم محیطی و مدیریت منابع طبیعی ایفا می‌کنند. مدیران و سیاست‌گذاران برای اتخاذ تصمیمات مؤثر و مبتنی بر اطمینان، به داده‌های پیوسته مکانی در سطح منطقه موردنظر نیاز دارند. پژوهشگران نیز برای ارائه گزارش‌های علمی مستدل، به داده‌های مکانی دقیق و پیوسته وابسته‌اند. با این حال، چنین داده‌هایی معمولاً به‌راحتی در دسترس نیستند و گردآوری آن‌ها دشوار و پرهزینه است. افزون بر این، داده‌های محیطی حاصل از برداشت‌های میدانی غالباً به‌صورت نقطه‌ای جمع‌آوری می‌شوند. از این‌رو، برای تولید داده‌های پیوسته مکانی، ضروری است مقادیر متغیر موردنظر در نقاط نمونه‌برداری نشده نیز برآورد شود (Li و Heap، ۲۰۱۱). در چنین شرایطی، روش‌های درون‌یابی مکانی ابزاری مؤثر و مکمل برای برآورد مقادیر متغیرهای موردنظر در مکان‌های فاقد داده با استفاده از مشاهدات نقطه‌ای فراهم می‌آورند. هدف از درون‌یابی، تخمین مقادیر متغیرهای محیطی براساس الگوهای مکانی و همبستگی آماری بین نقاط مجاور در مکان‌هایی است که فاقد اندازه‌گیری مستقیم هستند (Isaaks و Srivastava، ۱۹۸۹).

در حال حاضر، درون‌یابی یکی از پرکاربردترین ابزارها در علوم مکانی و زیست‌محیطی است. ده حوزه برتر در استفاده از روش‌های درون‌یابی و زمین‌آمار شامل (۱) علوم زمین، (۲) منابع آب، (۳) علوم محیطی، (۴) کشاورزی یا علوم خاک، (۵) ریاضیات، (۶) آمار و احتمال، (۷) بوم‌شناسی، (۸) مهندسی عمران، (۹) مهندسی نفت و (۱۰) اکوسیستم‌های آبی است. عوامل متعددی بر عملکرد روش‌های درون‌یابی مکانی تأثیرگذارند که از آن جمله می‌توان به تراکم نمونه‌برداری، الگوی مکانی نمونه‌ها، خوشه‌بندی نمونه‌ها، واریانس و نرمال بودن داده‌ها، کیفیت اطلاعات ثانویه و اندازه یا دقت شبکه اشاره کرد (Li و Heap، ۲۰۱۱).

درون‌یابی مکانی متغیرهای هیدرولوژیکی نظیر دبی جریان، کمیت‌های مربوط به سیلاب، تراز آب زیرزمینی و پارامترهای کیفیت آب، نقش اساسی در مدیریت منابع آب، ارزیابی ریسک سیلاب و پایش زیست‌محیطی ایفا

می‌کند. روش‌های کلاسیک ژئواستاتستیک نظیر کریجینگ معمولی^۱ بر پایه فاصله‌های اقلیدسی استوار بوده و مشاهدات را به‌عنوان مقادیر نقطه‌ای در نظر می‌گیرند؛ این امر اغلب باعث نادیده گرفتن ساختار توپوگرافیکی ذاتی و ارتباطات هیدرولوژیکی درون شبکه‌های رودخانه‌ای می‌شود. اگرچه کریجینگ کلاسیک در فضاهای اقلیدسی عملکرد موافی دارد، اما برای داده‌هایی که در ساختارهای شبکه‌ای (مانند رودخانه‌ها یا شبکه‌های شهری) تعریف شده‌اند، کارایی خود را از دست می‌دهد. به‌طور مثال، در یک رودخانه، دو ایستگاه ممکن است به‌صورت اقلیدسی به هم نزدیک باشند اما هیچ ارتباط هیدرولوژیکی بین آن‌ها وجود نداشته باشد. در چنین مواردی، همبستگی بین نقاط باید براساس توپولوژی جریان یا ساختار شبکه، نه فاصله اقلیدسی، تعیین شود (Hoef و Peterson, ۲۰۱۰). این محدودیت‌ها منجر به توسعه روش‌های جدیدی شد که ساختار شبکه‌ای را لحاظ می‌کنند. کریجینگ توپولوژیکی Topological Kriging یا Top-Kriging تکنیک درون‌یابی ژئواستاتستیکی است که به‌طور خاص برای شبکه‌های رودخانه‌ای و حوزه‌های آبخیز طراحی شده است. این روش ویژگی‌های تودرتو و جهت‌دار حوزه‌های آبخیز را لحاظ می‌کند و مشاهدات را نه به‌عنوان نقاط، بلکه به‌صورت انتگرالی از مقدار متغیر بر روی سطوح حوضه‌ای غیرصفر در نظر می‌گیرد. این رویکرد، مسیرهای جریان و پیوستگی هیدرولوژیکی را حفظ کرده و منجر به تخمین‌های مکانی سازگارتر با فرآیندهای هیدرولوژیکی و دقیق‌تر، به‌ویژه در حوضه‌های فاقد ایستگاه اندازه‌گیری^۲ می‌شود.

Top-Kriging در ابتدا توسط Skoien و همکاران (۲۰۰۶) توسعه یافت و تاکنون به‌طور موفقیت‌آمیزی در برآورد کمیت‌های سیلاب، دبی میانگین سالانه، شاخص‌های جریان کمینه و پارامترهای کیفیت آب مورد استفاده قرار گرفته است. این روش همچنین امکان برآورد عدم قطعیت^۳ را فراهم می‌آورد که به‌صورت منطقی در طول شبکه رودخانه‌ای تغییر می‌کند. گزارش حاضر به ارائه مروری جامع و کاربردی بر روش Top-Kriging پرداخته و

^۱ Ordinary Kriging

^۲ un-gauged basins

^۳ uncertainty

---- ارزیابی روش درون‌یابی پیشرفته Topological Kriging در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک / ۴

مبانی نظری، الزامات داده‌ای، نحوه پیاده‌سازی، اعتبارسنجی و کاربردهای عملی آن در مطالعات هیدرولوژی و کیفیت آب را تشریح می‌کند.

۲- مرور ادبیات و منابع

مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک و حوضه‌های فاقد ایستگاه اندازه‌گیری، نیازمند روش‌های پیشرفته درون‌یابی و پیش‌بینی است. Top-Kriging از سال ۲۰۰۶ به‌عنوان روشی نوین در زمین‌آمار هیدرولوژیکی معرفی شد و به‌دلیل توانایی در مدل‌سازی ساختار تو در تو و جهت‌دار شبکه‌های رودخانه‌ای، جایگاه ویژه‌ای در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی یافته است. این روش با در نظر گرفتن مساحت حوزه‌های آبخیز و روابط هیدرولوژیکی بین آن‌ها، امکان برآورد دقیق‌تر و کم‌خطاتری از پارامترهای مختلف آب را فراهم می‌کند. در ادامه، مرور تحلیلی پژوهش‌هایی که از Top-Kriging برای پیش‌بینی و تحلیل پارامترهای مختلف هیدرولوژیکی شامل رواناب و دبی جریان، جریان کمینه، سیلاب و کیفیت آب استفاده کرده‌اند، طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۵ به‌صورت مختصر ارائه می‌شود.

رواناب و دبی جریان

نخستین مطالعه جامع در زمینه Top-Kriging توسط Skøien و همکاران در سال ۲۰۰۶ منتشر شد. این مطالعه، Top-Kriging را به‌عنوان روشی کارآمد برای برآورد متغیرهای مرتبط با رواناب در حوضه‌های فاقد آمار معرفی کرد. آن‌ها بیان داشتند که این روش با در نظر گرفتن ساختار تو در تو و جهت‌دار شبکه رودخانه‌ای، امکان برآورد دقیق‌تر و کم‌خطاتری از رواناب و دبی جریان را فراهم می‌کند.

پژوهش‌های بعدی در اتریش توسط Skøien و Blöschl (۲۰۰۷ و ۲۰۰۸) نشان داد که Top-Kriging نسبت به کریجینگ معمولی تخمین‌های دقیق‌تر و کم‌خطاتری ارائه می‌دهد و می‌تواند عدم قطعیت پیش‌بینی را به‌صورت واقع‌بینانه‌ای در طول شبکه رودخانه‌ای ارائه دهد. مطالعات گسترده Parajka و همکاران (۲۰۱۵) در اتریش و اروپا

نشان داد که تراکم و توزیع مناسب ایستگاه‌های اندازه‌گیری نقش کلیدی در دقت پیش‌بینی رواناب با-Top Kriging دارد.

Lachance-Cloutier و Turcotte (۲۰۱۷) در پژوهشی در حوضه‌های فاقد آمار کانادا، نشان دادند که ادغام شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیک با Top-Kriging دقت برآورد روزانه جریان را نسبت به روش‌های درونیابی فضایی سنتی به‌طور معناداری بهبود می‌بخشد و برای مدیریت منابع آب در رودخانه‌های فاقد پایش، کارآمد است.

جریان کمینه

در ایتالیا، توسط Castiglioni و همکاران (۲۰۱۱) دو روش درونیابی بر پایه فضای فیزیوگرافی (PSBI) و Top-Kriging برای تعمیم‌دهی شاخص جریان کمینه (Q_{355}) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که-Top Kriging در طول رودخانه اصلی و PSBI در بالادست حوضه‌ها عملکرد بهتری دارند.

در پژوهش شیخ (۱۳۹۸) که به‌عنوان نخستین مطالعه کاربردی Top-Kriging در ایران در نظر گرفته می‌شود، از رویکردهای نوین زمین‌آماري PSBI و Top-Kriging و روش مرسوم رگرسیون منطقه‌ای برای برآورد مقادیر جریان‌های کمینه در نقاط فاقد آمار حوضه دریاچه نمک استفاده شد. این مطالعه نشان داد که روش-Top Kriging با در نظر گرفتن ساختار تو در تو و مورفولوژی رودخانه‌ها، می‌تواند به‌عنوان روشی کارآمد و دقیق برای برآورد جریان‌های کمینه در حوضه‌های فاقد آمار در ایران مورد استفاده قرار گیرد.

در اتریش، Top-Kriging توسط Laaha و همکاران (۲۰۱۴) برای پیش‌بینی شاخص جریان کمینه (Q_{95}) در حوضه‌های فاقد آمار استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی متقابل نشان داد که Top-Kriging نسبت به رگرسیون منطقه‌ای و مدل‌های فرایندمحور عملکرد بهتری دارد.

اخیراً، Laimighofer و Laaha (۲۰۲۵) پتانسیل‌های روش جدید سلسله مراتبی فضا-زمان برای تخمین مقادیر جریان‌های کمینه ماهانه در مناطق فاقد آمار در اتریش را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها از چهار رویکرد یادگیری

---- ارزیابی روش درونیابی پیشرفته Topological Kriging در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک / ۶

آماري و Top-Kriging جهت برآوردها استفاده کردند. نتایج آن‌ها بیانگر دقت بالای روش پیشنهادی در برآورد مقادیر متوسط و حتی بسیار کم جریان‌های کمینه بوده است.

سیلاب

در مطالعات Archfield و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳) Top-Kriging برای منطقه‌بندی کمیت‌های سیلاب (مانند دبی اوج سیل) در حوضه‌های فاقد آمار مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که این روش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارآمد برای پیش‌بینی سیلاب در مناطق بدون ایستگاه اندازه‌گیری مورد استفاده قرار گیرد.

در مطالعه Persiano و همکاران (۲۰۲۱) کاربرد Top-Kriging و رگرسیون کمترین مربعات تعمیم‌یافته^۱ (GLS) به منظور برآورد مقادیر سیلاب در ناحیه‌ای همگن بررسی شده است. یافته‌ها آن‌ها نشان داد که Top-Kriging در شرایطی که مساحت حوضه تنها توصیف‌گر مورد استفاده باشد، عملکرد بهتری نسبت به GLS دارد. این نتایج نشان داد که Top-Kriging به‌خصوص در شرایط اطلاعات توصیفی محدود می‌تواند برآوردهای سیلاب را دقیق‌تر و با عدم قطعیت متفاوتی تولید کند.

کیفیت آب

در پژوهش Rokhana Dwi Bakti و همکاران (۲۰۲۵) سه روش درونیابی شامل کریجینگ معمولی^۲، کریجینگ یادگیری ماشین^۳ و Top-Kriging برای درونیابی داده‌های کیفیت آب مانند COD در منطقه ویژه یوگیاکارتا (DIY)، آندونزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که Top-Kriging با در نظر گرفتن ساختار شبکه رودخانه‌ای و مساحت حوزه‌های آبریز، کمترین خطا را نسبت به سایر روش‌ها دارد.

^۱ Generalized Least Squares

^۲ Ordinary Kriging

^۳ ML Kriging

دمای آب

Laaha و همکاران (۲۰۱۳) برای پیش‌بینی مکانی دمای جریان رودخانه‌ها از روش Top-Kriging استفاده کردند. نتایج نشان داد Top-Kriging نسبت به روش‌های کریجینگ سنتی دقت پیش‌بینی بالاتری ارائه کرده و عدم‌ثبات مکانی و وابستگی‌های طولی شبکه رودخانه را بهتر بازنمایی می‌کند، ضمن آنکه تخمین‌های عدم قطعیت واقعی‌تری فراهم می‌آورد. این رویکرد برای مدیریت منابع آب، ارزیابی زیستگاه‌های حرارتی آبریان و برنامه‌ریزی کمی‌سازی مخاطرات گرمایی رودخانه‌ها توصیه شده است.

مرور پژوهش‌های صورت‌گرفته از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد که Top-Kriging به‌عنوان یکی از روش‌های پیشرفته و کارآمد در پیش‌بینی و تحلیل متغیرهای هیدرولوژیکی مختلف از جمله رواناب، دبی جریان، جریان کمینه، سیلاب و کیفیت آب مورد استفاده قرار گرفته است. این روش به‌دلیل در نظر گرفتن ساختار توپولوژیکی شبکه رودخانه‌ای و مساحت حوزه‌های آبریز، امکان مدل‌سازی همبستگی‌های مکانی و زمانی را به‌صورت واقع‌بینانه‌تری فراهم می‌کند و در مقایسه با روش‌های قطعی و سایر روش‌های زمین‌آماري عملکرد بهتری دارد. بر پایه نتایج شیخ (۱۳۹۸)، این رویکرد از پتانسیل بالایی جهت برآورد در حوضه‌های فاقد آمار در ایران نیز برخوردار است.

در حوضه کیفیت آب، استفاده از Top-Kriging به‌تازگی مورد توجه قرار گرفته و نتایج اولیه نشان‌دهنده پتانسیل بالای این روش است. همچنین، ترکیب Top-Kriging با روش‌های یادگیری ماشین و ادغام داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند راهکارهای نوینی برای بهبود دقت و کارایی مدل‌های پیش‌بینی ارائه دهد.

۲- مبانی نظری

۲-۱- درون‌یابی مکانی زمین‌آماري

روش‌های زمین‌آماري که در ابتدا برای برآورد عیار سنگ معدن و عدم قطعیت یک بلوک با استفاده از داده‌های نقطه‌ای در صنعت معدن توسعه یافته بودند، قادر به برآورد مقادیر متغیر موردنظر در نقاط فاقد اندازه‌گیری با

استفاده از واریوگرام و براساس همبستگی مکانی جفت نقاط در مقابل فاصله اقلیدسی آنها هستند (Journel و Huijbregts, ۱۹۷۸).

فرآیند اصلی این روش‌ها بدین صورت است که با ترسیم همبستگی فضایی جفت نقاط در مقابل فاصله اقلیدسی آنها، واریوگرام‌ها ایجاد می‌شوند و در نهایت از واریوگرام‌ها برای تخمین متغیر در مکان‌های موردنظر براساس بلوک‌های داده‌ای مشخص استفاده می‌شود. اما در حوضه‌های هیدرولوژیکی این مسئله کاملاً متفاوت است. مهم‌ترین تفاوت، سازمان‌دهی حوضه‌ها در زیرحوضه‌هاست. برخلاف بلوک‌های معادن، حوضه‌ها دارای ساختار تودرتو هستند و آب در یک شبکه جریان دارد. بنابراین، بالادست و پایین‌دست یک حوضه رفتار متفاوتی از حوضه‌های همسایه که حتی زیرحوضه مشترکی ندارند، از خود نشان می‌دهند. در نتیجه، فاصله اقلیدسی میان حوضه‌ها راهکار اصلی برای اندازه‌گیری فاصله مکانی آنها نخواهد بود.

۲-۲- درون‌یابی مکانی در هیدرولوژی

مشکل حوضه‌های فاقدآمار (PUB) یکی از چالش‌های اساسی در هیدرولوژی و علوم وابسته به آن است. این مشکل به این معنیست که امکان برآورد و پیش‌بینی متغیرهای مربوط به جریان در مکان‌های فاقد اندازه‌گیری وجود ندارد. طیف گسترده‌ای از روش‌ها برای رفع این مشکل توسعه یافته‌اند که از جمله می‌توان به پژوهش‌های Blöschl (۲۰۰۵) اشاره کرد. در این میان، مجموعه روش‌های زمین‌آماري برای برآورد متغیرها در مکان‌هایی که عدم قطعیت داشته و داده‌ای از آنها در دسترس نیست، توسعه یافته‌اند. این روش‌ها به‌عنوان بهترین تخمین‌گر خطی ناریب^۱ یا BLUE شناخته می‌شوند. بهترین تخمین‌گر بودن به این معنیست که دارای کمترین مربع ریشه خطا هستند، خطی بودن به این معنیست که برآوردها براساس میانگین وزنی داده‌ها در منطقه انجام می‌شود و ناریب بودن یعنی خطای موردانتظار آنها صفر است. هدف از درون‌یابی مکانی، برآورد مقادیر متغیر در مکان‌هایی است که داده‌ای مشاهده نشده تا امکان تحلیل‌های مکانی جامع برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و تصمیم‌گیری

¹ Best Linear Unbiased Estimator

مدیریتی فراهم شود. متغیرهای هیدرولوژیکی معمولاً دارای وابستگی مکانی هستند که ناشی از ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه، اتصال جریان‌ها و عوامل اقلیمی است.

یکی از نخستین رویکردها در کاربرد روش‌های درون‌یابی در مطالعات هیدرولوژیکی، فرض یک‌بعدی شبکه رودخانه‌ای و برآورد در امتداد آن است (Gottschalk, ۱۹۹۳). وی احتمالاً نخستین روش را برای محاسبه کوواریانس در امتداد شبکه رودخانه‌ای براساس فواصل رودخانه‌ای توسعه داد. Hoef و همکاران (۲۰۰۶) و Cressie و همکاران (۲۰۰۶) رویکرد میانگین متحرک را برای درون‌یابی در سیستم یک‌بعدی شبکه رودخانه‌ای پیشنهاد کردند که میزان آورد بالادست و پایین‌دست را تخمین می‌زد. Peterson و Hoef (۲۰۱۰) ترکیبی از هر دو روش را ارائه کردند.

رویکرد دوم، در نظر گرفتن شبکه رودخانه‌ای به صورت دوبعدی است. در این رویکرد، رواناب به عنوان فرآیندی پیوسته که در هر نقطه از سیمای سرزمین وجود دارد، در نظر گرفته می‌شود و جریان رودخانه، انتگرالی از رواناب محلی در سرتاسر حوضه است. Sauquet و همکاران (۲۰۰۰) و Gottschalk (۱۹۹۳) روش کریجینگ بلوکی را پیشنهاد کردند که در آن وابستگی مکانی حوضه‌ها با پشتیبانی متفاوت و غیر صفر توسط کوواریوگرام منظم‌شده مدل‌سازی شده است.

کاربرد روش‌های زمین‌آماري در شبکه‌های رودخانه‌ای در سال‌های اخیر برجسته شده است. تا قبل از سال ۲۰۰۴، بیشترین کاربرد زمین‌آمار در هیدرولوژی حوزه‌های آبخیز براساس فاصله اقلیدسی میان حوضه‌ها بوده و به‌طور معمول فاصله اقلیدسی میان ایستگاه‌ها یا مرکز ثقل حوضه‌ها لحاظ می‌شد. با این حال، با توجه به ساختار متفاوت حوزه‌های آبخیز، مطالعاتی در زمینه کاربرد روش‌های زمین‌آمار صورت نگرفته بود. Skøien و همکاران (۲۰۰۶) ایده Sauquet و همکاران (۲۰۰۰) را برای برآورد همبستگی مکانی شدیدتر میان حوضه‌های تودرتو نسبت به حوضه‌های مستقل توسعه دادند. روش معرفی شده توسط Skøien و همکاران (۲۰۰۶) دارای سه تفاوت عمده بود:

۱. قابلیت کاربرد برای طیف وسیعی از متغیرهای جریان: نشان داده شد که روش Top-Kriging از

طریق همسایگی می‌تواند برای دامنه وسیعی از متغیرهای مرتبط با جریان، از جمله متغیرهایی که تجمع خطی ندارند یا غیرایستا هستند، مورد استفاده قرار گیرد.

۲. استفاده از واریوگرام به جای کوواریوگرام: در این رویکرد، امکان استفاده از واریوگرام به جای

کوواریوگرام وجود دارد.

۳. محاسبه عدم قطعیت‌های مکانی: در این روش، عدم قطعیت مکانی مشاهدات که احتمالاً بین

مکان‌های مختلف متفاوت است، محاسبه می‌شود. این امر امکان بهره‌برداری از داده‌هایی با آمار کوتاه‌مدت را نیز فراهم می‌سازد (Laaha و همکاران، ۲۰۱۴).

به عبارت دیگر، روش‌های کلاسیک کریجینگ (نظیر کریجینگ معمولی و کریجینگ عمومی) فرض می‌کنند که همبستگی مکانی به صورت همسان‌گرد^۱ و براساس فاصله اقلیدسی است. این فرض، ساختار جهت‌دار و تو در توی شبکه‌های رودخانه‌ای را نادیده می‌گیرد که می‌تواند منجر به الگوهای مکانی غیرواقعی و برآوردهای دارای سوگیری در مطالعات هیدرولوژیکی شود. اما در حوضه‌های هیدرولوژیکی، مهم‌ترین تفاوت وجود ساختار تودرتو و شبکه‌ای از جریان رودخانه‌هاست. به عبارت دیگر، بالادست و پایین‌دست یک حوضه می‌تواند رفتار متفاوتی نسبت به حوضه‌های همسایه داشته باشد (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶). بنابراین، در فضای جغرافیایی سیلاب ماهیتی ناپیوسته خواهد داشت و حتی در حوضه‌های همجوار، مقادیر آن تغییرات زیادی دارد؛ زیرا مکانیسم تولید سیلاب و پارامترهای مؤثر بر آن در هر حوضه منحصر به فرد است. در نتیجه، امکان درونیابی مستقیم این قبیل متغیرها در فضای جغرافیایی وجود ندارد و برآورد فاصله اقلیدسی بین حوضه‌ها راهکار اساسی برای اندازه‌گیری فاصله مکانی آن‌ها نخواهد بود (Chokmani و Ouarda، ۲۰۰۴).

¹ isotropic

پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که روش‌های زمین‌آمار که در ابتدا جهت درون‌یابی داده‌های نقطه‌ای توسعه یافته بودند، می‌توانند به‌طور مؤثری جهت منطقه‌ای‌سازی داده‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گیرند. به‌طور خاص، دو رویکرد متفاوت درون‌یابی مکانی برای پیش‌بینی رژیم جریان در آبخیزهای فاقد آمار گزارش شده است:

۱. **درون‌یابی مکانی شاخص هیدرومتری در فضای دوبعدی:** این فضا که به فضای فیزیوگرافی معروف است، توسط متغیرهای اقلیمی و فیزیوگرافی تعریف می‌شود. مختصات X و Y فضای فیزیوگرافی از مجموعه‌ای $n > 1$ توصیف‌گرهای ژئومورفولوژیکی با استفاده از تکنیک‌های چندمتغیره از قبیل تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل همبستگی متعارف (CCA) به دست می‌آید.

۲. **کریجینگ توپولوژیکی:** این روش برای تعریف ساختار تو در تو و مورفولوژی منطقه مورد مطالعه برای درون‌یابی شاخص جریان مورد نظر در طول شبکه آبراهه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۳- اصول کریجینگ توپولوژیکی

Top-Kriging یک روش ژئواستاتیستیکی پیشرفته است که به‌منظور پیش‌بینی مکانی در شبکه‌های رودخانه‌ای و حوزه‌های آبخیز تودرتو طراحی شده است (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶). با در نظر گرفتن مساحت و توپولوژی حوزه‌های آبخیز، این روش برآوردهایی دقیق‌تر و قابل اعتمادتر نسبت به روش‌های سنتی کریجینگ برای متغیرهای هیدرولوژیکی ارائه می‌دهد (Li و Heap، ۲۰۱۱). Top-Kriging با گسترش مفاهیم کریجینگ کلاسیک، به‌صورت زیر عمل می‌کند:

- تعریف همبستگی مکانی براساس فاصله‌های توپولوژیکی در طول شبکه رودخانه‌ای به‌جای فاصله‌های اقلیدسی (Hoef و همکاران، ۲۰۰۶).
- در نظر گرفتن مشاهدات به‌عنوان مقادیر انتگرالی بر روی حوزه‌های آبخیز غیر صفر، نه به‌عنوان نقاط منفرد (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶).

---- ارزیابی روش درون‌یابی پیشرفته Topological Kriging در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک / ۱۲

- لحاظ کردن ساختار تودرتوی حوضه‌ها، به‌طوری که حوضه‌های بالادست درون حوضه‌های پایین‌دست قرار گرفته‌اند (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶).

- مدل‌سازی توابع کوواریانس و واریوگرام به‌نحوی که ارتباطات جریان و اندازه حوضه‌ها را منعکس کند (Isaaks و Srivastava، ۱۹۸۹).

از نظر ریاضی، کوواریانس بین دو حوضه به وسعت ناحیه مشترک بالادست و پیوستگی درون شبکه رودخانه‌ای بستگی دارد. در نتیجه، ساختار کوواریانس به نحوی تنظیم می‌شود که مسیرهای جریان هیدرولوژیکی را رعایت کرده و منعکس می‌کند (Hoef و همکاران، ۲۰۰۶). این روش، نوعی تخمین‌گر خطی بدون سوگیری بهینه یا BLUE است که برای شبکه‌های رودخانه‌ای تطبیق یافته و نیاز به فرضیات اضافی ندارد. باید توجه داشت که Top-Kriging بر دو فرض اصلی زیر استوار است:

۱. **ایستایی ذاتی:** واریانس مشاهدات تابعی از فاصله یا دقیق‌تر، مساحت حوزه آبخیز و توپولوژی آن است (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶).

۲. **پیوستگی مکانی:** متغیر موردنظر نتیجه فرآیندی پیوسته است که بر کل مساحت حوزه آبخیز یکپارچه شده است، نه فقط در نقاط گسسته (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶).

این رویکرد، امکان برآورد دقیق‌تر و سازگارتر با فرآیندهای هیدرولوژیکی را فراهم می‌کند و به‌ویژه برای برآورد متغیرهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های فاقد ایستگاه اندازه‌گیری (حوضه‌های بدون آمار) بسیار کارآمد است (Li و Heap، ۲۰۱۱).

۴-۲- مبانی تئوری روش Top-Kriging

با توجه به شکل ۱، دو گروه عمده از متغیرهای کنترل‌کننده جریان وجود دارد. هدف از Top-Kriging، ترکیب این دو گروه از متغیرهاست (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶).



شکل ۱- فرآیند تولید رواناب (Laaha و همکاران، ۲۰۱۴)

گروه نخست: شامل متغیرهایی است که در مکان پیوسته هستند؛ این متغیرها عبارتند از بارش، تبخیر-تعرق و خصوصیات خاک حوزه‌های آبخیز که در تولید مکانی رواناب مؤثرند. این دسته از متغیرها را می‌توان به‌عنوان فرآیندهای پیوسته در مقیاس مکانی در نظر گرفت. برای مشخص کردن این متغیرها، فاصله اقلیدسی مناسب بوده و ویژگی‌های فضایی آن‌ها با ارایوگرام قابل‌نمایش است (Srivastava و Isaaks، ۱۹۸۹).

گروه دوم: متغیرهای مربوط به مسیر جریان در طول شبکه زهکشی هستند. این متغیرها تحت تأثیر ساختار تودرتوی حوضه‌ها سازمان‌دهی شده و تجمع رواناب در آن‌ها در امتداد شبکه جریان رخ می‌دهد. متغیرهای این گروه شامل میانگین دبی سالانه، خصوصیات سیلاب، غلظت، کدورت و دمای جریان هستند. این متغیرها بر روی شبکه رودخانه تعریف می‌شوند و فاصله اقلیدسی راهکار اصولی برای نشان دادن فواصل میان آن‌ها نیست؛ بلکه باید از روش‌هایی استفاده کرد که ساختار درختی شبکه رودخانه را منعکس می‌کنند (Hoef و همکاران، ۲۰۰۶). برای این منظور، فرآیند تولید رواناب به‌عنوان یک پروسه پیوسته مکانی در نظر گرفته می‌شود که در هر نقطه از لندسکیپ وجود دارد (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶).

---- ارزیابی روش درون‌یابی پیشرفته Topological Kriging در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک / ۱۴

در روش Top-Kriging، به جای رویکرد سنتی مشاهده نقطه‌ای فرآیند، داده‌های مشاهده شده $z(A_1), z(A_2), \dots, z(A_n)$ در ایستگاه‌های موجود در طول شبکه آبراهه در نظر گرفته می‌شود. فرض کنید $Z(A_i)$ متغیر هیدرولوژیکی موردنظر (مانند دبی جریان یا شاخص کیفیت آب) باشد که بر روی ناحیه حوزه آبخیز A_i مرتبط با یک بازه رودخانه‌ای یا ایستگاه اندازه‌گیری i اندازه‌گیری شده است. تفاوت اصلی با کریجینگ کلاسیک این است که Z به‌عنوان میانگین انتگرالی بر روی ناحیه حوزه آبخیز تعریف می‌شود، نه به‌عنوان یک مقدار نقطه‌ای (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶).

$$z(A_i) = \frac{1}{|A_i|} \int_{A_i} z(x) dx \quad (۱)$$

که در این رابطه A_i پوشش مکانی $z(A_i)$ را نشان می‌دهد. متغیرهای جریان رابطه (۱) شامل A_i حوزه آبخیزی که به درون آبراهه در موقعیت x_i زهکشی می‌شود و $|A_i|$ مساحت آن است. برای درون‌یابی در سطح یک آبراهه در موقعیت x_0 با سطح حوزه A_0 از نمونه‌های غیرنقطه‌ای $z(A_1), z(A_2), \dots, z(A_n)$ مقادیر برآوردگر Block-Kriging از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\hat{z}(A_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(A_i) \quad (۲)$$

در روش‌های کریجینگ اقلیدسی (مانند کریجینگ معمولی)، متغیر موردنظر به‌عنوان یک جزء تصادفی از مقادیر $Z(x)$ در نظر گرفته می‌شود. در این حالت، شباهت‌های فضایی براساس واریانس میان جفت نقاط که تابعی از فاصله اقلیدسی است، بیان می‌شود. در این حالت، مقادیر نامعلوم متغیر $\hat{Z}(A_0)$ در موقعیت A براساس میانگین وزنی متغیرهای اندازه‌گیری شده در همسایگی با رابطه ۲ به دست می‌آید. که در این رابطه λ_i وزن درون‌یابی اندازه‌گیری شده در موقعیت A_i و n تعداد همسایگی‌های اندازه‌گیری شده مورد استفاده برای درون‌یابی است. با

فرض این که فرآیند تولید رواناب به طور طبیعی ایستا و تصادفی است، مقادیر بهینه وزن λ_i با حل کردن سیستم کریجینگ براساس رابطه زیر به دست می آید (Journal و Huijbregts, ۱۹۷۸):

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{\gamma}_{ij} - \lambda_j \sigma_i^2 + \mu = \bar{\gamma}_{0i} \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

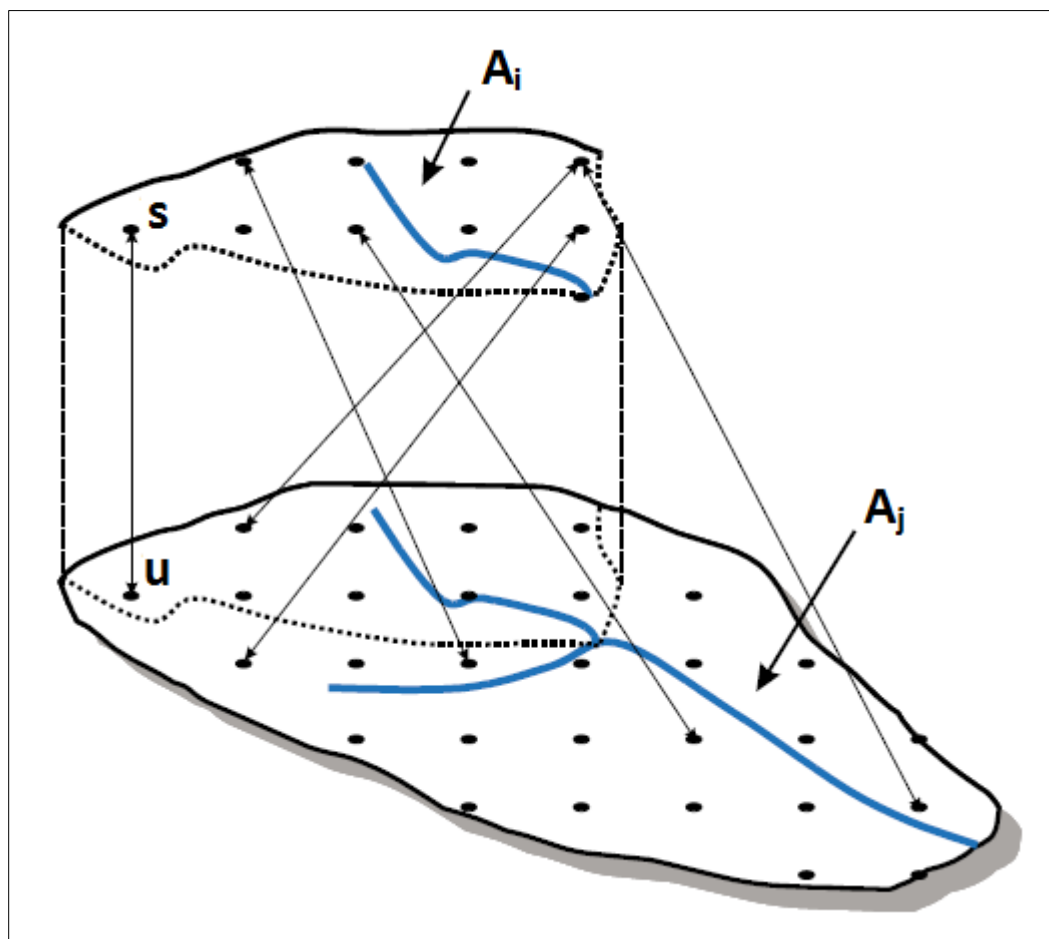
که در این رابطه γ_{ij} سمی واریوگرام قابل انتظار برای مشاهدات i و j با پشتیبانی غیر صفر، μ ضریب لاگرانژ براساس کمینه محدودیت و σ_i^2 میزان خطا یا عدم قطعیت مربوط به مشاهده i است. کریجینگ به دنبال کمینه رساندن مربع خطای قابل انتظار است.

از آنجایی که مشاهدات دارای پوشش غیر صفر A هستند، سمی واریانس های قابل انتظار γ_{ij} میان مشاهدات با استفاده از تغییرات به دست می آیند. این بدین مفهوم است که به جای یک مدل واریوگرام، یک گروه از مدل های واریوگرام مشابه برای حوضه ها با مساحت های مختلف استفاده شده و ساختار تودرتوی حوضه های آبخیز لحاظ می شود. با فرض وجود یک سمی واریوگرام نقطه ای γ_p ، سمی واریانس قابل انتظار γ_{ij} میان دو مشاهده با مساحت های A_i و A_j به ترتیب، برابر است با:

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_{ij} &= 0.5 * Var \left(z(A_i) - z(A_j) \right) \\ &= \frac{1}{|A_i||A_j|} \int_{A_j} \int_{A_i} \gamma_p(s-u) ds du - 0.5 \\ &\quad * \left[\frac{1}{|A_i|^2} \int_{A_i} \int_{A_i} \gamma_p(s-u) ds du \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{|A_j|^2} \int_{A_j} \int_{A_j} \gamma_p(s-u) ds du \right] \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن s و u بردارهای مکان درون هر حوضه هستند که برای انتگرال‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرند. بخش اول انتگرال، تمامی واریانس میان دو حوضه را بیان می‌کند، در حالی که بخش دوم، واریانس درون حوضه‌ها را کم می‌کند. بنابراین، $\overline{\gamma_{ij}}$ کمترین مقدار را برای نزدیک‌ترین مکان در آبراهه خواهد داشت.

در Top-Kriging، انتگرال رابطه ۴ با مجزاکردن مساحت حوضه درون شبکه‌ای از نقاط محاسبه می‌شود. شکل ۲، به‌طور شماتیک دو حوضه با ساختار تودرتو را ارائه می‌دهد که براساس مربع نقاط و فاصله میان نقاط درون حوضه‌ها از هم مجزا شده‌اند (Laaha و همکاران، ۲۰۱۳؛ ۲۰۱۴).



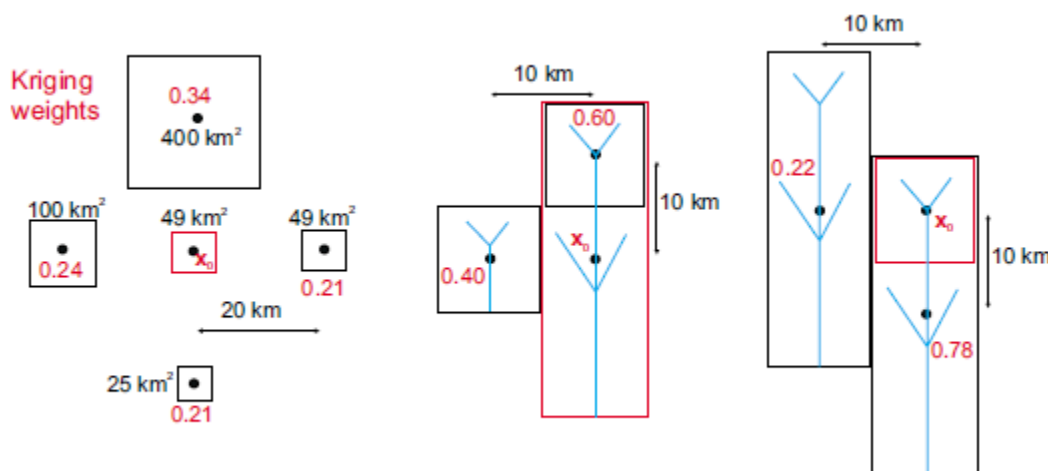
شکل ۲- محاسبه واریوگرام منظم شده برای دو حوزه آبخیز تودرتو. حوزه i درون حوزه j ساختار تودرتو یافته، A_i

و A_j بیان‌کننده مساحت‌های حوضه‌ها و s و u نقاط متمایزکننده در هر حوضه (Laaha و همکاران، ۲۰۱۴)

۵-۲ - واریوگرافی و درون‌یابی در Top-Kriging

در روش Top-Kriging، به جای کاربرد مستقیم واریوگرام‌های نقطه‌ای، از متوسط واریوگرام نقطه‌ای در سراسر حوزه‌های آبخیز استفاده می‌شود. این واریوگرام‌های متوسط به واریوگرام نقطه‌ای، موقعیت نسبی و اندازه (وسعت) دو آبخیز که توسط واریوگرام با یکدیگر مقایسه می‌شوند، وابسته هستند (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶).

در نخستین گام اجرای Top-Kriging، به واریوگرام معرفی شده توسط اسکین و همکاران نیاز است. برآورد واریوگرام تنها بر پایه فاصله مرکز تا مرکز میان حوضه‌ها نیست، بلکه اندازه حوضه‌ها نیز حائز اهمیت است. بنابراین، مدل واریوگرام نقطه‌ای براساس برازش مقادیر واریوگرام تجمعی به واریوگرام نمونه محاسبه می‌شود. در گام دوم، واریوگرام نقطه‌ای که ترکیبی از اندازه و موقعیت آبخیزها است، برای هر یک از شاخص‌های هیدرومتری موردنظر برآورد شده و از روش کریجینگ برای پیش‌بینی مقادیر متغیر در مکان‌های بدون آمار استفاده می‌شود (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶).



شکل ۳- اثر اندازه آبخیز (چپ) و ساختار تودرتو (مرکز و راست) بر وزن‌های کریجینگ λ در برآوردهای Top-Kriging

Kriging

شکل ۳ محاسن روش Top-Kriging را نسبت به روش‌های کریجینگ اقلیدسی نظیر کریجینگ معمولی نشان می‌دهد. در هر سه مورد، حوضه‌ها دارای فاصله مشابه مرکز تا مرکز با حوضه هدف (۲۰ کیلومتر در سمت چپ،

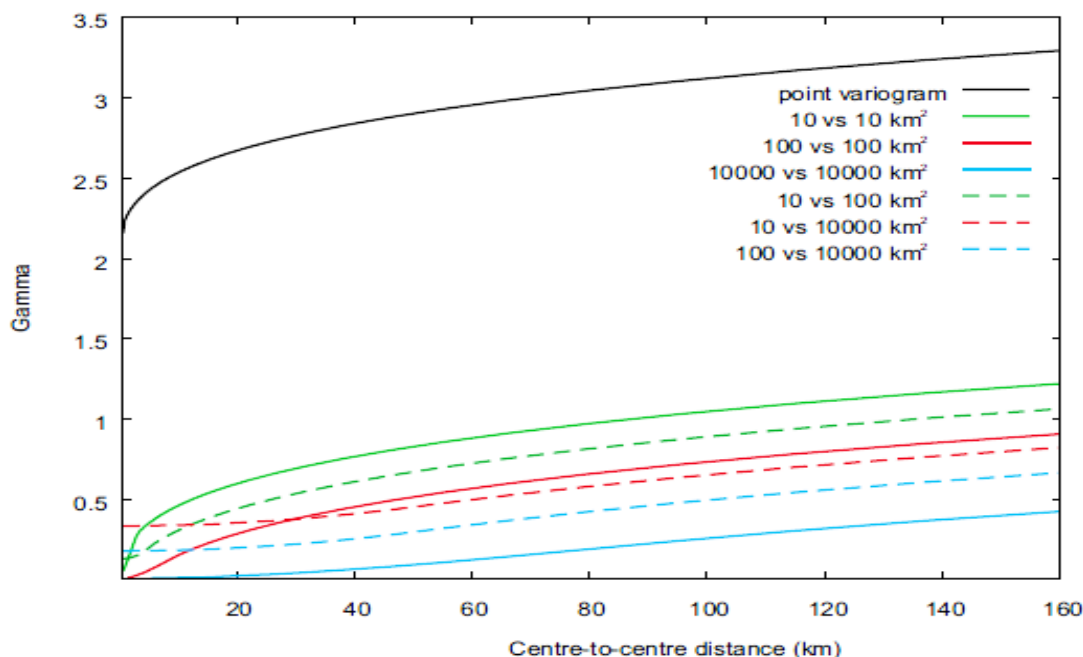
---- ارزیابی روش درونیابی پیشرفته Topological Kriging در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ۱۸/

۱۰ کیلومتر در مرکز و راست) هستند. در کریجینگ معمولی، وزن‌های مشابهی برای تمام آبخیزهای همسایه در نظر گرفته می‌شود؛ اما در روش Top-Kriging، وزن‌ها متفاوت است. به‌عنوان نمونه، در شکل ۵ سمت چپ، اثر اندازه حوضه نشان داده شده است. بزرگ‌ترین حوضه دارای بیشترین وزن است، زیرا دارای حداقل اریب اندازه‌گیری شده نسبت به میانگین است. با این حال، با وجود اینکه حوضه‌ای با مساحت ۴۹ کیلومترمربع در سمت راست از حوضه ۲۵ کیلومترمربعی در پایین بزرگ‌تر است، هر دو دارای وزن مشابهی هستند؛ زیرا فاصله حوضه ۴۹ کیلومترمربعی به حوضه ۴۰۰ کیلومترمربعی نزدیک‌تر است و کریجینگ وزن آن را کاهش می‌دهد (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶).

همان‌طور که بیان شد، برای اجرای Top-Kriging به یک مدل واریوگرام خاص نیاز است که توسط Skøien و همکاران (۲۰۰۶) ارائه شده است. این مدل یک واریوگرام نقطه‌ای با اثر نقطه‌ای است که براساس رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\gamma_p(h) = ah^b (1 - e^{-(h/c)^d}) + C_{0p} \quad (5)$$

در این رابطه، a سقف واریوگرام، c میزان همبستگی، b و d بیشترین و کمترین فاصله شیب واریوگرام در پلات $\log\text{-}\log$ و C_0 اثر نقطه‌ای هستند. بر این اساس، احتمال کاربرد سایر مدل‌های کلاسیک واریوگرام در-Top Kriging (مانند نمایی، گوسی، کروی) نیز وجود دارد. به منظور اطمینان از کارایی مدل کریجینگ، باید واریوگرام نقطه‌ای برآورد و براساس شرایط مثبت-معین (positive definite) که تابعی از داده‌هاست، مدل‌سازی شود (Huijbregts و Journal، ۱۹۷۸).



شکل ۴- نمونه‌ای از واریوگرام نقطه‌ای در روش Top-Kriging با توجه به مساحت‌های مختلف حوضه‌های آبخیز

بسیاری از متغیرهای مورد بررسی به احتمال زیاد دارای اثر قطعه‌ای^۱ هستند که نشان‌دهنده اختلاف میان مقیاس کوچکتر از فاصله بین مشاهدات است. در واریوگرام‌ها، اثر قطعه‌ای به صورت یک عرض از مبدا ظاهر می‌شود. واریوگرام نقطه‌ای با واریانس قطعه‌ای را می‌توان به شکل زیر شرح داد:

$$\gamma_p(h) = \begin{cases} 0 & \text{if } h = 0 \\ f(h) + C_{0p} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۶)$$

که در آن h فاصله فضایی و $f(h)$ واریوگرام بدون اثر قطعه‌ای است. اگر معادله (۴) و (۶) را به طور مستقیم مرتب کنیم، اثر قطعه‌ای حتی برای آبخیزهای کوچک ناپدید می‌شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود که اثر قطعه‌ای به طور جداگانه تنظیم شود. واریانس قطعه‌ای می‌تواند به عنوان واریانس یک متغیر تصادفی مستقل در نظر گرفته شود.

^۱ nugget effect

---- ارزیابی روش درون‌یابی پیشرفته Topological Kriging در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک / ۲۰

براساس پیشنهاد Journal و Huijbregts (۱۹۷۸)، واریانس قطعه‌ای منظم‌شده مربوط به دو آبخیز با اندازه‌های متفاوت که ممکن است با هم اشتراک داشته باشند یا نه، به شکل زیر تعمیم داده می‌شود:

$$C_0(A_1, A_2) = 0.5 \left(\frac{C_{0p}}{A_1} + \frac{C_{0p}}{A_2} - \frac{2C_{0p} \cdot Meas(A_1 \cap A_2)}{A_1 A_2} \right) \quad (7)$$

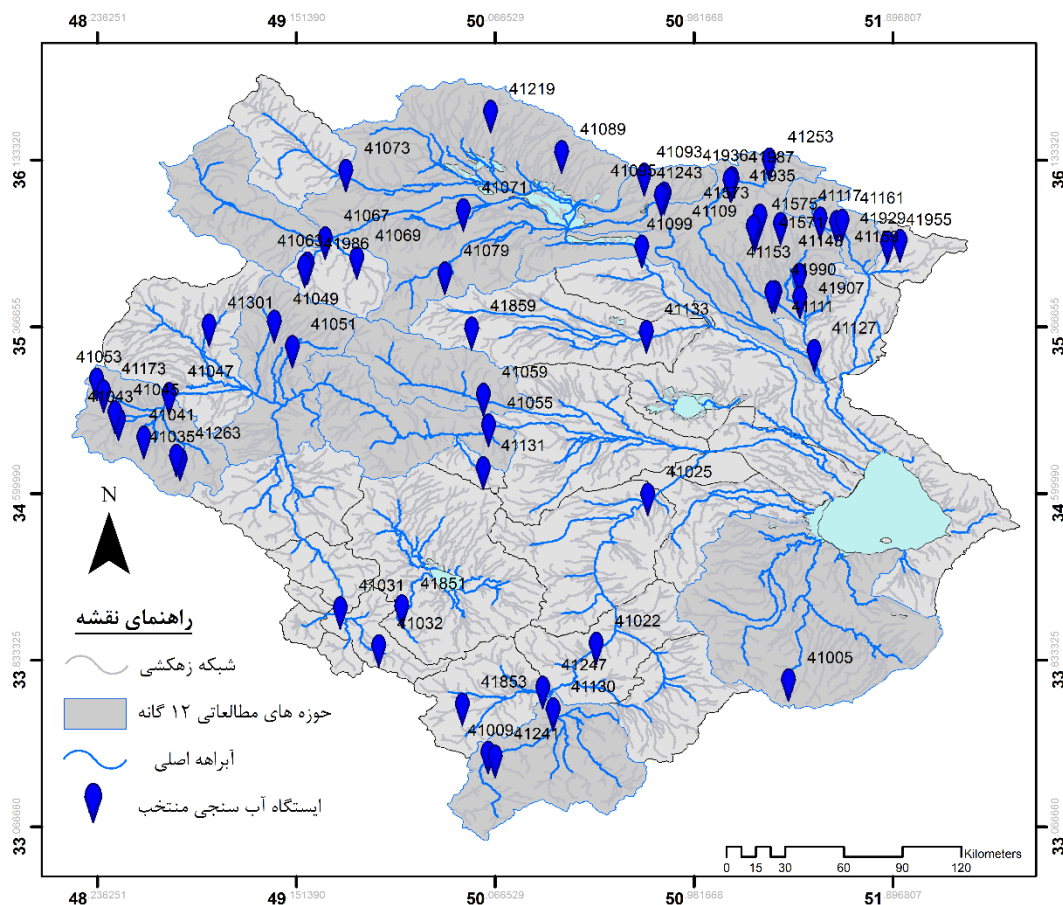
که در آن $Meas(A_1 \cap A_2)$ بیان‌کننده سطح اشتراک دو حوضه با مساحت‌های A_1 و A_2 است. چنانچه حوضه‌ها دارای ساختار تو در تو باشند، این مقدار کاسته خواهد شد و اگر چنین ساختاری نداشته باشند، صفر می‌شود (Journal و Huijbregts، ۱۹۷۸). یکی از مزیت‌های روش کریجینگ نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی، فراهم‌آوردن برآوردی از واریانس کریجینگ در هر نقطه است. واریانس کریجینگ در واقع عدم قطعیت برآوردها را ارائه می‌کند:

$$\sigma_R^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{i0} + \mu \quad (8)$$

که در آن γ_{i0} مقادیر گاما میان حوضه هدف و حوضه‌های همسایه را ارائه می‌کند (Journal و Huijbregts، ۱۹۷۸).

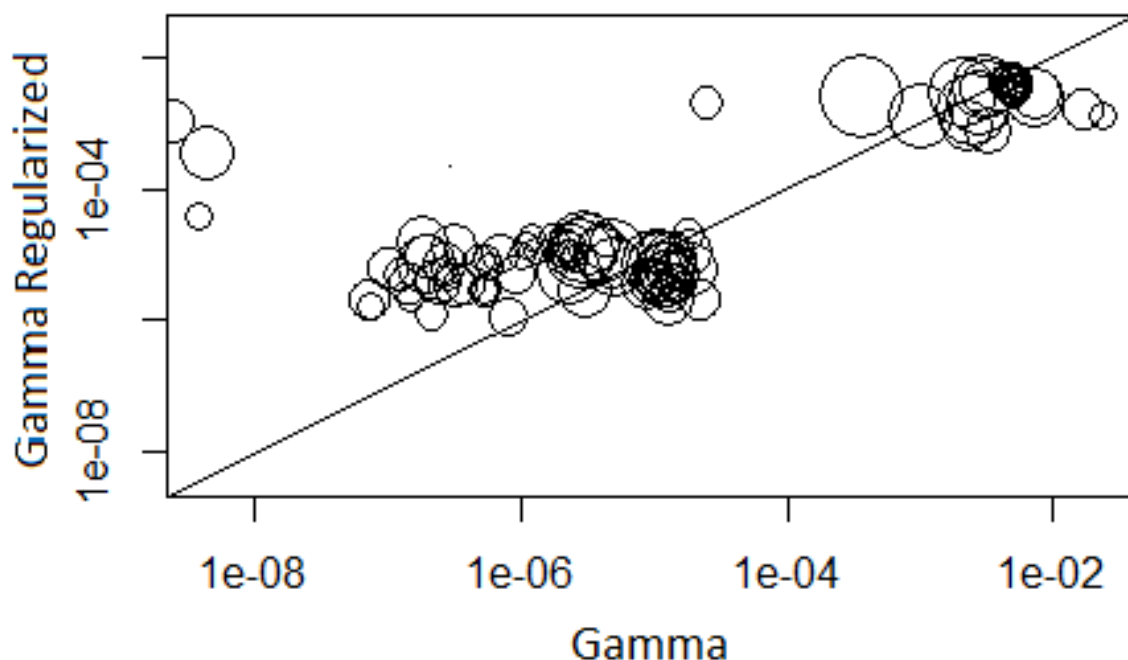
۳- کاربرد کریجینگ توپولوژیکی در ایران

شیخ (۱۳۹۸)، نخستین کاربرد از روش Top-Kriging در برآورد مقادیر جریان‌های کمینه در مناطق فاقد آمار حوزه آبخیز دریاچه نمک ایران را گزارش کرد. در این پژوهش، عملکرد روش Top-Kriging به منظور برآورد مقادیر جریان‌های کمینه مورد بررسی قرار گرفت. شاخص جریان کمینه Q_7 مربوط به ۶۰ ایستگاه آب‌سنجی منتخب حوزه آبخیز دریاچه نمک محاسبه شد. در ادامه، مقادیر شاخص Q_7 براساس مساحت حوزه‌های آبخیز استاندارد شد تا مقادیر جریان به متغیر مکانی پیوسته با پشتیبانی نقطه‌ای تبدیل شود.



شکل ۵- محدوده مطالعاتی و پراکنش ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب (شیخ، ۱۳۹۸)

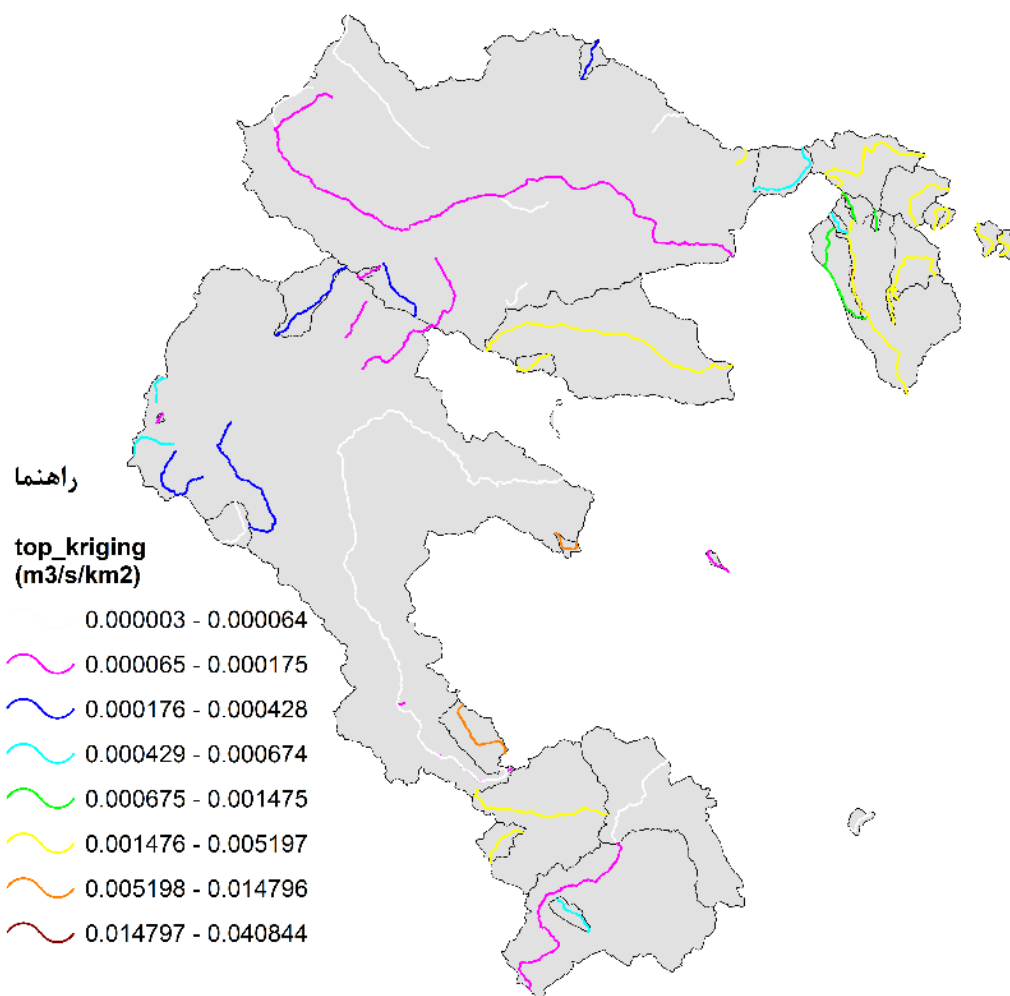
در گام نخست، مدل واریوگرام نقطه‌ای بر پایه روش back-calculated و مقادیر کمیت مورد مطالعه در حوضه-های دارای آمار، برآورد شد. براساس واریوگرام نقطه‌ای، واریوگرام‌های منظم‌شده بین حوضه‌ها، به‌عنوان تابعی از فاصله و مساحت حوضه‌ها برآورد شد. به عبارت دیگر در این روش، برآورد واریوگرام تنها بر پایه فاصله مرکز تا مرکز میان حوضه‌ها نبوده؛ بلکه اندازه آن‌ها نیز حائز اهمیت است. شکل ۶، نمودار پراکنش log-log از مقادیر سمی واریوگرام منظم شده در مقابل مقادیر واریوگرام نمونه از مدل برازش یافته شده را نمایش می‌دهد. خط ۱:۱ نشان‌دهنده بهترین برازش است.



شکل ۶- مقایسه مقادیر سمی‌واریوگرام مشاهده‌ای و منظم‌شده (ابعاد دایره‌ها نشان‌دهنده تعداد نسبی جفت‌ها در هر گام) (شیخ، ۱۳۹۸)

در دومین مرحله، واریوگرام نقطه‌ای که ترکیبی از اندازه و موقعیت حوضه‌های آبخیز است، برای شاخص آب‌سنجی موردنظر برآورد و از روش درون‌یابی برای پیش‌بینی مقادیر متغیر در مکان‌های بدون‌آمار استفاده شد. در این روش، درون‌یابی بر پایه سیستم کریجینگ و براساس سمی‌واریانس‌های منظم شده انجام شد. یکی از مزیت‌های روش کریجینگ نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی، تخمین میزان واریانس برآوردها در هر مکان است. در روش Top-Kriging برخلاف روش کریجینگ معمولی (اقلیدسی)، وزن‌های یکسانی برای تمامی حوضه‌های آبخیز لحاظ نمی‌شود. معمولاً بزرگ‌ترین حوضه، دارای بیشترین وزن است؛ زیرا دارای کمینه اریب اندازه‌گیری‌شده در مقایسه با میانگین است. علاوه بر مساحت حوضه‌ها، فاصله مرکز تا مرکز حوضه‌ها نیز در وزن‌دهی مؤثر است. حوضه نزدیک‌تر از وزن بیشتری برخوردار است. ساختار تودرتوی حوضه‌ها، یکی دیگر از عوامل مؤثر در وزن‌دهی است. چنانچه همسایگی‌ها، مساحت مشابه و فاصله مرکز تا مرکز یکسانی با حوضه هدف داشته باشند، وزن بیشتر به زیرحوضه‌ای که به حوضه هدف زهکشی می‌شود، تعلق می‌گیرد. شکل ۷، نتایج برآوردهای منطقه‌ای مقادیر

جریان کمینه، براساس روش Top-Kriging در مناطق فاقد آمار حوزه آبخیز دریاچه نمک و مشاهدات در دسترس است.



شکل ۷- برآوردهای منطقه‌ای بر پایه روش Top-Kriging در سطح حوزه آبخیز دریاچه نمک (شیخ، ۱۳۹۸)

این نتایج نشان داد، عدم قطعیت‌های مشاهده شده در نتایج Top-Kriging در محدوده مورد مطالعه دور از انتظار نبوده است. تراکم بسیار پایین ایستگاه‌ها در سطح حوضه و عدم توزیع و پراکنش یکنواخت آن‌ها یکی از اصلی‌ترین دلایل بروز این امر محسوب می‌شود. به‌طوری‌که بخش‌های وسیعی از سطح حوضه بدون آماربرداری و در اختیار داشتن آمار کافی بوده و نقاط دارای آمار از پراکنش و حمایت مکانی مطلوبی برخوردار نبوده است. در

---- ارزیابی روش درون‌یابی پیشرفته Topological Kriging در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک / ۲۴

بخش‌هایی از حوضه به خصوص در امتداد آبراهه‌های اصلی که تراکم ایستگاه‌های سنجش مطلوب‌تر است، برآوردهای روش Top-Kriging دقت بالاتری نشان می‌دهند اما در سرشاخه‌ها به دلیل فقدان ایستگاه‌های آب-سنجی عملکرد ضعیف‌تری انعکاس داده شده است.

در نظر گرفتن شبکه درختی آبراهه‌ها و ساختار ژئومتریک از نقاط قوت روش Top-Kriging محسوب می‌شود؛ که به طبیعی‌ترین^۱ روش تعمیم‌دهی معروف شده است. این روش بر پایه درون‌یابی مکانی اطلاعات استوار است؛ بنابراین ناهمگنی‌های مکانی جریان کمینه بایستی با داده‌های نقطه‌ای مکانی به‌طور کامل پوشش داده شود. در شرایط نبود اطلاعات مکانی قوی و پوشش بهینه سطح، پیش‌بینی‌های روش Top-Kriging با خطای قابل‌توجهی روبرو خواهد شد.

از سوی دیگر، کیفیت داده‌های مورد استفاده به‌ویژه داده‌های مربوط به توپولوژی آبراهه‌ها نیز یکی دیگر از چالش‌های این روش درون‌یابی محسوب می‌شود. در روش Top-Kriging به دلیل در نظر گرفتن ساختار تودرتوی حوضه‌ها، دقت داده‌های شبکه آبراهه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است. دسترسی و بکارگیری داده‌های شبکه آبراهه‌ای دقیق می‌تواند در افزایش قطعیت تخمین‌ها، اثرات مثبتی داشته باشد. باید به این نکته نیز توجه داشت، در روش‌های درون‌یابی مرسوم، عدم قطعیت مشاهده شده تنها به فواصل مرکز حوضه‌های دارای آمار یا بدون آمار وابسته است. این در حالی است که در روش Top-Kriging ساختار تودرتو حوضه‌ها در عدم قطعیت برآوردی به‌طور کامل در نظر گرفته شده است. بنابراین مقادیر عدم قطعیت مشاهداتی روش Top-Kriging قابل‌توجیه است.

۴- پیاده‌سازی کریجینگ توپولوژیکی

۴-۱- مدل‌سازی واریوگرام براساس فواصل توپولوژیکی

در روش Top-Kriging، فاصله توپولوژیکی به‌عنوان طول مسیر شبکه رودخانه‌ای که دو حوزه آبخیز را به هم متصل می‌کند (با در نظر گرفتن جهت جریان) تعریف می‌شود (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶). واریوگرام‌های تجربی

¹ Most Natural

با استفاده از این فواصل توپولوژیکی محاسبه می‌شوند تا همبستگی مکانی در امتداد شبکه رودخانه‌ای را منعکس کنند. مدل‌های واریوگرام (مانند مدل‌های نمایی یا کروی) با کمینه‌سازی معیارهای خطا نظیر مجموع مربعات خطا (SSE) و معیار اطلاعات آکائیک (AIC) به واریوگرام تجربی برازش داده می‌شوند (Hoef و همکاران، ۲۰۰۶).

۴-۲- برآوردگر کریجینگ

سامانه کریجینگ با استفاده از ماتریس کوواریانس مشتق‌شده از مدل واریوگرام توپولوژیکی حل می‌شود. برآوردها برای حوزه‌های آبخیز بدون اندازه‌گیری با وزن‌دهی به مقادیر مشاهده‌شده براساس کوواریانس توپولوژیکی انجام می‌شود. عدم قطعیت پیش‌بینی نیز محاسبه می‌شود (Journel و Huijbregts، ۱۹۷۸).

۴-۳- جنبه‌های پیاده‌سازی و محاسباتی کریجینگ توپولوژیکی

Top-Kriging در محیط آماری R قابلیت اجرا را دارد. محیط نرم افزار R شامل گستره وسیعی از ابزارها برای تحلیل داده‌ها و نمایش بصری بوده و پلت فرمی است که در آن به آسانی امکان توسعه سامانه‌های کنونی با روش‌های جدید در قالب پکیج فراهم شده است. چندین پکیج با هدف تحلیل فضایی داده‌ها درون R تعبیه شده‌اند اما هیچ‌کدام توانایی درون‌یابی زمین‌آماري با پیش‌تیبانی از داده‌های مکانی مشاهده‌شده را ندارند. پکیج‌های دیگری در R وجود دارند که عملیاتی مشابه انجام می‌دهند. به‌عنوان نمونه dissever-package که کوچک‌مقیاس کردن تصاویر ماهواره‌ای را برعهده دارد، که براساس مناطق منظم بوده و در CRAN در دسترس نیست. SSN-package قادر به درون‌یابی در امتداد شبکه آبراهه است، اما بر پایه تئوری‌های مختلفی بوده و پیش‌تیبانی ناحیه‌ای ندارد. علاوه‌براین نیازمند پیش پردازش شبکه آبراهه با STARS-Geoprocessing تحت نرم‌افزار ArcGIS است. package-constrainedKriging قادر به درون‌یابی بلوک‌های منظم است، اما از مشاهدات نامنظم پیش‌تیبانی نمی‌کند و ابزاری برای برازش واریوگرام ندارد. همچنین الحاقیه gstat-package جهت درون‌یابی امکاناتی فراهم کرده است، اما این الحاقیه در کد جاری خودش وجود ندارد و امکان برازش واریوگرام برخی از مشاهدات در آن وجود ندارد. در حال حاضر rtop تنها پکیجی است که تمامی قابلیت‌های لازم برای درون‌یابی داده‌ها با متغیرهای فضایی

---- ارزیابی روش درون‌یابی پیشرفته Topological Kriging در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک / ۲۶

را دارا است. پکیج rtop به آسانی قابلیت اجرا و امکان اجرای چندین روش مختلف درون‌یابی و ارائه نتایج بصری در مقایسه با روش‌های پیاده‌سازی دیگر را فراهم کرده است.

توابع کلیدی بسته rtop در محیط R

- createRtopObject(): ایجاد شیء rtop با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی.
- rtopVariogram(): محاسبه واریوگرام تجربی.
- rtopKrige(): حل معادلات کریجینگ و تولید پیش‌بینی‌ها.

۵- چالش‌ها، محدودیت‌ها و مسیرهای پژوهشی آینده در کریجینگ توپولوژیکی

۵-۱- چالش‌ها و محدودیت‌های اصلی

نیازمندی‌های داده‌ای و کیفیت اطلاعات

دقت نتایج Top-Kriging به شدت به کیفیت و جزئیات داده‌های ورودی وابسته است. این روش نیازمند اطلاعات دقیق از توپولوژی شبکه رودخانه‌ای، مرزهای حوزه‌های آبخیز و توزیع مکانی ایستگاه‌های اندازه‌گیری است (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶). خطا در مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM)، تعیین جهت جریان یا مرز حوضه‌ها می‌تواند به برآوردهای نادرست منجر شود. مطالعات نشان داده‌اند که عدم قطعیت در توپولوژی، تأثیر مستقیمی بر دقت پیش‌بینی‌های Top-Kriging دارد (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶).

عملکرد مطلوب این روش مستلزم شبکه‌ای متراکم و به‌خوبی توزیع‌شده از ایستگاه‌های اندازه‌گیری است. پوشش داده‌ای پراکنده، به‌ویژه در حوضه‌های بالادست، عدم قطعیت پیش‌بینی را افزایش می‌دهد. همچنین، متغیرهای هیدرولوژیکی اغلب دارای تغییرات زمانی هستند و Top-Kriging معمولاً براساس داده‌های ایستا یا آمارهای تجمیعی عمل می‌کند، بنابراین کاربرد آن برای داده‌های پویا یا غیرایستا محدود است (Journel و Huijbregts، ۱۹۷۸).

پیچیدگی محاسباتی و مدیریت داده

Top-Kriging به دلیل نیاز به مدل سازی روابط مکانی و توپولوژیکی پیچیده، از نظر محاسباتی پرهزینه است (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶). با افزایش تعداد حوضه های مشاهده شده، اندازه ماتریس های کوواریانس رشد قابل توجهی می کند و این امر باعث افزایش هزینه های محاسباتی و نیاز به منابع حافظه بیشتر می شود. مدل سازی واریوگرام براساس فواصل توپولوژیکی پیچیده تر از مدل های اقلیدسی است و نیاز به الگوریتم های تخصصی و تنظیم دقیق پارامترها دارد (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶). همچنین، حوضه های همپوشان نیاز به مدیریت دقیق در مدل سازی کوواریانس دارند تا از بروز اریب جلوگیری شود و سازگاری نتایج حفظ شود.

فرضیات مدل و محدودیت های روشی

Top-Kriging براساس فرضیات ایستایی و خطی بودن عمل می کند که ممکن است در شرایط واقعی هیدرولوژیکی صادق نباشد (Journel و Huijbregts، ۱۹۷۸). این روش فرض می کند که فرآیند مکانی دارای ایستایی مرتبه دوم و همسانگردی در فضای توپولوژیکی است، درحالی که این فرض ممکن است در حوضه های ناهمگن یا تحت تأثیر عوامل انسانی و اقلیمی صادق نباشد. همچنین، Top-Kriging به عنوان یک برآوردگر خطی بدون اریب (BLUE) عمل می کند و ممکن است نتواند روابط غیرخطی یا تعاملات پیچیده مؤثر بر متغیرهای هیدرولوژیکی را به طور کامل مدل سازی کند (Journel و Huijbregts، ۱۹۷۸). شبکه های رودخانه ای واقعی ممکن است دارای انشعابات، حلقه ها یا زیرشبکه های جداگانه باشند که تعریف فواصل توپولوژیکی و ساختارهای کوواریانس را پیچیده می سازد (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶).

۵-۲- راهکارها و راهبردهای کاهش چالش ها

برای کاهش چالش های محاسباتی، بهبود کیفیت داده ها و مدیریت محدودیت های روشی، راهکارهای مختلفی پیشنهاد شده است (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶). استفاده از روش های محاسباتی کارآمد مانند کریجینگ با رتبه ثابت (FRK) یا تقسیم بندی حوضه می تواند اندازه ماتریس های کوواریانس را کاهش داده و محاسبات را تسهیل

کند. مدیریت همپوشانی زیرحوضه‌ها از طریق تعریف ماتریس‌های overlapObs و overlapPredObs برای مدیریت مناطق مشترک و جلوگیری از اریب در نتایج ضروری است.

برای حل چالش داده‌های با ابعاد بالا، اعمال تجزیه مقدار منفرد (SVD) یا سایر روش‌های کاهش ابعاد به ماتریس‌های کوواریانس پیشنهاد می‌شود. همچنین، ادغام متغیرهای کمکی خارجی مانند بارندگی یا عوامل فیزیوگرافی از طریق کریجینگ عمومی^۱ می‌تواند دقت مدل‌سازی را افزایش دهد (Hoef و همکاران، ۲۰۰۶).

۵-۳- مسیرهای پژوهشی آینده

پژوهش‌های آینده می‌توانند بر بهبود کارایی محاسباتی، گسترش مدل‌های فضازمانی و یکپارچه‌سازی با روش‌های یادگیری ماشین متمرکز شوند. توسعه روش‌های Top-Kriging برای مدل‌سازی همزمان تغییرات مکانی و زمانی متغیرهای هیدرولوژیکی، ترکیب Top-Kriging با روش‌های یادگیری ماشین برای مدل‌سازی روابط غیرخطی و تعاملات پیچیده و توسعه ابزارهای کاربرپسند و خودکار برای پیاده‌سازی Top-Kriging در مدیریت منابع آب و محیط زیست از جمله مسیرهای پیشنهادی هستند. همچنین، تحقیق در زمینه الگوریتم‌های سریع‌تر و کارآمدتر برای کاهش هزینه‌های محاسباتی و افزایش مقیاس‌پذیری روش ضروری است (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶).

۶- خلاصه و نتیجه‌گیری

روش Top-Kriging به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های زمین‌آماري در حوضه هیدرولوژی و مدیریت منابع آب، با در نظر گرفتن ساختار تو در تو و جهت‌دار شبکه‌های رودخانه‌ای، تحولی اساسی در مدل‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی ایجاد کرده است (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶). این روش، برخلاف کریجینگ کلاسیک که صرفاً براساس فاصله اقلیدسی و مشاهدات نقطه‌ای عمل می‌کند، مشاهدات را به‌صورت انتگرالی بر

^۱ Universal Kriging

روی حوزه‌های آبخیز با مساحت غیر صفر مدل‌سازی می‌نماید و از فاصله‌های توپولوژیکی در امتداد شبکه رودخانه‌ای بهره می‌برد. این رویکرد سبب می‌شود که همبستگی مکانی به‌صورت سازگارتر با فرآیندهای هیدرولوژیکی واقعی مدل‌سازی شود و برآوردهای دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتری برای حوزه‌های فاقد ایستگاه اندازه‌گیری ارائه شود.

یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در مطالعات هیدرولوژیکی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، کمبود اطلاعات و عدم اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولوژیکی در سطح گسترده است. در این مناطق، شبکه‌های اندازه‌گیری عموماً پراکنده و فاقد تراکم کافی هستند و در بسیاری از حوزه‌های آبخیز، ایستگاه‌های هیدرومتری یا نقاط نمونه‌برداری وجود ندارد. این کمبود داده، امکان تحلیل دقیق وضعیت منابع آب، پیش‌بینی تغییرات مکانی و زمانی متغیرهای هیدرولوژیکی و در نهایت تصمیم‌گیری‌های مدیریتی را با محدودیت مواجه می‌سازد. در چنین شرایطی، روش‌های زمین‌آماری مانند Top-Kriging می‌توانند با بهره‌گیری از اطلاعات محدود موجود، برآوردهای مناسبی از پارامترهای موردنظر در نقاط فاقد اندازه‌گیری ارائه دهند و به‌عنوان ابزاری مؤثر در رفع چالش کمبود داده عمل کنند.

مزیت اصلی Top-Kriging در این است که این روش قادر است با استفاده از ساختار توپولوژیکی شبکه رودخانه‌ای و روابط هیدرولوژیکی بین حوضه‌ها، برآوردهای خود را براساس منطق فیزیکی و واقعی جریان آب در حوضه انجام دهد. این ویژگی در مناطق خشک و نیمه‌خشک که شبکه‌های اندازه‌گیری بسیار پراکنده و کم‌تراکم هستند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که در چنین مناطقی، روش‌های کریجینگ و به‌ویژه Top-Kriging، نسبت به سایر روش‌های زمین‌آماری، برآوردهای دقیق‌تر و کم‌خطاتری ارائه می‌دهند و می‌توانند نقشه‌های پهنه‌بندی با کیفیت بالاتری برای پارامترهای کیفی و کمی آب تهیه کنند.

علاوه بر این، Top-Kriging امکان برآورد عدم قطعیت را نیز فراهم می‌آورد. این ویژگی به مدیران و تصمیم‌گیران منابع آب کمک می‌کند تا در مناطق فاقد داده، با آگاهی از میزان عدم قطعیت پیش‌بینی، برنامه‌ریزی

--- ارزیابی روش درون‌یابی پیشرفته Topological Kriging در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک / ۳۰

و مدیریت بهتری داشته باشند. در مناطق خشک و نیمه‌خشک که منابع آب اغلب محدود و در معرض تنش هستند، این قابلیت از اهمیت مضاعفی برخوردار است.

با وجود مزایای یادشده، پیاده‌سازی و کاربرد Top-Kriging با چالش‌ها و محدودیت‌های متعددی همراه است. نیازمندی به داده‌های دقیق از توپولوژی شبکه رودخانه‌ای و مرزهای حوزه‌های آبخیز، تراکم و توزیع مناسب ایستگاه‌های اندازه‌گیری و ثبات زمانی متغیرهای هیدرولوژیکی ازجمله مهم‌ترین چالش‌ها در این زمینه هستند. هرگونه خطا یا ناسازگاری در این داده‌ها می‌تواند به برآوردهای نادرست و کاهش اعتبار نتایج منجر شود (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶؛ Journel و Huijbregts، ۱۹۷۸).

برای کاهش این چالش‌ها، راهکارهای مختلفی پیشنهاد شده است. استفاده از روش‌های محاسباتی کارآمد مانند کریجینگ با رتبه ثابت (FRK) یا تقسیم‌بندی حوضه، مدیریت همپوشانی زیرحوضه‌ها، اعمال تجزیه مقدار منفرد (SVD) بر روی ماتریس‌های کوواریانس و ادغام متغیرهای کمکی از طریق کریجینگ عمومی^۱ می‌توانند کارایی و دقت مدل‌سازی را افزایش دهند (Hoef و همکاران، ۲۰۰۶). همچنین، توسعه روش‌های جدید برای آشکارسازی عدم قطعیت در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و تصمیم‌گیری نیز از دیگر راهکارهای پیشنهادی است.

در زمینه پژوهش‌های آینده، گسترش مدل‌های Top-Kriging به حوضه‌های فضا‌زمانی، یکپارچه‌سازی با روش‌های یادگیری ماشین برای مدل‌سازی روابط غیرخطی و تعاملات پیچیده، توسعه ابزارهای کاربرپسند و خودکار برای پیاده‌سازی عملی و بهبود کارایی محاسباتی ازجمله مسیرهای پیشنهادی هستند (Skøien و همکاران، ۲۰۰۶). این نوآوری‌ها می‌توانند کارایی و کاربردپذیری Top-Kriging را در مدیریت منابع آب و محیط زیست افزایش دهند.

در مجموع، Top-Kriging با در نظر گرفتن ساختارهای پیچیده شبکه‌های رودخانه‌ای و حوزه‌های آبخیز، امکان مدل‌سازی دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تری از متغیرهای هیدرولوژیکی را فراهم می‌کند. این روش به‌ویژه در مناطق خشک

^۱ Universal Kriging

و نیمه‌خشک جهان که با کمبود شدید داده و عدم اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولوژیکی مواجه هستند، می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای رفع این چالش عمل کند و کمک شایانی به بهبود مدیریت منابع آب و محیط زیست کند.

منابع:

- شیخ، ز. ۱۳۹۸. برآورد منحنی تداوم جریان در حوزه‌های آبخیز فاقد آمار با استفاده از روش‌های تعمیم-دهی هیدرولوژیکی (حوزه آبخیز دریاچه نمک). رساله دکتری، دانشگاه سمنان. ۱۹۵ صفحه.
- Archfield, S.A., Pugliese, A., Castellarin, A., Skøien, J.O. & Kiang, J.E. 2013. Topological and canonical kriging for design flood prediction in ungauged catchments: an improvement over a traditional regional regression approach?. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(4): 1575-1588. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1575-2013>.
- Archfield, S.A., Pugliese, A., Castellarin, A., Skøien, J.O. & Kiang, J.E. 2012. Topological and canonical kriging for design-flood prediction in ungauged catchments: an improvement over a traditional regional regression approach?. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 9(10). doi:10.5194/hessd-9-12193-2012.
- Blöschl, G. 2005. Rainfall-runoff modeling of ungauged catchments. Encyclopedia of Hydrological Sciences. John Wiley & Sons, Ltd, 19 p. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa140>
- Castiglioni, S., Castellarin, A. & Montanari, A. 2009. Prediction of low-flow indices in ungauged basins through physiographical space-based interpolation. *Journal of hydrology*, 378(3-4): 272-280. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.032>
- Castiglioni, S., Castellarin, A., Montanari, A., Skøien, J. O., Laaha, G. and Blöschl, G. 2011. Smooth regional estimation of low-flow indices: physiographical space based interpolation and top-kriging, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15: 715-727. <https://doi.org/10.5194/hess-15-715-2011>, 2011.
- Chokmani, K. & Ouarda, T.B.M.J. 2004. Physiographical space-based kriging for regional flood frequency estimation at ungauged sites. *Water Resources Research*, 40(12): W12514. <https://doi.org/10.1029/2003WR002983>.
- Cressie, N., Calder, C.A., Clark, J.S., Ver Hoef, J.M., & Wile, C.K. 2006. Accounting for uncertainty in ecological analysis: The strengths and limitations of hierarchical statistical modeling. *Ecological Applications*, 16(2): 442-457. <https://doi.org/10.1890/07-0744.1>
- Gottschalk, L. 1993. Correlation and covariance of runoff. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 7(2): 85-101. <https://doi.org/10.1007/BF01581418>.
- Gottschalk, L. 1993. Interpolation of runoff applying objective methods. *Stochastic hydrology and hydraulics*, 7(4): 269-281. <https://doi.org/10.1007/BF01581615>.
- Hoef, J.M.V., Peterson, E. & Theobald, D. 2006. Spatial statistical models that use flow and stream distance. *Environmental and Ecological statistics*, 13(4): 449-464. <https://doi.org/10.1007/s10651-006-0022-8>.

- Isaaks, E.H. & Srivastava, R.M. 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, 561 p.
- Journel, A.G. & Huijbregts, C.J. 1978. Mining Geostatistics. Academic Press. London, 600p.
- Laaha, G., Salinas, J.L. & Blöschl, G. 2013, April. Exploring the link between spatial hydrologic variability and catchment similarity for the purpose of regionalisation. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU2013-5433).
- Laaha, G., Skøien, J.O. & Blöschl, G. 2012. Comparing geostatistical models for river networks. In *Geostatistics Oslo 2012* (pp. 543-553). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4153-9_44.
- Laaha, G., Skøien, J.O. & Blöschl, G. 2014. Spatial prediction on river networks: comparison of top-kriging with regional regression. *Hydrological Processes*, 28(2): 315-324. <https://doi.org/10.1002/hyp.9578>.
- Laaha, G., Skøien, J.O., Nobilis, F. & Blöschl, G. 2013. Spatial prediction of stream temperatures using top-kriging with an external drift. *Environmental Modeling & Assessment*, 18(6): 671-683. <https://doi.org/10.1007/s10666-013-9373-3>.
- Lachance-Cloutier, S., Turcotte, R. & Cyr, J.F. 2017. Combining streamflow observations and hydrologic simulations for the retrospective estimation of daily streamflow for ungauged rivers in southern Quebec (Canada). *Journal of Hydrology*, 550: 294-306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.011>.
- Laimighofer, J. & Laaha, G. 2025. Statistical learning and topkriging improve spatio-temporal low-flow estimation. *Water Resources Research*, 61(4): e2024WR038329. <https://doi.org/10.1029/2024WR038329>.
- Li, J. & Heap, A.D. 2011. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecological Informatics*, 6(3–4): 228–241. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.12.003>.
- Parajka, J., Merz, R., Skøien, J.O. & Viglione, A. 2015. The role of station density for predicting daily runoff by top-kriging interpolation in Austria. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(3): 228. DOI: 10.1515/johh-2015-0024.
- Persiano, S., Salinas, J.L., Stedinger, J.R., Farmer, W.H., Lun, D., Viglione, A., ... & Castellarin, A. 2021. A comparison between generalized least squares regression and top-kriging for homogeneous cross-correlated flood regions. *Hydrological Sciences Journal*, 66(4): 565-579. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1879389>.
- Peterson, E.E. & Hoef, J.M.V. 2010. A mixed-model moving-average approach to geostatistical modeling in stream networks. *Ecology*, 91(3): 644-651. <https://doi.org/10.1890/08-1668.1>.
- Rokhana Dwi Bakti, R., Irawan, D.E. & Sulistyowati, D. 2025. Spatial interpolation of water quality using Ordinary Kriging, ML Kriging, and Top-Kriging in Yogyakarta, Indonesia. *AIMS Environmental Science*, 12(2): 245–263.
- Sauquet, E., Gottschalk, L., & Leblois, E. 2000. Mapping average annual runoff: A hierarchical approach applying a stochastic interpolation scheme. *Hydrological Sciences Journal*, 45(6): 799–815. <https://doi.org/10.1080/02626660009492385>.
- Skøien, J.O. & Blöschl, G. 2007. Spatiotemporal topological kriging of runoff time series. *Water Resources Research*, 43(9):1-21. <https://doi.org/10.1029/2006WR005760>.

- Skøien, J.O., Merz, R., & Blöschl, G. 2006. Top-Kriging Geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(2): 277–287. <https://doi.org/10.5194/hess-10-277-2006>
- Skøien, J.O., Blöschl, G. 2008. Topological kriging of runoff. In *geoENV VI—Geostatistics for Environmental Applications: Proceedings of the Sixth European Conference on Geostatistics for Environmental Applications* (pp. 221-231). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6448-7_19.

Abstract

Due to the spatial scarcity of hydrological records—particularly in the world’s arid and semi-arid regions—the prediction and estimation of variables related to water resources remain highly challenging. The lack of data impedes accurate analysis of water resources and optimal management decision-making. The objective of this study is to introduce and evaluate the application of the topological kriging (Top-Kriging) method as an advanced geostatistical approach for predicting and estimating hydrological variables in river networks, particularly under data scarcity conditions in arid and semi-arid basins. In this research, the theoretical foundations and methodology of Top-Kriging were described, and the modeling of spatial correlations based on the topological structure of river networks and catchment areas was examined. Subsequently, the results of applying this method to the estimation of low-flow variables in the Namak Lake watershed (Iran) were presented. Furthermore, the challenges and limitations of this method in arid and semi-arid regions, as well as strategies for mitigating them, were analyzed. Findings from the Namak Lake basin indicated the gauge density, spatial configuration of gauges, and performance of input data quality control estimation. By considering the nested network structure and river morphology. Comparative evaluations with other studies have shown that Top-Kriging, by taking into account the directed and nested structure of river networks, provides more precise and less biased estimates of hydrological variables at ungauged locations. This method also enables the quantification of prediction uncertainty, which is crucial for management decision-making in water resources and environmental management. Key practical requirements and constraints for applying Top-Kriging include access to accurate river-network topology and catchment delineations, sufficiently dense and appropriately distributed gauge networks, and temporal stability (or stationarity) of the hydrological variables of interest.

Keywords: Geostatistics, River Network, Spatial Interpolation, Topological Kriging.

Ministry of Agriculture Jahad
Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI)

Title: Evaluation of the Advanced Topological Kriging Interpolation Method in Hydrological Variables Predictions in Arid and Semi-arid Regions

Authors: Zahra Sheikh, Alireza Moghaddamnia, Mohammadreza Yazdani

Text Editing: Saeed Nabipay Lashkarian

Document Formatting: Abbas Seddigh

Publisher: Soil Conservation and Watershed Management Research Institute.

Circulation: 10 Copies

Date of Print: Autumn 2025

This scientific work has been registered with the series number of **68365** at the date of **2025-11-20** in the Agriculture Information and Scientific Documents Center. All rights reserved. No part of this publication may reproduced or translated without the original reference.

Ministry of Agriculture-Jahad
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Technical Report:

Evaluation of the Advanced Topological Kriging Interpolation Method in
Hydrological Variables Predictions in Arid and Semi-arid Regions

Authors:

Zahra Sheikh, Alireza Moghaddamnia, Mohammadreza Yazdani

Series Number: 68365

2025



Ministry of Agriculture - Jihad
Agriculture Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute



Technical Report

Evaluation of the Advanced Topological Kriging Interpolation Method in Hydrological Variables Predictions in Arid

Authors:

Zahra Sheikh, Alireza Moghaddamnia,
Mohammadreza Yazdani

Series Number: 68365

2025