

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب

**ارزیابی و طراحی بهینه شبکه پایش بارندگی در سطح حوضه آبریز
(مطالعه موردی حوضه مشهد)**

نگارنده: مسعود ابراهیمی ثانی

استاد راهنما

دکتر سعید گلیان

استاد مشاور

دکتر مجتبی شفیعی

شهریور ۱۳۹۶

تقدیم به :

این پایان‌نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران، در کمال افتخار و امتنان تقدیم می‌نمایم به محضر
ارزشمند پدر و مادر عزیزم از بابت تلاش‌های محبت‌آمیزی که در تمام دوران زندگی‌ام بی‌منت نثارم
کردند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموختند. خواهران و برادران، همراهان همیشگی و پشتوانه
های زندگی‌م به پاس دلگرمی و تشویق.

سپاسگزاری

از استاد گرامی جناب دکتر سعید گلپان بسیار سپاسگزارم چرا که بدون راهنمایی‌های ایشان تهیه این پایان نامه بسیار مشکل می‌نمود. و سپاسگزاری فراوان از جناب دکتر مجتبی شفیعی که حضور همیشگی و مشاوره‌های به جا و شایسته ایشان چراغ راه بود.

از داوران محترم پایان نامه، جناب دکتر رامین امینی و جناب دکتر رمضان واقعی که با حوصله و دقت، پایان نامه اینجانب را مطالعه فرمودند و نکات ارزنده‌ای در جهت هرچه بهتر شدن محتویات پایان نامه ارائه نمودند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

همچنین از دوستان گرامی که بنده را در این مسیر، همراهی فرمودند.

تعهد نامه

اینجانب مسعود ابراهیمی ثانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی و مدیریت منابع آب دانشکده مهندسی عمران دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه ارزیابی و طراحی بهینه شبکه پایش بارندگی در سطح حوضه آبریز (مطالعه موردی حوضه مشهد) تحت راهنمایی دکتر سعید گلیمان متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

چکیده:

بارندگی به عنوان ورودی اصلی در برنامه‌ریزی توسعه پایدار منابع آب محسوب می‌شود. شبکه کارآمد ایستگاه‌های باران‌سنجی شبکه‌ای است که علاوه بر دقت اندازه‌گیری مناسب، از تراکم مطلوبی برخوردار باشد، به طوری که بتوان در نقاط فاقد ایستگاه در یک حوضه آبریز برآورد مناسبی از بارندگی بدست آورد. در این مطالعه از روشی مبتنی بر مدل زمین‌آماري کریجینگ و تابع توزیع احتمال نرمال برای ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی در حوضه مشهد به مساحت ۹۹۰۰ کیلومتر مربع استفاده شده است که مفهوم آن بر اساس معیار درصدی از مساحت منطقه با دقت پذیرش (AP) می‌باشد. ابتدا با تحلیل تغییرات مکانی بارندگی سالانه در حوضه توسط واریوگرام بدون بعد، ساختار مکانی بارندگی حوضه استخراج گردید و سپس توسط الگوریتم ارائه شده شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه مورد بررسی قرار گرفت. از ۳۴ ایستگاه موجود، ۵ ایستگاه به دلیل نداشتن اطلاعات و یا ناکافی بودن اطلاعات در دوره آماری حذف شدند. از ۲۹ ایستگاه مورد تحلیل، ۱۹ ایستگاه به عنوان ایستگاه‌های شبکه‌ی مبنا بدست آمدند و ۱۰ ایستگاه باقی‌مانده تاثیر بسیار کمی در برآورد بارندگی حوضه داشتند. در روند بهینه‌سازی، ایستگاه‌های غیرمبنا به ۶ ایستگاه جدید در سایر نقاط حوضه کاهش یافتند که موجب افزایش دقت در تخمین بارندگی در کل حوضه می‌شوند. با ساده‌سازی‌های انجام شده در روش مذکور و انجام محاسبات در محیط نرم‌افزار GIS به صورت توسعه‌ی یک ابزار، نتایج نشان داد که از روش ارائه شده می‌توان به سادگی در ارزیابی شبکه‌ی ایستگاه‌های باران‌سنجی استفاده نمود.

کلید واژه‌ها: شبکه پایش بارندگی، کریجینگ، نیم تغییرنما، روش احتمال پذیرش

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات تحقیق.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ ضرورت و اهمیت تحقیق.....	۸
۳-۱ هدف تحقیق.....	۱۰
۴-۱ نوآوری تحقیق.....	۱۱
۵-۱ ساختار تحقیق.....	۱۱
فصل دوم: مروری بر سوابق تحقیق.....	۱۳
۱-۲ مقدمه.....	۱۴
۲-۲ پیشینه تحقیق.....	۱۴
فصل سوم: مواد و روش ها.....	۲۵
۱-۳ مقدمه.....	۲۶
۲-۳ گزاره های تحقیق.....	۲۶
۱-۲-۳ کلیاتی در مورد زمین آمار.....	۲۶
۲-۲-۳ نیم تغییرنما (واریوگرام).....	۲۸
۱-۲-۲-۳ قسمت های مختلف یک تابع نیم تغییرنما.....	۲۸
۱-۱-۲-۲-۳ اثر قطعه ای.....	۳۰
۲-۱-۲-۲-۳ آستانه.....	۳۰
۳-۱-۲-۲-۳ دامنه تاثیر (شعاع تاثیر).....	۳۰
۳-۲-۳ ناهمسان گردی.....	۳۱
۴-۲-۳ بررسی تغییرات مکانی داده ها و تحلیل واریوگرام.....	۳۱
۵-۲-۳ کریجینگ.....	۳۳
۶-۲-۳ تعریف و محاسبه احتمال پذیرش.....	۳۵
۷-۲-۳ ارزیابی کارایی و تقویت شبکه موجود.....	۳۷

۳۷	..... منطقه مورد مطالعه
۳۸	..... بارندگی ۱-۳-۳
۳۹	..... ایستگاه های شبکه پایش منطقه
۴۱	..... بازسازی داده های مفقود
۴۵	..... بررسی ایستایی مکانی داده ها و تشخیص روند متغیرها
۴۶	..... تحلیل واریوگرام داده ها
۴۸	..... محاسبه احتمال پذیرش و محاسبه کارایی شبکه موجود در منطقه
۵۰	..... تقویت شبکه فعلی

فصل چهارم: نتایج و بحث ۵۳

۵۴	..... مقدمه ۱-۴
۵۴	..... آمار و اطلاعات ۲-۴
۵۴	..... انتخاب مدل نیم تغییرنما ۳-۴
۵۵	..... محاسبه احتمال پذیرش و ارزیابی و تقویت شبکه ۴-۴

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۶۳

۶۴	..... نتیجه گیری ۱-۵
۶۵	..... پیشنهادات ۲-۵
۶۶	..... پیوست ها
۶۶	..... پیوست ۱: ضرایب همبستگی بین ایستگاه های مستقل و وابسته
۶۷	..... پیوست ۲: مقدار بارش سالانه ی ایستگاه ها در طول دوره آماری
۶۸	..... پیوست ۳: مختصات ایستگاه ها و پارامتر Z (میانگین بارش سالانه مقیاس شده)
۶۹	..... منابع

فهرست جداول

- جدول (۳-۱) مشخصات ایستگاه های منتخب حوضه..... ۴۰
- جدول(۳-۲) مشخصات ایستگاه های حذف شده ۴۱
- جدول (۳-۳) ضریب همبستگی و تعداد سالهای بازسازی شده ۴۵
- جدول (۴-۱) نام و مشخصات ایستگاه هایی که می توانند حذف شوند و تاثیر کمی در افزایش دقت شبکه دارند ۵۸
- جدول (۴-۲) موقعیت ایستگاه های اضافه شده به شبکه..... ۵۹

فهرست اشکال

- شکل (۳-۱) قسمت‌های مختلف یک تابع نیم‌تغییرنما ۲۹
- شکل (۳-۲) پراکندگی ایستگاه هادر حوضه مشهد ۳۸
- شکل (۳-۳) نمایی از محیط برنامه SPSS و وارد کردن داده‌ها در آن ۴۲
- شکل (۳-۴) نمایی از جدول خروجی نرم افزار برای ضریب همبستگی دو ایستگاه ۴۳
- شکل (۳-۵) داده‌های بازسازی شده در نرم افزار SPSS ۴۴
- شکل (۳-۶) نمودار میانگین بارش سالانه نسبت به ارتفاع ۴۶
- شکل (۳-۷) ابزار Geostatistical analyst در نرم‌افزار ArcGIS ۴۶
- شکل (۳-۸) ورود داده‌ها ۴۷
- شکل (۳-۹) آماده سازی داده‌ها ۴۸
- شکل (۳-۱۰) نمایی از ابزار مذکور در محیط GIS جهت محاسبه احتمال پذیرش ۵۰
- شکل (۴-۱) نیم‌تغییرنمای نمایی برآزش داده شده بر روی داده‌ها ۵۵
- شکل (۴-۲) توزیع مکانی مقادیر احتمال پذیرش و موقعیت ایستگاه‌های موجود (شبکه فعلی) ۵۶
- شکل (۴-۳) اولویت‌بندی ایستگاه‌ها و مقدار A_p متناظر آن‌ها در سطح $\alpha=0/8$ ۵۷
- شکل (۴-۴) موقعیت ایستگاه‌های پایه و ایستگاه‌های اضافه در محدوده مطالعاتی ۵۷
- شکل (۴-۵) توزیع مکانی مقادیر احتمال پذیرش براساس ایستگاه‌های پایه ۵۹
- شکل (۴-۶) اولویت‌بندی ایستگاه‌ها و مقدار A_p متناظر آن‌ها در سطح $\alpha=0/8$ پس از تقویت شبکه ۶۰
- شکل (۴-۷) توزیع مکانی مقادیر احتمال پذیرش براساس شبکه تقویت شده ۶۰
- شکل (۴-۸) وضعیت راه‌های دسترسی، شهرها و روستاهای حوضه مشهد ۶۲

فصل اول:

کلیات تحقیق

۱-۱ مقدمه

منظور از اندازه گیری باران، تعیین مقدار ارتفاع آب حاصله از نزولات جوی در سطح زمین است به عبارت دیگر، چنانچه آب ناشی از نزولات جوی در روی زمین تجمع پیدا کرد، بدون آنکه تبخیر شده و یا در زمین نفوذ نماید، ارتفاعی را بوجود می آورد که به آن مقدار بارندگی گفته می شود. بارندگی ورودی سیکل هیدرولوژی در یک ناحیه بوده، بنابراین از مهمترین متغیرهایی است که باید مورد مطالعه قرار گیرد. اندازه گیری باران قدمتی بیش از ۲۰۰۰ سال دارد. نخستین باران سنجی که در دنیا نصب شده مربوط به سال ۱۴۰۰ میلادی و در کشور کره می باشد. ثبت خودکار بارندگی ها نیز از سال ۱۶۰۰ در انگلستان آغاز گردید.

با توجه به اینکه اندازه گیری تمام آبی که روی یک حوضه می بارد امکان پذیر نیست، لذا به اندازه گیری نمونه ای آن در نقاط مختلف حوضه اکتفا می شود. نقاطی که در آن بارش اندازه گیری می شود، ایستگاه باران سنجی نام دارد و چون نتایج حاصله از این ایستگاه ها برای کل منطقه تعمیم داده می شود باید در انتخاب محل و تعداد ایستگاه ها، ثبت و تحلیل داده ها دقت کافی به عمل آید. موضوعی که در اکثر مطالعات هیدرولوژیکی به آن توجه می شود این است که برای تخمین بارندگی در یک منطقه چه تعداد ایستگاه باید در شبکه باران سنجی گنجانده شود. چنانچه تعداد ایستگاه ها کم باشد، تخمین بارندگی دقیق نخواهد بود و اگر بیش از تعداد مورد نیاز باشد مخارج اضافی در بر خواهد داشت.

دیده بانی بارندگی در نتیجه خطاهای اندازه گیری و خطای استوکستیک بواسطه طبیعت تصادفی بارندگی دارای عدم قطعیت بوده و بهترین راه برای بهبود کیفیت برآوردهای منطقه ای، افزایش تراکم شبکه پایش است، زیرا هیدرولوژیست ها با بارش منطقه ای بیش از بارش نقطه ای سرو کار دارند بنابراین باران سنج ها باید مدل دقیقی از بارش منطقه ای ارائه دهند.

باران سنج ها باید تراکم مناسبی داشته باشند تا بتوان برآوردی قابل قبول از عوامل اقلیمی وهیدرولوژیکی مورد نیاز ارائه داد. هر چه تغییرات مکانی پدیده بیشتر باشد به نقاط نمونه برداری بیشتری برای پایش آن نیاز است. بطوریکه در حوضه های هموار وپهناور ولی یکنواخت تعداد کمی باران سنج کافی است اما برای پایش بینی طغیان های وابسته به رگبارهای کوتاه مدت ولی شدید در مناطق کوهستانی مستلزم وجود شبکه متراکم باران سنج خواهد بود.

عوامل اصلی که باید در طراحی شبکه مدنظر قرارگیرند شامل شرایط جغرافیایی- توپوگرافی - هیدرولوژیکی و اقلیمی-پروژه های آبی در حال توسعه در منطقه - بهره برداری و نگهداری ایستگاه - جمعیت وغیره می باشد.

طراحی شبکه , تعیین محل و تعداد ایستگاه هایی است که تامین کننده معیارهای طراحی باشند.

می دانیم که بارندگی محرک چرخه ی هیدرولوژی در حوضه ها می باشد. کاهش باران موجب خشکسالی ها و افزایش شدت و مقدار موجب سیلاب های مخرب می شود. لذا لزوم یک شبکه مناسب از لحاظ تراکم در سطح حوضه ها برای اندازه گیری بارش بسیار ضروری است. بطوریکه سازمان جهانی هواشناسی (WMO) در مورد تراکم ایستگاه ها در حوضه های متفاوت توصیه هایی کرده است. در مناطق مسطح به ازای هر ۵۰۰ کیلومتر مربع یک ایستگاه و در حوضه های کوهستانی کوچک با بارش- های نامنظم در هر ۲۵ کیلومتر مربع یک ایستگاه توصیه شده است (WMO, 1994).

کشور ما در منطقه کم آب و پرتنش خاورمیانه قرار دارد و مدیریت منابع آب کشور با محدودیت های جدی، جدید و گسترده ای روبروست . کمبود منابع آب و افزایش تقاضا کاملا احساس می شود به طوری که بسیاری از دشت ها بحرانی یا ممنوعه شده است. ضرورت ایجاد امنیت آشامیدنی و اقتصادی برای عامه مردم ومدریت منابع آب انکارناپذیر است. بر پایه چنین نگرش هایی، نظام اقتصاد ملی نیز دگرگون شده است. آب به عنوان کالای اقتصادی اهمیت ویژه ای یافته است .بر این اساس منابع آب باید با دقت و تلاش فراوان مورد پایش و ارزیابی قرار گیرد(اکبرزاده، ۱۳۸۴).

در راستای نظارت بر میزان بارندگی، یک سامانه پایش شامل شبکه ایستگاه های پایش باید بر اساس روشهای علمی طرح ریزی و پیاده سازی شود. با توجه به گسترش جهانی مشکلات مربوط به آب از نظر کمی و کیفی، سامانه پایش باید بطور مستمر ارزیابی و اصلاح شود تا از یک سو، اهداف نظارتی خود را حفظ نموده و از سوی دیگر سبب افزایش هزینه های پایش نشود.

نظر به اینکه اجرای برنامه های پایش طولانی مدت، هزینه بر و مستوجب صرف وقت است، ارائه روش های اصولی ارزیابی در ساختار برنامه پایش و همچنین اصلاح طرح پایش و نیز روش های تجزیه و تحلیل ضروری است.

پایش "فرآیندی نظارتی با طرحی علمی و پویا بر مبنای مشاهده، اندازه گیری، نمونه برداری و ارزیابی نتایج و ثبت آن می باشد (امور نظام فنی و اجرایی، ۱۳۹۱). همچنین فرآیند بهینه سازی شبکه پایش، فرآیند تصمیم گیری برای داشتن بهترین ترکیب در بین ایستگاه های پایش موجود است (چادالوادا و داتا^۱، ۲۰۰۸ ؛ سینگ^۲، ۲۰۱۳). پایش بلند مدت بدون در نظر گرفتن بهینه سازی، سبب افزایش های پایش می شود. از این رو طراحی شبکه پایش باید بر اساس اهداف مشخص و از پیش معین باشد (موقیر و همکاران^۳، ۲۰۰۹ ؛ دهار و پاتیل^۴، ۲۰۱۲).

با توجه به اینکه شبکه های پایش اهمیت زیادی در مدیریت و توسعه پروژه های آبی دارد، تحقق پایش پایدار مستلزم اعتبارسنجی و ارزیابی مستمر در تمامی ساختار پایش است. در واقع بازنگری و ارزشیابی برنامه پایش در تمامی مراحل امکان قضاوت درست را فراهم آورده و روشن خواهد ساخت که وضعیت کنونی ناشی از کارآمدی روش در حال اجرا است یا ضعفی در آن وجود دارد که در نهایت ممکن است مجری و طراح را به اصلاح و بهسازی وضعیت موجود سوق دهد. علاوه بر شناسایی تمام کاستی های

^۱ Chadalavada
^۲ Singh
^۳ Mogheir
^۴ Dhar and Patil

موجود، دستیابی به راهکارهایی جهت بهبود شرایط و ارزیابی پیوسته در آینده از اهمیت بالایی برخوردار است (موقیر و سینگ^۱، ۲۰۰۲؛ میشر و کولیبالی^۲، ۲۰۰۹).

تاکنون تعریف استاندارد و جامعی از ارزیابی ارائه نشده است. مطالعاتی که در این زمینه انجام شده از حیث جامع بودن، روش شناسی ها و تجزیه و تحلیل داده ها متفاوت هستند به عبارت دیگر مبحث ارزیابی بسیار گسترده بوده و از ابعاد مختلف می توان پدیده ای را مورد ارزیابی قرار داد. در پژوهش هایی از این دست، ارزیابی را می توان در ۳ محور اصلی خلاصه نمود.

۱_ ارزیابی داده های جمع آوری شده

۲_ ارزیابی شبکه موجود

۳_ ارزیابی و کارایی شبکه تقویت شده

در ساختار پایش شبکه باران سنجی، یکی از مراحل که از اهمیت زیادی برخوردار است، تجزیه و تحلیل داده ها و تفسیر اطلاعات می باشد زیرا میزان موفقیت فرایند پایش را در رسیدن به اهداف تعیین شده نشان می دهد. همچنین این مرحله اطلاعات لازم برای تصمیم گیری را فراهم می کند. انتخاب بهترین راه برای حل مشکل کیفیت آب یا بررسی میزان بهبود صورت گرفته در کیفیت آب به این بخش بستگی دارد. به رغم این که امروزه رایانه ها در کمک به فرایند تحلیل داده ها و ارائه نتایج نقش موثری دارند اما با این وجود چنین فعالیت هایی همچنان نیازمند نظر کارشناسی و برنامه نویسی می باشد. همچنین نیازمند اطلاع کامل از تاریخچه بررسی های انجام شده در این خصوص و روشهای آماری است.

^۱ Mogheir and Singh

^۲ Mishra and Coulibaly

وجود رایانه و نرم افزارها، باعث شده تا نقشه های پهنه بندی کیفیت آب بدون درنظر گرفتن جزئیات تخصصی، عموماً بر اساس پیش فرض این نرم افزارها تولید شده و به تحلیل و تفسیر داده ها نیز توجه کافی نشود. از این گذشته نحوه تلفیق این مرحله با سایر مراحل انجام گرفته از دیگر مشکلات پیش روی است (امور نظام فنی و اجرایی، ۱۳۹۱).

داده های جمع آوری شده در مطالعات آب انواع و توزیع مختلف دارند. شناسایی نوع توزیع داده ها اهمیت زیادی دارد زیرا پیش فرض بسیاری از روشهای آماری بر اساس قرار گرفتن داده ها در یکی از انواع توزیع ها است (هسل و هیرسج^۱، ۲۰۰۲؛ مک^۲، ۲۰۰۲؛ مک براید^۳، ۲۰۰۵). همچنین ممکن است برخی مقادیر، خارج از محدوده قابل قبول به نظر آید که با الگوی عمومی مجموعه داده های موجود همخوانی نداشته باشد. وجود چنین داده هایی در مجموعه اندازه گیری شده محتمل است. در چنین مواردی تشخیص این که آیا این داده ها جزو داده های دورافتاده (پرت) هستند که باید اصلاح یا کنار گذاشته شوند بسیار حیاتی است. برای جلوگیری از بروز این گونه داده ها یا کاهش تعداد آنها، می بایست بررسی لازم به هنگام اعتبارسنجی داده ها صورت پذیرد و همچنین در ورود داده ها به فرایند تجزیه و تحلیل، دقت لازم را به خرج داد. به عبارت دیگر در صورت ارزیابی داده های جمع آوری شده و کنترل روش های جمع آوری و ثبت آنها میتوان از تولید داده های دورافتاده جلوگیری کرد. (هاینینگ^۴، ۱۹۹۳؛ هسل و هیرسج، ۲۰۰۲).

داده های دورافتاده، بلافاصله حذف نمی شوند بلکه نیاز به بررسی کارشناسی و دقت بیشتر دارند. به عبارت دیگر، تحت شرایطی ممکن است واقعا مقادیری خارج از محدوده های به ظاهر قابل قبول مشاهده شوند. بنا بر این کنترل داده ها توسط کارشناس متخصص منابع آب و آشنا به ویژگی های

^۱ Helsel and Hirsch

^۲ Mac

^۳ Mc Bride

^۴ Haining

منطقه میتواند به غربالگری داده ها و شناسایی این گونه داده ها و تمایز آنها از داده های پرت کمک کند (امور نظام فنی و اجرایی، ۱۳۹۱).

روش های مختلفی برای بازسازی و تکمیل داده ها، پیشنهاد شده است. بر این اساس ضروری است که مقادیر را در محل ایستگاه های پایش از حالت نقطه ای به حالت منطقه ای تعمیم داد که این امر میزان خطای برآورد در نقاط فاقد مشاهده را کاهش می دهد. در گذشته درونیابی با استفاده از روشهای آمار کلاسیک، میانگین حسابی و رگرسیونی انجام می گرفت که این روش ها سریع و آسان اما در نظر نگرفتن موقعیت داده ها و همبستگی مکانی آنها، باعث ایجاد خطا در انجام درونیابی میشود؛ به عنوان مثال در روش میانگین حسابی، موقعیت ایستگاه ها در نظر گرفته نمی شود و بنابراین به نحوه پراکنش نقاط با مقادیر معلوم در اطراف نقطه ی مجهول بهایی داده نمی شود. در این حالت وقتی که تغییرات بارندگی در منطقه زیاد و تراکم شبکه باران سنجی کم باشد، میانگین محاسبه شده قابل اعتماد نخواهد بود. ضمن آنکه توزیع مکانی بارندگی نیز بدست نمی آید. از این رو درونیابی بر اساس آنالیز مکانی داده ها پیشنهاد شده است (ماترون^۱؛ ۱۹۶۳؛ گووآرتز^۲، ۱۹۹۷؛ کریستاکاس^۳، ۲۰۰۰).

آنالیز مکانی به دو صورت روش های قطعی و روشهای زمین آماری می باشد. روشهای قطعی بر اساس تعیین سطح از نقاط نمونه گیری شده و بر پایه شباهت ها (مانند روش وزن دهی عکس فاصله) یا درجه هموارسازی (مانند توابع پایه شعاعی) انجام می شود. این روش ها مدل فرایندهای مکانی تصادفی را مورد استفاده قرار نمی دهند. به عنوان مثال در روش عکس فاصله، اگرچه هر نقطه بطور مستقل در نظر گرفته می شود، ولی توپولوژی و موقعیت نسبی نقاط در محاسبات لحاظ نمی شود و بنابراین وزن نقاطی که به فاصله ی یکسان از نقطه ی مجهول قرار دارند، یکسان در نظر گرفته می شود. اما روش های زمین آماری مانند انواع کریجینگ، خواص آماری نقاط نمونه گیری شده را در نظر گرفته و با

^۱ Matheron
^۲ Goovaerts
^۳ Christakos

استفاده از فرایندهای تصادفی با همبستگی مکانی، آنها را به صورت مدل در می آورند (ماترون، ۱۹۶۳؛ بوکن^۱ و همکاران، ۲۰۰۴؛ عیوضی و مساعدی، ۱۳۹۱).

در ساختار هر برنامه پایشی، بازنگری و اصلاح از ارکان اصلی آن است و از آنجا که اجرای برنامه های پایش، هزینه بر و مستوجب صرف زمان است، بررسی روشی برای اصلاح و بهینه سازی شبکه موجود ضروری است. باید بررسی شود در شرایط بهینه چه تعداد ایستگاه در سطح منطقه مورد مطالعه لازم است تا اطلاعات لازم را در اختیار قرار دهد.

۱-۲ ضرورت و اهمیت تحقیق

نیاز به طراحی یک شبکه پایش که بتواند اطلاعات دقیق و پیوسته ای از بارش های منطقه ای در حوضه آبریز را برای مدیران و مسئولان ذیربط در حوزه مهندسی آب فراهم کند و از طرفی حداقل هزینه های سنگین تجهیز ایستگاه را به همراه داشته باشد یک ضرورت به شمار می رود.

در این پژوهش که در حوضه آبریز مشهد مورد آزمون قرار خواهد گرفت، با شناسایی داده های دورافتاده، تحقق شروط اولیه تحلیل زمین آماری، برازش بهترین مدل واریوگرام بر داده ها و تعیین مشخصات آن، تقویت شبکه موجود با کاربرد الگوریتم احتمال پذیرش و ارزیابی کارایی شبکه، تعداد و موقعیت ایستگاه های جدید که استانداردهای لازم را رعایت کنند، ارائه خواهد شد که براساس آن میتوان گامی موثر در جهت برنامه ریزی و مدیریت جامع منابع آب برداشت.

"پایش" فرآیندی نظارتی با طرحی علمی و پویا بر مبنای مشاهده، اندازه گیری، نمونه برداری و ارزیابی نتایج و ثبت آن است. همچنین فرآیند بهینه سازی، فرآیند تصمیم گیری برای داشتن بهترین ترکیب در بین ایستگاه های موجود است. پایش بلند مدت بدون در نظر گرفتن بهینه سازی، سبب افزایش هزینه های پایش می شود به طور کلی در ساختار هر برنامه پایشی، ارزیابی و اصلاح از ارکان اصلی آن

^۱ Boken

است و از آنجا که اجرای برنامه های پایش در چنین مقیاسی، هزینه بر و مستوجب صرف زمان است، بررسی روشی برای اصلاح و بهینه سازی شبکه موجود ضروری است.

تعیین یک روش مناسب توزیع مکانی اهمیت زیادی دارد. هرگونه کاستی در انتخاب روش مناسب توزیع مکانی عوامل اقلیمی و بی توجهی به دقت روش های درونیابی میتواند موجب بروز خطا در برآوردهای طراحی گردد. داده های نقطه ای داده هایی هستند که در مکان یا مکان های معینی اندازه گیری میشوند. به منظور تهیه نقشه های توزیع مکانی و مطالعه الگوهای مکانی، داده های نقطه ای طی فرآیند درونیابی به سطح تعمیم می یابند. درونیابی مکانی فرآیندی است که در آن با استفاده از مقادیر اندازه گیری شده در نقاط معلوم، مقادیر نقاط مجهول برآورد میشود (ثقفیان، ۱۳۹۰). روش های درونیابی متنوعی وجود دارند که با کمک آنها می توان خطوط هم پتانسیل را در منطقه مورد نظر استخراج کرد، اما به دلیل نابسندگی آمار و داده های موجود و دقت پایین اندازه گیری، تخمین ها در برخی روش ها چندان رضایت بخش نیست. این روش ها در یک تقسیم بندی کلی به روش های زمین آماری و روش های کلاسیک تقسیم می گردند. روش های کلاسیک روش هایی هستند که از آمار کلاسیک برای تخمین استفاده می کنند، در صورتیکه در روش های زمین آماری، تخمین بر اساس ساختار مکانی موجود در محیط صورت می گیرد. از روش های زمین آماری می توان به انواع کریجینگ و کوکریجینگ اشاره کرد. برخی از روش های درونیابی کلاسیک عبارتند از وزن دهی معکوس فاصله، روش نزدیکترین نقطه، روش میانگین متحرک، روش سطح روند و غیره. استخراج توزیع مکانی بسیاری از پارامترها از جمله عوامل اقلیمی که در نقاط اندازه گیری میشوند، در اغلب مطالعات منابع آب مورد نیاز است (ثقفیان، ۱۳۹۰). الگوریتم های متفاوتی برای بهینه سازی موقعیت شبکه پایش بارندگی وجود دارد که برخی از آنها مبتنی بر روش های زمین آماری می باشند. به طور کلی تخمین زمین آماری فرآیندی است که طی آن می توان مقدار مجهول یک کمیت در نقاطی با مختصات معلوم را با استفاده از مقادیر معلوم همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم بدست آورد. در این تحقیق از روش احتمال پذیرش که روشی مبتنی بر کریجینگ می باشد، استفاده شده است که مفهوم آن بر

اساس درصدی از مساحت منطقه با دقت پذیرش (AP) می باشد (شفیعی و همکاران، ۲۰۱۴). از مزیت های این روش می توان به موارد زیر اشاره کرد:

(۱) در نظر گرفتن مقدار یک پارامتر نقطه‌ای (به جای در نظر گرفتن میانگین) در بررسی دقت

تخمین توزیع مکانی

(۲) انعطاف پذیری بالا

(۳) به کمیت درآوردن میزان مشارکت هر ایستگاه در دقت تخمین توزیع مکانی (چنگ^۱ و همکاران، ۲۰۰۸).

(۴) با کاربرد الگوریتم ارائه شده در این روش، شبکه‌ی بهینه بدست آمده برای کل منطقه مورد مطالعه و حتی قسمت‌های کوچکتری از آن هم بهینه خواهد بود.

۱-۳ هدف تحقیق

تصمیم گیری در خصوص ارزیابی و بهینه‌سازی شبکه پایش به کیفیت اطلاعات موجود بستگی دارد. هدف کلی این پژوهش، دست یابی به روشی نوین برای ارزیابی و تقویت شبکه پایش بارندگی در حوضه آبریز مشهد است. همچنین اهداف ویژه پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

- تصحیح داده‌های جمع آوری شده بر اساس شناسایی داده‌های دورافتاده
- بررسی عملکرد شبکه بارانسنجی موجود منطقه در تخمین پارامتر مورد مطالعه
- مشخص کردن ایستگاه‌هایی از شبکه موجود که در تخمین پارامتر موردنظر، تاثیر زیادی ندارند و یا به عبارتی میزان اندازه‌گیری شده در این نقاط با دقت قابل قبولی با استفاده از سایر ایستگاه‌ها، قابل تخمین باشد.

¹ Cheng

- تقویت شبکه موجود با روش احتمال پذیرش
- ارزیابی کارایی شبکه تقویت شده در مقایسه با شبکه موجود

۴-۱ نوآوری تحقیق

ارزیابی و طراحی بهینه شبکه پایش بارندگی در حوضه آبریز مشهد با استفاده از روش زمین‌آماري احتمال پذیرش، تاکنون صورت نگرفته که در این تحقیق به این مورد پرداخته می‌شود.

۵-۱ ساختار تحقیق

پایان نامه حاضر در ۵ فصل به ترتیب ذیل تهیه شده است:

فصل اول: کلیات تحقیق

در این فصل، به ضرورت تحقیق، اهمیت تحقیق و اهدافی که موضوع تحقیق دارد، پرداخته می‌شود. سپس کلیاتی راجع به آمار کلاسیک و زمین‌آمار و همچنین معرفی روش احتمال پذیرش بیان شده است.

فصل دوم: مروری بر منابع

در این بخش خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در ایران و جهان در زمینه بهینه‌سازی شبکه باران سنجی و استفاده از روش زمین‌آمار ارائه شده است.

فصل سوم: مواد و روش‌ها

در این بخش به بررسی منطقه مورد مطالعه پرداخته شده و روش کار توضیح داده شده است.

فصل چهارم: نتایج و بحث

کلیه نتایج حاصل از بررسی شبکه باران سنجی منطقه مورد مطالعه و تقویت آن، در این بخش ارائه شده و نتایج حاصله مورد بحث قرار گرفته است.

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این فصل به نتایج کلی که از انجام تحقیق حاصل شده است به همراه ارائه پیشنهاداتی جهت تحقیقات آتی پرداخته شده است.

فصل دوم:

مروری بر سوابق

تحقیق

۲-۱ مقدمه

در یکی دو دهه اخیر، به موازات پیشرفت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری کامپیوتر و ارائه سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، شاهد توجه و علاقه‌مندی روزافزونی به پردازش و مدل‌سازی داده‌های مکانی هستیم. بسیاری از علوم محیطی از جمله علوم مهندسی آب در برگیرنده متغیرها و خصوصیات هستند که مقادیر آنها بصورت پیوسته‌ای در فضای چند بعدی نمونه‌برداری، توزیع یافته‌اند. علم زمین‌آمار با ارائه مدلی مناسب جهت توصیف این متغیرها، ضمن در نظر گرفتن مولفه‌های تغییرپذیری ساختاری و تصادفی آنان، قادر به تعیین مقدار متوسط این کمیت‌ها در یک محدوده، تخمین مقدار آنان در یک مکان خاص، ترسیم نقشه پراکندگی متغیرها و غیره می‌باشد. در سالیان اخیر زمین‌آمار کاربرد وسیعی در مطالعات هیدرولوژیکی یافته است. توانایی این ابزار در منطقه‌ای کردن فرآیند زمانی-مکانی این روش را به ابزار مفیدی برای مطالعات در زمینه شبکه‌های پایش تبدیل کرده است. در گذشته تحقیقات گوناگونی در مورد طراحی شبکه باران سنجی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و سایر روش‌ها صورت گرفته که در این فصل به بررسی این فعالیت‌ها می‌پردازیم.

۲-۲ پیشینه تحقیق

هرشفیلد^۱ (۱۹۶۵) برای اولین بار، با استفاده از همبستگی داده‌ها در شبکه‌ی داده‌های بارش ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۲ سال و همچنین بارش ۱ ساعته با همین دوره بازگشت، به منظور طراحی استفاده نمود.

کریچینگ به عنوان یکی از روش‌های کاهش واریانس، از روش‌های مطرح برای انتخاب بهینه تعداد و موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی می‌باشد که موجب تخمین دقیق‌تر بارندگی در سطح و با کمترین هزینه می‌شود. این روش شامل جستجوی تعداد مناسب ایستگاه و موقعیت آنها با حداقل کردن

^۱ Hershfield

واریانس تخمین کریجینگ می‌باشد. گزارش و مقالات محققان متعددی در این مورد در دسترس است.

کازیم و کوتگودا^۱ (۱۹۹۱) با استفاده از روش کاهش واریانس خطا در زمین آمار به ارزیابی شبکه‌ی ایستگاه‌های باران‌سنجی پرداخته‌اند. آنها در مطالعه خود ذکر کرده‌اند که کاربرد این روش زمان‌بر است، همچنین ایشان سایر عوامل مؤثر بر طراحی شبکه بهینه از جمله عوامل محیطی و اقتصادی را لحاظ نکردند و اذعان کردند که مدل‌سازی واریوگرام مشکل بوده و مدل واریوگرام برای هر واقعه بارندگی ممکن است متفاوت بدست آید.

ثقفیان و بندر ابادی (۱۳۸۴) قابلیت چند روش میانبایی شامل میانگین متحرک وزنی، (TPSS)^۲ و کریجینگ برای برآورد توزیع مکانی بارندگی ماهانه و سالانه جنوب غرب ایران را مورد بررسی قرار دادند. برای مقایسه و ارزیابی روش‌ها، از تکنیک اعتبارسنجی تقاطعی استفاده گردید. مقایسه روش‌های مختلف برای برآورد بارندگی سالانه نشان می‌دهد که هرچند روش TPSS دارای خطای نسبتاً کمتری است، ولی روش کوکریجینگ تغییرات مکانی بارندگی در منطقه را بهتر نشان می‌دهد و با توپوگرافی منطقه هماهنگی بیشتری دارد. همچنین بررسی نتایج تکنیک اعتبارسنجی تقاطعی و توزیع مکانی واریانس خطا نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های بازسازی شده دقت برآورد را کاهش می‌دهد.

در ایران قهرمان و سپاسخواه (۲۰۰۱) با استفاده از روش کاهش واریانس کریجینگ بر روی داده‌های بارش با مدت تداوم یک ساعت و دوره بازگشت ۱۰ سال در ایستگاه‌های سینوپتیک ایران، مقدار واریانس خطای تخمین کریجینگ و ضریب تغییرات مکانی بارش سالانه^۳ (که حاصل تقسیم انحراف معیار خطای تخمین کریجینگ بر مقدار بارش تخمین زده شده در آن نقطه می‌باشد) در هر نقطه را

^۱ Kassim and Kottegoda

^۲ Thin Plate Smoothing Splines

^۳ CV

بدست آوردند. سپس با بررسی ضریب تغییرات نسبی (حاصل تقسیم ضریب تغییرات بر بیشترین ضریب تغییرات موجود در محدوده‌ی مورد مطالعه) موقعیت‌های جدیدی جهت احداث ایستگاه به منظور کم کردن خطای تخمین پیشنهاد کردند. در عمل می‌توان گفت که، نصب باران‌سنج جدید در شبکه نیازمند هزینه‌هایی می‌باشد که ترازنی بین دقت مورد نیاز و تعداد ایستگاه‌های پیشنهادی برقرار کند.

در این مورد پاردو^۱ (۱۹۹۸) از یک روش برای بهینه‌یابی طراحی شبکه باران‌سنج‌ها جهت افزایش دقت تخمین بارندگی ناحیه‌ای استفاده کرد که مسئله شامل حداقل کردن تابع هدفی است که هم دربرگیرنده‌ی دقت تخمین بارندگی ناحیه‌ای (یعنی از طریق تخمین واریانس کریجینگ) و هم هزینه‌ی اقتصادی جمع‌آوری داده‌ها باشد. به طوری که روش شناخته شده‌ی کاهش واریانس زمین آماری در ترکیب با Simulated annealing به عنوان الگوریتم حداقل سازی اقتصادی را بکار برده‌اند، و تابع هدف آنها برابر مجموع تابع هدف افزایش دقت و تابع هدف اقتصادی می‌باشد. مبنای تصمیم‌گیری ایشان بر اساس دقت مناسب برآورد بارندگی ناحیه‌ای با حداقل هزینه اقتصادی است.

پاپا میشل و همکاران^۲ (۱۹۹۶) با استفاده از روش کریجینگ به بهینه سازی شبکه ایستگاه های باران سنجی برای بارندگی ماهانه در شمال آلمان پرداختند. آنها نشان دادند که استفاده از ۱۰ ایستگاه در مقایسه با ۲۰ ایستگاه موجود نتایج مشابهی را از لحاظ دقت برآورد دارد. انتخاب این ۱۰ ایستگاه با استفاده از توزیع واریانس خطا صورت گرفت.

بندر آبادی و ثقفیان (۱۳۸۹) شبکه ایستگاه های باران سنجی جنوب غرب کشور را با توجه به واریانس برآورد کریجینگ و توپوگرافی منطقه و با هدف حفظ یا کاهش تعداد ایستگاه های موجود منطقه، مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که تعداد و آرایش ایستگاه های موجود برای برآورد

^۱ Pardo
^۲ Papamichail

توزیع مکانی بارندگی در ماه های خشک سال کفایت می کند. اما در مورد سایر ماه ها و بارندگی سالیانه، نیاز به جابجایی برخی ایستگاه ها می باشد. نتایج نشان می دهد که جابجایی ۱۷ ایستگاه منطقه میزان میانگین واریانس خطا را حدود ۱۰ درصد کاهش می دهد. همچنین وضعیت برونابی داده ها بیانگر خطای قابل توجهی در برآورد بارندگی در ارتفاعات می باشد.

چن^۱ و همکاران (۲۰۰۸) روشی متشکل از کریجینگ و آنترپی برای تعیین تعداد و توزیع مکانی بهینه ایستگاه های باران سنجی در شمال تایوان ارائه دادند. آنها از کریجینگ برای درون یابی مقادیر مشاهده شده ماهانه بارندگی به منظور بررسی تغییرات مکانی بارندگی و تعیین مقدار بارندگی در موقعیت های جدید باران سنج ها (گره های یک شبکه منظم) واز آنترپی، برای یافتن تعداد کافی باران سنج ها بطوریکه معرف پدیده بارندگی ماهانه باشند استفاده کرده و با محاسبه آنترپی انتقال اطلاعات و آنترپی مشترک درجه اهمیت ایستگاه ها را تعیین کردند.

تابیوس و سالاس^۲ (۱۹۸۵) برای برآورد توزیع بارش در یک منطقه آمریکا، روش های تیسن، عکس فاصله، مجذور عکس فاصله، عکس وزنی فاصله، چند جمله ای درجه دو و کریجینگ را مقایسه کردند. تکنیک اعتبارسنجی متقاطع نشان داد که روش کریجینگ مناسب ترین روش برای برازش مکانی بارندگی سالانه بوده است.

برآورد بارندگی سالانه با استفاده از روش های کریجینگ فاقد روند^۳، کوکریجینگ و کریجینگ، توسط فیلیپس^۴ و همکاران (۱۹۹۲) در حوضه ی ویلمت در غرب ایالت اورگان انجام شد. براساس نتایج این مطالعه، روش های کریجینگ رونددار و کوکریجینگ درمقایسه با روش کریجینگ مناسب تر تشخیص

^۱ Chen

^۲ Tabios and Salas

^۳ Deterended Kriging

^۴ Phillips

داده شدند. همچنین این محققین با ترسیم نقشه ی بارندگی و تطابق آن با سیمای توپوگرافی منطقه به این نتیجه رسیدند که روش کوکریجینگ، بیش از دو روش دیگر با منطقه تطابق دارد.

لیبل^۱ و همکاران (۱۹۸۷) در یک مطالعه ی موردی در سونس فرانسه برای تعیین دقت برآورد مکانی بارش های ۲، ۴، ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته، روش های برازش صفحه های اسپلین، چندضلعی تیسن و کریجینگ را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که روش کریجینگ نسبت به روش های دیگر از دقت بیشتری برخوردار می باشد.

مقایسه بین چند روش کریجینگ، نزدیک ترین همسایگی، عکس مجذور فاصله و روش گرادیان همراه با عکس مجذور فاصله (GIDS)^۲ توسط نالدرو و وین^۳ (۱۹۹۸) به منظور بررسی توزیع مکانی بارندگی و دمای ماهانه در جنگل های شمال کانادا گزارش شد. نتایج به دست آمده نشان داد که روش GIDS برای دمای ماهانه و بارندگی ماهانه از سایر روش ها مناسب تر است. همچنین ایشان با مقایسه ی روش های GIDS و کریجینگ، روش GIDS را از نظر کاربرد و عدم نیاز به رسم مدل های نیم تغییرنا ساده تر تشخیص دادند.

آبتیو^۴ و همکاران (۱۹۹۳) در آنالیز مکانی بارندگی ماهانه در جنوب فلوریدا، روش های تیسن، عکس فاصله، چند جمله ای درجه دو، کریجینگ عمومی، کریجینگ معمولی و بهینه را مورد آزمون قرار دادند و روش های چندجمله ای، کریجینگ معمولی و بهینه را جزو مناسب ترین روش های برآورد بارندگی ماهانه در آن منطقه معرفی کردند.

^۱ Lable

^۲ Gradient Plus Inverse Distance Squared

^۳ Nalder and Wein

^۴ Abtew

گارن^۱ و همکاران (۱۹۹۴) روش کریجینگ رونددار را برای برآورد متوسط منطقه ای بارندگی روزانه در حوضه ی رینولدز کریک استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که روش کریجینگ به دلیل وزن دهی متفاوت، در مقایسه با روش های با وزن یکسان، دقت برآورد را بالا می برد. آنها نشان دادند که با تقسیم منطقه، خطا افزایش نمی یابد.

گوارتز^۲ (۲۰۰۰) سه الگوریتم زمین آماری را برای پیش بینی مکانی بارندگی بررسی کرد. روش های کریجینگ ساده، کریجینگ با روند خارجی و کوکریجینگ، برای بارندگی و دمای سالانه ۳۶ ایستگاه کلیماتولوژی در یک ناحیه با وسعت ۵۰۰۰ کیلومتر مربع در پرتغال بررسی شد. برای مقایسه سه روش کریجینگ با روش های رگرسیون خطی با ارتفاع، تیسن، عکس فاصله، عکس مجذور فاصله و کریجینگ معمولی از تکنیک اعتبارسنجی متقاطع استفاده شد. دو روش عکس مجذور فاصله و تیسن بیشترین خطا را در برآورد بارندگی داشتند. در مجموع روش های چند متغیره زمین آماری و در رأس آنها روش کریجینگ ساده با تغییر دادن میانگین محلی و کریجینگ با روند خارجی بهترین روش ها بودند. نتایج نشان داد که روش کریجینگ معمولی هنگامی که ضریب همبستگی بارندگی و ارتفاع نسبتاً بالا باشد، از روش همبستگی خطی نتایج بهتری ارائه می دهد.

حویسی^۳ و همکاران (۱۹۹۲) بارندگی متوسط سالانه را در منطقه ای شامل کوه های یوکا واقع در جنوب نوادا و جنوب شرقی کالیفرنیا برآورد کردند. آنها روش های عکس فاصله، عکس مجذور فاصله، عکس مکعب فاصله، کریجینگ، همبستگی خطی، همبستگی خطی لگاریتمی، متوسط همسایگی و کوکریجینگ را بررسی نمودند. به علت این که در منطقه مطالعاتی همبستگی بارندگی و ارتفاع قوی بود، روش هایی مانند کوکریجینگ که از ارتفاع به عنوان متغیر کمکی استفاده می کنند، برتری نشان دادند.

^۱ Garen

^۲ Goovaerts

^۳ Hevesi

بال^۱ و همکاران (۱۹۹۸) برای تخمین توزیع مکانی شدت بارندگی روزانه در حومه ی غربی شهر سیدنی، روش های تیسن، عکس فاصله، توابع اسپلاین و چند جمله ای را در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی بررسی کردند. روش اسپلاین دقیق ترین روش و روش چندضلعی تیسن نامناسب ترین روش معرفی شد.

سینتیکیدیس^۲ و همکاران (۲۰۰۲) برای طراحی شبکه ایستگاه های باران سنجی در حوضه آبخیز فولسوم نیز از توزیع واریانس برآورد، روش کریجینگ برای بارندگی ساعتی استفاده نمودند. آنها نشان دادند که با اضافه کردن ۷ ایستگاه دیگر، خطای برآورد تا ۷۰ درصد کاهش می یابد. لازم به ذکر است که آنها از بارش هایی استفاده کردند که ۷۵ درصد ایستگاه های حوضه را پوشش می داد. سایر روش ها برای ارزیابی شبکه ی باران سنج ها با استفاده از آنتروپی نیز پیشنهاد شده است.

میشرا و کولیبالی^۳ (۲۰۱۰) از تئوری آنتروپی در حوضه های اصلی استان های مختلف کانادا برای شناسایی ایستگاه های ضروری و مناطق بحرانی (تراکم شبکه بسیار ضعیف) استفاده کردند. نتایج آنها در خصوص تجزیه و تحلیل آنتروپی نشان داد که:

۱- تقریباً همه ی حوضه های اصلی کانادا کمبود زیادی از ایستگاه های هیدرومتری دارند.

۲- در برخی از حوضه ها با تراکم شبکه بالا هنوز هم مناطق بحرانی وجود دارد.

بررسی هایی که در حوضه های کانادا صورت گرفت، نشان داد که روش آنتروپی می تواند به عنوان یک ابزار مفید برای شناسایی اهمیت نسبی ایستگاه های هیدرومتری، و همچنین مناطق بحرانی در حوضه که در آن ایستگاه های اضافی میتواند بصورت سودمند اضافه شود، بکار رود.

^۱ Ball

^۲ Tsintikidis

^۳ Mishra and Coulibaly

سو و یان یو^۱ (۲۰۱۴) از مدل آنتروپی در طراحی شبکه باران سنجی حوضه آبریز مخزن شیمن در تایوان استفاده کردند. ایشان گزارش کردند که مکان بهینه نزدیک به مناطقی است که اطلاعات کمی دارند و با بررسی شبکه جمع آوری موجود مشخص شد که تعداد ایستگاه ها کافی است.

الزهرانی و حسین^۲ (۱۹۹۸) از روشی بر پایه معیار اطلاعات شانون (آنتروپی) برای طراحی یک شبکه هیدرولوژیکی در عربستان سعودی استفاده کرده و آن را یکبار برای کاهش ایستگاه های باران سنجی موجود و بار دیگر جهت افزایش ایستگاه ها و ارتقاء شبکه استفاده کردند. آنها از داده های بارندگی روزانه استفاده کرده و توزیع بارندگی روزانه در منطقه مورد مطالعه را توزیع گاما تشخیص دادند. این مطالعه نشان داد که ۷۰ ایستگاه موجود را می توان به ۴۵ ایستگاه کاهش داد.

ساموئل و همکاران^۳ (۲۰۱۳) با استفاده از الگوریتم CRDEMO (ترکیب منطقه ای و بهینه سازی چند منظوره آنتروپی دوگانه) حوضه های مربوط به دو رودخانه ی سنت جان و سنت لارنس در کانادا را مورد بررسی قرار دادند. حوضه رودخانه ی سنت جان دارای چگالی شبکه ی بالاتر نسبت به حوضه ی رودخانه ی سنت لارنس می باشد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می دهد که حوضه رودخانه ی سنت لارنس نیاز به تعداد زیادی ایستگاه جدید برای پاسخگویی به حداقل تراکم شبکه بنا به توصیه WMO دارد. همچنین مشخص شد که ایستگاه های موجود تاثیر قابل توجهی در تعیین محل ایستگاه های جدید در حوضه رودخانه ی سنت لارنس ندارند. در مقابل ایستگاه های موجود در حوضه رودخانه ی سنت جان که تعداد بیشتری هم دارند تاثیر قابل توجهی در تعیین محل ایستگاه های جدید دارند. الگوریتم فوق نشان داد که یک روش قابل اعتماد و خوب برای ارزیابی و طراحی بهینه شبکه های هیدرومتری می باشد.

^۱ Su and Yun Yu

^۲ Al Zahrani and Husain

^۳ Samuel

بالتاس و میمیکو^۱ (۲۰۰۹) با استفاده از روش های GIS ارزیابی و طراحی بهینه شبکه هواشناسی در یونان را مورد بررسی قرار دادند. آنها توزیع فضایی مناسب و معیار های مربوط به انتخاب مکان مناسب مانند: شیب کم زمین، دسترسی آسان و نزدیکی به نقاط مورد نظر را به عنوان معیار طراحی در نظر گرفتند. در نهایت تنها ۲۰ درصد از ایستگاه های موجود در مکان خود باقی مانده و در بهینه سازی شبکه گنجانده شده است و بقیه ایستگاه ها باید با توجه به محل پیشنهاد شده در طراحی شبکه مطلوب توزیع شوند.

سان و همکاران^۲ (۲۰۰۶) برای تخمین بارش، سال های مختلفی را به عنوان دوره آماری در نظر گرفتند. مطالعات ایشان نشان داد که در بازسازی داده های بارندگی، حداقل طول دوره ی مشترک آماری نباید کمتر از ۱۰ سال باشد و ایستگاه هایی که کمتر از این تعداد آمار دارند از تحلیل کنار گذاشته شوند.

بازالیروا و همکاران^۳ (۱۹۹۳) به بررسی شبکه باران سنجی اوگاندا به روش تجزیه و تحلیل مولفه اصلی پرداختند. منطقه را به مناطقی با بارش همگن تقسیم کردند و از هر منطقه ایستگاهی که بالاترین ضریب را داشت انتخاب کردند. با بررسی ایستگاه هایی که به نمایندگی از سایر ایستگاه ها انتخاب شدند، مشخص گردید که بهترین داده های اقلیمی را برای بارش های منطقه فراهم می کنند. مطالعات نشان داد که شبکه بهینه برای اوگاندا حداقل شامل ۱۴ ایستگاه می باشد.

آوادله^۴ (۲۰۱۲) از کریجینگ برای بازسازی داده های بارندگی در نقاط فاقد داده با توجه به داده های بارشی اندازه گیری شده و از آنروپی برای تعیین مکان بهینه ایستگاه ها در حوضه کوهستانی وادی ابراهیم مکه استفاده کرد. ۴ مکان برای نصب ایستگاه های جدید در نظر گرفته شد که مکان های

^۱ Baltas and Mimikou

^۲ Sun

^۳ Basalirwa

^۴ Awadallah

انتخاب شده با استفاده از روش های زمین آماری تأیید شده است. به توصیه ایشان برای درک این مطلب که شبکه جدید اطلاعات دقیقی از توزیع فضایی بارش در منطقه ارائه می دهد یا خیر، باید تحقیقات بیشتر در مقیاس بزرگتر انجام شود.

چنگ و همکاران^۱ (۲۰۰۸) از الگوریتم AP و روش زمین آماری کریجینگ و با فرض اینکه توزیع داده ها نرمال است، برای ارزیابی و تقویت شبکه موجود در شمال تایوان استفاده کردند. ایشان با تجزیه و تحلیل واریوگرام و استفاده از کریجینگ معمولی برای درونیابی و محاسبه واریانس خطای تخمین، درصدی از مساحت منطقه را که دقت برآورد آن در حد قابل قبول بود تعیین کردند. الگوریتم ترتیبی پیشنهاد شده برای اولویت بندی بارانسنج های موجود، شناسایی شبکه پایه و نقل مکان ایستگاه های غیر پایه می تواند بکار گرفته شود بطوریکه ایستگاه هایی که حذف آنها تاثیری در کارایی شبکه ندارد، حذف یا جابه جا می شوند. الگوریتم AP نشان داد که دوسوم ایستگاه های موجود (شبکه پایه) می توانند کارایی شبکه فعلی را از لحاظ دقت برآورد بارش داشته باشند و با اضافه کردن ایستگاه های جدید، کارایی شبکه از ۵۶ درصد به ۸۸ درصد افزایش می یابد. ایشان حداقل احتمال پذیرش (α) را برابر ۰/۸ در نظر گرفتند و مناطقی را که احتمال پذیرش آنان در این حدود بود را به عنوان مناطقی که از دقت پذیرش برخوردارند تعریف کردند. از مزیت های این روش نسبت به سایر روش ها، تمرکز آن بر روی دقت بارش نقطه ای می باشد.

شفیعی و همکاران (۲۰۱۴) شبکه بهینه را شبکه ای معرفی کردند که در آن پراکندگی ایستگاه ها بگونه ای باشد که بتوان ایستگاه های فاقد مشاهده را با دقت مناسب برآورد کرد. آنها با استفاده از الگوریتم AP و روش زمین آماری کریجینگ به تحلیل شبکه بارانسنجی گرگانرود پرداختند. از ۳۳ ایستگاه مورد تحلیل، ۲۱ ایستگاه به عنوان ایستگاه های شبکه ای مبنا بدست آمدند و ۱۲ ایستگاه باقی مانده تاثیر بسیار کمی در برآورد بارندگی حوضه داشتند. در روند بهینه سازی، ایستگاه های

^۱ Cheng

غیرمبنا به ۷ ایستگاه جدید در سایر نقاط حوضه کاهش یافتند که موجب افزایش دقت در تخمین بارندگی در کل حوضه می‌شوند.

روش احتمال پذیرش جهت ارزیابی و تقویت شبکه باران‌سنجی توسط چنگ و همکاران (۲۰۰۸) و شفیع‌ی و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شد. این روش که در تحقیق حاضر برای ارزیابی و طراحی بهینه شبکه پایش بارندگی حوضه مشهد استفاده شده است، مبتنی بر کریجینگ می‌باشد، که مفهوم آن بر اساس درصدی از مساحت منطقه با دقت پذیرش^۱ (Ap) است.

از مزیت‌های این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

(۱) در نظر گرفتن مقدار یک پارامتر نقطه‌ای (به جای در نظر گرفتن میانگین) در بررسی دقت تخمین توزیع مکانی

(۲) انعطاف‌پذیری بالا

(۳) به کمیت درآوردن میزان مشارکت هر ایستگاه در دقت تخمین توزیع مکانی (چنگ^۲ و همکاران، ۲۰۰۸).

(۴) با کاربرد الگوریتم ارائه شده در این روش، شبکه‌ی بهینه بدست آمده برای کل منطقه مورد مطالعه و حتی قسمت‌های کوچکتری از آن هم بهینه خواهد بود.

در این مطالعه ضمن کاربرد روش ارائه شده توسط چنگ و همکاران (۲۰۰۸)، در ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی، ساده‌سازی‌هایی نیز در این روش صورت گرفته و تمامی محاسبات در محیط نرم‌افزار GIS با توسعه‌ی یک ابزار (Toolbox) در آن انجام شده است که به آسانی در سایر مطالعات مشابه قابل استفاده است.

^۱ - Acceptable Accuracy

^۲ Cheng

فصل سوم:

مواد و روش ها

۳-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا به بیان کلیاتی در مورد زمین آمار، معرفی منطقه مورد مطالعه و سپس به ورود داده ها و جداسازی آنها پرداخته می شود. برازش واریوگرام بر داده های منتخب و تحلیل آن در محیط نرم افزار ArcGIS10.3 انجام می شود. پس از آن، احتمال پذیرش و میزان کارایی شبکه فعلی حوضه آبریز مشهد در سطح $\alpha=0/8$ با استفاده از ابزاری در محیط ModelBuilder در نرم افزار ArcGIS تعیین می گردد.

۳-۲ گزاره های تحقیق

۳-۲-۱ کلیاتی در مورد زمین آمار

زمین آمار (ژئواستاتستیک) شعبه ای از علم آمار است که در آن مختصات داده های مربوط به جامعه ی تحت بررسی و ساختار فضایی داده های مربوطه، مورد مطالعه قرار می گیرد. زمین آمار در واقع گرایشی از آمار با زمینه های کاربردی در علوم فیزیکی و علوم مربوط به زمین می باشد. این علم شامل مجموعه مطالعاتی است که به بررسی تغییرات یک پدیده در زمان و مکان می پردازد و قادر به مدل سازی آن پدیده به صورت قطعی یا غیرقطعی زمانی و مکانی می باشد (حسنی پاک، ۱۳۹۲).

در بررسی های آمار کلاسیک، نمونه های به دست آمده از جامعه، عمدتاً به صورت تصادفی در نظر گرفته می شوند و مقدار اندازه گیری شده یک کمیت معین در یک نمونه خاص، هیچگونه اطلاعاتی درباره مقدار همان کمیت در نمونه دیگر و به فاصله معلوم نخواهد داشت. در صورتی که در زمین آمار می توان بین مقادیر یک کمیت در جامعه نمونه ها و فاصله و جهت قرار گرفتن نمونه ها نسبت به هم ارتباط برقرار کرد. در آمار کلاسیک همچنین، فرض می شود که تغییرپذیری یک متغیر تصادفی است. در صورتی که در زمین آمار، بخشی از آن تصادفی و بخش دیگر آن دارای ساختار و تابع فاصله و جهت می باشد. بنابراین در زمین آمار ابتدا به بررسی وجود یا عدم وجود ساختار مکانی بین داده ها

پرداخته می‌شود و سپس در صورت وجود ساختار مکانی تحلیل داده‌ها انجام می‌گیرد. البته ممکن است نمونه‌های مجاور تا فاصله معینی در قالب ساختار مکانی به هم وابسته باشند، در این حالت بدیهی است که میزان تشابه بین مقادیر مربوط به نمونه‌های نزدیکتر احتمالاً بیشتر است؛ زیرا در صورت وجود ساختار مکانی، تغییرات ایجاد شده در یک فضای معین شانس بیشتری برای تأثیرگذاری روی فضاهای نزدیک به خود را نسبت به فضاهای دورتر از خود دارند.

زمین آمار شاخه‌ای از علم آمار می‌باشد که مبتنی بر تئوری متغیرهای ناحیه‌ای است. هر متغیری که در فضای سه بعدی توزیع شده باشد و دارای وابستگی مکانی باشد، متغیر ناحیه‌ای نامیده شده و می‌تواند در مطالعات زمین آماری مورد بحث و بررسی قرار گیرد. به عنوان مثال مقادیر ضریب آبگذاری در یک شبکه 300×300 متری، متغیر ناحیه‌ای است. مقدار متغیر ناحیه‌ای $Z(x)$ در هر نقطه را می‌توان به دو مؤلفه قطعی و تصادفی تجزیه کرد، بنابراین می‌توان نوشت:

$$Z(x) = m(x) + L(x) \quad (3-1)$$

که در آن $Z(x)$ متغیر ناحیه‌ای در نقطه‌ای به مختصات (x) ، $m(x)$ مؤلفه قطعی متغیر ناحیه‌ای و $L(x)$ مؤلفه تصادفی متغیر ناحیه‌ای می‌باشد. در صورتی که متغیر ناحیه‌ای دارای ساختار مکانی مناسبی باشد، تحلیل‌های بسیاری را بر روی آن می‌توان بعمل آورد که از جمله آنها می‌توان به برآورد متغیر مورد نظر در نقاط فاقد آمار، طراحی نمونه‌برداری و توزیع واریانس خطا اشاره نمود. تخمین زمین آماری شامل دو مرحله می‌باشد: در مرحله اول شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی متغیر است که به وسیله آنالیز نیم‌تغییرنما قابل بررسی می‌باشد. مرحله دوم تخمین متغیر مورد نظر بوده که به مرحله اول وابسته است. لازم به ذکر است شرط استفاده از روش‌های زمین آماری، ایستا بودن متغیر می‌باشد که از طریق نیم‌تغییرنما قابل تشخیص است. به عنوان مثال اگر نیم‌تغییرنما به آستانه معینی نرسید و دارای روند افزایشی بود، می‌تواند بیانگر وجود روند در داده‌ها یا نایستایی باشد. ضمناً توزیع داده‌ها نیز باید به توزیع نرمال نزدیک باشد (حسنی پاک، ۱۳۹۲).

۳-۲-۲ نیم‌تغییرنما^۱ (واریوگرام)

اساس تعدادی از تخمین‌گرهای زمین‌آمار از جمله کریجینگ، بر تعریف نیم‌تغییرنما استوار است. واریانس متغیر بین نقاطی به فاصله h از یکدیگر، می‌تواند همبستگی متقابل مقدار متغیر تصادفی را بین این نقاط نشان دهد. اگر واریانس بین نقاطی به فاصله h کوچک باشد، نشانه همبستگی بیشتر بین آن نقاط است. این واریانس وابسته به فاصله را نیم‌تغییرنما می‌نامند و با $\gamma(h)$ نشان می‌دهند. در صورت وجود ساختار مکانی، طبیعی است که همبستگی در نقاط نزدیک به هم بیشتر از نقاط دور از هم است (حسنی پاک، ۱۳۹۲). هدف اصلی از برقراری تابع نیم‌تغییرنما آن است که بتوان ساختار تغییرپذیری متغیر را نسبت به فاصله مکانی شناسایی نمود. تابع نیم‌تغییرنما تغییرات یک پارامتر را با در نظر گرفتن فاصله به صورت رابطه‌ی زیر نشان می‌دهد:

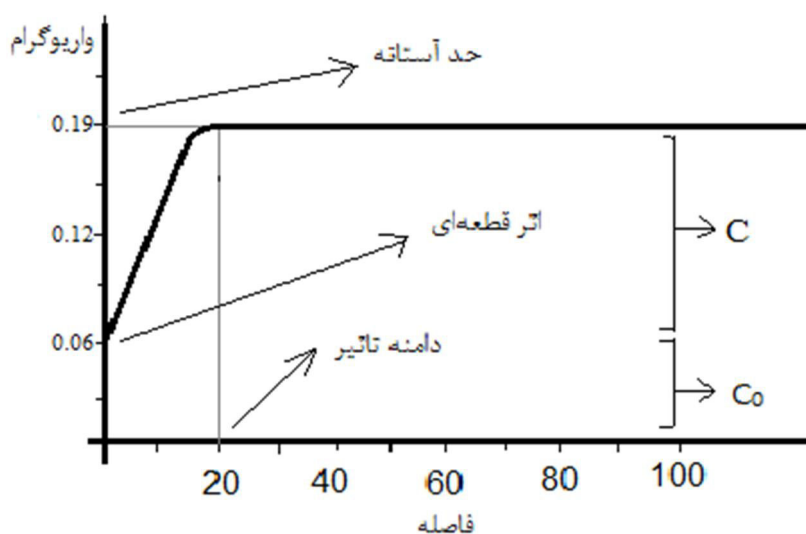
$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x) - z(x+h)]^2 \quad (3-2)$$

که در رابطه بالا، $Z(x)$ و $Z(x+h)$ مقدار متغیر در نقاط x و $x+h$ و $N(h)$ تعداد جفت نمونه‌های بکار رفته به ازای هر فاصله h می‌باشد.

۳-۲-۲-۱ قسمت‌های مختلف یک تابع نیم‌تغییرنما

قسمت‌های مختلف یک تابع نیم‌تغییرنما در شکل (۳-۱) نشان داده شده است:

^۱ Semivariogram



شکل (۱-۳) قسمت‌های مختلف یک تابع نیم‌تغییرنما

یک نیم‌تغییرنمای ایده‌آل دارای سه پارامتر شامل اثر قطعه‌ای (C_0)، حد آستانه (C_0+C) و دامنه تاثیر (A) می‌باشد. اثر قطعه‌ای بیان‌کننده مولفه غیر ساختاری (تصادفی) واریانس می‌باشد. حد آستانه تقریبی از واریانس کل را ارائه می‌کند و مقدار دامنه بیان‌گر فاصله‌ای است که در این فاصله می‌توان از تخمین‌گرهای زمین‌آماري استفاده کرد (مدنی، ۱۳۷۳). همانطور که در شکل پیداست با افزایش فاصله h ، مقدار تغییرنما نیز اضافه می‌شود و این وضعیت تا فاصله معینی ادامه دارد و در این فاصله مشخص، به حدی می‌رسد که از آن پس مقدار تغییرنما عملاً ثابت می‌شود. این امر نشان‌گر آن است که نمونه‌ها تا فاصله معینی به هم شبیه‌اند و به هم وابستگی دارند و در خارج از این فاصله، دیگر به هم وابسته نیستند (مدنی، ۱۳۷۳).

۳-۲-۱-۱ اثر قطعه‌ای^۱

از نظر تئوری، مقدار نیم‌تغییرنما به ازاء $h=0$ باید به حداقل مقدار خود یعنی صفر تنزل یابد. لیکن در عمل کمتر چنین شرایطی اتفاق می‌افتد. به مقدار تغییرنما به ازاء $h=0$ اثر قطعه‌ای گفته می‌شود. وجود

اثر قطعه‌ای را می‌توان به دلایل زیر نسبت داد:

۱- خطای وابسته به اندازه‌گیری، نمونه برداری و تحلیل داده‌ها

۲- تغییرات شدید مقدار متغیر در فواصل بسیار کوتاه که به ناهمگنی محیط نسبت به توزیع مکانی اجزاء متغیر ارتباط دارد.

۳-۲-۱-۲ آستانه^۲

همچنان که فاصله h افزایش می‌یابد، مقدار نیم‌تغییرنما از فواصل کم شروع شده و پس از تغییراتی ممکن است به حد ثابتی برسد. این مقدار نسبتاً ثابت که تغییرات آن تصادفی می‌باشد، آستانه نامیده می‌شود. در مواردی تغییرنماهایی به دست می‌آید که در محدوده فواصل موردنظر تمایلی به نزدیک شدن به حد ثابتی ندارند. این تغییرنماها می‌توانند نشان دهنده وجود روند در داده‌ها و یا عدم ایستایی داده‌ها باشند. در روش کریجینگ تغییرنماهایی که به سقف مشخص می‌رسند، اهمیت بیشتری دارند.

۳-۲-۱-۳ دامنه تاثیر (شعاع تاثیر)^۳

برای یک متغیر ناحیه‌ای با ساختار فضایی، توزیع به گونه‌ای است که تشابه مقدار متغیر ناحیه‌ای برای نقاط نزدیک به هم نسبت به نقاط دور از هم بیشتر است. لذا با افزایش فاصله‌ی زمانی یا مکانی

^۱ Nugget Effect

^۲ Sill

^۳ Range of Influence

بین نمونه‌ها به حدی می‌رسیم که از آن به بعد مقدار متغیر ناحیه‌ای در نقاط اطراف یکدیگر برهم تاثیر چندانی ندارند و با افزایش فاصله مقدار واریوگرام تغییر معنی داری نمی‌کند. به این فاصله، دامنه یا شعاع تاثیر می‌گویند. بدیهی است که دامنه تاثیر بزرگتر دلالت بر ساختار فضایی گسترده‌تر دارد. این گسترش موجب افزایش محدوده مجازی می‌گردد که می‌توان از داده‌های موجود در آن برای تخمین مقدار متغیر ناحیه‌ای در نقطه با بلوک مجهول استفاده کرد. دامنه‌ی تاثیر واریوگرام در طراحی فاصله‌ی شبکه بهینه‌ی باران سنجی و همچنین در تحلیل ناهمسانگردی‌های ساختاری، کاربرد زیادی دارد (حسنی پاک، ۱۳۹۲).

۳-۲-۳ ناهمسان‌گردی^۱

ناهمسان‌گردی به تغییرات دامنه و یا سقف واریوگرام در جهات مختلف اطلاق می‌شود. به همین دلیل واریوگرام ابزار سودمندی برای تشخیص ناهماهنگی‌هایی است که موجب بروز ناهمسان‌گردی می‌شود. برای این منظور کافی است ابتدا واریوگرام در جهات مختلفی رسم شود و سپس واریوگرام‌های جهات مختلف با هم مقایسه شوند. در یک فضای همسانگرد تغییرات متغیر در تمام جهات یکسان است بنابراین شعاع تاثیر در تمام جهات برابر است.

۳-۲-۴ بررسی تغییرات مکانی داده‌ها و تحلیل واریوگرام

ماهیت تصادفی بسیاری از پدیده‌های طبیعی را می‌توان با متغیر تصادفی $Z(x)$ نشان داد که x نشان دهنده موقعیت مکانی است و Z پدیده تصادفی مورد مطالعه می‌باشد. همان‌طور که ذکر شد، ساختار تغییرات مکانی متغیر تصادفی $Z(x)$ با میانگین ایستا را می‌توان توسط واریوگرام آن بدین صورت تعریف کرد:

$$\gamma(|x_i - x_j|) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x_i) - Z(x_j)] = \frac{1}{2} E[Z(x_i) - Z(x_j)]^2 \quad (3-3)$$

^۱ Anisotropic

که $E(Z)$ و $Var(Z)$ به ترتیب بیانگر مقدار مورد انتظار و واریانس متغیر تصادفی Z هستند. رابطه (۳-۳) نشان می‌دهد که واریوگرام مستقل از موقعیت‌های مکانی است، به عبارت دیگر فقط به فاصله بین جفت نقاط بستگی دارد. در شرایط ایستایی مرتبه دوم زمانی که فاصله h افزایش می‌یابد، واریوگرام به یک مقدار مجانب (ثابت) می‌رسد که به آن سقف می‌گویند و از لحاظ مقدار برابر واریانس $Z(x)$ می‌باشد.

وقایع بارندگی در فصول مختلف ممکن است ساختارهای مکانی متفاوتی داشته باشند، بنابراین نمی‌توان یک واریوگرام برای تمامی وقایع بارندگی صرف نظر از شدت‌های آنها، فصل و شرایط اقلیمی در نظر گرفت. در این مورد از مدل واریوگرام اقلیمی (باستین^۱ و همکاران، ۱۹۸۴) می‌توان استفاده کرد:

$$\gamma(m, h) = \alpha(m)\gamma^*(h) \quad (3-4)$$

که m یک شاخص برای واقعه‌ی بارندگی، h فاصله‌ی اقلیدوسی و $\alpha(m)$ فاکتور مقیاس است. با این ساختار تمام زمان‌های غیرایستا در فاکتور مقیاس $\alpha(m)$ دیده می‌شوند و مؤلفه‌ی مقیاس شده $\gamma^*(h)$ زمان یا واقعه‌ی بدون تغییر است و واریوگرام بدون بعد نامیده می‌شود. در مناطقی که شرایط هواشناسی بسیار متغیر است، ضریب $\alpha(m)$ به سبب تغییرات زمانی شدت بارندگی تاثیر مقیاس را لحاظ می‌کند. در این مطالعه واریوگرام‌های بدون بعد برای بارندگی سالانه استفاده شده است.

برای حذف نایستایی مکانی و زمانی و ساخت واریوگرام بدون بعد، داده‌های بارندگی سالانه توسط رابطه زیر مورد پردازش قرار می‌گیرند (چنگ^۲ و همکاران، ۲۰۰۸).

$$R_i^*(j) = \frac{R_i(j) - R_{m,j}}{S(j)} \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (3-5)$$

^۱ Bastin
^۲ Cheng

که $R_{m,j}$ و $R_i(j)$ به ترتیب نشان دهنده بارندگی سالانه سال زام و متوسط بارندگی سالانه ایستگاه زام است، $S(j)$ انحراف معیار بارندگی سالانه در سال زام است و $R_i^*(j)$ داده‌های مقیاس شده می-باشد که در ساخت واریوگرام اقلیمی بدون بعد از آن استفاده می‌شود.

۳-۲-۵ کریجینگ

روش کریجینگ بر مبنای تئوری متغیرهای ناحیه‌ای (RVT) می‌باشد و همبستگی مکانی بین داده‌ها نقش اساسی در آن بازی می‌کند. زمینه‌ی کاربردی وسیع این روش در هیدرولوژی به علت توانایی آن در منطقه‌ای کردن پدیده‌های زمانی-مکانی است. کریجینگ یک روش تخمین است که بر منطق میانگین متحرک وزن دار^۱ (WMA) استوار می‌باشد و در مورد آن می‌توان گفت که بهترین تخمینگر خطی نارایب^۲ (BLUE) است. در واقع در این روش برای هر یک از نمونه‌ها وزن آماری مشخصی به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که واریانس تخمین مبتنی بر آن‌ها حداقل باشد. در روش کریجینگ هر چقدر نمونه در فاصله دورتری قرار داشته باشد، به همان نسبت وزن آماری که به آن نسبت داده می‌شود، کمتر است. اما در عین حال موقعیت نمونه نیز مدنظر قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین ویژگی‌های کریجینگ آن است که به ازای هر تخمین، خطای مرتبط به آن را می‌توان محاسبه کرد. در حالیکه در روش کلاسیک معمولاً چنین امکانی وجود ندارد (حسنی پاک، ۱۳۹۲). بطور کلی کریجینگ مجموعه‌ای از روش‌های رگرسیون خطی تعمیم داده شده در ابعاد بزرگ است که تخمین آن شامل محاسبه مقادیر خطا و عدم قطعیت در تخمین نیز می‌باشد. این روش، روشی برای بهینه سازی تخمین یک پارامتر دارای توزیع مکانی و یا زمانی در نقطه‌ای دلخواه می‌باشد. روش کریجینگ محدود به تخمین ساده‌ی نقطه‌ای پارامتر نیست و محاسبات این روش قابل تعمیم برای موارد زیر که از کاربردهای مهم این روش محسوب می‌گردند نیز می‌باشد:

^۱ Weighted Moving Average

^۲ Best Linear Unbiased Estimator

۱- محاسبه میزان خطای برآورد شده و واریانس خطای تخمین Z که عبارتست از تعیین غیردقیق فاصله اطمینان تخمین.

۲- بهترین موقعیت شبکه اندازه‌گیری پارامتر Z به منظور ایجاد ایستگاه‌های جدید از طریق حداقل کردن کلیه عدم قطعیت‌ها در محدوده مطالعاتی موردنظر.

۳- مقدار متوسط پارامتر Z در محدوده یک بلوک تخمین زده می‌شود. مانند مقدار متوسط پارامتر Z در قسمتی از یک شبکه.

برای روش درونیایی و کاربرد مفهوم واریانس تخمین از روش کریجینگ معمولی به خاطر سادگی محاسبات و در دسترس بودن داده‌های مرتبط با آن استفاده شده است. اگر $Z(x)$ متغیر تصادفی در موقعیت x تعریف شود و $\{Z(x), x \in \Omega\}$ در شرایط ایستایی مرتبه دوم در محدوده مکانی Ω باشد. می‌توان مقدار مجهول Z را در x_0 ، به عبارتی $Z(x_0)$ را با استفاده از مقادیر مشاهده شده $Z(x_i)$ ، $i=1,2,\dots,n$ در نقاط همسایه توسط معادله خطی زیر به دست آورد:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3-6)$$

که λ_i وزن‌های در نظر گرفته شده برای تخمین‌ها است. این وزن‌ها با حل سیستم معادله کریجینگ معمولی بدست می‌آیند. واریانس خطای تخمین ($\sigma_k^2(x_0)$) به عنوان واریانس کریجینگ معمولی به صورت زیر است:

$$\sigma_k^2(x_0) = \mu + \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{i0} \quad (3-7)$$

که μ ضریب لاگرانژ است و γ_{i0} مقدار واریوگرام بین نقطه معلوم $Z(x_i)$ و نقطه مجهول $Z(x_0)$ است.

۳-۲-۶ تعریف و محاسبه احتمال پذیرش

دقت تخمین بارندگی نقطه‌ای در هر منطقه‌ای متفاوت است و به تعداد و موقعیت قرارگیری باران-سنج‌ها بستگی دارد. از نظر کاربردی، یک شبکه‌ی باران‌سنجی خوب بایستی منجر به دقت قابل قبول برای اکثر نقاط در منطقه شود. برآورد در نقطه x_0 قابل قبول خواهد بود اگر مقدار برآورد شده در دامنه‌ای از مقدار واقعی قرار گیرد (رابطه ۳-۸) یا به عبارتی:

$$|\tilde{Z}(x_0)| = |\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)| < r \quad (3-8)$$

که در آن $r > 0$ است. هر چند که در نقطه‌ی مشخص x_0 ، دقت برآورد ساعت به ساعت و واقعه به واقعه تغییر می‌کند؛ از این‌رو ارزیابی بایستی بر مبنای یک مفهوم دربرگیرنده تمامی وقایع صورت پذیرد. همچنین تعیین دامنه r بایستی با در نظر گرفتن واریانس $Z(x)$ (یعنی σ_z^2) صورت پذیرد. بنابراین معیار تجدید نظر شده و دقیق‌تر با رابطه زیر می‌توان بیان کرد (چنگ و همکاران، ۲۰۰۸):

$$p[|\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)| < k\sigma_z] \geq \alpha \quad (3-9)$$

که در این رابطه دامنه قابل قبول برای خطای برآورد برحسب انحراف معیار متغیر تصادفی $Z(x)$ است، ضریب k و حداقل احتمال α بر اساس عواملی مانند: بودجه در دسترس برای تاسیس و نگهداری ایستگاه و دقت برآورد مورد نظر انتخاب می‌شوند. در صورتی که محدودیتی وجود نداشته باشد، $k=1$ و α برابر $0/8$ در نظر گرفته می‌شود (چنگ و همکاران، ۲۰۰۸). در روش کریجینگ معمولی واریانس خطای تخمین (واریانس کریجینگ) توسط رابطه (۳-۷) بدست می‌آید.

چون تخمین گر کریجینگ معمولی نارایب است، میانگین خطای برآورد در x_0 صفر و واریانس آن $\sigma_k^2(x_0)$ است. اگر فرض شود که توزیع خطای برآورد نرمال باشد، احتمال این‌که خطای برآورد $\tilde{Z}(x_0)$ در داخل دامنه‌ی مورد نظر $(-\sigma_z, \sigma_z)$ قرار گیرد را می‌توان به سادگی با استفاده از احتمال جمعی توزیع نرمال استاندارد تعیین کرد (رابطه ۳-۱۰):

$$p[|\tilde{Z}(x_0)| < \sigma_z] = p\left[\frac{|\tilde{Z}(x_0)|}{\sigma_k(x_0)} < \frac{\sigma_z}{\sigma_k(x_0)}\right] = p\left[|\tilde{Z}^*(x_0)| < \frac{\sigma_z}{\sigma_k(x_0)}\right] = P_A(x_0) \quad (3-10)$$

که در آن $\tilde{Z}^*(x_0)$ خطای تخمین استاندارد می‌باشد و از توزیع نرمال استاندارد پیروی می‌کند یا به عبارتی $\tilde{Z}^*(x_0) \sim N(0,1)$ ، σ_z انحراف معیار داده‌های بارندگی مقیاس شده می‌باشد که معادل سقف واریوگرام بدون بعد در نظر گرفته می‌شود و $\sigma_k(x_0)$ جذر واریانس تخمین کریجینگ می‌باشد و $p_A(x_0)$ احتمال پذیرش (Acceptance Probability) در نقطه x_0 نامیده می‌شود که نشان دهنده احتمال آن است که خطای تخمین در x_0 کمتر از σ_z است. بنابراین می‌توان گفت که دقت برآورد در یک نقطه‌ی فاقد آمار قابل قبول است تنها اگر احتمال پذیرش مربوط به آن بزرگتر یا مساوی α باشد. در نتیجه برآورد در آن نقطه از دقت پذیرش (Acceptable Accuracy) برخوردار است. به بیان دیگر نقاطی که واریانس‌های کریجینگ بزرگتر دارند احتمال‌های پذیرش در آنها کمتر می‌باشد (چنگ و همکاران، ۲۰۰۸). از آنجایی که در محاسبه $p_A(x_0)$ نیاز به مراجعه به جدول توزیع نرمال استاندارد می‌باشد، لذا ساده‌سازی‌هایی توسط شفیع‌ی و همکاران (۲۰۱۴) انجام شده است که در نهایت منجر به رابطه‌ای ساده و با دقت مناسب برای محاسبه $p_A(x_0)$ شده است. مقدار تابع توزیع تجمعی احتمال نرمال استاندارد از رابطه ذیل بدست می‌آید:

$$D(x) = P(Z < x) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) + 1 \right] \quad (3-11)$$

تقریب $\operatorname{erf}(y)$ برابر است با (وینیتزکی^۱، ۲۰۰۳):

$$\operatorname{erf}(y) \approx \left[1 - \exp\left(-y^2 \frac{\frac{4}{\pi} + 0/14y^2}{1 + 0/14y^2}\right) \right]^{1/2} \quad (3-12)$$

باتوجه به رابطه (۳-۱۰) و شکل تابع توزیع نرمال:

¹ Winitzki

$$P(|Z| < x) = 1 - 2P(Z < -x) \quad (3-13)$$

(رابطه ۳-۱۰) در این تحقیق از فرم تقریب زده شده‌ی آن توسط شفیعی و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شده است (رابطه ۳-۱۴):

$$p_A(x_0) = 1 - \left[1 - \left[1 - \exp\left(-\tau^2 \frac{\frac{4}{\pi} + 0.14\tau^2}{1 + 0.14\tau^2}\right) \right]^{1/2} \right], \quad (3-14)$$

$$\tau = \frac{\sigma_z}{\sqrt{2}\sigma_k(x_0)}$$

۲-۲-۷ ارزیابی کارایی و تقویت شبکه موجود

با توجه به مطالب گفته شده در بخش قبل، ارزیابی کارایی یک شبکه باران‌سنجی را می‌توان بر اساس درصدی از مساحت منطقه با دقت پذیرش (A_p) انجام داد. بنابراین احتمال پذیرش را می‌توان در هر نقطه‌ی درون منطقه مورد مطالعه محاسبه کرد. یک شبکه‌ی موجود ایستگاه‌های باران‌سنجی را می‌توان برحسب درصد مساحتی با دقت پذیرش از طریق جابه‌جایی ایستگاه‌ها یا اضافه کردن ایستگاه‌های جدید تقویت کرد.

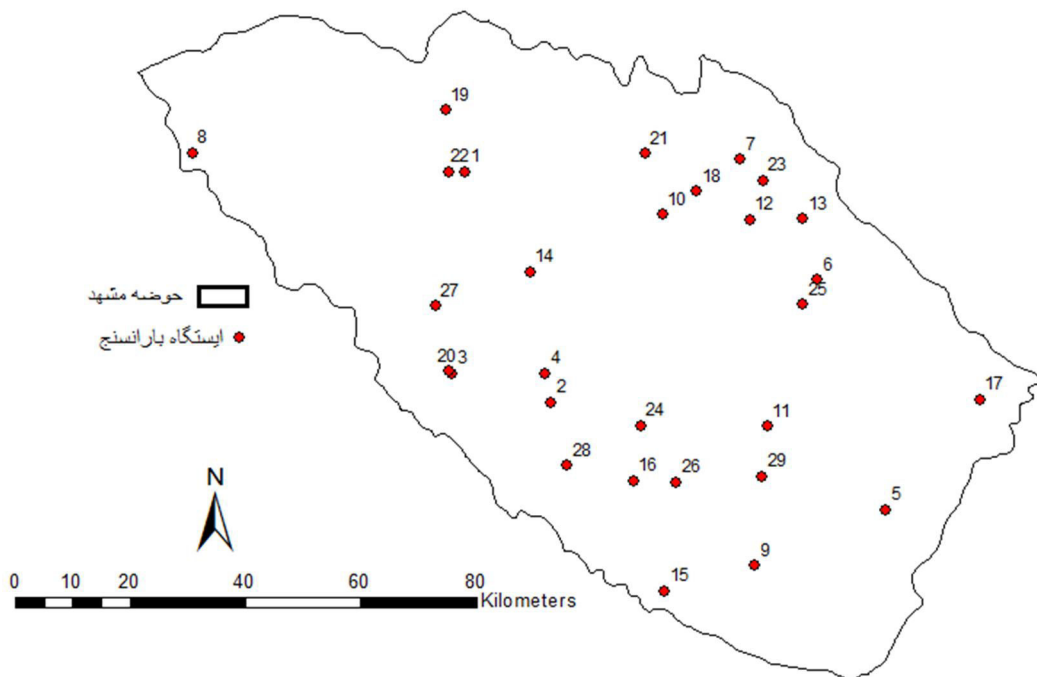
۳-۳ منطقه مورد مطالعه

دشت مشهد در استان خراسان رضوی واقع گردیده و جزئی از حوضه آبریز کویر قره قوم است. این حوضه در طول جغرافیایی $36^{\circ} 0'$ تا $37^{\circ} 3'$ واقع شده و از شمال به خط الراس ارتفاعات هزار مسجد، از جنوب به خط الراس ارتفاعات بینالود، از شرق به حوضه آبریز جام رود و از غرب به حوضه آبریز رودخانه اترک محدود می‌شود. وسعت کل منطقه مورد مطالعه حدود ۹۹۰۰ کیلومتر مربع است که ۶۱۲۰ کیلومتر مربع آن را ارتفاعات و ۳۷۸۰ کیلومتر مربع بقیه را دشت تشکیل می‌دهد. بلندترین نقطه در قله بینالود واقع است و حدود ۳۳۰۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. پایین نقطه در محل خروجی حوضه (پل خاتون) قرار گرفته و ۵۸۰ متر از سطح دریا بلندتر است. دشت مشهد در حوضه

آبریز کشف رود در محدوده ی ۹۰' ۵۷° تا ۴۰' ۶۰° درجه طول شرقی و ۰' ۳۶° تا ۰۳' ۳۷° درجه عرضی شمالی واقع است.

۳-۳-۱ بارندگی

بیشترین مقادیر متوسط بارندگی سالانه حدود ۳۰۰ میلیمتر در شرق حوضه می باشد (مانند ایستگاه- های آبقد ارداک، جنگ، آل، گوش بالا) و در مناطق مرکزی حوضه متمایل به شمال مقادیر بارندگی سالانه با حدود ۱۸۰ میلیمتر کمترین میزان می باشد (مانند ایستگاه های قدیر آباد، امامزاده رادکان، چناران). همچنین متوسط بارندگی سالانه در مناطق غرب حوضه حدود ۲۷۰ میلیمتر می باشد (مانند ایستگاه های فریزی، آبقد فریزی، دهانه اخلمد).



شکل (۲-۳) پراکندگی ایستگاه هادر حوضه مشهد

۳-۴ ایستگاه های شبکه پایش منطقه

این حوضه در برگیرنده ۳۴ ایستگاه باران سنجی متعلق به وزارت نیرو است. در این تحقیق از داده های بارندگی سالانه ایستگاه ها استفاده شده است. با توجه به طول دوره آماری ایستگاه ها و با در نظر گرفتن اینکه در بازسازی داده های بارندگی حداقل طول دوره مشترک آماری نباید کمتر از ۱۰ سال باشد (سان وهمکاران، ۲۰۰۶)، ایستگاه هایی که کمتر این تعداد آمار داشتند از تحلیل کنار گذاشته شدند. لذا یک دوره مشترک ۱۵ ساله (از سال آبی ۸۰-۱۳۷۹ الی ۹۴-۱۳۹۳) برای تحلیل داده های بارندگی در مقیاس سالانه براساس ۲۹ ایستگاه انتخاب گردید (شکل ۲-۳). لازم به ذکر است ایستگاه های حذف شده پنج مورد می باشند که با توجه به دوره آماری کمتر از ۱۰ سال از تحقیق کنار گذاشته شدند.

جدول (۱-۳) مشخصات ایستگاه های منتخب حوضه

ردیف	نام ایستگاه	ارتفاع (متر)	میانگین بارندگی سالانه (میلیمتر)	ردیف	نام ایستگاه	ارتفاع (متر)	میانگین بارندگی سالانه (میلیمتر)
۱	امامزاده رادکان	۱۲۱۴	۱۹۹	۱۸	آبقد ارداک	۱۵۰۵	۳۲۴.۲۲
۲	دولت آباد	۱۵۷۵	۲۰۲.۹	۱۹	بهمن جان علیا	۱۳۷۱	۳۱۴.۹۶
۳	فریزی	۱۶۳۱	۲۸۲.۰۸	۲۰	آبقد فریزی	۱۳۹۰	۲۶۶.۷
۴	گلمکان	۱۴۴۰	۲۶۵.۳۳	۲۱	تلغور	۱۵۶۳	۳۳۲.۴۶
۵	اولنگ اسدی	۹۱۲	۱۶۸.۳۳	۲۲	قدیر آباد	۱۱۹۵	۱۸۶.۰۳
۶	سد کارده	۱۲۷۹	۳۳۸	۲۳	جنگ	۲۳۱۳	۳۱۵.۳
۷	مارشک	۱۸۳۰	۲۹۳.۸۴	۲۴	سراسیاب شاندیز	۱۲۹۶	۲۱۳.۱۶
۸	چکنه علیا	۱۷۰۴	۳۴۱.۸۶	۲۵	اندرخ	۱۲۰۷	۲۰۲.۰۳
۹	سد طرق	۱۲۴۲	۲۴۰.۸۵	۲۶	حصار	۱۲۵۱	۲۰۷.۴
۱۰	ارداک بند	۱۳۲۰	۲۴۳.۴۲	۲۷	دهانه اخلمد	۱۴۶۷	۲۷۷.۶۷
۱۱	بلغور	۱۹۴۱	۳۵۶.۶۶	۲۸	زشک	۱۸۳۲	۳۴۵.۳
۱۲	گوش بالا	۱۵۶۹	۲۷۳.۴۶	۲۹	اداره مشهد	۱۰۱۸	۲۱۱.۳۹
۱۳	آل	۱۴۶۴	۲۷۵.۴۷				
۱۴	چناران	۱۱۸۶	۱۷۳.۵				
۱۵	مغان	۱۷۸۸	۳۴۹.۴۴				
۱۶	جاغرق	۱۴۳۴	۲۹۴.۳۶				
۱۷	هندل آباد	۱۲۰۶	۱۷۵.۸۶				

جدول (۳-۲) مشخصات ایستگاه های حذف شده

نام ایستگاه	ارتفاع	XUTM	YUTM
کرتیان	۱۲۴۰	۷۲۶۰۷۳	۴۰۰۵۹۳۰
اندرخ	۱۲۰۷	۷۳۸۰۵۸	۴۰۵۱۸۰۸
شغل آباد	۱۳۱۰	۶۵۱۶۶۳	۴۰۷۸۶۳۲
خرکت	۱۹۸۲	۷۲۶۹۰۴	۴۰۸۶۰۷۶
درخت توت	۱۲۵۴	۷۳۴۰۷۸	۳۹۹۶۶۵۳

در جدول (۳-۱) ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب (۲۹ ایستگاه) به همراه میانگین بارندگی سالانه و ارتفاع نشان داده شده است. لازم به ذکر است که شماره ردیف در جدول (۳-۱) با شماره ایستگاه‌ها در شکل (۳-۲) مطابقت دارد.

۳-۵ بازسازی داده های مفقود

از آنجا که اطلاعات بارشی توسط ابزارهای هواشناسی و نهادهای مربوطه جمع آوری می شود ممکن است در یک دوره زمانی خاص به هردلیلی آمار مربوط به آن ماه یا سال گرفته نشده یا ثبت نگردیده باشد که در این حالت بهترین راه بازسازی داده هاست یعنی: اطلاعات وداده های ایستگاهی که مجهول هست را از داده های ایستگاه مجاور آن که معلوم می باشد، اخذ می کنیم. روش های بازسازی داده ها متعدد است اما یکی از ساده ترین و شاید بهترین آنها بازسازی به روش نرم افزاری وبا نرم افزار spss (با در نظر گرفتن همبستگی و رگرسیون) می باشد.

روش کار بدین صورت است، ایستگاهی که از داده های آن برای یافتن داده های مجهول ایستگاه دیگر استفاده می شود باید دو ویژگی زیر را دارا باشد:

- (۱) داده های آن معلوم باشد.
- (۲) فاصله زیادی نداشته و در واقع ایستگاه مجاور ایستگاه مجهول باشد از طرفی شرایط اقلیمی آن ایستگاه با ایستگاه مورد نظر مشابهت داشته باشد.

برای تعیین ایستگاه پایه خود نرم افزار از طریق تحلیل همبستگی ایستگاه پایه راتعیین می کند. ایستگاهی که بیشترین همبستگی با ایستگاه مجهول را داشته باشد به عنوان ایستگاه پایه انتخاب می شود.

به عنوان مثال برای بازسازی داده های مفقود ایستگاه آبقد فریزی، ضریب همبستگی این ایستگاه با ایستگاه های معلوم اطراف آن (فریزی، دولت آباد، گلنکان، زشک) بدست آمد که با مقایسه جداول مربوط به همبستگی مشخص گردید که ایستگاه گلنکان بیشترین همبستگی را با ایستگاه فوق دارد که در ادامه به تشریح مراحل بازسازی داده های ایستگاه آبقد فریزی با استفاده از داده های ایستگاه گلنکان می پردازیم. ابتدا داده های ۱۵ ساله ایستگاه معلوم را بصورت ماهانه در یک فایل اکسل جمع آوری می کنیم که در ابتدای هر ستون ماه مربوط به آن و در ابتدای هر سطر سال مربوط به آن داده ذکر شده است. داده های ایستگاه معلوم را (فقط داده ها، نام ماه ها و سال ها وارد نشود) را در اولین خانه از نرم افزار SPSS کپی می کنیم. داده های ایستگاه مجهول را هم درست در کنار داده های ایستگاه معلوم کپی می کنیم و خانه هایی که در آن سال ایستگاه فاقد داده می باشد خالی می گذاریم. نام مربوط به ماه های ایستگاه معلوم را بدون پسوند ۱ و نام مربوط به ماه های ایستگاه مجهول را با پسوند ۱ (به عنوان مثال mehr1) برای تمایز دادن نامگذاری می کنیم.

	VAR00001	VAR00002	VAR00003	VAR00004	VAR00005	VAR00006	VAR00007	VAR00008	VAR00009	VAR00010	VAR00011	VAR00012	var	var
1	13.00	26.00	0.00	6.00	15.00	14.00	33.00	4.00	0.00	3.00	2.00	0.00		
2	0.00	20.00	34.00	32.00	8.00	2.00	41.00	144.00	5.00	3.00	0.00	0.00		
3	0.00	18.50	15.00	18.00	26.00	42.00	55.00	41.00	20.00	0.00	4.00	1.00		
4	2.00	29.00	30.00	21.00	37.00	29.00	43.00	36.00	6.00	17.00	5.00	0.00		
5	0.00	28.00	64.00	30.00	20.00	92.00	62.00	34.00	34.00	4.00	0.00	0.00		
6	0.00	32.00	0.00	22.00	51.00	38.00	25.00	1.00	0.00	10.00	0.00	6.00		
7	4.00	19.00	20.00	19.00	49.00	71.00	97.00	49.00	43.00	2.00	2.00	0.00		
8	0.00	2.00	80.00	30.00	20.00	0.00	26.00	25.50	15.00	0.00	0.00	0.00		
9	0.00	30.00	15.50	22.00	36.50	40.50	90.50	49.00	25.00	0.00	0.00	20.00		
10	0.00	4.00	15.00	4.50	52.50	48.00	47.50	72.00	15.00	5.00	0.00	0.00		
11	4.00	14.50	0.00	11.00	54.00	54.00	27.00	66.00	15.50	9.00	0.00	4.00		
12	16.50	68.50	35.00	40.50	52.00	25.00	23.00	113.00	13.50	4.00	0.00	0.00		
13	0.00	20.00	66.00	17.50	20.00	64.00	21.00	35.00	28.50	0.00	0.00	0.00		
14	11.00	17.50	13.50	4.00	6.00	46.00	40.50	52.50	12.50	6.50	0.00	0.00		
15	22.50	34.50	13.00	25.00	27.00	59.50	29.50	6.00	6.00	0.00	0.00	5.50		

شکل (۳-۳) نمایی از محیط برنامه SPSS و وارد کردن داده ها در آن

مرحله بعدی، تعیین همبستگی بین داده های دو ایستگاه می باشد. از منوی Analyze، گزینه Correlate و زیرگزینه ی Bivariate را کلیک می کنیم. پس از انجام تنظیمات مربوطه، نرم افزار جدول مربوط به ضریب همبستگی بین ماه های دو ایستگاه را ارائه می دهد. در شکل (۳-۴) نمونه ای از جدول خروجی نرم افزار، برای عدد همبستگی بین ماه های ایستگاه معلوم و مجهول آورده شده و اعداد مربوط به همبستگی با تغییر رنگ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود نقطه تلاقی ماه های دو ایستگاه، عدد همبستگی را نشان می دهد. جداول مربوط به ۳ ایستگاه مجهول و ایستگاه هایی با داده های معلوم که بیشترین همبستگی را با ۳ ایستگاه فوق داشته اند، در پیوست آمده است.

	mehr1	aban1	azar1	dey1	bahman1	esfand1	farvardin1	ordibehesht1	khordad1	tir1	mordad1	shahrivar1
mehr Pearson Correlation	.952	.638	-.018	-.195	.125	-.028	-.223	-.016	-.257	.142	.302	.105
aban Pearson Correlation	.354	.927	.266	.338	.111	-.112	-.078	.162	.144	.315	.038	.191
azar Pearson Correlation	-.383	-.222	.763	.425	-.305	-.109	-.290	.008	.386	-.327	-.292	-.292
dey Pearson Correlation	-.149	.524	.603	.717	-.073	-.341	-.214	.115	.316	-.069	-.368	.073
bahman Pearson Correlation	-.183	.198	-.439	-.020	.653	.151	.239	.043	.174	.698	-.266	.174
esfand Pearson Correlation	.032	-.077	-.035	.194	.202	.946	.362	-.226	.218	-.086	-.316	.085
farvardin Pearson Correlation	-.255	-.006	-.037	.050	-.209	.241	.897	.007	.397	-.364	-.132	.340
ordibehesht Pearson Correlation	-.228	.264	.312	.204	.151	-.339	.056	.928	.064	.305	-.324	-.197
khordad Pearson Correlation	-.372	-.164	.251	.328	-.031	.469	.550	.031	.645	-.306	-.381	-.018
tir Pearson Correlation	-.050	-.007	-.441	-.336	.176	.232	-.321	.028	-.234	.653	-.027	-.206
mordad Pearson Correlation	.031	-.037	-.216	.131	-.073	-.052	.378	-.081	.046	-.300	.336	-.239
shahrivar Pearson Correlation	-.071	.205	-.306	-.091	.120	-.013	.499	-.208	.301	-.109	-.137	.964

شکل (۳-۴) نمایی از جدول خروجی نرم افزار برای ضریب همبستگی دو ایستگاه

به همین ترتیب ضریب همبستگی ایستگاه مجهول با سایر ایستگاه های معلوم اطراف آن، بدست می آید و با مقایسه ی جداول مربوطه ایستگاهی که بیشترین همبستگی را با داده های ایستگاه مجهول

دارد تعیین می کنیم. گام بعدی بازسازی داده های ایستگاه مجهول با توجه به داده های ایستگاه معلوم می باشد که برای این منظور از منوی Analyze گزینه Regression و زیرگزینه ی curve estimation را کلیک می کنیم. بازسازی داده ها بصورت ماه به ماه انجام می شود یعنی برای بازسازی داده های هر ماه از ایستگاه مجهول، باید ماهی از ایستگاه معلوم تعیین شود(به عنوان مثال برای بازسازی mehr1، ماه mehr از ایستگاه معلوم را انتخاب می کنیم) بدین ترتیب داده های مربوط به ماه مهر ایستگاه مجهول برای ۱۵ سال یعنی به تعداد سال های آماری بازسازی می شود و در کنار داده های ورودی به نمایش در می آید که از بین این داده ها، داده ای را که مربوط به سال فاقد داده می باشد (عددی که با کشیدن دایره به دور آن مشخص شده) استخراج می کنیم. همین فرآیند را برای ماه های دیگر نیز انجام می دهیم که با جمع اعداد بدست آمده برای هر ماه، بارش سالانه برای آن سال که فاقد آمار بوده تعیین می شود.

bahman1	esfand1	farvardin1	ordibehesht1	khordad1	tir1	mordad1	shahrivar1	FIT_1	var	var
31.00	11.00	41.00	10.30	0.00	2.00	2.50	0.00	12.77831		
28.00	4.00	37.00	87.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49315		
37.00	40.00	62.00	49.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.49315		
.	.	.	.	.	.	.	.	2.38318		
26.00	78.00	48.50	17.50	27.50	0.00	0.00	0.00	0.49315		
30.00	46.00	27.00	0.00	6.00	11.00	0.00	3.00	0.49315		
31.00	57.00	71.00	34.00	22.00	0.00	0.00	0.00	4.27320		
20.00	0.00	22.00	15.00	28.00	0.00	0.00	0.00	0.49315		
34.00	29.00	85.00	38.00	36.00	0.00	0.00	15.00	0.49315		
53.00	51.00	61.00	68.00	5.00	16.00	0.00	0.00	0.49315		
75.00	51.00	38.00	44.00	21.00	11.00	0.00	3.00	4.27320		
47.00	12.00	34.00	87.00	29.00	17.50	0.00	0.00	16.08586		
41.00	56.00	34.00	40.00	17.00	0.00	0.00	0.00	0.49315		
7.00	60.00	38.00	59.00	18.00	4.00	0.00	0.00	10.88829		
49.00	58.00	40.00	12.00	2.00	0.00	0.00	8.00	21.75593		

داده های بازسازی شده



شکل (۳-۵) داده های بازسازی شده در نرم افزار spss

در جدول (۳-۳) مشخصات ایستگاه‌هایی که مورد بازسازی قرار گرفته‌اند آورده شده است:

جدول (۳-۳) ضریب همبستگی و تعداد سال‌های بازسازی شده

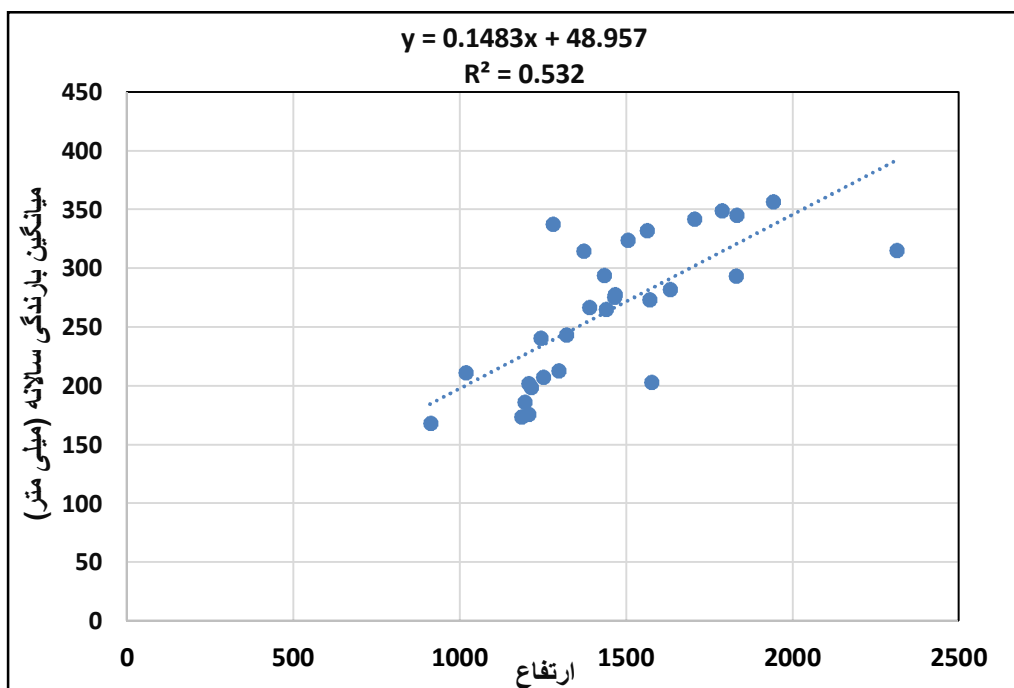
نام ایستگاه وابسته	نام ایستگاه مستقل	تعداد سال‌های بازسازی شده	ضریب همبستگی (R^2)
فریزی	دولت آباد	۴	جدول (پیوست ۱)
آبقد ارداک	ارداک بند	۱	جدول (پیوست ۱)
آبقد فریزی	گلمکان	۱	جدول (پیوست ۱)

۳-۶ بررسی ایستایی مکانی داده‌ها و تشخیص روند متغیرها

قبل از انجام تحلیل زمین‌آماري و برازش واریوگرام برای ایستگاه‌های حوضه، باید از عدم وجود روند در داده‌های بارندگی سالانه نسبت به ارتفاع، طول و عرض جغرافیای اطمینان حاصل کرد، که برای این منظور ابتدا نمودار میانگین بارش سالانه نسبت به ارتفاع رسم می‌شود.

این نمودار وجود روند را نشان می‌دهد یعنی داده‌ها ایستا نیستند بنابراین باید داده‌ها را با توجه به رابطه ی (۳-۵) مقیاس کرده سپس با استفاده از داده‌های بدون بعد، واریوگرام اقلیمی بدون بعد را مدل کنیم.

داده‌های بارندگی سالانه ی ۲۹ ایستگاه حوضه باید ابتدا با رابطه ی (۳-۵) مورد پردازش قرار گیرند. لازم به ذکر است که داده‌های مقیاس شده بدون بعد هستند و دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک می‌باشند.

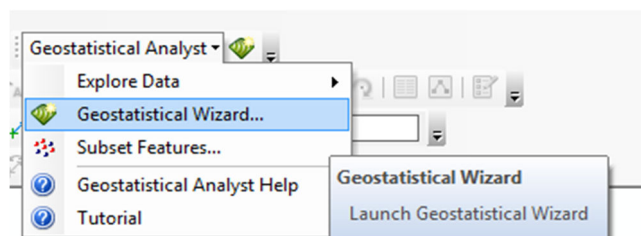


شکل (۳-۶) نمودار میانگین بارش سالانه نسبت به ارتفاع

۳-۷ تحلیل واریوگرام داده‌ها

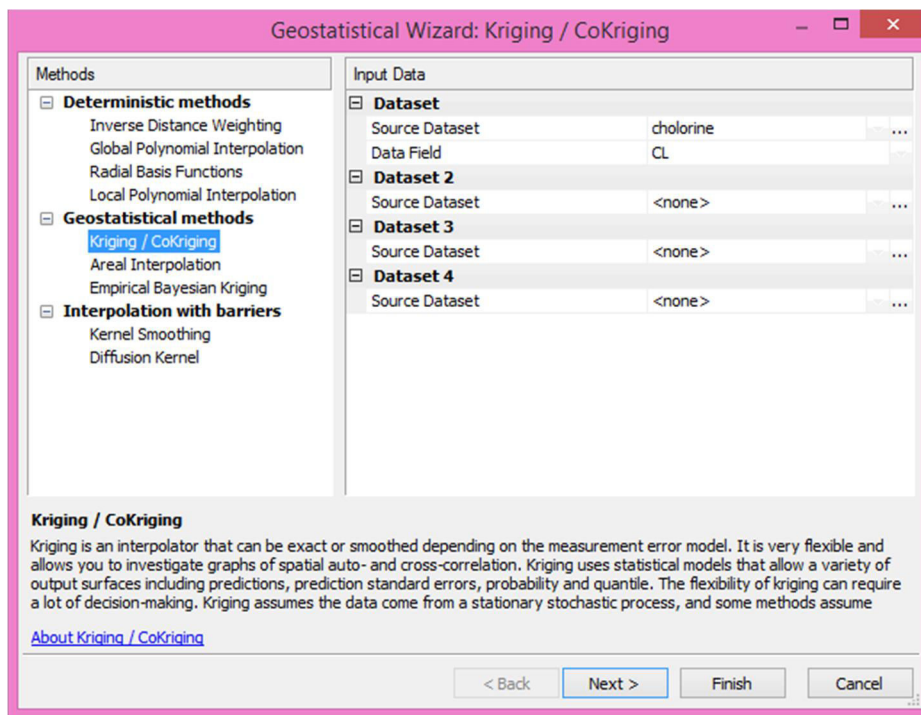
جهت تحلیل داده‌هایی از این نوع که مکانی محسوب می‌شوند، از ابزار Geostatistical Analyst نرم‌افزار ArcGIS ۱۰.۳ برای بررسی همسان‌گردی و انتخاب بهترین مدل برازش واریوگرام استفاده شد. بررسی همسان‌گردی نشان داد نیم‌تغییرنا همه جهته می‌باشد و در جهت خاصی همسانگرد نمی‌باشد. جهت انتخاب مدل نیم‌تغییرنا، از نرم‌افزار ArcGIS استفاده می‌شود.

از منوی ابزار Geostatistical analyst گزینه Geostatistical wizard انتخاب می‌شود (شکل ۳-۷).



شکل (۳-۷) ابزار Geostatistical analyst در نرم‌افزار ArcGIS

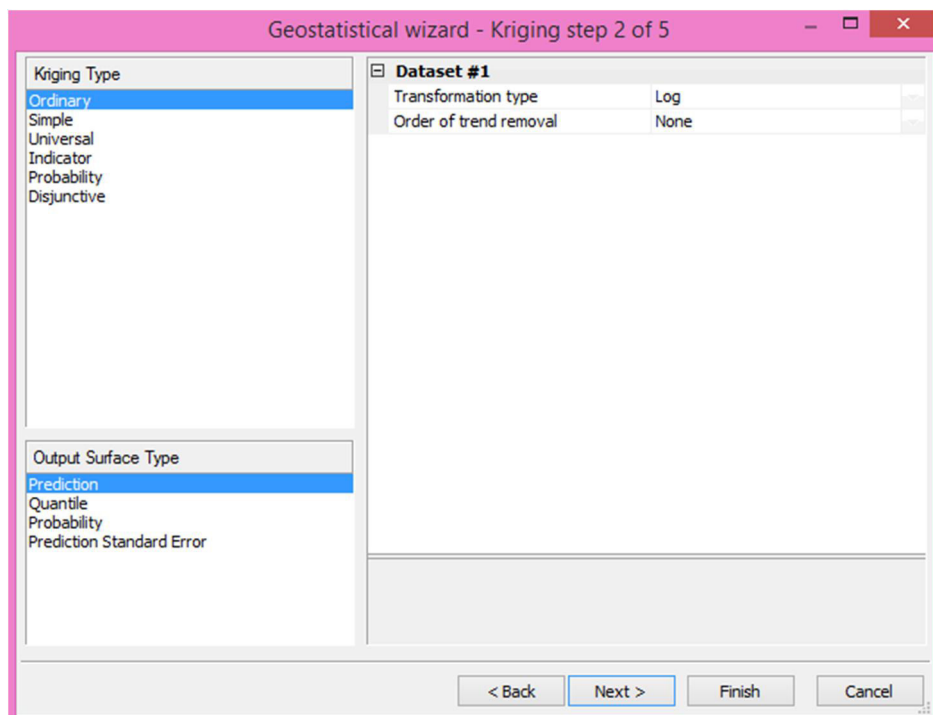
در پنجره باز شده، لایه داده‌ها، زمینه تحقیق (Z)، نوع روش درونیابی تعیین می‌گردد (شکل ۸-۳).



شکل (۸-۳) ورود داده‌ها

گام بعدی، نوع کریجینگ و نوع خروجی تعیین می‌گردد. از روش کریجینگ عام^۱ جهت درونیابی استفاده شد. در مرحله بعد، هدف، پیدا کردن مدل نیم‌تغییرنمای مناسب برای داده‌ها می‌باشد. معیار انتخاب بهترین مدل، شکل منحنی و میزان انطباق با داده‌ها و ضریب همبستگی می‌باشد. در واقع باید مدلی انتخاب شود که کمترین خطا و بیشترین انطباق با داده‌ها را داشته باشد. مناسب‌ترین مدل بر اساس کمترین میزان RMSE، پایین بودن مقدار جزء تصادفی واریوگرام و میزان مطابقت نیم‌تغییرنما با داده‌ها انتخاب گردید. پایین بودن میزان RMSE به معنای کم بودن اختلاف میان داده‌های مشاهده‌ای و اندازه‌گیری شده می‌باشد. همچنین هر چه میزان جزء تصادفی کمتر باشد، داده‌ها از توزیع مکانی بهتری برخوردار می‌باشند.

^۱ -Ordinary kriging



شکل (۳-۹) آماده سازی داده‌ها

۳-۸ محاسبه احتمال پذیرش و محاسبه کارایی شبکه موجود در منطقه

در این بخش، پس از تعیین مشخصات واریوگرام برازش داده شده به داده‌ها، براساس ساختار مکانی تغییرات پارامتر در منطقه و روابط ارائه شده در محاسبه احتمال پذیرش، احتمال پذیرش (P_A) در نقاط مختلف منطقه محاسبه و سپس دقت پذیرش A_p در سطح $\alpha=0.8$ تحلیل و بررسی شده‌اند. در این تحقیق از الگوریتم ارائه شده توسط چنگ و همکاران (۲۰۰۸) استفاده شده است که به شرح زیر می‌باشد:

(۱) محاسبه A_p برای شبکه با حذف یک ایستگاه از شبکه موجود در یک سطح دقت مورد نظر (α) .

(۲) برگرداندن ایستگاه حذف شده در مرحله قبل به شبکه، انتخاب ایستگاهی دیگر و محاسبه مجدد A_p . این مرحله تا آنجایی ادامه می‌یابد که همه ایستگاه‌ها یکبار حذف شده باشند. بنابراین مجموعه‌ای از مقادیر A_p به ازای حذف هر ایستگاه از شبکه بدست می‌آید.

۳) در این مرحله ایستگاهی که بیشترین مقدار A_p را در مرحله ۲ داشته از محاسبات کنار

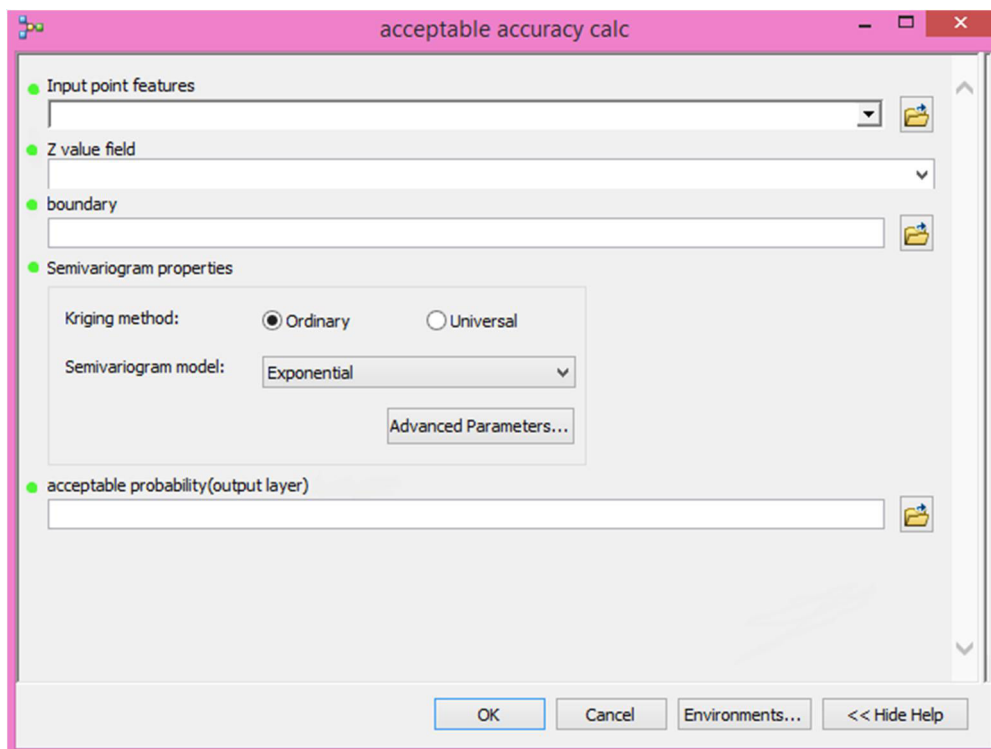
گذاشته می‌شود. سپس از تعداد ایستگاه‌های باقی‌مانده یکی کم می‌شود و مراحل ۱ و ۲

تکرار می‌شوند. مرحله ۳ تا زمانی اجرا می‌شود که تنها یک ایستگاه باقی بماند.

بعد از اتمام الگوریتم ترتیبی فوق، تمامی ایستگاه‌ها براساس نوبت (رتبه) حذف شدنشان در گام سوم اولویت‌بندی می‌شوند. علاوه بر این در هر بار که در گام سوم یک ایستگاه حذف می‌شود نقشه‌ی مقادیر احتمال پذیرش و مقادیر A_p متناظر با آن با استفاده از ایستگاه‌های باقی‌مانده بدست می‌آید. با استفاده از مقادیر A_p مربوط به حذف تک ایستگاه‌ها یا معادل آن مجموعه‌ای از ایستگاه‌های باقیمانده، نموداری براساس A_p و شماره ایستگاه حذف شده متناظر با آن برای نشان دادن ترتیب اولویت ایستگاه‌ها و کارایی مجموعه‌ی آنها می‌توان ترسیم کرد.

در این مطالعه، از مقادیر میانگین بارش سالیانه برای ترسیم نقشه‌های هم مقدار احتمال پذیرش و ارزیابی شبکه پایش موجود، استفاده شده است. در ابتدا با استفاده از یک برنامه جانبی در نرم‌افزار ArcGIS و در محیط ModelBuilder کارایی شبکه موجود مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل (۱۰-۳) نمایی از محیط این برنامه نشان داده شده است. همان‌طور که ذکر شده است، احتمال پذیرش تنها با داشتن مشخصات واریوگرام و موقعیت مکانی شبکه موجود قابل محاسبه می‌باشد. با در نظر گرفتن یک شبکه سلولی 500×500 متر و با استفاده از روابط و ابزار موجود در محیط ModelBuilder، احتمال پذیرش در شبکه موجود شامل تمامی ایستگاه‌های منطقه محاسبه شده است و نتیجه مقادیر هم‌مقدار آن در شکل (۲-۴) آمده است.

درمحل هر ایستگاه، مقدار احتمال پذیرش برابر یک می‌باشد. تخمین‌گر کریجینگ معمولی، زمانی دقیق است که مقدار ناگت (اثر قطعه‌ای) صفر باشد. در نزدیکی مرزهای حوضه و مناطقی که ایستگاهی وجود ندارد احتمال پذیرش کمتر از سایر نقاط می‌باشد.



شکل (۳-۱۰) نمایی از ابزار مذکور در محیط GIS جهت محاسبه احتمال پذیرش

۳-۹ تقویت شبکه فعلی

ارزیابی کارایی شبکه بر مبنای درصدی از مساحت منطقه با دقت پذیرش A_p ، براساس الگوریتم ارائه شده در رابطه ی (۳-۱۰) قابل انجام است. با انجام این الگوریتم نقش (مشارکت) هر ایستگاه در دقت شبکه، محاسبه و ارزیابی می شود. همچنین، تقویت شبکه موجود با حذف ایستگاه هایی که تاثیر کمی در افزایش دقت برآورد دارند با احداث ایستگاه های جدید امکان پذیر می باشد که توسط الگوریتم ارائه شده در رابطه ی (۳-۱۰) انجام می شود. به طور مثال، برای اینکه کل مساحت منطقه از دقت پذیرش در سطح $\alpha=0/8$ برخوردار باشد ($A_p=100\%$)، شبکه موجود نیاز به افزایش ایستگاه های موجود خواهد داشت، زیرا درحال حاضر در شبکه موجود A_p در سطح ۸۰ درصد، برابر ۷۵ درصد است. به همین منظور و پس از مشخص شدن میزان کارایی شبکه، ایستگاه هایی که باعث کاهش دقت برآورد می شوند و یا در افزایش آن نقشی ندارند، از ادامه کار کنار گذاشته می شوند و به ایستگاه های

باقیمانده، اصطلاحاً ایستگاه های پایه می گویند که تشکیل یک شبکه پایه را می دهند. میزان کارایی شبکه پایه تقریباً با کارایی شبکه اولیه برابر خواهد بود.

برای افزایش دقت در شبکه پایه یا به عبارتی افزایش کارایی شبکه به دقت پذیرش (A_p) ۱۰۰ درصد، در نقاطی که $P(A) < \alpha$ با توجه به الگوریتم ارائه شده می توان به ترتیب نقاطی را که بیشترین A_p را در ترکیب با شبکه پایه می دهند، بدست آورد. برای این کار ابتدا یک سری ایستگاه پیشنهادی (شبکه پیشنهادی جدید) در نقاطی که مقادیر احتمال پذیرش کمتر از حد آستانه آن می باشد در نظر گرفته می شود و سپس الگوریتم ارائه شده در رابطه ی (۱۰-۳) اجرا می شود.

فصل چهارم:

نتایج و بحث

۴-۱ مقدمه

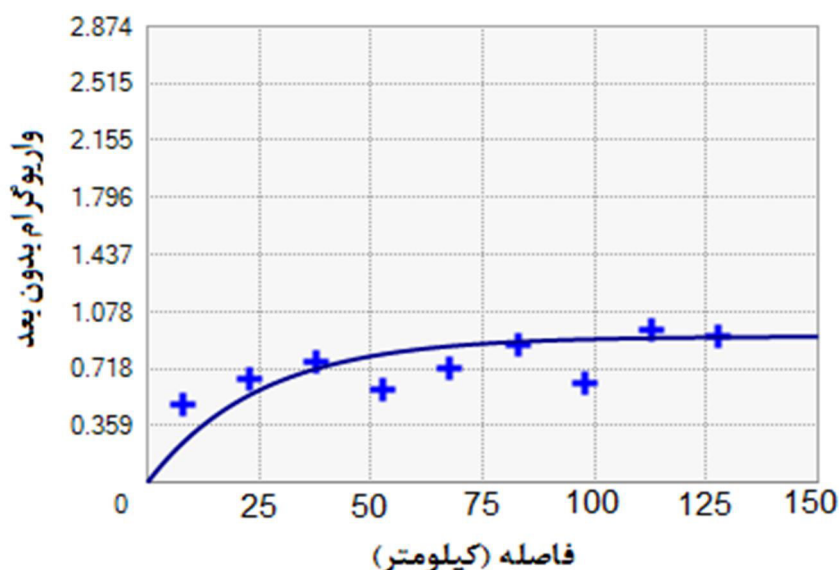
در این فصل، پس از بررسی داده های موجود، داده های منتخب منطقه موردنظر تعیین می گردد. سپس، بهترین نیم تغییرنمای برازش داده شده بر روی داده ها و مشخصات واریوگرام مذکور ارائه می شود. پس از تعیین مشخصات واریوگرام و با استفاده از الگوریتم احتمال پذیرش، میزان کارایی و دقت برآورد شبکه موجود تعیین می گردد. برای تقویت شبکه فعلی، ایستگاه های اضافی که تاثیری بر افزایش دقت تخمین پارامتر مورد مطالعه ندارند حذف می شوند و در عوض ایستگاه هایی در مناطقی از حوضه که دقت پذیرش پایینی دارند، اضافه می شوند.

۴-۲ آمار و اطلاعات

برای ارزیابی پتانسیل منابع آب، دوره بلند مدت بارندگی و برای طراحی و مدل سازی پروژه های سیلاب دوره های کوتاه مدت بارندگی مورد توجه قرار می گیرد. ارزیابی و یا طراحی شبکه ایستگاه های باران-سنجی باید بر اساس هدف آن باشد که این هدف تعیین کننده تداوم بارندگی برای تحلیل آن نیز می باشد. در این تحقیق، داده های بلند مدت بارندگی سالانه در حوضه مورد استفاده قرار گرفته است.

۴-۳ انتخاب مدل نیم تغییرنما

در این مرحله، ارزیابی تغییرات مکانی واریانس داده ها مورد بررسی قرار گرفت. برای برازش نیم تغییرنمای تجربی از انواع متداول آن مانند خطی، توانی، نمایی و گوسی استفاده شد و در نهایت مدل نیم تغییرنمای نمایی بهترین برازش را نشان داد. مشخصات واریوگرام بدست آمده شامل سقف ۰/۹۲، اثر قطعه ای صفر و دامنه تاثیر آن ۷۵ کیلومتر می باشد. نمودار حاصل از برازش واریوگرام بر روی داده های بارش سالانه به صورت شکل (۴-۱) آورده شده است.



شکل (۴-۱) نیم‌تغییرنمای نمایی برازش داده شده بر روی داده‌ها

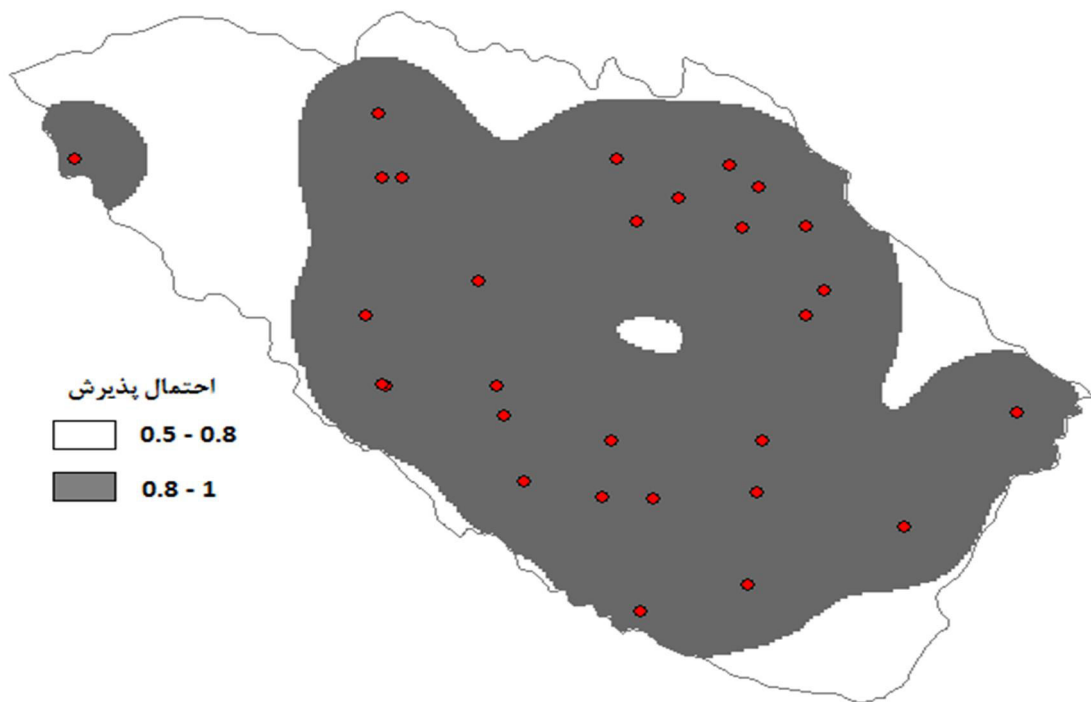
۴-۴ محاسبه احتمال پذیرش و ارزیابی و تقویت شبکه

در این مطالعه از بارندگی سالانه برای ترسیم نقشه‌های هم‌مقدار احتمال پذیرش و ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه استفاده شده است. در ابتدا براساس رابطه ساده شده ی (۳-۱۴) و الگوریتم ارائه شده جهت ارزیابی شبکه فعلی، با استفاده از یک برنامه جانبی در نرم‌افزار ArcGIS و در محیط ModelBuilder که به صورت یک ابزار مستقل در ArcGIS قابل استفاده است. سپس احتمال پذیرش $(P_A(x_0))$ در هر نقطه حوضه به فواصل شبکه ای 500^1 متر محاسبه گردید.

با توجه به توزیع مکانی $(P_A(x_0))$ برای ضریب ثابت $\alpha=0/8$ ، ۷۵ درصد از مساحت حوضه از دقت پذیرش برخوردار هستند. در صورتی که آستانه قابل قبول را برای A_p برابر ۸۰٪ به عنوان معیار ارزیابی شبکه در نظر بگیریم، آنگاه در سطح ۸۰٪ شبکه باران‌سنجی مورد تایید است. اگر بخواهیم کل مساحت حوضه از دقت پذیرش در سطح ۸۰٪ برخوردار باشد ($A_p=100\%$)، شبکه موجود نیاز به افزایش ایستگاه یا جابه‌جایی ایستگاه‌های موجود خواهد داشت. قابل ذکر است که در محل هر ایستگاه، مقدار احتمال پذیرش برابر یک می‌باشد.

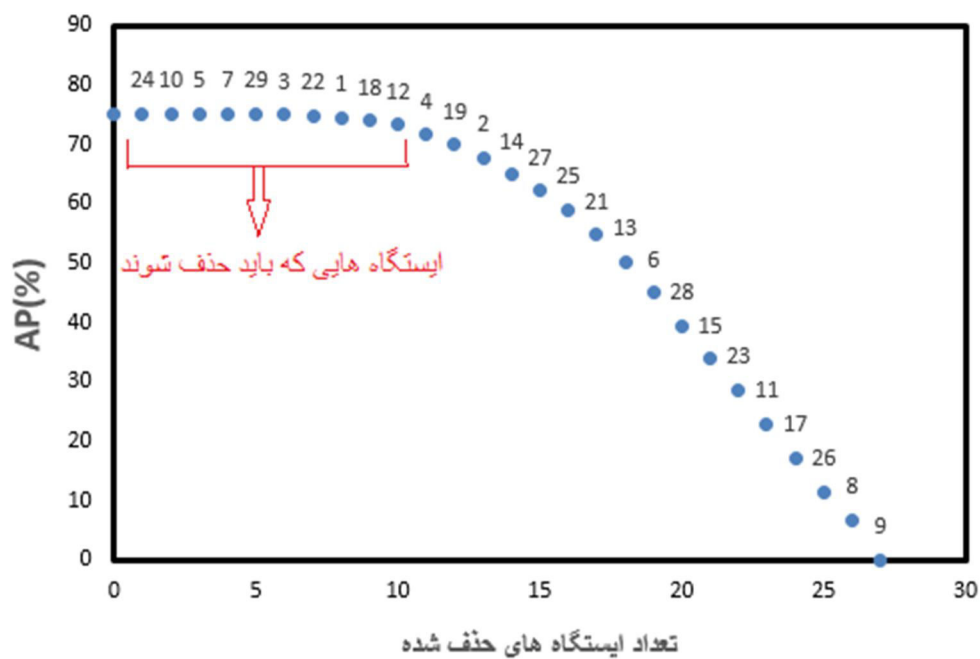
¹ Cell size

چون تخمین‌گر کریجینگ دقیق است و خطای تخمین در محل‌هایی که داده اندازه‌گیری شده دارند صفر می‌باشد و همان‌طور که در شکل (۲-۴) دیده می‌شود، در نزدیکی مرزهای حوضه، احتمال پذیرش کمتر از سایر نقاط حوضه می‌باشد.

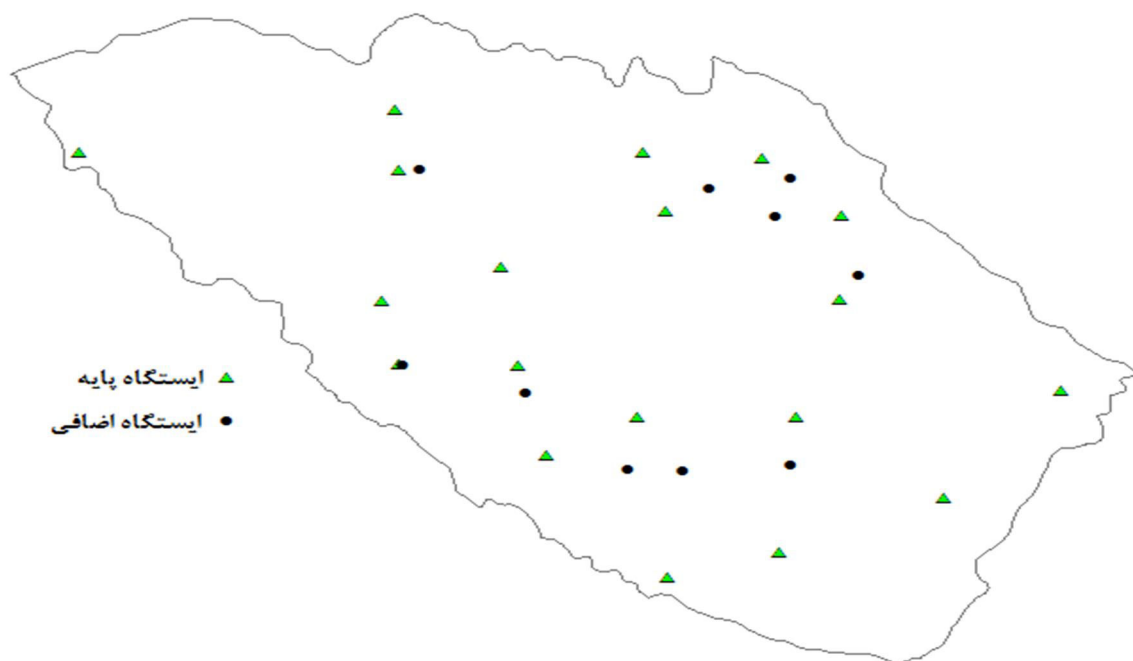


شکل (۲-۴) توزیع مکانی مقادیر احتمال پذیرش و موقعیت ایستگاه‌های موجود (شبکه فعلی)

ارزیابی کارایی شبکه بر مبنای درصدی از مساحت منطقه با دقت پذیرش A_p براساس الگوریتم ارائه شده، انجام شده است. بعد از اتمام الگوریتم، تمامی ایستگاه‌ها براساس نوبت حذف شدنشان در گام سوم اولویت‌بندی شدند و با استفاده از مقادیر A_p مربوط به حذف تک تک ایستگاه‌ها یا معادل آن مجموعه‌ای از ایستگاه‌های باقی‌مانده، نموداری براساس A_p و شماره ایستگاه حذف شده متناظر با آن برای نشان دادن ترتیب اولویت ایستگاه‌ها و کارایی مجموعه بارانسج‌ها در شکل (۳-۴) ترسیم شده است. اعداد روی نمودار بیانگر شماره‌ی ایستگاه حذف شده در هر مرحله است. در شکل (۴-۴) نیز موقعیت نقاط اضافی (نقاطی که می‌توانند حذف شوند) و نقاط پایه شبکه فعلی، مشخص شده است.



شکل (۳-۴) اولویت بندی ایستگاه ها و مقدار Ap متناظر آن ها در سطح $\alpha=0/8$



شکل (۴-۴) موقعیت ایستگاه های پایه و ایستگاه های اضافه در محدوده مطالعاتی

با توجه به شکل (۳-۴)، تعداد ۱۰ ایستگاه، می‌توانند حذف شوند. این ایستگاه‌ها تاثیر کمی در شبکه باران سنج‌های حوضه دارند و موجب صرف هزینه‌هایی اضافی می‌شوند. جدول (۱-۴) مشخصات ایستگاه‌های حذف شده را نشان می‌دهد.

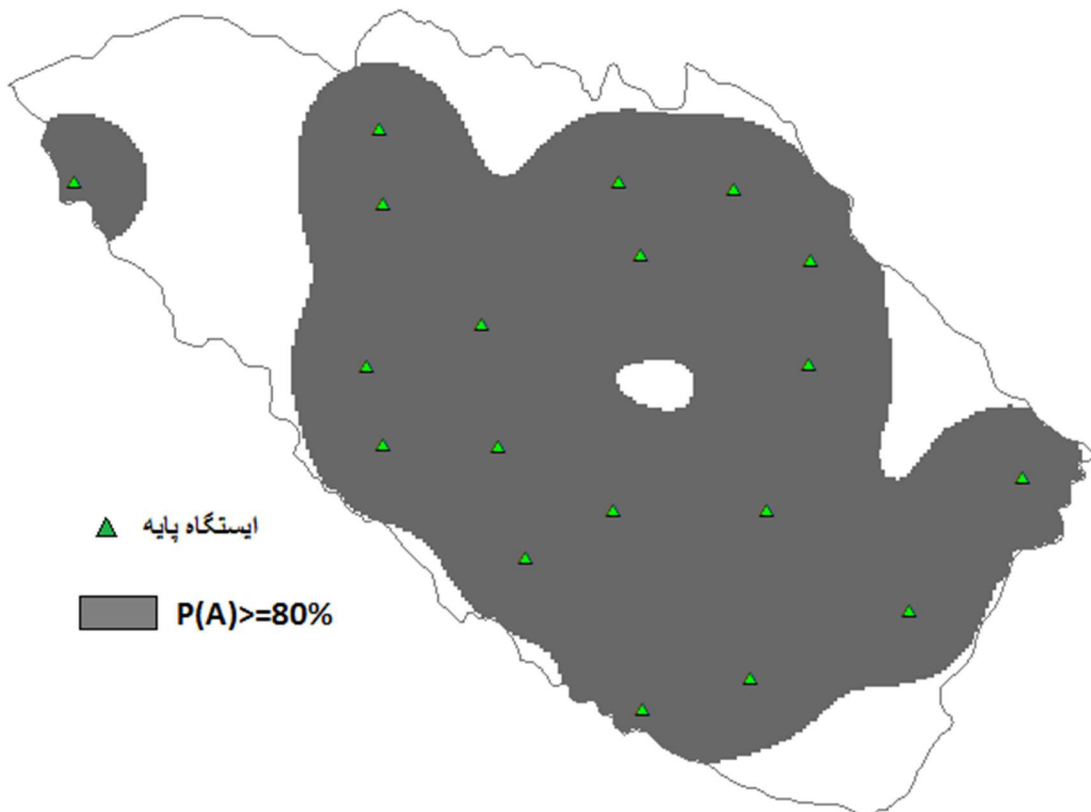
جدول (۱-۴) نام و مشخصات ایستگاه‌هایی که می‌توانند حذف شوند و تاثیر کمی در افزایش دقت شبکه دارند

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	x	y
۲۴	آبقد ارداک	۷۱۹۶۵۳	۴۰۷۱۵۵۵
۱۰	حصار	۷۱۶۰۲۲	۴۰۲۰۷۵۱
۵	دولت آباد	۶۹۴۱۹۷	۴۰۳۴۶۹۸
۷	اداره مشهد	۷۳۱۰۵۱	۴۰۲۱۷۷۹
۲۹	جنگ	۷۳۱۱۳۳	۴۰۷۳۴۹۸
۳	فریزی	۶۷۶۹۴۰	۴۰۳۹۷۲۸
۲۲	جاغرق	۷۰۸۵۰۸	۴۰۲۱۰۰۱
۱	امامزاده رادکان	۶۷۹۲۹۷	۴۰۷۵۰۵۱
۱۸	گوش بالا	۷۲۸۹۱۹	۴۰۶۶۶۳۳
۱۲	سد کارده	۷۴۰۶۹۵	۴۰۵۶۰۹۳

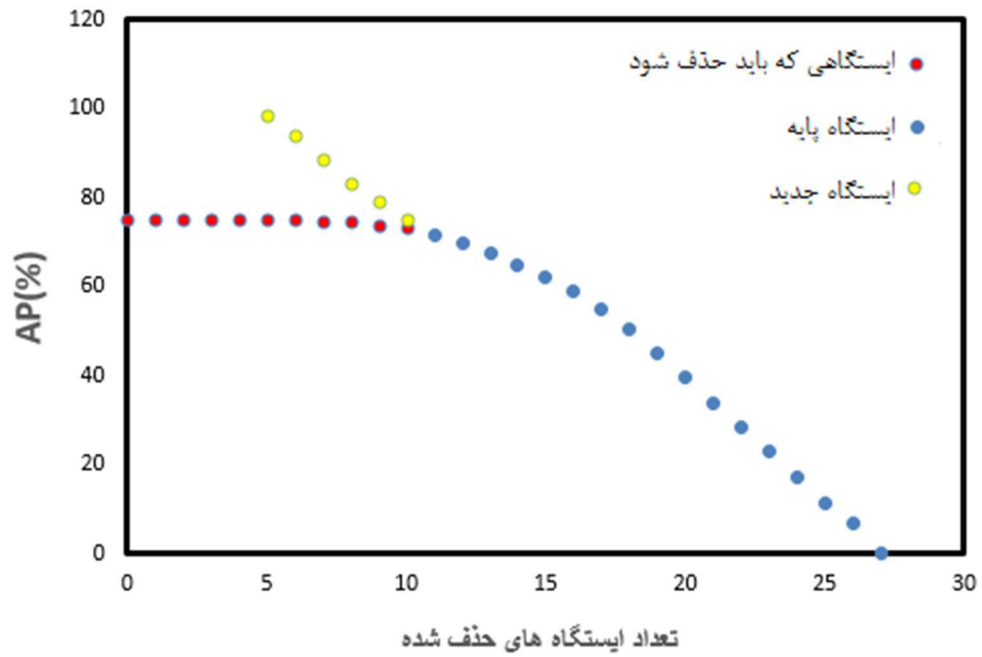
بنابراین ۱۹ ایستگاه باقیمانده، شبکه پایه را تشکیل می‌دهند (شکل ۵-۴). بطوری که A_p متناظر با ایستگاه‌های پایه که برابر ۷۴ درصد می‌باشد، تقریباً برابر A_p تمامی ۲۹ ایستگاه اولیه موجود در حوضه می‌باشد. برای افزایش دقت در شبکه باران سنجی پایه، در نقاطی که $P_A(x_0) < \alpha$ (منطقه سفید رنگ در شکل ۵-۴) با توجه به الگوریتم ارائه شده در رابطه ی (۱۰-۳)، می‌توان به ترتیب نقاطی را که بیشترین A_p را در ترکیب با شبکه باران سنجی پایه می‌دهند، بدست آورد. در جدول (۲-۴) موقعیت ایستگاه‌های پیشنهادی آورده شده است. در این مطالعه با حذف ۱۰ ایستگاه اضافی و با افزودن تنها ۶ ایستگاه در مکان‌های بهینه یافت شده، دقت موردنظر در شبکه با معیار $A_p = 100\%$ فراهم شد (شکل ۶-۴ و ۷-۴).

جدول (۴-۲) موقعیت ایستگاه های اضافه شده به شبکه

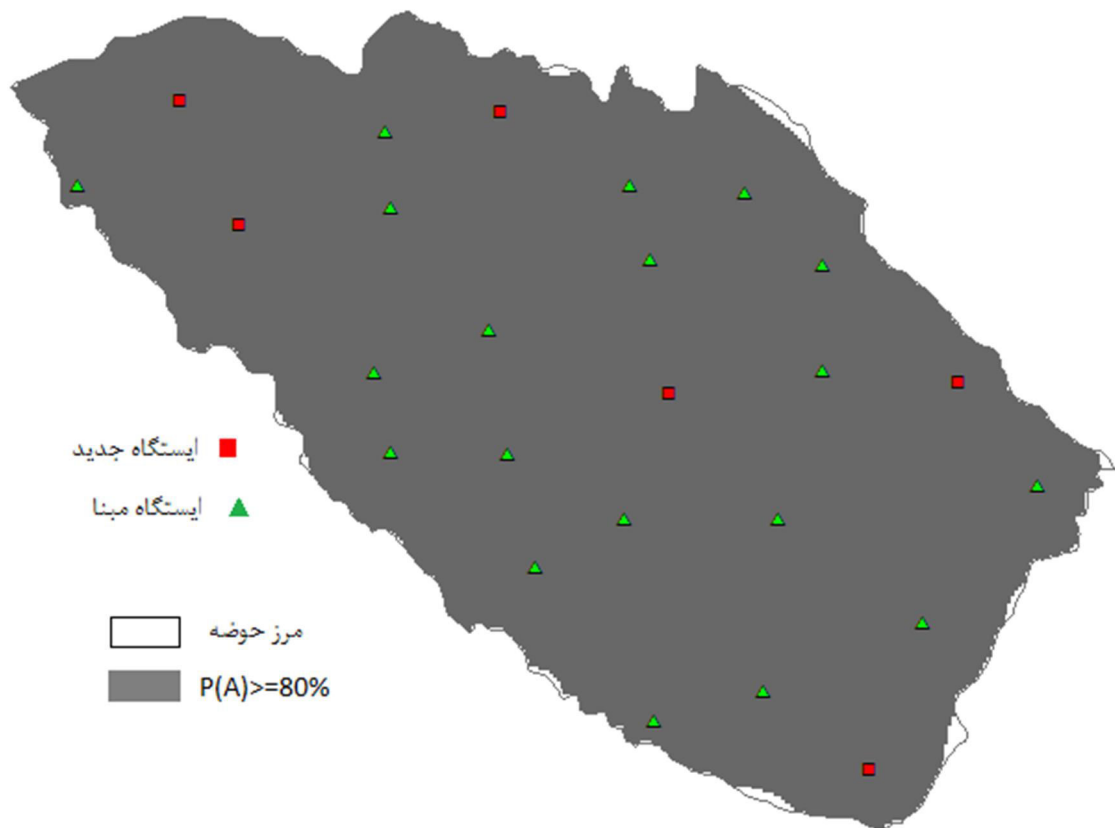
ردیف	x	y	موقعیت ایستگاه پیشنهادی
۱	۷۱۶۱۹۶	۴۰۴۸۶۰۹	میان ولایت
۲	۷۴۴۷۴۵	۳۹۹۴۸۹۳	میامی
۳	۷۵۷۳۸۰	۴۰۵۰۱۵۹	تبادکان
۴	۶۹۲۰۸۰	۴۰۸۸۷۲۹	رادکان
۵	۶۴۶۲۶۵	۴۰۹۰۳۱۱	دوغائی ۱
۶	۶۵۴۷۷۵	۴۰۷۲۷۸۸	دوغائی ۲



شکل (۴-۵) توزیع مکانی مقادیر احتمال پذیرش براساس ایستگاه های پایه



شکل (۴-۶) اولویت بندی ایستگاه ها و مقدار Ap متناظر آن ها در سطح $\alpha=0/8$ پس از تقویت شبکه



شکل (۴-۷) توزیع مکانی مقادیر احتمال پذیرش براساس شبکه تقویت شده

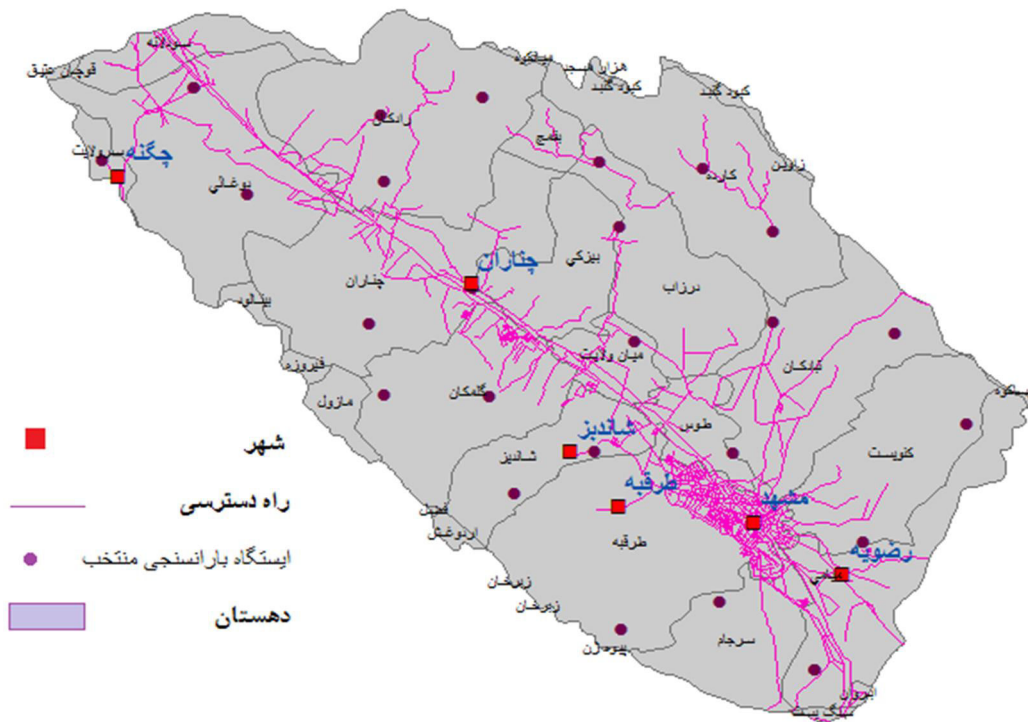
در این مطالعه سطح احتمال پذیرش مورد بررسی، ۸۰٪ انتخاب شده است. دلیل انتخاب این سطح احتمال جهت تقویت کارایی و دقت شبکه پیزومتری، با توجه به موارد زیر می‌باشد:

(۱) با توجه به اهمیت داده‌های ایستگاه‌ها در بحث مهندسی و مدیریت منابع و پروژه‌های آبی، بایستی سطح احتمال پذیرش بالا باشد.

(۲) بودجه در دسترس برای تاسیس و نگهداری از ایستگاه‌ها یکی از عوامل تعیین‌کننده میزان سطح احتمال پذیرش هستند.

طبق نظر چنگ و همکاران (۲۰۰۸)، سطح احتمال پذیرش (α) براساس بودجه و دقت برآورد انتخاب می‌شود و در صورتی که محدودیتی وجود نداشته باشد، α برابر ۰/۸ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین تقویت شبکه موجود، در سطح احتمال ۸۰ درصد انجام شده است.

در انتخاب نقاط برای ایجاد ایستگاه‌های جدید، وجود مراکز جمعیتی و دسترسی به راه‌های فرعی و اصلی مدنظر قرار گرفته است (شکل ۸-۴).



شکل (۴-۸) وضعیت راه‌های دسترسی، شهرها و روستاهای حوضه مشهد

با اضافه شدن نقاط جدید به شبکه فعلی مطابق اشکال (۴-۶) و (۴-۷)، بهبود کارایی شبکه با در نظر گرفتن این نقاط نشان داده شده است.

کارایی شبکه جدید نسبت به قبل حدود ۲۵ درصد بیشتر شده است. این در حالی است که شبکه جدید تنها با ۲۵ ایستگاه به بالاترین عملکرد رسیده است و شبکه قدیمی نیز با ۲۹ ایستگاه، حداکثر دارای عملکرد یا کارایی ۷۵ درصد بوده است. بنابراین شبکه تقویت شده جدید تنها با افزودن ۶ ایستگاه به ایستگاه‌های پایه، قابل طراحی می‌باشد. ۶ ایستگاه جدید را می‌توان با ایستگاه‌هایی که نقش کمی در افزایش دقت و کارایی شبکه دارند جایگزین نمود.

فصل پنجم:

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه گیری

شبکه پایش بارندگی، می‌بایست معرف نسبتاً کاملی از شرایط حوضه باشد، که با تکیه بر داده‌های حاصل از آن به برنامه ریزی و مدیریت جامع منابع آب پرداخت. ارزیابی عملکرد شبکه بارانسنجی در حوضه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. بنابراین همواره وجود یک معیار مناسب برای این امر احساس شده است. روش احتمال پذیرش (چنگ و همکاران، ۲۰۰۸ و شفیعی و همکاران، ۲۰۱۴) می‌تواند به عنوان یک روش ساده و کاربردی، این مسئله را در مطالعات منابع آب حل نماید. از این روش که مبتنی بر مدل زمین‌آماری کریجینگ است برای ارزیابی شبکه پایش بارندگی در حوضه مشهد استفاده شده است که مفهوم آن براساس درصدی از مساحت حوضه با دقت پذیرش Ap می‌باشد. جهت سهولت در محاسبات ابزاری در محیط نرم‌افزار ArcGIS توسعه داده شده است، به طوری که تنها با وارد کردن موقعیت ایستگاه‌ها، مشخصات واریوگرام و مرز حوضه محاسبات قابل انجام است. در واقع هدف این تحقیق ارزیابی و بررسی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه مشهد بر اساس دقت تخمین مکانی بارندگی‌های نقطه‌ای در مقیاس سالانه می‌باشد. این امر بدین معنی است که در هر بخشی از حوضه، بارندگی ناحیه‌ای آن از دقت مناسب برخوردار باشد. در حالی که در روش‌های قبلی مانند روش کاهش واریانس هدف افزایش دقت تخمین در کل حوضه بوده و سایر بخش‌های حوضه را شامل نمی‌شده است. تعداد ایستگاه‌های مورد بررسی در شبکه موجود ۲۹ ایستگاه می‌باشد که ۱۹ ایستگاه به عنوان ایستگاه‌های پایه شناخته شدند و ۱۰ ایستگاه دیگر تاثیر کمی در برآورد پارامتر مورد مطالعه داشتند. در نتیجه برای تقویت شبکه فعلی و با حذف این ۱۰ نقطه، تعداد ۶ نقطه پیشنهادی در نقاطی که احتمال پذیرش کمتر از ۸۰ درصد بود به شبکه پایه اضافه شد که باعث شد میزان Ap، از ۷۵ درصد به ۱۰۰ درصد برسد. نقاط پیشنهادی براساس دسترسی و نقاط جمعیتی منطقه در نظر گرفته شده است.

۲-۵ پیشنهادات

توصیه می‌شود که:

- (۱) از این روش جهت ارزیابی شبکه پایش بارندگی برای سایر حوضه های آبریز کشور استفاده شود.
- (۲) روش احتمال پذیرش مبتنی بر روش‌های دیگر درون‌یابی مانند کوکریجینگ در این منطقه و مناطق دیگر استفاده و با نتایج این تحقیق مقایسه شود.
- (۳) برای پارامترهای دیگر موجود در حوضه مشهد (غیر از شبکه باران سنجی)، این تحقیق تکرار شده و در نهایت به یک شبکه تقویت شده واحد برای این حوضه دست پیدا کنیم.
- (۴) پیشنهاد می‌شود از سایر الگوریتم‌های بهینه‌یابی مانند الگوریتم ژنتیک نیز تقویت شبکه بارانسنجی انجام شود نتایج آن با روش موجود بررسی گردد.
- (۵) پیشنهاد می‌شود که آنالیز اقتصادی تاسیس ایستگاه‌های جدید نیز به نتایج این تحقیق افزوده شود طوری‌که بتوان ارائه کرد، با افزایش هر واحد دقت در شبکه چقدر هزینه‌ها بیشتر می‌شود.

پیوست ها

پیوست ۱: ضرایب همبستگی بین ایستگاه های مستقل و وابسته

ضریب همبستگی بین ایستگاه آبقد فریزی (وابسته) و گلمکان (مستقل)

ایستگاه مستقل (گلمکان)	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
ضریب همبستگی	.۹۵۲	.۹۲۷	.۷۶۳	.۷۱۷	.۶۵۳	.۹۴۶	.۸۹۷	.۹۲۸	.۶۴۵	.۶۵۳	.۳۳۶	.۹۶۴
ایستگاه وابسته (آبقد فریزی)	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور

ضریب همبستگی بین ایستگاه های آبقد ارداک (وابسته) و ارداک بند ساروج (مستقل)

ایستگاه مستقل (ارداک بند)	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
ضریب همبستگی	.۸۳۶	.۷۲۹	.۸۲۶	.۵۷۲	.۷۶	.۸۲۲	.۷۶۲	.۶۶۷	.۳۱۸	.۵۷۶	.۶۲۹	.۶۸۱
ایستگاه وابسته (آبقد ارداک)	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور

ضریب همبستگی بین ایستگاه های فریزی (وابسته) و دولت آباد (مستقل)

ایستگاه مستقل (دولت آباد)	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
ضریب همبستگی	.۹۶۵	.۶۱۷	.۶۵۵	.۸۰۳	.۳۶	.۷۹۵	.۶۴۹	.۷۰۳	.۷۲۲	.۷۶	.۶۷۲	.۹۶۱
ایستگاه وابسته (فریزی)	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور

پیوست ۲: مقدار بارش سالانه ی ایستگاه ها در طول دوره آماری

(خانه های رنگی مربوط به سال هایی است که داده های آن بازسازی شده اند)

ردیف	بارشگی سالیانه (میلی متر)																1393-94
	1379-80	1380-81	1381-82	1382-83	1383-84	1384-85	1385-86	1386-87	1387-88	1388-89	1389-90	1390-91	1391-92	1392-93			
1	149.5	216	230	195.5	226.5	154	239.5	115	236.5	200	249.5	260.5	140	145.5	227		
2	238	305	378.5	294.5	327.5	215.5	342.5	119	279.1	232	317.5	336.5	254	239.5	286		
3	221	358	431.5	249	332.1965032	218.5892446	325.5069514	210.3304566	69	270.8	292.5	381.3	285	240.5	346		
4	116	289	240.5	255	368	185	375	198.5	329	263.5	259	391	272	210	228.5		
5	175.5	203.5	238.5	209	229	109.5	257.5	105.5	260.5	187.5	165.5	266	216	198.5	221.5		
6	197	384	467	333.5	374.5	231.5	421.5	224.5	479	347.5	272	438	306.5	334	369		
7	144.9	192.9	234.7	234.3	270.5	160.5	250.2	153	292.4	204.6	131.3	264.6	236.6	184.1	216.3		
8	166	191.5	251	228	244	107.5	330	136.5	252	203.5	173.5	298.5	235	170.5	210		
9	183	271	280	185	252	121	236	157.5	267	220.5	150	208	183	131	185.5		
10	177	205	246	223.5	267	135	281	140	293	182	126	282	162	159.5	232		
11	148.5	178	177.5	193	178.5	129.5	218	91.5	231	160	77.5	187	196	169.5	189.5		
12	213.5	338	267.5	235	308.5	146.5	285.5	150.5	292.5	292.5	134	259	221.5	179.9	225		
13	168	369	412.5	315.5	396.5	177.5	310.6	129.5	272	362	259	325.5	262.5	245.5	402		
14	210	382.5	447	334.5	422	307	445	170	407	345.5	314.5	411	308.5	240	383.5		
15	179.3	255.8	288.7	289.3	291.8	177.2	324.2	173.9	318.4	191.5	139.7	303	234.2	203.5	262.3		
16	190	254	291	267.5	301	166.5	291	139.5	307	242.3	244	286	227.6	185.5	258.5		
17	224.5	462	432	431	395	286	412.5	182.5	404.9	413	274	394.3	302	303.5	432.8		
18	195	319.5	347.5	312.5	323	166.5	359.5	158	337	316	224	317.5	231.5	205.5	289		
19	166	336	378	303.5	338	163	319.5	183	396.5	285.7	214.5	261	275.5	245	266.9		
20	131	195.5	215	165.2	212.5	83.3	210	84	193.5	159.1	190.8	210.9	199.3	154.5	198		
21	300.5	415.5	409.5	351.5	482.5	189.9	231.5	218	491.5	313.5	238.5	476.8	340	378	404.5		
22	202.5	265	346	295	379.5	168	381.5	185.5	362	277.5	214.5	419.5	362	236	321		
23	152	208	230	188	178.5	190	275	94	227	160	117	188	145	154.5	131		
24	275.4194938	334.5	403	329	483	348	451	222.5	304.5	253.5	215	356	276	247.5	364.5		
25	183	359	378.5	325	361	209	391	183	397	372	377	373	229	233	354		
26	185.3	275	280.5	263.7046947	327.5	170	294	146	313	278	286	388.5	282	228	283		
27	186.5	327	366	417.5	459.5	243.5	394.5	206	371	386.5	302	426.5	303.5	227.5	369.5		
28	108	211	215	214	210.5	122.5	223.5	93.5	231	204.5	227	219	123.5	162.5	225		
29	174	460	502	432	372	222	319	138	357	305	229	328	250	266	375.5		

پیوست ۳: مختصات ایستگاه ها و پارامتر Z (میانگین بارش سالانه مقیاس شده)

ID	Name	X	Y	Z
۱	امامزاده - رادکان	۶۷۹۲۹۷	۴۰۷۵۰۵۱	-۰.۸۹۲
۲	دهانه اخلمد	۶۷۴۰۱۹	۴۰۵۱۶۰۶	۰.۲۴۷
۳	فریزی	۶۷۶۹۴۰	۴۰۳۹۷۲۸	۰.۳۷۲
۴	گلکمان	۶۹۳۱۷۷	۴۰۳۹۸۰۰	۰.۰۵۵
۵	دولت آباد خرم دره	۶۹۴۱۹۷	۴۰۳۴۶۹۸	-۰.۸۱۰
۶	زشک خراسان	۶۹۷۰۲۳	۴۰۲۳۷۴۲	۱.۱۸۴
۷	اداره مشهد	۷۳۱۰۵۱	۴۰۲۱۷۷۹	-۰.۶۸۰
۸	سر آسیاب شانديز	۷۰۹۷۹۸	۴۰۳۰۶۸۶	-۰.۶۵۹
۹	اندرخ	۷۳۸۰۵۸	۴۰۵۱۸۰۸	-۰.۸۱۶
۱۰	حصار - دهیار	۷۱۶۰۲۲	۴۰۲۰۷۵۱	-۰.۷۵۵
۱۱	اولنگ اسدي	۷۵۲۴۷۰	۴۰۱۵۹۰۵	-۱.۲۸۸
۱۲	سد کارده	۷۴۰۶۹۵	۴۰۵۶۰۹۳	-۰.۳۲۳
۱۳	مارشک	۷۲۷۰۵۹	۴۰۷۷۱۵۷	۰.۳۹۲
۱۴	چکنه علیا	۶۳۱۶۷۷	۴۰۷۸۳۲۱	۱.۱۰۹
۱۵	سد طرق	۷۲۹۵۸۷	۴۰۰۶۱۳۲	-۰.۲۵۶
۱۶	اردک بند ساروج	۷۱۳۶۴۸	۴۰۶۷۵۲۴	-۰.۲۴۵
۱۷	بلغور	۷۳۱۸۳۷	۴۰۳۰۵۰۶	۱.۳۳۴
۱۸	گوش بالا	۷۲۸۹۱۹	۴۰۶۶۶۳۳	۰.۱۶۰
۱۹	آل	۷۳۸۱۶۲	۴۰۶۶۷۸۷	۰.۱۹۲
۲۰	چناران	۶۹۰۵۳۸	۴۰۵۷۴۸۲	-۱.۲۵۵
۲۱	مغان	۷۱۴۰۷۰	۴۰۰۱۷۳۹	۱.۲۹۴
۲۲	جاغرق	۷۰۸۵۰۸	۴۰۲۱۰۰۱	۰.۴۹۲
۲۳	هندل آباد	۷۶۸۸۶۸	۴۰۳۵۲۵۱	-۱.۱۸۹
۲۴	آبقد ارداک	۷۱۹۶۵۳	۴۰۷۱۵۵۵	۰.۹۷۵
۲۵	بهمن جان علیا	۶۷۵۸۴۲	۴۰۸۵۷۹۶	۰.۷۲۳
۲۶	آبقد فریزی	۶۷۶۳۹۴	۴۰۴۰۱۱۴	۰.۰۸۴
۲۷	تلغور	۷۱۰۵۴۴	۴۰۷۸۱۸۳	۰.۹۹۱
۲۸	قدیر آباد	۷۸۷۴۰۱	۴۰۷۴۹۸۴	-۱.۱۰۸
۲۹	جنگ	۷۳۱۱۳۳	۴۰۷۳۴۹۸	۰.۶۷۴

منابع

- اکبرزاده، م. ۱۳۸۴. نقدی بر عملکرد مدیریتی وزارت نیرو در بخش آب. شبکه خبری آب ایران، شرکت مدیریت منابع آب ایران.
- www.wnn.ir/html/index.php?name=Sections&req=viewarticle&artid=74&page=1
- امور نظام فنی و اجرایی. ۱۳۹۱. دستورالعمل پایش کیفیت آب‌های زیرزمینی. انتشارات سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، نشریه شماره ۶۲۰، تهران.
- ثقفیان، ب.، رحیمی بندرآبادی، س.، ۱۳۸۴. مقایسه روش‌های درونیایی و برون‌یایی برای برآورد توزیع مکانی مقدار بارندگی سالانه. مجله تحقیقات منابع آب ایران. ۲(۱): ۸۴-۷۴.
- ثقفیان، ب.، ۱۳۹۰. راهنمای روش‌های توزیع مکانی عوامل اقلیمی با استفاده از داده‌های نقطه‌ای. معاونت نظارت راهبردی وزارت نیرو، امور نظام فنی دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا
- حسینی پاک، ع. ا. ۱۳۹۲. زمین آمار. چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- رحیمی بندرآبادی، س.، ثقفیان، ب.، ۱۳۸۹. بهینه‌سازی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی بر مبنای بارش ماهانه و سالانه. مجله علمی-پژوهشی علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران. ۱۲(۴): پائیز ۸۹
- عیوضی، م. و مساعدی، ا. ۱۳۹۱. بررسی الگوی گسترش مکانی بارش در سطح استان گلستان با استفاده از مدل‌های قطعی و زمین‌آمار. نشریه آب و خاک، ۲۶(۱): ۵۳ تا ۶۴.
- مدنی، ح.، ۱۳۷۳. مبانی زمین‌آمار، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. پلی تکنیک تهران، واحد تفرش. ص ۶۵۹.
- Abtew, W., Obeysekera, J., & Shih, G. (1993). Spatial analysis for monthly rainfall in South Florida. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 29(2), 179-188.
- Al-Zahrani, M., & Husain, T. (1998). An algorithm for designing a precipitation network in the south-western region of Saudi Arabia. *Journal of Hydrology*, 205(3-4), 205-216.
- Awadallah, A. G. (2012). Selecting optimum locations of rainfall stations using kriging and entropy. *Int. J. Civil Environ. Eng*, 12(1), 36-41.
- Ball, J. E., & Luk, K. C. (1998). Modeling spatial variability of rainfall over a catchment. *Journal of Hydrologic Engineering*, 3(2), 122-130.
- Baltas, E. A., & Mimikou, M. A. (2009). GIS-based optimisation of the hydrometeorological network in Greece. *International Journal of Digital Earth*, 2(2), 171-185.
- Basalirwa, C. P. K., Ogallo, L. J., & Mutua, F. M. (1993). The design of a regional minimum rain gauge network. *International Journal of Water Resources Development*, 9(4), 411-424.

- Boken, V. K., Hoogenboom, G., Hook, J. E., Thomas, D. L., Guerra, L. C., & Harrison, K. A. (2004). Agricultural water use estimation using geospatial modeling and a geographic information system. *Agricultural Water Management*, 67(3), 185-199.
- Brown, L. C., & Mac Berthouex, P. (2002). *Statistics for environmental engineers*. CRC press.
- Chadalavada, S., & Datta, B. (2008). Dynamic optimal monitoring network design for transient transport of pollutants in groundwater aquifers. *Water Resources Management*, 22(6), 651-670.
- Cheng, K. S., Lin, Y. C., & Liou, J. J. (2008). Rain-gauge network evaluation and augmentation using geostatistics. *Hydrological processes*, 22(14), 2554-2564.
- Chen, Y. C., Wei, C., & Yeh, H. C. (2008). Rainfall network design using kriging and entropy. *Hydrological Processes*, 22(3), 340-346.
- Christakos, G. (2000). *Modern spatiotemporal geostatistics* (Vol. 6). Oxford University Press.
- Dhar, A., & Patil, R. S. (2012). Multiobjective design of groundwater monitoring network under epistemic uncertainty. *Water resources management*, 26(7), 1809-1825.
- Garen, D. C., Johnson, G. L., & Hanson, C. L. (1994). Mean areal precipitation for daily hydrologic modeling in mountainous regions. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 30(3), 481-491.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York, USA.
- Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of hydrology*, 228(1), 113-129.
- Haining, R. (1993). *Spatial data analysis in the social and environmental sciences*. Cambridge University Press.
- Helsel, D. R., Hirsch, R. M. 2002. *Statistical Methods in Water Resources*. Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey, Book 4 (Hydrologic Analysis and Interpretation), chapter A3. USGS. USA.
- Hershfield, D. M. (1965, June). On the spacing of raingages. In Proceedings of the WMO/IASH Symposium on Design of Hydrometeorologic Networks, Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ (Vol. 67, pp. 72-79).
- Hevesi, J. A., Istok, J. D., & Flint, A. L. (1992). Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part I: structural analysis. *Journal of applied meteorology*, 31(7), 661-676.
- Kassim, A. H. M., & Kottegoda, N. T. (1991). Rainfall network design through comparative kriging methods. *Hydrological Sciences Journal*, 36(3), 223-240.

- Lebel, T., Bastin, G., Obled, C., & Creutin, J. D. (1987). On the accuracy of areal rainfall estimation: a case study. *Water Resources Research*, 23(11), 2123-2134.
- Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic geology*, 58(8), 1246-1266.
- McBride, G. B. (2005). *Using statistical methods for water quality management: issues, problems and solutions* (Vol. 19). John Wiley & Sons.
- Mogheir, Y., De Lima, J. L. M. P., & Singh, V. P. (2009). Entropy and multi-objective based approach for groundwater quality monitoring network assessment and redesign. *Water resources management*, 23(8), 1603-1620.
- Mogheir, Y., & Singh, V. P. (2002). Application of information theory to groundwater quality monitoring networks. *Water Resources Management*, 16(1), 37-49.
- Nalder, I. A., & Wein, R. W. (1998). Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and forest meteorology*, 92(4), 211-225.
- Papamichail, D. M., & Metaxa, I. G. (1996). Geostatistical analysis of spatial variability of rainfall and optimal design of a rain gauge network. *Water resources management*, 10(2), 107-127.
- Pardo-Igúzquiza, E. (1998). Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing. *Journal of Hydrology*, 210(1), 206-220.
- Phillips, D. L., Dolph, J., & Marks, D. (1992). A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58(1-2), 119-141.
- Samuel, J., Coulibaly, P., & Kollat, J. (2013). CRDEMO: Combined regionalization and dual entropy-multiobjective optimization for hydrometric network design. *Water Resources Research*, 49(12), 8070-8089.
- Shafiei, M., Ghahraman, B., Saghafian, B., Pande, S., Gharari, S., & Davary, K. (2014). Assessment of rain-gauge networks using a probabilistic GIS based approach. *Hydrology Research*, 45(4-5), 551-562.
- Singh, V. P. (2013). *Entropy theory and its application in environmental and water engineering*. John Wiley & Sons.
- Sun, B., & Peterson, T. C. (2006). Estimating precipitation normals for USCRN stations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D9).
- Su, H. T., & You, G. J. Y. (2014). Developing an entropy-based model of spatial information estimation and its application in the design of precipitation gauge networks. *Journal of hydrology*, 519, 3316-3327.
- Tabios, G. Q., & Salas, J. D. (1985). A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 21(3), 365-380.
- Tsintikidis, D., Georgakakos, K. P., Sperfslage, J. A., Smith, D. E., & Carpenter, T. M. (2002). Precipitation uncertainty and raingauge network design within Folsom Lake watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(2), 175-184.

- Winitzki, S. (2003). Uniform approximations for transcendental functions. *Computational Science and Its Applications—ICCSA 2003*, 962-962.
- WMO (World Meteorological Organization). (1994). *Guide to Hydrological Practices*, WMO-164. WMO: Geneva.
- Bastin, G., Lorent, B., Duque, C., & Gevers, M. (1984). Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of rain gauge locations. *Water Resources Research*, 20(4), 463-470.
- Brown, L. C., & Mac Berthouex, P. (2002). *Statistics for environmental engineers*. CRC press.
- Mishra, A. K., & Coulibaly, P. (2009). Developments in hydrometric network design: A review. *Reviews of Geophysics*, 47(2).
- Mishra, A. K., & Coulibaly, P. (2010). Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of Hydrology*, 380(3), 420-437.
- Ghahraman, B., & Sepaskhah, A. (2001). autographic rain-gage network design for iran by kriging. *Iranian Journal of Science and Technology-Transaction B: Engineering*, 25.

Abstract

Precipitation is considered as the main input in the planning of sustainable water resources development. Efficient measuring network is a network of rainguages which, in addition to the proper and accurate measurement, has a desirable density and spatial distribution, in such a way that it is possible to obtain an appropriate estimation of precipitation in ungauged areas in a basin. In this study, a method was used based on Kriging concept and a normal probability distribution function for evaluating the network of rainguages in Mashhad basin with a total area of 9900 square kilometers. This approach is based on a percentage of region's area with Acceptance Probability (AP) method. First, by analyzing the spatial variations of annual rainfall over the basin using a dimensionless variogram, the spatial structure of the precipitation was extracted and then the proposed algorithm was applied. Of the 34 stations, 5 stations were omitted due to lack of information or insufficient information over the historical period. From remaining 29 stations, 19 stations were detected as base stations where the remaining 10 stations were assessed to have a very little effect on rainfall estimation in the basin. Also it was found that by installing 6 new stations in some ungauged areas of the basin, the accuracy of rainfall estimation can be increased significantly. With the simplifications carried out in this method and the calculations in the GIS, the results revealed that the proposed method can easily be applied for assessment of raingauge networks.

Keywords: Rainfall monitoring network, Kriging, Semivariogram , Acceptance probability method.



Shahrood University of Technology

Faculty of civil engineering

MSc Thesis in Engineering and water resource management

**Rainfall monitoring network optimal design and evaluation
on watershed scale (Case study, Mashhad watershed)**

By: masoud ebrahimi sani

Supervisor:

Dr Saeed Golian

Advisor:

Dr Mojtaba Shafiei

September 2017