



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
گروه اکتشاف معدن

بهبود تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش کریگینگ با روند

بیرونی

دانشجو: محسن یآوری

اساتید راهنما:

دکتر محمد کنشلو

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

آذر ماه ۱۳۹۰

## دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه: اکتشاف معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محسن یاوری

تحت عنوان: بهبود تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش کریگینگ با روند

بیرونی

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد.....مورد ارزیابی و با درجه .....مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : دکتر محمد کنشلو
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : دکتر بهزاد تخمچی
			نام و نام خانوادگی : دکتر حمید آقاجانی

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایشا و از خودگذشتگان...

به پاس عاطفه سرشار و کرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روز کاران بهترین پشتیبان است...

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهمشان به شجاعت می‌کراید...

و به پاس محبت‌های بی‌دینشان که هرگز فروکش نمی‌کند...

این اثر را تقدیمشان می‌کنم...

تقدیم به پدر و مادر عزیزم.

## تشکر و قدردانی

ایزد منان را شاکرم که پس از صرف بیش از یک سال تلاش و کوشش بی‌وقفه، مطالعات و تحقیقات اینجانب در قالب این پایان‌نامه به ثمر نشست. در طول این مدت، عزیزان زیادی اینجانب را همراهی نمودند که بی‌شک، بدون یاری این عزیزان به نتیجه رساندن این اثر ممکن نبود. بر خود لازم می‌دانم از استاد عزیز و گرانمایه‌ام جناب آقای دکتر محمد کنشلو که به عنوان استاد راهنمای اول این پایان‌نامه، در این راه از هیچ تلاشی دریغ ننموده و همواره پشتیبان و راهنمای اینجانب بوده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. همچنین از جناب آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی که به عنوان استاد راهنمای دوم این پایان‌نامه، اینجانب را راهنمایی نمودند، سپاسگزارم. بر خود می‌دانم از مسئولان شرکت اکتشافی زمین کاو گستر که کمال همکاری را در به نتیجه رساندن تحقیقات اینجانب در فصل پنجم این پایان‌نامه داشتند، تشکر ویژه نمایم. از دوستان عزیزم آقایان مهندس اکبر شریفی و مهندس مجتبی باوند سوادکوهی که در امر تدوین و ویرایش اثر پیش‌رو و آقای محمود سیف‌الهی که در مبحث کدنویسی در نرم افزار مطلب، اینجانب را یاری نمودند، کمال تشکر را دارم. از جناب آقایان دکتر بهزاد تخم‌چی و دکتر حمید آقاجانی که داوری این پایان‌نامه را بر عهده داشتند، صمیمانه سپاسگزارم. از تمامی خوانندگان محترم هم ضمن تشکر از انتخاب این اثر برای مطالعه، خواهشمندم انتقادات و پیشنهادات سازنده‌ی خود را از اینجانب دریغ ننموده و اینجانب را در ارتقای هر چه بیشتر این اثر، از طریق مکاتبه با رایانامه به آدرس: [m.yavari.66@gmail.com](mailto:m.yavari.66@gmail.com)، یاری نمایند.

محسن یآوری

آبان ماه ۱۳۹۰

## تعهد نامه

اینجانب محسن یاوری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش اکتشاف از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: **بهبود تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش کریگینگ با روند بیرونی** تحت راهنمایی آقایان دکتر محمد کنشلو و دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی، 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 مورد استفاده استناد شده است.
  - مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون 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 صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
  - حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از این 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 اخلاقی انسانی رعایت شده است.
- تاریخ

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) مربوط به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

امروزه تکنیک‌های زمین آماری حیطة وسیعی از تخمین‌های علوم زمین را به خود اختصاص داده‌اند و استفاده از روش‌های تخمین تک متغیره زمین‌آمارى در صنعت معمول شده است. لیکن روش‌های چند متغیره زمین آماری نسبت به روش‌های تک متغیره از اهمیت بیشتری برخوردار هستند، زیرا توانایی استفاده‌ی بیش از یک متغیر در تخمین مورد نظر را دارا هستند. در این روش‌ها از اطلاعات ثانویه برای کمک به تخمین متغیر اولیه (متغیر هدف) نیز استفاده می‌شود. یکی از روش‌های چند متغیره زمین آماری که در این پایان‌نامه از آن استفاده شده است، روش کریجینگ با روند بیرونی است. در این پایان‌نامه از این روش جهت بهبود تخمین سطح آب زیرزمینی در منطقه‌های مورد مطالعه استفاده شده است.

داده‌های اولیه داده‌های سطح آب زیرزمینی برداشت شده از پیزومترهای حفر شده در این مناطق هستند. اگرچه این داده‌ها دقت بالایی در تعیین سطح آب زیرزمینی در همان نقاط پیزومتر دارند، اما با توجه به تعداد اندک پیزومترها نسبت به وسعت منطقه مورد مطالعه، برای رسیدن به نتایج مناسب، تعداد داده‌های بدست آمده از آنها در تخمین نقاط دیگر کافی نیست. از سوی دیگر افزایش تعداد پیزومترها هزینه قابل توجهی را در بر خواهد داشت. در کنار این داده‌ها، از داده‌های توپوگرافی به عنوان اطلاعات ثانویه یا کمکی که در تخمین سطح آب زیرزمینی می‌توان از آن بهره جست، استفاده شده است. جمع آوری و پردازش داده‌های توپوگرافی از هزینه بسیار کمی برخوردار می‌باشد. علاوه بر این، داده‌های توپوگرافی در منطقه به وفور یافت می‌شوند.

فرضیه مهمی که باید در این مطالعه در نظر گرفت این است که داده‌های توپوگرافی با سطح ایستابی یک سفره آزاد، همبستگی آماری دارند. این موضوع استفاده از توپوگرافی به عنوان روند بیرونی در تخمین سطح آب زیرزمینی با روش کریجینگ با روند بیرونی را ممکن می‌سازد.

حساسیت روش کریگینگ با روند بیرونی نسبت به پارامترهایی مانند ضریب همبستگی بین متغیر اولیه و ثانویه و همچنین مقدار اثر قطعه‌ای در تخمین داده اولیه، سنجیده شده و نتایج ارائه شده‌اند.

در این مطالعه علاوه بر توپوگرافی، از داده‌های ثانویه دیگری نیز استفاده شده است. داده‌ی دیگر، عمق سطح آب زیرزمینی تخمینی با استفاده از مطالعات مقاومت ویژه الکتریکی در منطقه است. استفاده از این دو متغیر به عنوان روند بیرونی، می‌تواند نتایج مطلوب‌تری نسبت به زمانی که فقط از یک متغیر به عنوان روند بیرونی در روش کریگینگ با روند بیرونی استفاده شده است، ارائه دهد. سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش و داده‌های مذکور در حالت یک متغیره و چند متغیره تخمین زده شده و نتایج بدست آمده‌اند. همچنین نتایج حاصل از اعتبارسنجی برای هر یک از تخمین‌های یاد شده، تهیه و در پایان با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

کلمات کلیدی: کریگینگ با روند بیرونی، تخمین سطح آب زیرزمینی، توپوگرافی، حساسیت‌سنجی، مقاومت ویژه الکتریکی.

## لیست مقالات مستخرج از این پایان نامه

۱. یآوری.م، کنشلوم.م، کامکار روحانی.ا، ۱۳۸۹، مقایسه نتایج حاصل از اعتبارسنجی کریگینگ با روند بیرونی و کریگینگ معمولی، ص ۱۸۵ ، بیست و نهمین کنفرانس علوم زمین، تهران



## فهرست مطالب

- فصل اول: مقدمه..... ۱
- ۱-۱ مقدمه..... ۲
- ۲-۱ متغیر ناحیه‌ای و تابع تصادفی..... ۳
- ۳-۱ واریوگرام (تغییرنما)..... ۳
- ۴-۱ تئوری کریگینگ..... ۵
- ۵-۱ کریگینگ با روند بیرونی و تاریخچه آن..... ۶
- ۶-۱ تعریف مسئله، هدف و راه‌کار ارائه شده..... ۹
- ۷-۱ ساختار پایان‌نامه..... ۱۲
- فصل دوم: معرفی روش کریگینگ با روند بیرونی..... ۱۳
- ۱-۲ مقدمه..... ۱۴
- ۲-۲ روش‌های تخمین تک متغیره زمین آماری..... ۱۴
- ۳-۲ روش‌های تخمین چند متغیره زمین آماری..... ۱۵
- ۱-۳-۲ معرفی..... ۱۵
- ۲-۳-۲ تقسیم بندی..... ۱۶
- ۱-۲-۳-۲ روش‌هایی که از اطلاعات ثانویه به صورت جامع استفاده می‌کنند..... ۱۷

- ۲-۳-۲ روش‌هایی که از اطلاعات ثانویه به صورت جامع استفاده نمی‌کنند ..... ۱۸
- ۲-۳-۲-۲ کریگینگ توأم هم موقعیت ..... ۲۰
- ۴-۲ کریگینگ با روند بیرونی ..... ۲۱
- ۱-۴-۲ کریگینگ همراه با یک متغیر به عنوان روند بیرونی ..... ۲۳
- ۲-۴-۲ مراحل تخمین KED ..... ۲۴
- ۳-۴-۲ کریگینگ همراه با دو یا چند نوع متغیر به عنوان روند بیرونی ..... ۲۶
- ۵-۲ جمع بندی و نتیجه گیری ..... ۲۸
- ۱-۵-۲ مزیت‌های کریگینگ با روند بیرونی ..... ۲۸
- ۲-۵-۲ محدودیت‌های کریگینگ با روند بیرونی ..... ۲۹
- فصل سوم: حساسیت‌سنجی روش کریگینگ با روند بیرونی ..... ۳۰**
- ۳-۱ مقدمه ..... ۳۱
- ۳-۲ اعتبار سنجی ..... ۳۱
- ۳-۳ حساسیت‌سنجی KED ..... ۳۲
- ۱-۳-۳ تولید مدل مصنوعی ..... ۳۲
- ۲-۳-۳ حساسیت‌سنجی KED نسبت به ضریب همبستگی ..... ۳۳
- ۱-۲-۳-۳ تولید داده های ثانویه ..... ۳۳
- ۲-۲-۳-۳ محاسبه پارامترهای مقایسه ..... ۳۳
- ۳-۲-۳-۳ نتایج ..... ۳۵
- ۳-۳-۳ حساسیت سنجی KED نسبت به اثر قطعه‌ای ..... ۳۹

- ۳-۳-۱ نتایج حاصل از حساسیت‌سنجی KED نسبت به اثر قطعه‌ای ..... ۴۰
- ۳-۴ جمع بندی کلی ..... ۴۷
- فصل چهارم: تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش کریگینگ با روند بیرونی ..... ۴۸
- ۴-۱ مقدمه ..... ۴۹
- ۴-۲ منطقه مورد مطالعه ..... ۵۰
- ۴-۳ داده‌های به کار گرفته شده در تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت چناران ..... ۵۱
- ۴-۴ تحلیل ساختاری ..... ۵۱
- ۴-۵ مطالعات تحلیل ساختاری روی داده‌ها ..... ۵۲
- ۴-۵-۱ داده‌های پیزومتریک ..... ۵۲
- ۴-۵-۲ داده‌های توپوگرافی ..... ۵۴
- ۴-۶ تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت چناران ..... ۵۶
- ۴-۶-۱ شبکه تخمین ..... ۵۷
- ۴-۶-۲ تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش OK ..... ۵۷
- ۴-۶-۳ تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش KED ..... ۵۸
- ۴-۷ اعتبارسنجی روش‌های تخمین به کار برده شده ..... ۵۹
- ۴-۷-۱ نتایج حاصل از اعتبار سنجی روش‌های تخمین به کار برده شده ..... ۵۹
- ۴-۷-۲ مقایسه و تحلیل نتایج حاصل از اعتبارسنجی ..... ۶۰

۶۱ ..... ۸-۴ جمع بندی و نتیجه گیری

فصل پنجم: تخمین سطح آب زیر زمینی با استفاده از روش کریگینگ همراه با چند متغیر

۶۲ ..... به عنوان روند بیرونی

۶۳ ..... ۱-۵ مقدمه

۶۴ ..... ۲-۵ منطقه مورد مطالعه

۶۴ ..... ۳-۵ داده‌ها

۶۵ ..... ۳-۵-۱ داده‌های اصلی

۶۶ ..... ۳-۵-۲ داده‌های ثانویه

۶۶ ..... ۳-۵-۱-۲-۱ داده‌های توپوگرافی

۶۷ ..... ۳-۵-۲-۲-۲ داده‌های ژئوالکتریک

۶۸ ..... ۴-۵ مطالعات تحلیل ساختاری روی داده‌ها

۶۸ ..... ۳-۵-۱-۴-۱ داده‌های پیزومتریک

۶۹ ..... ۳-۵-۲-۴-۲ داده‌های توپوگرافی

۷۱ ..... ۳-۵-۴-۳ داده‌های ژئوالکتریک

۷۳ ..... ۵-۵ تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت دامغان

۷۴ ..... ۵-۵-۱ مشخصات شبکه تخمین

۷۴ ..... ۵-۵-۲ تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از رگرسیون خطی

۷۶ ..... ۵-۵-۳ تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش کریگینگ معمولی

۴-۵-۵ تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش KED و استفاده از داده‌های توپوگرافی	۷۷
به عنوان روند بیرونی .....	
۵-۵-۵ تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش KED و استفاده از داده‌های ژئوالکتریک	۷۸
به عنوان روند بیرونی .....	
۶-۵-۵ تخمین سطح آب زیرزمینی با روش KED و با استفاده از دو داده توپوگرافی و	
ژئوالکتریک به عنوان روند بیرونی .....	۷۹
۶-۵-۶ اعتبارسنجی روش‌های تخمین به کار برده شده.....	۸۰
۱-۶-۵ نتایج حاصل از اعتبارسنجی روش‌های تخمین به کار گرفته شده .....	۸۰
۲-۶-۵ تحلیل نتایج اعتبارسنجی و جمع‌بندی .....	۸۱
<b>فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....</b>	
۱-۶ نتیجه‌گیری.....	۸۴
۲-۶ پیشنهادات.....	۸۷
<b>پیوست‌ها.....</b>	
۱-۹۰ اعتبارسنجی.....	۹۰
۲-۹۳ تحلیل ساختاری.....	۹۳
۱-۹۴ واریوگرافی.....	۹۴
۱-۹۴ محاسبه واریوگرام تجربی.....	۹۴
۱-۹۵ محاسبه واریوگرام تجربی در دو بعد (صفحه).....	۹۵

- ۳-۱ محاسبه واریوگرام تجربی در سه بعد (فضا) ..... ۹۵
- ۴-۱ برازش دادن مدل واریوگرام ..... ۹۶
- ۵-۱ برازش دستی ..... ۹۷
- ۶-۱ برازش اتوماتیک ..... ۹۸
- ۲- ناهمسانگردی ..... ۹۹
- ۱-۲ ناهمسانگردی هندسی ..... ۹۹
- ۲-۲ ناهمسانگردی زونال ..... ۱۰۰
- ۳- شعاع همسایگی ..... ۱۰۱
- پیوست ۳: تخمین و شبیه سازی ..... ۱۰۳
- ویژگی های تخمین و شبیه سازی ..... ۱۰۳
- منابع و ماخذ ..... ۱۰۷
- References ..... ۱۰۸

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ واریوگرام تجربی و مدل تئوری برازش شده بر آن به همراه دامنه و سقف آن..... ۵
- شکل ۱-۲ موقعیت داده‌های پیزومتریک و داده‌های توپوگرافی نسبت به یکدیگر و استفاده از داده‌های توپوگرافی در تخمین سطح آب زیرزمینی در نقاطی که داده‌های پیزومتریک موجود نیستند..... ۱۱
- شکل ۲-۱ شمایی از تخمین کریگینگ همراه با روند بیرونی با معرفی پارامترهای فرمول آن..... ۲۵
- شکل ۳-۱ مقادیر شیب خط رگرسیون در مقابل ضریب همبستگی..... ۳۶
- شکل ۳-۲ مقادیر ضریب تعیین در مقابل ضرایب همبستگی داده‌های اولیه و ثانویه..... ۳۶
- شکل ۳-۳ واریانس خطای تخمین در مقابل ضرایب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه..... ۳۷
- شکل ۳-۴ میانگین خطای تخمین در مقابل ضرایب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه..... ۳۸
- شکل ۳-۵ حساسیت‌سنجی KED نسبت به اثر قطعه‌ای با استفاده از ضریب تعیین خط رگرسیون برازش داده شده به نمودار پراکندگی مقادیر تخمینی در مقابل مقادیر واقعی. ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه در بالای هر نمودار ارائه شده‌اند..... ۴۲
- شکل ۳-۶ حساسیت‌سنجی KED نسبت به اثر قطعه‌ای با استفاده از تغییرات شیب خط رگرسیون برازش داده شده به نمودار پراکندگی مقادیر تخمینی در مقابل مقادیر واقعی. ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه در بالای هر نمودار ارائه شده‌اند..... ۴۳
- شکل ۳-۷ حساسیت‌سنجی KED نسبت به اثر قطعه‌ای با استفاده از میانگین خطای تخمین. ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه در بالای هر نمودار ارائه شده‌اند..... ۴۵
- شکل ۳-۸ حساسیت‌سنجی KED نسبت به اثر نقطه‌ای با استفاده از واریانس خطای تخمین. ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه در بالای هر نمودار ارائه شده‌اند..... ۴۶
- شکل ۴-۱ واریوگرام تجربی و مدل واریوگرام مکعبی برازش داده شده بر داده‌های پیزومتریک برداشت شده در دشت چناران مشهد..... ۵۳
- شکل ۴-۲ موقعیت داده‌های پیزومتریک برداشت شده در دشت چناران مشهد در مختصات قراردادی. ارتفاع تقریبی سطح آب زیرزمینی در هر پیزومتر در نوارمدرج سمت راست نقشه نشان داده شده است..... ۵۴
- شکل ۴-۳ واریوگرام تجربی و مدل مکعبی برازش داده شده بر داده‌های توپوگرافی برداشت شده در دشت چناران..... ۵۵

شکل ۴-۴ موقعیت داده‌های توپوگرافی برداشت شده در دشت چناران مشهد در مختصات قراردادی. مقدار این داده‌ها در نوار مدرج سمت راست شکل نشان داده شده است. ۵۶.....

شکل ۴-۵ سطح آب زیرزمینی تخمین زده شده با استفاده از روش OK و به کارگیری داده‌های پیزومتریک در دشت چناران. ۵۸.....

شکل ۴-۶ نقشه سطح آب زیرزمینی تخمین زده شده در دشت چناران با استفاده از روش KED. ۵۹.....

شکل ۵-۱ نقشه موقعیت داده‌های پیزومتریک موجود در منطقه دشت دامغان. مقدار کمی این داده‌ها در نوار سمت راست نقشه نشان داده شده است. ۶۵.....

شکل ۵-۲ موقعیت داده‌های توپوگرافی برداشت شده در دشت دامغان که به عنوان داده‌های ثانویه در تخمین سطح آب زیرزمینی به کار گرفته شده‌اند. مقدار تقریبی داده‌های موجود از سطح آب‌های آزاد در نوار کنار نقشه نشان داده شده است. ۶۶.....

شکل ۵-۳ نقشه موقعیت جغرافیایی داده‌های ژئوالکتریک برداشت شده در دشت دامغان. مقدار تقریبی این داده‌ها در نوار سمت راست شکل نشان داده شده است. ۶۸.....

شکل ۵-۴ واریوگرام تجربی داده‌های پیزومتریک و مدل کروی برازش داده شده بر آن همراه با اثر قطعه‌ای. ۶۹.....

شکل ۵-۵ واریوگرام تجربی و مدل واریوگرام کروی برازش داده شده بر داده‌های توپوگرافی برداشت شده در دشت دامغان که به عنوان روند بیرونی در تخمین سطح آب زیرزمینی در منطقه به کار گرفته شده‌اند. ۷۰.....

شکل ۵-۶ نقشه داده‌های توپوگرافی تخمین زده شده با استفاده از مدل مکعبی برازش داده شده در نقاط هدف در دشت دامغان. ۷۱.....

شکل ۵-۷ واریوگرام تجربی و مدل واریوگرام مکعبی برازش داده شده بر داده‌های ژئوالکتریک در دشت دامغان. ۷۲.....

شکل ۵-۸ تخمین داده‌های ژئوالکتریک با استفاده از مدل واریوگرام مکعبی برازش داده شده و با روش تخمین زمین آماری کریگینگ معمولی در دشت دامغان. مقدار داده‌ها در نوار سمت راست شکل نشان داده شده است. ۷۳.....

شکل ۵-۹ رگرسیون خطی بین داده‌های پیزومتریک و توپوگرافی و رابطه خطی بین پیزومتریک و توپوگرافی. ۷۵.....

شکل ۵-۱۰ نقشه کنتوری سطح آب زیرزمینی که با استفاده از داده‌های پیزومتریک بدست آمده از رگرسیون خطی در دشت دامغان تهیه شده‌اند. ۷۶.....

شکل ۵-۱۱ سطح آب زیرزمینی تخمین زده شده با روش کریگینگ معمولی و با استفاده از داده‌های پیزومتریک در دشت دامغان. ۷۷.....



- شکل ۵-۱۲ سطح آب زیرزمین تخمین زده شده با روش KED و استفاده از داده‌های پیزومتریک به عنوان داده اولیه و داده‌های توپوگرافی به عنوان روند بیرونی در منطقه دشت دامغان..... ۷۸
- شکل ۵-۱۳ سطح آب زیرزمینی تخمین زده شده با استفاده روش KED و به کار گرفتن داده‌های پیزومتریک به عنوان داده اولیه و داده‌های ژئوالکتریک به عنوان روند بیرونی در دشت دامغان..... ۷۹
- شکل ۵-۱۴ نقشه سطح آب زیرزمینی تخمین زده شده با روش کریگینگ همراه با داده‌های توپوگرافی ژئوالکتریک به عنوان روندهای بیرونی در دشت دامغان..... ۸۰

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۴-۱ نتایج حاصل از اعتبارسنجی روش‌های تخمین به کار گرفته شده برای تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت چناران..... ۶۰
- جدول ۵-۱ نتایج حاصل از اعتبار سنجی روش‌های تخمین به کار گرفته شده برای تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت دامغان. بهترین نتایج به صورت پر رنگ و ضعیف ترین نتایج به صورت کج نمایش داده شده‌اند..... ۸۱

# فصل اول:

مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

زمین‌آمار یکی از شاخه‌های ریاضیات کاربردی است که در مهندسی معدن از حدود پنج دهه گذشته برای بهبود تخمین ذخیره به کار گرفته شده است. پس از این که برای اولین بار در آفریقای جنوبی مهندس معدنی به نام دی. جی. کریگ<sup>۱</sup> و آماردانی نام اچ. اس. سیچل<sup>۲</sup>، از روش‌های آماری در تخمین ذخیره استفاده کردند، تکنیک‌های زمین‌آمار و کاربرد عدیده آنها به مرور مورد توجه مهندسی معدن فرانسوی قرار گرفت. این امر، پروفیسور جورج مترون<sup>۳</sup>، استاد مدرسه عالی معدن پاریس، را بر آن داشت تا با استفاده از مفاهیم ابتدائی که توسط کریگ مطرح شده بود، چهارچوب مستحکمی به نام تئوری متغیر ناحیه‌ای<sup>۴</sup> را بنیان گذارد. زمین‌آمار در حال حاضر شامل تعداد بسیاری روش‌ها، فرضیات و تکنیک‌ها است [۱].

اساسی‌ترین مفاهیمی که به صورت معمول در زمین‌آمار به کار می‌روند شامل: متغیر ناحیه‌ای و تابع تصادفی<sup>۵</sup>، فرضیات پایایی<sup>۶</sup> و ذاتی<sup>۷</sup>، واریوگرام (تغییرنما)<sup>۸</sup>، همبستگی<sup>۹</sup>، و ... می‌باشند.

---

<sup>1</sup> D. G. Krige

<sup>2</sup> H. S. Sichel

<sup>3</sup> Georges Matheron

<sup>4</sup> Regionalized Variable

<sup>5</sup> Random Function

<sup>6</sup> Stationary

<sup>7</sup> Intrinsic

<sup>8</sup> Variogram

<sup>9</sup> Correlation

## ۲-۱ متغیر ناحیه‌ای و تابع تصادفی

متغیر ناحیه‌ای  $Z(x)$  متغیری است که نسبت به تغییر موقعیت فضایی حساسیت نشان می‌دهد. این متغیر در مقیاس‌های محلی دارای تغییرات تصادفی و در مقیاس‌های بزرگ می‌تواند دارای ساختار باشد [۲].

مقدار مشاهده‌ای در هر نقطه  $(x)$  به صورت  $Z(x)$  و تحت عنوان یک خروجی از متغیر تصادفی  $Z(x)$  در نظر گرفته می‌شود. در نقاطی که اندازه‌گیری انجام نشده است، مقادیری برای  $Z(x)$  بر اساس متغیر تصادفی  $Z(x)$  تعریف می‌شود. در ریاضیات مجموعه این متغیرهای تصادفی را تحت عنوان تابع تصادفی معرفی می‌کنند [۲].

## ۳-۱ واریوگرام (تغییر نما)

تعریف ریاضی واریوگرام به صورت زیر ارائه شده است:

$$\gamma(h) = 0.5 \text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] \quad (1-1)$$

که  $x$  موقعیت نقطه هدف<sup>۱</sup> و  $h$  فاصله بین هدف و نقطه مورد نظر است. برای متغیرهای ذاتی و در حالت پایا، میانگین عبارت  $Z(x+h) - Z(x)$  برابر با صفر می‌باشد که  $x$  و  $x+h$  نقاط معلوم هستند. بنابراین، واریوگرام برابر با میانگین مربع اختلاف‌های این دو مقدار می‌باشد: [۲]

$$\gamma(h) = 0.5 E [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (2-1)$$

<sup>1</sup> Target point

عبارت (۳-۱) تحت عنوان واریوگرام تجربی<sup>۱</sup> معرفی می‌شود. مدل‌های واریوگرامی که در تخمین به کار می‌روند، تحت عنوان واریوگرام تئوری<sup>۲</sup> معرفی می‌شوند که به صورت‌های مختلفی مانند نمایی، کروی، گوسی، و ... وجود دارند و از برازش دادن بر واریوگرام تجربی منتج شده‌اند.

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

زمانی که واریوگرام به مقدار ثابتی رسید، مقدار واریوگرام در آن نقطه را برابر با سقف<sup>۳</sup> و مقدار  $h$  را به نام دامنه<sup>۴</sup> در نظر می‌گیرند. به عبارت دیگر فاصله‌ای را که واریوگرام در آن به سقف می‌رسد را دامنه می‌نامند. در شکل ۱-۱ واریوگرام تجربی و مدل برازش شده بر آن به همراه دامنه و سقف آن نشان داده شده است. واریوگرام در  $h$ های با مقادیر بیش از دامنه در بررسی تغییرات همبستگی داده‌ها ناتوان است. به دیگر سخن همبستگی بین داده‌ها در فواصل بزرگتر از دامنه، صفر در نظر گرفته می‌شود. مقدار دامنه را ناحیه تاثیر<sup>۵</sup> واریوگرام نیز می‌نامند [۲].

---

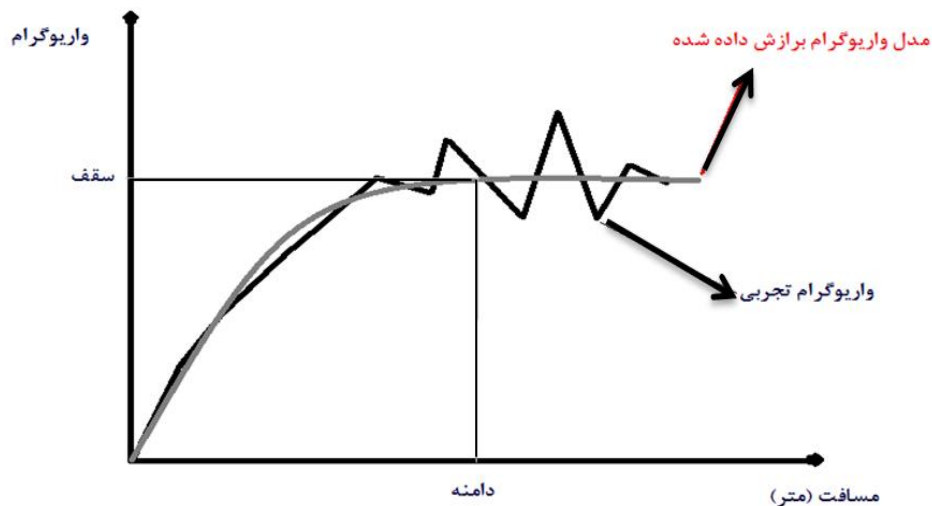
<sup>1</sup> Experimental Variogram

<sup>2</sup> Theoretical Variogram

<sup>3</sup> Sill

<sup>4</sup> Range

<sup>5</sup> Zone Of Influence



شکل ۱-۱ واریوگرام تجربی و مدل تئوری برازش شده بر آن به همراه دامنه و سقف آن.

#### ۴-۱ تئوری کریگینگ

نمونه برداری تنها راهی است که می‌توان به کمک آن اطلاعاتی راجع به نقاط داده‌ای<sup>۱</sup> بدست آورد. از طرفی امکان برداشت نمونه در تمام نقاط مورد نظر امکان‌پذیر نیست. بنابراین اطلاعاتی راجع به نقاطی که نمونه برداشت نشده است، با این روش بدست نمی‌آید. از این رو نیاز مبرم به روشی که بتواند تخمینی تا حد ممکن نزدیک به واقعیت در نقاط فاقد نمونه بدهد، وجود دارد. اعتبار تخمینی که برای این مقادیر زده می‌شود بستگی به عوامل زیر دارد: [۲]

۱- تعداد و صحت نمونه‌های برداشت شده.

۲- موقعیت نمونه‌ها نسبت به هدف (پوشش فضایی).

۳- فاصله بین نمونه‌ها با نقاط یا بلوک‌هایی که باید تخمین زده شوند. (انتظار می‌رود تخمین

در نقاط هدف نزدیک به نمونه‌ها نسبت به نقاط دورتر، از صحت بیشتری برخوردار باشد).

<sup>۱</sup> Data points

۴- پیوستگی فضایی متغیر مورد نظر (تخمین متغیری که دارای تغییرات منظم است و نوسانات کمتری دارد، ساده‌تر است).

کریگینگ روش تخمینی است که تمام شرایط بالا را در نظر می‌گیرد و در واقع بهترین تخمین گر خطی نااریب<sup>۱</sup> است. یعنی تخمین‌گری است که به صورت یک ترکیب خطی از داده‌ها بوده و می‌تواند نوعی میانگین وزن‌دار متحرک محسوب گردد که به ازای هر نقطه معلوم، مقدار تخمینی با آن دقیقاً برابر خواهد بود. در ضمن در کریگینگ دو شرط: الف) امید ریاضی خطا برابر با صفر و ب) کمینه کردن واریانس خطای تخمین اعمال شده است. (برای کسب اطلاعات بیشتر به کتاب‌های مقدمه‌ای بر زمین‌آمار خطی نوشته خانم آرمسترانگ و مدل‌سازی زمین‌آماري ناپیوستگی فضایی اثر آقایان شیلس و دلفینر مراجعه شود) [۲].

## ۱-۵ کریگینگ با روند بیرونی و تاریخچه آن

اساس روش کریگینگ همراه با روند بیرونی<sup>۲</sup> توسط آقای پروفیسور جورج مترون ( G. Matheron, 1963) پایه‌گذاری و بعدها در زمینه‌های گوناگون توسعه داده شده است. جدول ۱-۱ یک روند کلی از پایه‌گذاری و استفاده از KED در زمینه‌های گوناگون طی سال‌های ۲۰۰۸-۱۹۶۳ را نشان می‌دهد.

KED یکی از روش‌های چند متغیره زمین‌آماري است که همان گونه که در جدول ۱-۱ مشاهده می‌شود، دارای کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف مخصوصاً علوم زمین، می‌باشد که بر اساس منابع موجود، استفاده از این روش نتایج بهتری برای تخمین مورد نظر تهیه کرده است. در

<sup>1</sup> Unbias

<sup>2</sup> Kriging with External Dirft, KED

تمام مطالعات انجام شده با استفاده از این روش به حداقل دو نوع داده نیاز است که در فصل دوم مفصلاً در این مورد بحث شده است.



جدول ۱-۱ تاریخچه کریگینگ همراه با روند بیرونی و کاربردهای آن در سال‌های ۲۰۰۸ - ۱۹۶۳

سال	پژوهشگر	زمینه استفاده از کریگینگ همراه با روند بیرونی
۱۹۶۳	Matheron. J.	مطرح کردن روش کریگینگ همراه با روند بیرونی [۳]
۱۹۸۴	Mar'echal. A.	شناسایی گسل‌ها در معدن با استفاده از عیار ماده معدنی به عنوان روند بیرونی [۴]
۱۹۸۷	Ahmed. S. et al.	بررسی روابط بین خواص ژئوفیزیکی و هیدرولیکی آب‌های زیرزمینی در محیط‌های متخلخل و چگونگی تعریف آن‌ها [۵]
۱۹۸۷	Che. A. et al.	مطالعات لرزه و استفاده از داده‌های لرزه برای تخمین عمق لایه‌ها با استفاده از داده‌های حفاری به عنوان داده اولیه
۱۹۹۱	Chilès J. et al.	کاربرد کریگینگ همراه با روند بیرونی در حوزه نفت و هیدروژئولوژی [۳]
۱۹۹۴	Hudson. G. et al.	ترکیب دما و داده‌های DEM و مدل سازی دما [۶]
۱۹۹۶	Pauly et al.	ترسیم نقشه‌های کیفیت هوا با استفاده از DEM
۱۹۹۸	Zquiza. E. P.al.	تخمین میزان بارش با استفاده از توپوگرافی به عنوان روند بیرونی [۷]
۲۰۰۰	Goovaerts et al.	ترکیب داده‌های بارش باران و مدل ارتفاع دیجیتالی (DEM) [۸]
۲۰۰۰	Troisi. S. et al.	تخمین رسانش هیدرولیکی در منطقه با استفاده از داده‌های مقاومت الکتریکی [۹]
۲۰۰۴	Bourennane. H.	تخمین افق‌های خاک با استفاده از مقاومت ویژه الکتریکی و توپوگرافی [۱۰]
۲۰۰۸	Wakernagel. H. et al.	مطالعه امواج الکترومغناطیس در منطقه مورد مطالعه [۱۱]
۲۰۰۸	Baume. O. et al.	مدل سازی زمین آماری انتشار صوت در محیط [۱۲]
۲۰۰۸	Degan. G. A. et al.	بهبود کاهش نویز در فضای محدود شده با استفاده از زمین آمار [۱۳]
۲۰۰۸	Rivest. M. et al.	تعیین هد هیدرولیکی با استفاده از اطلاعات مدل مفهومی به عنوان روند بیرونی [۱۴]
۲۰۰۸	Anderlinden. K. et al.	درون یابی رطوبت خاک با استفاده از اطلاعات رادار FDR [۱۵]

## ۱-۶ تعریف مسئله، هدف و راه کار ارائه شده

تخمین سطح آب زیرزمینی همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است، مخصوصاً در حال حاضر که آب‌های زیرزمینی به یکی از منابع اصلی تامین آب مورد نیاز برای مصارف گوناگون از جمله آشامیدن، کشاورزی، صنعت و... تبدیل شده‌اند. آنچه در تخمین یک متغیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، این است که بتوان ضمن بالا بردن دقت تخمین مورد نظر تا حد ممکن از هزینه‌های موجود نیز کاست. بنابراین طرح راه‌کاری که بتوان به کمک آن تا حد ممکن به این دو هدف نایل شد، ضروری می‌باشد.

هدف اصلی مطالعات انجام شده در این پایان‌نامه بهبود تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش کریگینگ با روند بیرونی است. تخمین سطح آب زیرزمینی را می‌توان با استفاده از حفر پیزومترها و اندازه‌گیری مستقیم سطح آب در هر نقطه بدست آورد. این راه را می‌توان به عنوان دقیق‌ترین راه موجود در هر تخمین معرفی کرد که در واقع همان اندازه‌گیری مستقیم متغیر مورد نظر در نقطه هدف می‌باشد. اما مسئله اینجاست که حفر این پیزومترها از هزینه بسیاری برخوردار است و اگر به تعداد کمی پیزومتر هم اکتفا کنیم، دقت و صحت تخمین کاهش خواهد یافت.

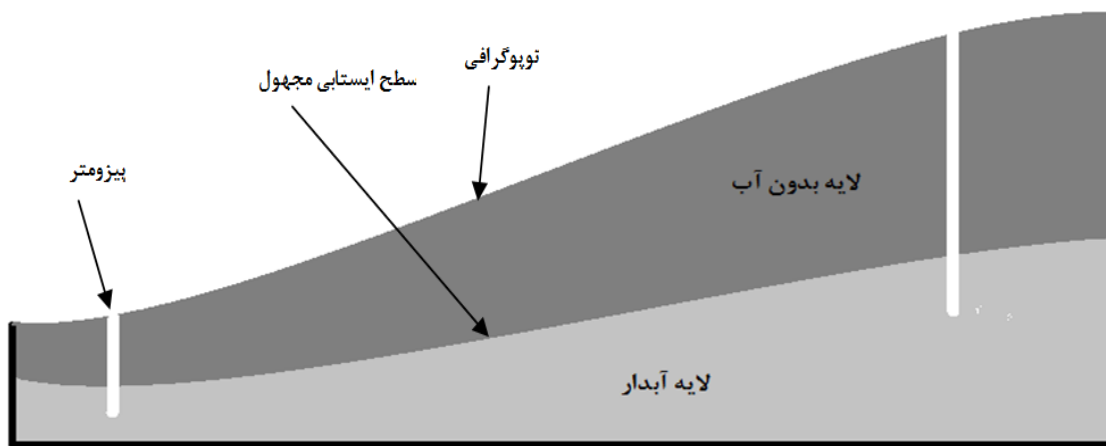
راه‌های غیرمستقیم دیگری نیز برای تخمین سطح آب زیرزمینی وجود دارند که شامل روش‌های ژئوفیزیکی مانند برداشت مقاومت ویژه الکتریکی در منطقه مورد نظر می‌باشد. اما این روش‌ها نیز گرچه ممکن است نسبت به حفر پیزومترها از هزینه کمتری برخوردار باشند، اما علاوه بر هزینه‌های قابل توجهی که همراه دارند، دارای کاستی‌هایی مانند دشواری تفسیر نتایج بدست آمده نیز می‌باشند [۹].

وجود مسائلی این چنین، ما را بر آن داشت تا به دنبال راه‌کاری باشیم که بتوان تا حد ممکن مشکلات موجود را برطرف کرد. روش KED یکی از روش‌های چند متغیره زمین آماری است که می‌تواند در حد قابل توجهی مشکلاتی را که در تخمین سطح آب زیرزمینی به آن‌ها اشاره شد، را

مرتفع کند. در همین راستا، در این پایان نامه از این روش برای بهبود تخمین سطح آب زیرزمینی استفاده شده است. گرچه این روش قبلاً نیز در مطالعات آبخوان‌های زیرزمینی به کار گرفته شده است، اما در مطالعاتی که تا به حال انجام شده است، از نوع داده‌هایی که در این تحقیق به کار برده شده است، استفاده نشده است و همچنین هدف مطالعه نیز با هدفی که در این پایان‌نامه مد نظر است، متفاوت بوده است. به عنوان مثال در سال ۲۰۰۲ آقای دسباراتس و همکارانش (A. Desbarats et al)، به کمک روش KED مطالعاتی روی تخمین سطح آب زیرزمینی انجام داده‌اند، اما آنها برای این کار از داده‌های رسانش هیدرولیکی و داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی استفاده نموده‌اند [۱۶].

در این پایان‌نامه برای تخمین سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد نظر، از داده‌های پیزومتریک و داده‌های توپوگرافی و داده‌های عمق سطح آب زیرزمینی منتج از اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی استفاده شده است. مطالعاتی که در راستای موضوع این پایان‌نامه انجام شده‌اند، برای اولین بار در کشور عزیزمان انجام شده و سعی شده تا حد ممکن بتوان این مطالعات را کاربردی کرد.

همان‌طور که عنوان شد، راه‌کاری که در این تحقیق از آن استفاده شده است، استفاده از داده‌های توپوگرافی در تخمین سطح آب زیرزمینی است. اساس این کار وجود همبستگی آماری بین داده‌های توپوگرافی و داده‌های پیزومتریک (سطح ایستابی) می‌باشد. این همبستگی به صورت شماتیک در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ موقعیت داده‌های پیزومتریک و داده‌های توپوگرافی نسبت به یکدیگر و استفاده از داده‌های توپوگرافی در تخمین سطح آب زیرزمینی در نقاطی که داده‌های پیزومتریک موجود نیستند.

داده‌های توپوگرافی نسبت به سایر داده‌های برداشت شده برای مطالعات مختلف در علوم زمین، از هزینه‌های کمتری برخوردار بوده و به فراوانی یافت می‌شوند. حال اگر بتوان از این داده‌ها به نوعی در تخمین داده‌هایی مانند داده‌های پیزومتریک استفاده کرد، می‌توان ادعا کرد که هم از هزینه‌های تخمین مورد نظر کاسته‌ایم و هم به لحاظ فراوانی داده‌ها، دقت تخمین را بهبود داده‌ایم که در واقع هدف اصلی این مطالعه نیز همین موارد بوده است. این امر با استفاده از روش تخمین زمین‌آماري کریگینگ با روند بیرونی میسر خواهد بود. به دلیل این که در کنار داده‌های پیزومتریک و داده‌های توپوگرافی برداشت شده در منطقه مورد نظر، داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی نیز موجود بودند، از این داده‌ها نیز در تخمین سطح آب زیرزمینی استفاده کرده‌ایم تا بتوان دقت تخمین را بهینه کرد. نکته‌ای که باید مد نظر داشت این است که تخمین سطح آب زیرزمینی در این پایان‌نامه صرفاً به عنوان یک مطالعه موردی انجام شده و از تفسیرهای ژئوفیزیکی در این زمینه خودداری شده است.

در این تحقیق از نرم افزار زمین آماری WinGSLIB1.5.6® جهت انجام مطالعات تحلیل ساختاری<sup>۱</sup> داده‌های مورد نظر استفاده شده است. همچنین از نرم افزار زمین آماری

<sup>1</sup> Structural analysis

SGEMS2.1beta® جهت انجام شبیه‌سازی داده‌های به کار گرفته شده در مبحث حساسیت‌سنجی<sup>۱</sup> استفاده شده است. از نرم افزار MATLAB7® برای نوشتن کد مورد نیاز برای کریگینگ همراه با چند متغیر به عنوان روند بیرونی استفاده شده است. نقشه‌های کنترلی موجود نیز در محیط نرم افزار 9® surfer تهیه شده‌اند.

## ۷-۱ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه مشتمل بر شش فصل است؛ فصل اول تحت عنوان مقدمه ارائه شده است که در آن به مقدمه‌ای بر اصول تخمین‌های زمین آماری و همچنین معرفی روش کریگینگ با روند بیرونی و تاریخچه آن به صورت مختصر پرداخته شده است. در فصل دوم روش کریگینگ همراه با روند بیرونی مفصلاً معرفی شده است. در این فصل همچنین برخی از روش‌های تخمین چند متغیره زمین آماری به اختصار معرفی شده‌اند. در فصل سوم به حساسیت‌سنجی روش KED نسبت به پارامترهای اساسی برای این روش پرداخته خواهد شد. در فصل چهارم، با استفاده از یک مطالعه موردی در دشت چناران مشهد، سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش KED تخمین زده شده است. در فصل پنجم نیز با استفاده از یک مطالعه موردی دیگر در منطقه دشت دامغان، سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش کریگینگ همراه با چند متغیر به عنوان روند بیرونی<sup>۲</sup> تخمین زده شده است. فصل ششم شامل نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مطالب ارائه شده در این پایان‌نامه و همچنین ارائه پیشنهاداتی بر اساس نتایجی که از مطالعات انجام شده در این پایان‌نامه بدست آمده است، می‌باشد. سعی شده در انتهای هر فصل به صورت خلاصه نتایج حاصل شده از آن فصل ارائه شود. در فصل آخر این نتایج به صورت توام و قابل قیاس با یکدیگر ارائه شده‌اند.

<sup>1</sup> Sensitivity

<sup>2</sup> Kriging with Multiple External- Drifts

## فصل دوم:

معرفی روش کریگینگ باروندیرونی

## ۲-۱ مقدمه

در برخی موارد در مطالعات زمین آماری داده‌هایی وجود دارند که علیرغم دقت بالایی که دارند، ممکن است تعداد آنها برای تخمین متغیر مورد نظر کافی نباشد یا همبستگی فضایی بین آنها ضعیف باشد. در چنین شرایطی روش‌های معمول تخمین زمین آماری مانند کریگینگ معمولی، نتایج مناسبی را ارائه نمی‌دهند و باید از روش‌های دیگری استفاده کرد. روش‌های چند متغیره در زمین‌آمار علاوه بر استفاده از داده‌های اولیه یا اصلی (که مد نظر تخمین هستند)، از اطلاعات دیگری تحت عنوان داده ثانویه یا کمکی به صورت‌های مختلف در تخمین متغیر اولیه استفاده می‌کنند. داده‌های ثانویه داده‌هایی هستند که اولاً روی همان منطقه‌ای که داده‌های اولیه برداشت شده‌اند، تهیه شده‌اند، ثانیاً با داده اولیه همبستگی آماری دارند و همچنین دارای مزیت‌هایی چون فراوان بودن و هزینه کم برداشت، نسبت به داده اولیه می‌باشند و نهایتاً اطلاعاتی در خصوص داده اولیه به ما می‌دهند.

در این فصل در ابتدا روش‌های تخمین تک متغیره زمین آماری به اختصار معرفی خواهند شد. سپس انواع روش‌های تخمین چند متغیره زمین آماری معرفی خواهند شد. در پایان نیز روش KED که یکی از روش‌های تخمین چند متغیره زمین آماری است، به تفصیل معرفی خواهد شد. شایان ذکر است که در این فصل صرفاً به روش‌های زمین‌آمار خطی پرداخته شده است.

## ۲-۲ روش‌های تخمین تک متغیره زمین آماری

روش‌های تخمین تک متغیره زمین آماری، روش‌هایی هستند که برای تخمین متغیر مورد نظر تنها از اطلاعات موجود از همان متغیر برای تخمین آن در نقاط هدف استفاده می‌کنند. از مهم‌ترین روش‌های تخمین تک متغیره که بر اساس کریگینگ عمل می‌کنند، می‌توان به روش‌های کریگینگ معمولی<sup>۱</sup> (OK) اشاره کرد. کریگینگ معمولی در زمانی به کار می‌رود که میانگین متغیر مورد نظر

<sup>۱</sup> Ordinary kriging

معلوم نباشد. یکی دیگر از این روش‌ها، روش کریگینگ ساده<sup>۱</sup> است که در زمانی که میانگین متغیر مورد نظر معلوم باشد، از روش کریگینگ ساده استفاده می‌شود [۸].

## ۲-۳ روش‌های تخمین چند متغیره زمین آماری

### ۲-۳-۱ معرفی

اطلاعات موجود در یک پدیده طبیعی را به ندرت می‌توان با استفاده از مجموعه‌ای از نقاط نمونه‌ای، که محدود به یک متغیر هستند، به خوبی بدست آورد. در علوم کاربردی زمین، چهار منبع زیر برای تهیه اطلاعات از پدیده مورد نظر وجود دارد:

۱- مقادیر عددی یک متغیر در نقاط دیگر (داده اولیه).

۲- مقادیر عددی متغیرهای احتمالی دیگر که در موقعیت‌های<sup>۲</sup> دیگر قرار دارند (داده ثانویه).

۳- رابطه فیزیکی بین متغیرها.

۴- اطلاعات عملی-کاربردی.

در عمل، در اکثر مطالعات مربوط به علوم زمین از بیش از یک متغیر استفاده می‌شود. برای مثال می‌توان یک مخزن نفتی را در نظر گرفت. در این زمینه می‌دانیم که گمانه‌های حفاری سازندهای مختلف زمین شناسی را قطع می‌کنند. در این گمانه‌ها علاوه بر عمق می‌توان جهت و شیب سازند مورد نظر را مشخص کرد. مخزن مورد نظر توسط پارامترهای مختلفی چون نفوذپذیری، تخلخل و میزان اشباع آب و ... توصیف می‌شود. این پارامترها کم و بیش با عمق دارای رابطه هستند.

<sup>1</sup> Simple Kriging

<sup>2</sup> Locations



بنابراین برای تخمین عمق یک سازند علاوه بر داده‌های حفاری می‌توان از هر یک از پارامترهای نام برده استفاده کرد. این امر به واسطه‌ی استفاده از روش‌های تخمین چند متغیره در زمین‌آمار امکان‌پذیر است [۳].

در واقع روش‌های چند متغیره در زمین‌آمار برای تخمین متغیر مورد نظر از متغیرهای دیگری نیز استفاده می‌کنند. این روش‌ها بر اساس نحوه استفاده از اطلاعات ثانویه در تخمین متغیر اولیه به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند.

در ادامه، ابتدا به صورت خلاصه برخی از روش‌های چند متغیره زمین‌آمار معرفی خواهند شد. سپس به طور مفصل‌تر به معرفی روش کریگینگ با روند بیرونی، که مورد نظر این پایان‌نامه است، پرداخته خواهد شد.

### ۲-۳-۲ تقسیم بندی

در برخی از روش‌های چند متغیره در زمین‌آمار که اساس آنها کریگینگ است، از اطلاعات ثانویه به صورت جامع<sup>۱</sup> استفاده می‌شود و در واقع این اطلاعات با تمام جزئیات در تخمین استفاده می‌شوند. از این نوع روش‌ها می‌توان به کریگینگ لایه‌ای<sup>۲</sup> (KWS)، کریگینگ ساده با میانگین محلی متغیر<sup>۳</sup> (SKlm)، و کریگینگ با روند بیرونی اشاره کرد. در برخی دیگر از این روش‌ها اطلاعات ثانویه به صورت جامع در تخمین به کار گرفته نمی‌شوند که به روش‌های از این قبیل می‌توان به کریگینگ توأم<sup>۴</sup>، کریگینگ توأم هم موقعیت<sup>۵</sup>، و ... اشاره کرد [۸].

<sup>۱</sup> Exhaustively

<sup>۲</sup> KWS: Kriging With Strata,

<sup>۳</sup> SKlm: Simple Kriging with varying local mean,

<sup>۴</sup> Cokriging

<sup>۵</sup> Colocated Cokriging

در یک جمع بندی کلی می‌توان این روش‌ها را در دو دسته اصلی جای داد؛ دسته اول روش‌هایی که از اطلاعات ثانویه به صورت جامع استفاده می‌کنند و دسته دوم روش‌هایی که از اطلاعات ثانویه به صورت جامع استفاده نمی‌کنند. در ادامه این روش‌ها به صورت مختصر معرفی می‌شوند. برای اطلاعات بیشتر می‌توان به کتاب زمین‌آمار برای ارزیابی ذخایر طبیعی نوشته آقای گووآرتس (Goovaerts) مراجعه کرد [۸].

### ۲-۳-۲-۱ روش‌هایی که از اطلاعات ثانویه به صورت جامع استفاده می‌کنند

انواع روش‌هایی که از این ویژگی برخوردار هستند، قبلاً نام برده شدند. محدودیت اصلی این روش‌ها این است که زمانی که از این روش‌ها استفاده می‌شود، باید داده‌های ثانویه در تمام نقاط هدف تخمین وجود داشته باشند. علاوه بر این در برخی از این روش‌ها مانند KED، این اطلاعات باید در نقاط داده اولیه هم موجود باشند. در اینجا چون بیشتر روش کریگینگ با روند بیرونی مد نظر ما است، از دو روش معرفی شده‌ی دیگر صرف نظر کرده و فقط کلیات آنها را به صورت خیلی مختصر بیان می‌کنیم. برای مطالعه بیشتر در این زمینه می‌توان به منبع ذکر شده در این زمینه مراجعه کرد.

### ۲-۳-۲-۱-۱ کریگینگ لایه‌ای

کریگینگ لایه‌ای در ابتدا منطقه مورد مطالعه را بر اساس داده‌های ثانویه موجود لایه‌بندی می‌کند. سپس در هر لایه با توجه به داده اولیه و به تبعیت از داده‌های ثانویه، داده اولیه مورد نظر را تخمین می‌زند [۸].

### ۲-۳-۲-۱-۲ کریگینگ ساده با میانگین محلی متحرک

استفاده از داده‌های ثانویه در این روش تشابه زیادی به روش کریگینگ با روند بیرونی دارد که در ادامه توضیح داده شده است [۸].

### ۲-۳-۲-۱-۳ کریگینگ با روند بیرونی

در این فصل این روش به صورت کامل معرفی و توصیف خواهد شد. در واقع در این روش با استفاده از رابطه‌ی موجود بین داده‌های اولیه و ثانویه، از داده‌های ثانویه برای هدایت تخمین داده‌های اولیه استفاده می‌شود. استفاده از داده‌های ثانویه در کنار داده‌های اولیه منجر به بهبود تخمین داده‌های اولیه خواهد شد. این روش بنا به استفاده از تعداد نوع داده ثانویه‌ای که در تخمین داده اولیه به کار می‌گیرد، به دو نوع کریگینگ همراه با یک متغیر به عنوان روند بیرونی و کریگینگ همراه با چند متغیر به عنوان روند بیرونی تقسیم می‌شود که هر یک به تفصیل در بندهای بعدی معرفی خواهند شد. در پایان این فصل KED به اختصار با سایر روش‌های معرفی شده، مقایسه شده است.

### ۲-۲-۳-۲ روش‌هایی که از اطلاعات ثانویه به صورت جامع استفاده نمی‌کنند

همان طور که قبلاً ذکر شد، از مهمترین روش‌ها در این زمینه می‌توان به روش‌های کریگینگ توأم (که خود به دو صورت معمولی و ساده وجود دارد)، کریگینگ توأم هم موقعیت (که آن نیز به دو صورت معمولی و ساده وجود دارد)، کریگینگ فاکتوری چند متغیره<sup>۱</sup> و روش‌هایی از این قبیل اشاره کرد. روش‌هایی که از داده ثانویه به صورت جامع استفاده نمی‌کنند، بر اساس کریگینگ توأم و با در نظر گرفتن همبستگی متقاطع فضایی<sup>۲</sup> بین متغیرهای اولیه و ثانویه کار می‌کنند [۸].

پرداختن به جزئیات این روش‌ها در چهارچوب این پایان‌نامه نمی‌گنجد لیکن در ادامه سعی شده است برخی از این روش‌ها به اختصار توضیح داده شوند.

### ۲-۳-۲-۱-۲ کریگینگ توأم معمولی

هرگاه میانگین متغیر مورد نظر معلوم باشد از کریگینگ توأم ساده و در غیر این صورت از کریگینگ توأم معمولی استفاده می‌شود. به دلیل این که معمولاً در مطالعاتی که انجام می‌شود،

<sup>1</sup> Multivariate factorial kriging

<sup>2</sup> Spatial cross correlation

میانگین داده‌ها معلوم نیست، کریگینگ توأم معمولی رایج‌تر از نوع ساده آن است. این روش بر اساس وزن‌دهی به داده‌های اولیه و ثانویه موجود در شعاع جستجوی مورد نظر تخمین می‌زند. اگر داده‌های اولیه را با  $Z$  و داده‌های ثانویه را با  $Y$  نشان دهیم، مقدار داده اولیه تخمین زده شده در نقطه هدف به صورت رابطه (۱-۲) بدست می‌آید: [۱۷]

$$Z^* = \sum_{i=1}^n a_i Z_i + \sum_{j=1}^m b_j Y_j \quad (1-2)$$

در این رابطه،  $a_i$  اوزان کریگینگ برای داده‌های اولیه در  $n$  نقطه و  $b_j$  اوزان کریگینگ برای داده‌های ثانویه در  $m$  نقطه است که در همسایگی نقطه هدف قرار دارند. در این رابطه مجموع اوزان برای داده‌های اولیه برابر با یک و مجموع داده‌های ثانویه برابر صفر است [۱۷].

در این روش برخلاف روش KED، باید مطالعات تحلیل ساختاری روی داده‌های ثانویه انجام گیرد. زیرا در کریگینگ توأم به مدل تابع کوواریانس، برای هرگروه از داده‌های ثانویه، نیاز است. همچنین باید واریوگرام متقاطع<sup>۱</sup> بین داده‌های ثانویه و اولیه محاسبه شود. بنابراین با افزایش تعداد داده‌های ثانویه، تعداد مدل‌های کوواریانسی که باید محاسبه شود افزایش می‌یابد و حجم محاسبات به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد که منجر به این می‌شود که در عمل به ندرت از کریگینگ توأم استفاده می‌شود. دلیل دیگری که باعث می‌شود از کریگینگ توأم به ندرت استفاده شود این است که نقشه‌هایی که از این روش بدست می‌آیند شبیه به نقشه‌هایی است که به کمک روش‌های تخمین معمول مانند کریگینگ معمولی و با استفاده از فقط داده‌های اولیه بدست آمده‌اند. این مشکل مخصوصاً در جایی که داده‌های اولیه و ثانویه هم موقعیت باشند، به چشم می‌خورد. در این حالت در

<sup>1</sup> Cross variogram

اطراف نقطه‌ای که درون یابی می‌شود، داده‌های اولیه وزن بیشتری نسبت به داده ثانویه‌ای که در فاصله نزدیک‌تری هستند، به خود اختصاص می‌دهند. به این پدیده اثر صفحه‌ای<sup>۱</sup> می‌گویند [۱۷].

زمانی که داده ثانویه از تراکم بالایی برخوردار باشد، ماتریس سمت چپ کریگینگ توأم ممکن است ناپایدار گردد زیرا همبستگی بین داده‌های ثانویه در این حالت بسیار بیشتر از همبستگی بین داده‌های اولیه با فاصله زیاد از هم می‌باشد. همچنین در این حالت همان طور که قبلاً اشاره شد، داده‌های ثانویه در نقاطی که داده اولیه نامعلوم است، اثر صفحه‌ای را پدید می‌آورند [۸].

### ۲-۲-۲-۳-۲ کریگینگ توأم هم موقعیت

کریگینگ توأم هم موقعیت در واقع خلاصه شده‌ای از کریگینگ توأم است. در این روش فقط داده‌های ثانویه هم موقعیت با داده اولیه در نظر گرفته می‌شوند. مشروط بر آنکه داده‌های ثانویه در تمام نقاط هدف تخمین موجود باشند. اساس تخمین گر کریگینگ توأم هم موقعیت به صورت رابطه (۲-۲) است:

$$Z^* = \sum_{i=1}^n a_i [Z_i - \bar{Z}] + b[Y - \bar{Y}] \quad (2-2)$$

که در آن  $Z$  و  $Y$  به ترتیب داده اولیه و ثانویه و  $a_i$  و  $b$  به ترتیب اوزان کریگینگ برای داده‌های اولیه و وزن داده ثانویه در نقطه هدف هستند.  $\bar{Z}$  و  $\bar{Y}$  به ترتیب میانگین متغیر اولیه و ثانویه هستند [۱۷].

با استفاده از این تکنیک، فقط به استنتاج تابع کوواریانس بین داده‌های اولیه نیاز است و اگر همبستگی کمی هم بین داده‌های اولیه و ثانویه برقرار باشد، دیگر نتایج حاصل با نقشه داده اولیه که از روش‌های یک متغیره بدست آورده شده است، تشابهی ندارد. نقص این روش در نظر نگرفتن داده‌های ثانویه‌ای است که در محدوده مورد نظر با داده‌های اصلی هم موقعیت نیستند. مشابه

<sup>1</sup> Screen effect

کریگینگ توأم، در این روش نیز اثر صفحه‌ای به چشم می‌خورد. این روش تشابه زیادی به روش KED دارد اما با این وجود هنوز هم از منظر محاسباتی پیچیده‌تر و کسل کننده‌تر از آن است [۱۷].

### ۲-۳-۲-۳-۲ کریگینگ فاکتوری چند متغیره

به منظور درک بهتر، این روش با یک مثال شرح داده شده است؛ بسیاری از فرایندهای فیزیکی که ناشی از زمین شناسی منطقه یا مرتبط با فعالیت‌های انسانی هستند، تمرکز فلزات را در محدوده مورد مطالعه مورد تاثیر قرار می‌دهند. بر همین اساس ممکن است در برخی موارد بتوان بین ساختار فضایی یک متغیر با متغیر دیگر یک رابطه برقرار کرد که این رابطه در یک مقیاس معین برقرار است. به این رابطه، وابسته به مقیاس<sup>۱</sup> گفته می‌شود چرا که با تغییر مقیاس تغییر می‌کند. روش کریگینگ فاکتوری چندگانه امکان تحلیل روابط بین متغیرها در مقیاس‌های فضایی که با استفاده از واریوگرام‌های تجربی بدست آمده‌اند، را فراهم می‌کند. این روش در زمینه‌های گوناگونی مانند ژئوشیمی، علوم مرتبط با خاک، هیدروژئولوژی، معدن و ... به کار گرفته شده است [۸].

### ۲-۴ کریگینگ با روند بیرونی

فرضیه اصلی در این روش این است که مانند رگرسیون، امید ریاضی متغیر اولیه تابعی از متغیر

ثانویه است که با  $Y(x)$  مشخص می‌شود و به صورت رابطه (۲-۳) تعریف می‌شود:

$$E [Z(x)] = Y(x) \quad (۲-۳)$$

برای رسیدن به انعطاف بیشتر معمولا مدل به صورت رابطه (۲-۴) تعریف می‌شود:

$$E [Z(x)] = a_0 + a_1 \cdot Y(x) \quad (۲-۴)$$

<sup>۱</sup> Scale dependence

که ضرایب  $a_0$  و  $a_1$  نامعلوم هستند. ضرایب  $a_0$  و  $a_1$  در معادله بالا ترکیبات خطی خطا هستند که برای فیلتر کردن روند<sup>۱</sup> محلی داده‌های ثانویه به کار می‌روند [۹].

نکات مهمی که باید در حین استفاده از این رابطه در نظر گرفت، شامل موارد زیر است:

۱- میانگین محلی داده اولیه  $z$  در موقعیت  $x$  با داده ثانویه  $y$  دارای یک رابطه خطی است. این فرض باید برقرار باشد که می‌توان آن را هم از ارزیابی داده‌ها و هم از لحاظ فیزیک مسئله بررسی کرد. برای مثال کاملاً واضح است که زمان‌های رفت و برگشت لرزه‌ای که سطح یک لایه را در زیر زمین نشان می‌دهند، به صورت خطی با عمق آن لایه در رابطه هستند. این امر هم در فیزیک مسئله دیده می‌شود و هم می‌توان با استفاده از محاسبات ریاضی در داده‌های یاد شده این رابطه را درک کرد. بنابراین می‌توان از داده‌های لرزه به عنوان روند بیرونی برای تعداد کمی داده بدست آمده از حفاری، برای تخمین عمق لایه مورد نظر استفاده کرد [۸].

۲- رابطه بین متغیرهای اولیه و ثانویه باید خطی باشد. در غیر این صورت باید در داده‌های ثانویه تغییراتی لحاظ شود تا این رابطه به یک رابطه خطی تبدیل شود [۱، ۸، ۱۰].

۳- مقدار داده ثانویه  $y$  باید در تمام نقاط اعم از نقاط شبکه تخمین و نقاطی که داده  $x$  وجود دارد، معلوم باشند [۸].

۴- داده‌های ثانویه باید دارای به صورت هموار در فضا تغییر کنند تا مانع از ناپایداری سیستم کریگینگ شوند [۸].

۵- سمی‌واریوگرام<sup>۲</sup> باقی مانده باید با استفاده از جفت نقاطی از داده اولیه محاسبه شود که بی‌تأثیر از داده ثانویه باشند. یعنی نقاطی انتخاب شوند که در آنها شرط  $y(x_i) \approx y(x_i + h)$  برقرار باشد [۸].

<sup>1</sup> Drift

<sup>2</sup> Semi-Variogram

## ۲-۴-۱ کریگینگ همراه با یک متغیر به عنوان روند بیرونی

کریگینگ با روند بیرونی تعریف عبارتی به صورت امید ریاضی شرطی متغیر اولیه به عنوان

تابعی خطی از متغیر ثانویه است:

$$E[Z(x_i)/Y(x_i)] = a.Y(x_i) + b \quad (۵-۲)$$

در این رابطه،  $i$  نقاط مورد نظر است.

مقدار تخمینی در نقطه هدف برای متغیر  $Z(x)$  به صورت رابطه (۶-۲) محاسبه می‌شود:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (۶-۲)$$

که در آن  $n$  تعداد داده‌های موجود برای  $Z$  و  $\lambda_i$  اوزان کریگینگ برای است. تخمین شرطی نارایب به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$E\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) - \frac{Z(x_0)}{Y(x_i)}, Y(x_i), i = 1, \dots, n\right) = 0 \quad (۷-۲)$$

در نهایت داریم:

$$a_0 \left[ \sum_{i=1}^n \lambda_i Y(x_i) - Y(x_0) \right] + a_1 \left[ \sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right] = 0 \quad (۸-۲)$$

$a_0$  و  $a_1$  اعداد ثابت غیر صفر هستند.

در این روابط دو شرط زیر برقرار است:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (۹-۲)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i Y(x_i) = Y(x_0) \quad (۱۰-۲)$$

عبارت (۹-۲) همان شرط عمومی تخمین نارایب کریگینگ است و عبارت (۱۰-۲)، حاکی از

خطی بودن تخمین است.

شرط بهینه سازی تخمین، کمینه کردن مقدار خطای تخمین (رابطه (۱۱-۲)) است.



$$E[(Z^*(x_0) - Z(x_0))^2 / Y(x_0), Y(x_i), i=1, \dots, n] \quad (11-2)$$

ضرایب لاگرانژ  $(\mu_1, \mu_2)$  برای اعمال شرایط مرزی به کار می‌روند:

$$E[(Z^*(x_0) - Z(x_0))^2 / Y(x_0), Y(x_i), i=1, \dots, n] - 2\mu_1 \left[ \sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right] - 2\mu_2 \left[ \sum_{i=1}^n \lambda_i Y(x_i) - Y(x_0) \right] \min \quad (12-2)$$

با صفر قرار دادن مشتق این عبارت در نهایت داریم:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{ij} + \mu_1 + \mu_2 &= \gamma_{i0} \quad i = 1, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i &= 1 \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i Y(x_i) &= Y(x_0) \end{aligned} \quad (13-2)$$

عبارت (13-2) همان ماتریس کریگینگ با روند بیرونی است [9].

عبارت (14-2) مقدار تابع واریوگرام مدل شده بر توزیع فضایی  $Z(x)$  است.

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{2} E[(Z(x_i) - Z(x_j))^2] = \gamma(h) \quad (14-2)$$

برای حل معادله تخمین، به  $Y(x)$  در تمام نقاط، اعم از نقاط شرکت کننده در تخمین و نقاط

هدف و به  $Z(x)$  در نقاط شرکت کننده در تخمین، نیاز است. چنانچه در نقاطی  $Y(x)$  وجود نداشته

باشد، باید به وسیله کریگینگ معمولی و تابع واریوگرام توزیع فضایی  $Y(x)$  تعیین شود [9].

## ۲-۴-۲ مراحل تخمین KED

تخمین به وسیله KED شامل چند مرحله کلی زیر است:

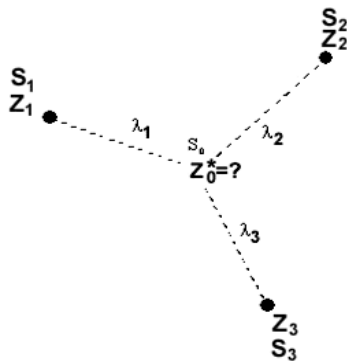
۱- محاسبه ضرایب  $a_0$  و  $a_1$  رگرسیون با روش حداقل مربعات ناحیه‌ای با استفاده از متغیرهای

اولیه و ثانویه که در نقاط معلوم اندازه‌گیری شده‌اند.

۲- محاسبه باقی مانده‌ها در نقاط معلوم

۳- محاسبه باقی مانده‌ها در تمام نقاط

با استفاده از مثال شکل ۱-۲ مفهوم کلی کریگینگ با روند بیرونی ارائه شده است که در آن  $S_i$  داده‌های ثانویه و  $Z_i$  داده‌های اصلی می‌باشند. همچنین فرمول ماتریس کریگینگ با روند بیرونی برای این داده‌ها در رابطه (۱۵-۲) آورده شده است.



شکل ۱-۲ شمایی از تخمین کریگینگ همراه با روند بیرونی با معرفی پارامترهای فرمول آن.

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} & 1 & S_1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} & 1 & S_2 \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} & 1 & S_3 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ S_1 & S_2 & S_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \mu_1 \\ \mu_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \gamma_{30} \\ 1 \\ S_0 \end{pmatrix} \quad (15-2)$$

شرایط (۱۶-۲) نیز برای تخمین برقرار است:

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_i S(x_i) = S(x_0)$$

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_i = 1 \quad (16-2)$$

$$Z_0^* = \lambda_1 Z_1 + \lambda_2 Z_2 + \lambda_3 Z_3$$

### ۲-۴-۳ کریگینگ همراه با دو یا چند نوع متغیر به عنوان روند بیرونی

اگر داده‌های ثانویه شامل بیش از یک نوع داده باشند و همچنین این داده‌های ثانویه با داده‌های اولیه دارای همبستگی باشند، می‌توان از هر دو گروه این داده‌ها در تخمین داده‌های اولیه استفاده کرد که این کار منجر به بهبود نتایج تخمین و بالا رفتن دقت و کارایی تخمین می‌شود (مانند داده‌های توپوگرافی و مقاومت ویژه الکتریکی که به عنوان داده‌های ثانویه برای تخمین داده‌های اولیه عمق سنگ بستر سفره آب زیر زمینی به کار می‌روند). در این صورت KED شامل استفاده از شرط‌های اضافی شامل چند متغیر  $s_i(x), i=1,2,\dots, M$  به عنوان روند بیرونی که در فضا اندازه‌گیری شده‌اند، می‌شود. تابع  $s_i(x)$  متعلق به داده ثانویه  $i$  است که باید در تمام نقاط گره‌های شبکه تخمین، مشخص باشند. شرط (۲-۱۷) به سیستم کریگینگ مستقل از کوواریانس اضافه می‌شود که به بهبود روند بیرونی کمک می‌کند (در واقع به ازای هر متغیر اضافه شده، یک سطر و یک ستون به ماتریس کریگینگ با روند بیرونی اضافه می‌شود): [۱۰]

$$\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} s_i(x_{\alpha}) = s_i(x_{\alpha}) \text{ for } i = 1, 2, \dots, M \quad (17-2)$$

روند چندگانه بیرونی کریگینگ می‌تواند به صورت رابطه (۲-۱۸) ارائه شود [۱۰].

$$\sum_{\beta=1}^n W_{\beta} C(x_{\alpha} - x_{\beta}) - \sum_{l=1}^L \mu_l f(x_{\alpha}) - \sum_{i=1}^M \mu_i s_i(x_{\alpha}) = C(x_{\alpha} - x_0) \text{ for } \alpha = 1, \dots, n$$

$$\sum_{\beta=1}^n W_{\beta} f(x_{\beta}) = f_l(x_0) \text{ for } l = 1, \dots, L \quad (18-2)$$

$$\sum_{\beta=1}^n W_{\beta} s_l(x_{\beta}) = s_l(x_0) \text{ for } l = 1, \dots, M$$

ماتریس کریگینگ همراه با چند متغیر به عنوان روند بیرونی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$A = \begin{bmatrix} \text{cov}(x_1, x_1) & \text{cov}(x_1, x_2) & \cdots & \text{cov}(x_1, x_n) & 1 & f_1(x_1) & f_2(x_1) & \cdots & f_L(x_1) & s_1(x_1) & s_2(x_1) & \cdots & s_M(x_1) \\ \text{cov}(x_2, x_1) & \text{cov}(x_2, x_2) & \cdots & \text{cov}(x_2, x_n) & 1 & f_1(x_2) & f_2(x_2) & \cdots & f_L(x_2) & s_1(x_2) & s_2(x_2) & \cdots & s_M(x_2) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \text{cov}(x_n, x_1) & \text{cov}(x_n, x_2) & \cdots & \text{cov}(x_n, x_n) & 1 & f_1(x_n) & f_2(x_n) & \cdots & f_L(x_n) & s_1(x_n) & s_2(x_n) & \cdots & s_M(x_n) \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ f_1(x_1) & f_1(x_2) & \cdots & f_1(x_n) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ f_2(x_1) & f_2(x_2) & \cdots & f_2(x_n) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ f_L(x_1) & f_L(x_2) & \cdots & f_L(x_n) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ s_1(x_1) & s_1(x_2) & \cdots & s_1(x_n) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ s_2(x_1) & s_2(x_2) & \cdots & s_2(x_n) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ s_M(x_1) & s_M(x_2) & \cdots & s_M(x_n) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu_0 \\ \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_L \\ \mu_{s_1} \\ \mu_{s_2} \\ \vdots \\ \mu_{s_M} \end{bmatrix}, \text{ and } \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \text{cov}(x_1, x_0) \\ \text{cov}(x_2, x_0) \\ \vdots \\ \text{cov}(x_n, x_0) \\ 1 \\ f_1(x_0) \\ f_2(x_0) \\ \vdots \\ f_L(x_0) \\ s_1(x_0) \\ s_2(x_0) \\ \vdots \\ s_M(x_0) \end{bmatrix}.$$

بنابراین اگر  $A$  را معکوس کنیم ماتریس ضرایب به صورت زیر بدست می‌آید که شامل اوزان کریگینگ

و ضرایب لاگرانژ است:

$$\mu = A^{-1}b \quad (2-20)$$

و بدین ترتیب ماتریس کریگینگ همراه با چند روند بیرونی حل می شود. و می توان داده اولیه را تخمین زد [۱۰].

## ۲-۵ جمع بندی و نتیجه گیری

در این فصل تعدادی روش های چند متغیره در زمین آمار که از سایر روش ها شناخته تر هستند، معرفی شدند. برخی از این روش ها به جز کریگینگ با روند بیرونی، به صورت مختصر توضیح داده شده و اساس آنها بیان گردید. برخی نیز با روش کریگینگ با روند بیرونی مقایسه شدند.

### ۲-۵-۱ مزیت های کریگینگ با روند بیرونی

همان گونه که قبلا اشاره شد، روش KED نسبت به بسیاری از روش های چند متغیره زمین آماری دارای مزایایی است که در ادامه به برخی از آنها اشاره شده است:

۱- داده های ثانویه را به صورت مستقیم در حین تخمین داده های اولیه به کار می گیرد. بنابراین نیازی به تحلیل ساختاری داده های ثانویه نیست.

۲- کاربرد ساده تری نسبت به کریگینگ توأم یا کریگینگ توأم هم موقعیت دارد زیرا نیازی به مدل واریوگرام داده ثانویه یا واریوگرام متقاطع ندارد و محاسبات بسیار ساده تر هستند.

۳- زمان محاسبه تقریبا مشابه کریگینگ معمولی است (بازای هر نوع داده ثانویه یک سطر و یک ستون به ماتریس کریگینگ معمولی اضافه می شود).

۴- امکان انجام کریگینگ همراه با روند بیرونی با تعداد متغیرهای بیشتر امکان پذیر است. این کار عملا در کریگینگ توأم با مشکل روبروست. بویژه آنکه شرایط ساده نمودن ماتریس کریگینگ توأم نیز برقرار نباشد.

## ۲-۵-۲ محدودیت‌های کریگینگ با روند بیرونی

علیرغم مزیت‌های فراوانی که KED دارد، مانند بسیاری از روش‌های موجود، این روش نیز دارای کاستی‌هایی است که مهمترین آنها در زیر آورده شده‌اند:

۱- وسیله‌ای برای کالیبره یا کنترل تاثیر متغیر ثانویه وجود ندارد زیرا در این روش مطالعات تحلیل ساختاری داده‌های ثانویه انجام نمی‌شود.

۲- اگر روند داده‌های ثانویه هموار نباشد، سیستم KED ممکن است پایدار نباشد. (این مورد مخصوصاً در مختصات قراردادی تاثیرگذار است).

بر اساس نتایج بدست آمده از یک مطالعه موردی انجام شده برای تخمین توزیع عنصر  $Cd$  و با استفاده از توزیع عنصر  $Zn$  به عنوان داده ثانویه که از روش‌های  $OK$ ،  $SKlm$ ،  $KWS$  و  $KED$  استفاده شده است؛ روش KED نسبت به سایر روش‌های به کارگرفته شده، بهتر عمل کرده و نتایج حاصل از آن به واقعیت نزدیک‌تر است [۸].

با توجه به مطالعات انجام شده و منابع اشاره شده، کریگینگ با روند بیرونی نسبت به سایر روش‌هایی که در این فصل معرفی شدند، از کاربرد و سادگی بیشتری برخوردار است و نتایج مطلوب‌تری ارائه می‌دهد. اگرچه این روش کاستی‌هایی نیز دارد، اما در مجموع نسبت به روش‌های ذکر شده و با توجه به نوع کاربردی که برای آن در این پایان نامه در نظر گرفته شده است، می‌توان ادعا کرد این روش بهتر از سایر روش‌های موجود برای تخمین مورد نظر جوابگو است. کاربرد روش کریگینگ با روند بیرونی با استفاده از مطالعات موردی در فصل‌های چهارم و پنجم به تفصیل شرح داده خواهد شد.

فصل سوم:

حساسیت سنجی روش کریگینگ باروندیرونی

## ۳-۱- مقدمه

حساسیت‌سنجی در لغت به معنی "توانایی اندازه‌گیری تغییرات خیلی کوچک"<sup>۱</sup> می‌باشد. اما در ریاضیات به منظور برآورد تغییرات رفتار یک تابع نسبت به پارامترهایی که به نحوی با آنها رابطه دارد، انجام می‌پذیرد. به بیان دیگر حساسیت‌سنجی به معنی بررسی تغییرات رفتار یک تابع در حین تغییر هر یک از پارامترهای مرتبط با آن تابع است. در این فصل حساسیت روش KED نسبت به پارامترهای ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه و همچنین مقدار اثر قطعه‌ای واریوگرام داده‌های اولیه سنجیده شده است. معیاری که حساسیت سنجی KED بر اساس آن انجام گرفته است، نتایج حاصل از اعتبارسنجی<sup>۲</sup> KED می‌باشد. پارامترهایی که در این اعتبارسنجی بررسی شده‌اند، شامل میانگین خطای تخمین، واریانس خطای تخمین، شیب خط رگرسیون برازش داده شده بر داده‌های تخمینی و واقعی و همچنین ضریب تعیین ( $R^2$ ) بدست آمده از این رگرسیون می‌باشند. در پایان نتایج به صورت گرافیکی ارائه و تفسیر شده‌اند.

## ۳-۲- اعتبار سنجی

اعتبارسنجی یک تکنیک قدرتمند برای ارزیابی کارایی مدل کریگینگ به کار گرفته شده است. در واقع می‌توان اعتبار مدل کریگینگ به کار گرفته شده را به کمک این تکنیک سنجید. مقایسه نتایج بدست آمده از دو اعتبارسنجی که در شرایط مختلف بدست آورده شده‌اند، می‌تواند به شخص کمک کند که از بین دو مدل موجود کدام یک را انتخاب کند. به عنوان مثال شخص می‌تواند از بین دو مدل واریوگرام برازش داده شده، یک مدل همسانگرد یا یک مدل ناهمسانگرد، یکی را انتخاب کند.

[۳].

<sup>1</sup> Oxford Advanced Learner's Dictionary

<sup>2</sup> Cross Validation



در پیوست شماره ۱ در انتهای این پایان‌نامه، اعتبارسنجی به تفصیل معرفی شده است. همچنین منابع مرتبط با این موضوع در این پیوست معرفی شده‌اند که جهت اطلاع بیشتر از این موضوع می‌توان به آنها مراجعه کرد.

### ۳-۳ حسائیت‌سنجی KED

برای سنجیدن حسائیت KED نسبت به پارامترهای یاد شده، تصمیم گرفته شد از داده‌های مصنوعی<sup>۱</sup> استفاده شود. به دلیل این که هم می‌توان روی شبکه دلخواه آنها را تولید کرد و هم از مقدار داده‌ها در نقاط هدف اطلاعات داریم. با استفاده از این داده‌ها می‌توان شرایط ایده‌آل را برای KED مهیا کرد. از طرف دیگر داده‌های واقعی که برای مطالعات موردی در این پایان‌نامه به کار برده شده‌اند، دارای این خصوصیات نیستند.

### ۳-۳-۱ تولید مدل مصنوعی

به منظور تولید مدل مصنوعی، ابتدا در نرم افزار@SGEMS2.1beta داده‌های مصنوعی در یک شبکه ۵۰۰×۵۰۰ با فاصله گره ۱۰ متر با استفاده از الگوریتم شبیه سازی گوسی پی‌درپی غیرشرطی<sup>۲</sup> تولید شده‌اند. بنابراین تعداد ۲۵۰۰ نقطه داده‌ای در سطح بوجود می‌آید. مدل واریوگرامی که برای توزیع فضایی این داده‌ها در نظر گرفته شده است، یک مدل واریوگرام کروی چندجهتی<sup>۳</sup> با دامنه ۱۵۰ متر و سقف ۱ و اثر قطعه‌ای برابر با صفر می‌باشد. داده‌های تولید شده در این مرحله وارد نرم افزار@WinGSLIB1.5.6 شده و مختصات به آنها تخصیص داده شده است. سپس یک شبکه نمونه-برداری منظم به فاصله ۵۰ متر از بین این داده‌ها انجام شده است و تعداد ۱۰۰ نمونه روی یک شبکه

<sup>1</sup> Synthetical

<sup>2</sup> Nonconditional Sequential Gaussian Simulation

<sup>3</sup> Omi- Directional

۵۰۰ × ۵۰۰ به فاصله گره ۵۰ متر انتخاب شده‌اند که به عنوان داده اولیه در حساسیت‌سنجی KED به کار برده خواهند شد. داده‌های ثانویه روی این شبکه با فاصله ۱۰ متر از یکدیگر قرار دارند.

### ۲-۳-۲ حساسیت‌سنجی KED نسبت به ضریب همبستگی

در اینجا حساسیت KED نسبت به ضرایب مختلف همبستگی بین داده اولیه و ثانویه که برابر با مقادیر زیر در نظر گرفته شده‌اند، بررسی خواهد شد.

$$\rho = -1, -0.75, -0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$$

### ۱-۲-۳-۳ تولید داده های ثانویه

برای بدست آوردن داده‌هایی که با داده‌های اصلی دارای ضرایب همبستگی یاد شده باشند، داده‌های ثانویه با استفاده از رابطه (۱-۳) در محیط گسترده Excel® تولید خواهند شد:

$$S = 3 * P + C + K * \text{RAND}() \quad (1-3)$$

در این رابطه، S همان داده‌های ثانویه، P داده‌های اصلی و K ضریب متغیر است که با تغییر آن، ضریب همبستگی تغییر می‌کند. C یک مقدار ثابت است که در اینجا برابر با ۱۰ در نظر گرفته شده است. در جاهایی که نیاز به ضریب همبستگی منفی داریم، ضریب P در یک منفی ضرب خواهد شد. بنابراین برای هر یک از ضرایب همبستگی، یک گروه داده ثانویه تولید شده و در اعتبارسنجی KED به کار برده می‌شوند. این داده‌های ثانویه هم در فایل ورودی داده‌های اولیه با شبکه ۵۰ × ۵۰ و هم به صورت جداگانه در فایل ورودی داده‌های ثانویه که روی یک شبکه منظم ۱۰ × ۱۰ وجود دارند، به کار برده می‌شوند.

### ۲-۲-۳-۳ محاسبه پارامترهای مقایسه

همان گونه که در ابتدای این فصل اشاره شد، معیاری که برای حساسیت‌سنجی KED در این پایان‌نامه در نظر گرفته شده است، نتایج حاصل شده از اعتبارسنجی KED می‌باشد. برای استفاده از نتایج حاصل از اعتبارسنجی در حساسیت‌سنجی، این نتایج از نرم افزار زمین آماری

WinGSLIB1.5.6® به محیط گسترده Excel® انتقال داده شده و عملیات لازم روی پارامترهای اعتبارسنجی انجام شده است. پارامترهای اعتبارسنجی مطابق آنچه ذکر گردید، شامل موارد زیر می‌باشند:

۱- میانگین خطای تخمین.

۲- واریانس خطای تخمین.

۳- شیب خط رگرسیون برازش داده شده بر نمودار پراکندگی نقطه‌ای مقادیر تخمینی در مقابل مقادیر واقعی.

۴- مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) بدست آمده از رگرسیون مذکور.

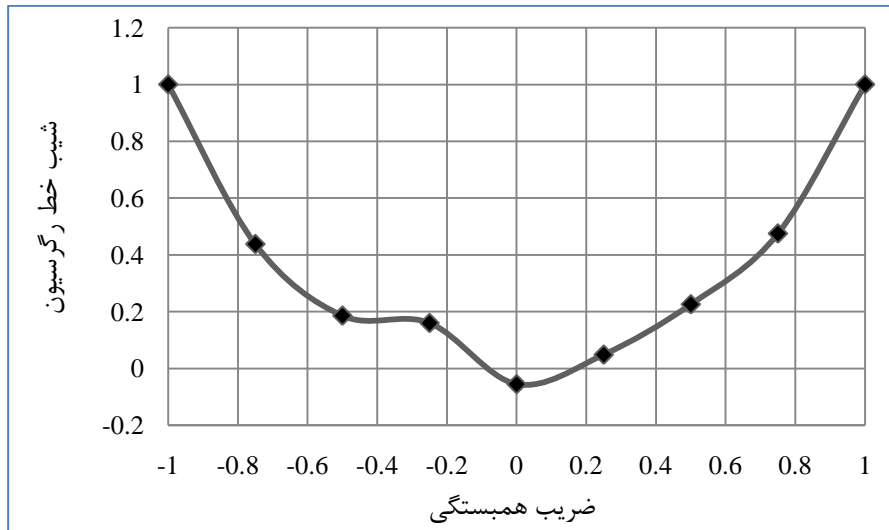
خطای تخمین و واریانس آن برای هر یک از داده‌های اولیه در فایل خروجی نرم افزار WinGSLIB1.5.6® موجود می‌باشد. این مقدار حاصل تفاضل مقدار واقعی و مقدار تخمینی است. بنابراین در محیط Excel® به سادگی می‌توان میانگین آن را محاسبه کرد. به همین ترتیب واریانس خطای تخمین نیز قابل محاسبه است. برای بدست آوردن پارامترهای سوم و چهارم نیاز است نمودار پراکندگی نقطه‌ای مقادیر تخمینی و واقعی در محیط Excel® رسم شود و پس از برازش دادن رگرسیون خطی بر آن، مقدار شیب خط و ضریب تعیین آن محاسبه شود. در این نمودارها داده‌های تخمینی روی محور قائم و داده‌های واقعی روی محور افقی لحاظ شده‌اند. این فرایند برای هر یک از ضرایب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه انجام شده است و پارامترهای مذکور محاسبه شده‌اند. سپس مقدار هر یک از این پارامترها برای ضریب همبستگی مورد نظر، روی نمودار انتقال داده شده و در پایان برای هر پارامتر یک نمودار به ازای تمام مقادیر ضریب همبستگی که قبلاً به آنها اشاره شد، بدست آورده شد. این نمودارها در شکل‌های ۳-۱ تا ۳-۴ آورده شده‌اند. بر اساس این پارامترها،

تخمینی از نتایج مطلوب‌تری برخوردار است که در آن به طور نسبی ضریب تعیین و شیب خط رگرسیون به مقدار یک و میانگین و واریانس خطای تخمین به مقدار صفر نزدیکتر باشند [۲, ۳, ۸].

انتظار این است که معمولا وقتی ضریب همبستگی بین داده‌ها کاهش می‌یابد، انتظار می‌رود نتایج تخمین ضعیف شوند. همچنین با افزایش اثر قطعه‌ای، به دلیل هموار شدگی در تخمین مورد نظر، انتظار می‌رود از کیفیت تخمین کاسته شود. زمانی که بر اساس نتایج اعتبارسنجی گفته می‌شود تخمین از کیفیت نامطلوب‌تری برخوردار است یعنی به طور نسبی واریانس و میانگین خطای تخمین افزایش می‌یابد و شیب خط رگرسیون و ضریب تعیین به صفر نزدیک‌تر می‌شوند. اما تفاوتی که در این مطالعه با شرایط گفته وجود دارد این است که در اینجا علاوه بر وجود داده‌های اولیه و یا اصلی، از داده‌های ثانویه نیز در تخمین استفاده شده است که می‌توانند شرایط حاکم بر داده اولیه را به کلی تحت تاثیر قرار دهند. هدف از حساسیت‌سنجی KED نیز بیشتر تاثیر داده‌های ثانویه بر تخمین بوده است.

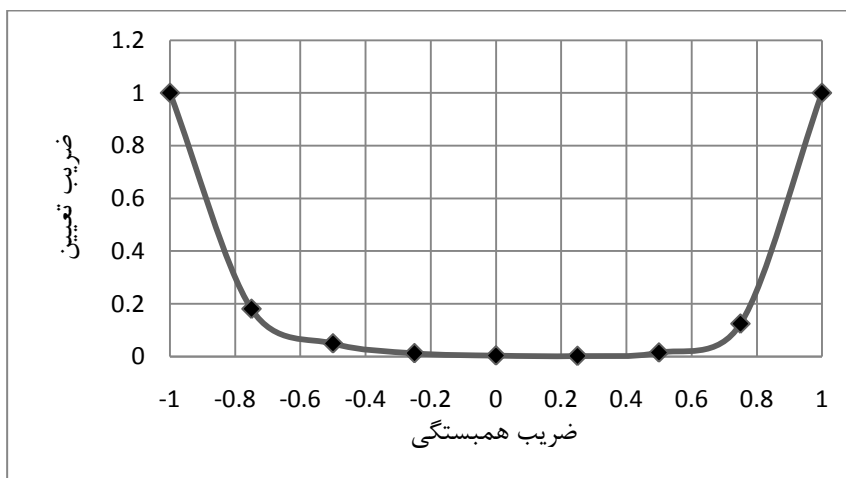
### ۳-۲-۳-۳ نتایج

همان طور که در شکل ۳-۱ مشاهده می‌شود، با کاهش ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه (که از این به بعد آن را ضریب همبستگی می‌نامیم)، شیب خط رگرسیون برآزش داده شده بر داده‌های تخمینی و واقعی نیز کاهش می‌یابد. منظور از کاهش ضریب همبستگی نزدیک شدن این مقدار به صفر از سمت راست یا چپ است بدین معنی که صرفا اندازه ضریب همبستگی مد نظر است نه علامت آن. این تغییرات با یکدیگر به صورت مستقیم عمل می‌کنند یعنی در جایی که ضریب همبستگی برابر با ۱ یا -۱ است، شیب خط مذکور نیز بیشینه و جایی که ضریب همبستگی برابر با صفر است، این شیب کمینه مقدار خود را دارد. کاهش شیب خط رگرسیون با کاهش ضریب همبستگی، امری منطقی به نظر می‌رسد چرا که ضریب همبستگی کم یک تخمین ضعیف را در پی خواهد داشت.



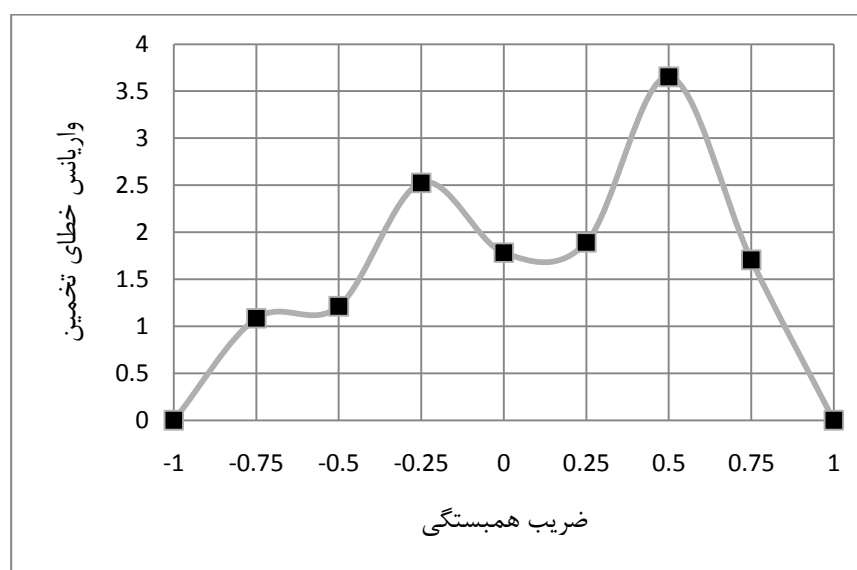
شکل ۱-۳ مقادیر شیب خط رگرسیون در مقابل ضریب همبستگی

در شکل ۲-۳ تغییرات ضریب تعیین رگرسیون موجود نسبت به ضریب همبستگی نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود، با کاهش ضریب همبستگی، ضریب تعیین نیز کاهش می‌یابد. این روند نیز مشابه روند یاد شده در مورد شیب خط رگرسیون در شکل ۱-۳ است. این فرایند نیز امری منطقی است زیرا با کاهش ضریب همبستگی انتظار می‌رود که تخمین ضعیف‌تری ارائه شود که این امر خود را با کاهش در مقدار ضریب تعیین نشان داده است.



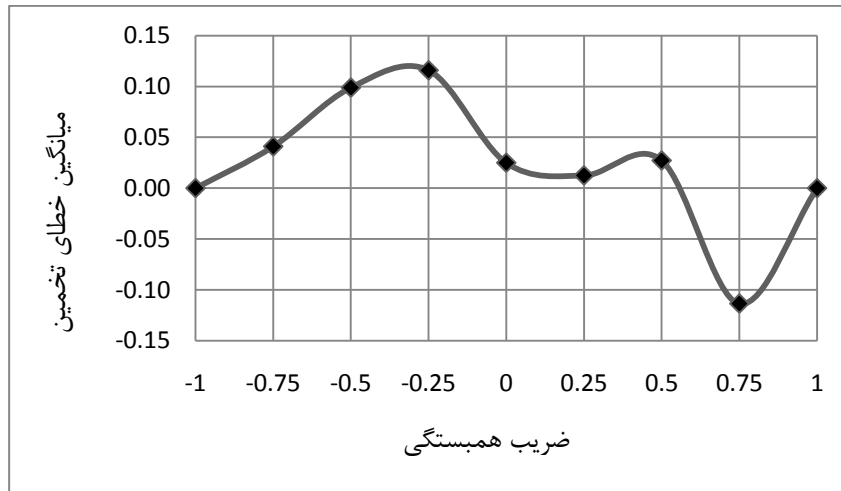
شکل ۲-۳ مقادیر ضریب تعیین در مقابل ضرایب همبستگی داده‌های اولیه و ثانویه.

در شکل ۳-۳ مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب همبستگی، واریانس خطای تخمین به صفر نزدیک می‌شود. این فرایند امری طبیعی است. از سوی دیگر انتظار می‌رود، واریانس خطای تخمین در ضریب همبستگی صفر بیشترین مقدار خود را داشته باشد. اما مطابق آنچه در شکل نشان داده شده است، این اتفاق در این مسئله نیفتاده است. این امر را می‌توان ناشی از نوسانات آماری در ضریب همبستگی صفر دانست که منجر به عدم تبعیت واریانس خطای تخمین از روال طبیعی خود شده است.



شکل ۳-۳ واریانس خطای تخمین در مقابل ضرایب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه.

در شکل ۳-۴ تغییرات میانگین خطای تخمین نسبت به ضریب همبستگی ارائه شده است. انتظار می‌رود با افزایش ضریب همبستگی، میانگین خطای تخمین کاهش یابد. این اتفاق در بیشینه ضریب همبستگی یعنی در ۱ و -۱ افتاده است. از سوی دیگر می‌بایستی در کمینه ضریب همبستگی، یعنی مقدار صفر، میانگین خطای تخمین به مقدار بیشینه خود برسد که این اتفاق نیز در این مسئله رخ نداده است. در واقع رفتار میانگین خطای تخمین در ضرایب همبستگی بین ۱ و -۱ از پیچیدگی‌های زیادی برخوردار است.



شکل ۳-۴ میانگین خطای تخمین در مقابل ضرایب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه.

بنابراین پارامترهایی مانند شیب خط رگرسیون و ضریب تعیین حساسیت زیادی به ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه در روش KED دارند و می‌توان از این دو پارامتر برای حساسیت‌سنجی این روش استفاده کرد. بدین معنی که با کاهش همبستگی بین متغیر اولیه و ثانویه شاهد هموار شدگی تخمین خواهیم بود و تخمین‌ها از کیفیت پایینی برخوردار خواهند بود به طوری که مقدار تخمینی تنها بیانگر بخش کوچکی از تغییرات متغیر واقعی خواهد بود. واریانس خطای تخمین در ضرایب همبستگی کم رفتار معنی داری از خود نشان نمی‌دهد. میانگین خطای تخمین نیز مطابق آنچه در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود، فقط در ضرایب همبستگی بالا از خود رفتار منطقی و طبیعی نشان می‌دهد و با کاهش ضریب همبستگی و نزدیک شدن آن به مقدار صفر، نمی‌توان برای آن رفتار معنی‌داری تعریف کرد. بر اساس آنچه گفته شد، می‌توان نتیجه گرفت ضریب همبستگی یک پارامتر مهم در کیفیت تخمین مورد نظر توسط روش KED بوده و بالا بودن ضریب همبستگی قطعاً در تخمین مورد نظر تاثیر مطلوب خواهد گذاشت.

### ۳-۳-۳ حساسیت سنجی KED نسبت به اثر قطعه‌ای

در این بخش، حساسیت KED نسبت به وجود اثر قطعه‌ای سنجیده شده است. منظور از اثر قطعه‌ای در اینجا، اثر قطعه‌ای مدل واریوگرام برازش داده شده برای داده‌های اولیه می‌باشد. روال کار بدین صورت است که اثر قطعه‌ای واریوگرام برازش داده شده به داده‌های اولیه تغییر داده شده و نتایج حاصل از اعتبارسنجی بررسی و در پایان با یکدیگر مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است که برای مقایسه بهتر نتایج، این فرایند برای ضرایب همبستگی مختلف انجام شده است. در اینجا حساسیت سنجی در پنج حالت انجام شده است:

۱- ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه برابر با یک است.

۲- ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه برابر با ۰/۸۶ است.

۳- ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه برابر با ۰/۷۰ است.

۴- ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه برابر با ۰/۵ است.

۵- ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه برابر با صفر است.

ضرایب ۰/۸۶ و ۰/۷۰ برای رسیدن به مقدار ضریب تعیین برابر با ۰/۷۵ و ۰/۵ است که از رگرسیون بین داده‌های تخمینی و واقعی بدست می‌آید. بنابراین در حین مقایسه نتایج مقادیر ضریب تعیین برابر با ۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۱ خواهد بود که مقایسه را معنی‌دارتر خواهد کرد.

مقادیر اثر قطعه‌ای که برای حساسیت سنجی KED در هر یک از ضرایب همبستگی مذکور به کار برده شده‌اند، برابر با مقادیر زیر می‌باشند:

$$C = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$$

پارامترهایی که نتایج اعتبارسنجی با آنها سنجیده شده است، عبارت از میانگین خطای تخمین، واریانس خطای تخمین، ضریب تعیین و ضریب شیب خط رگرسیون برازش داده شده به نمودار



پراکندگی نقطه‌ای داده‌های تخمینی و واقعی هستند. این پارامترها نیز مشابه آنچه در رابطه با حساسیت‌سنجی نسبت به ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه انجام شد، بدست آورده شده‌اند.

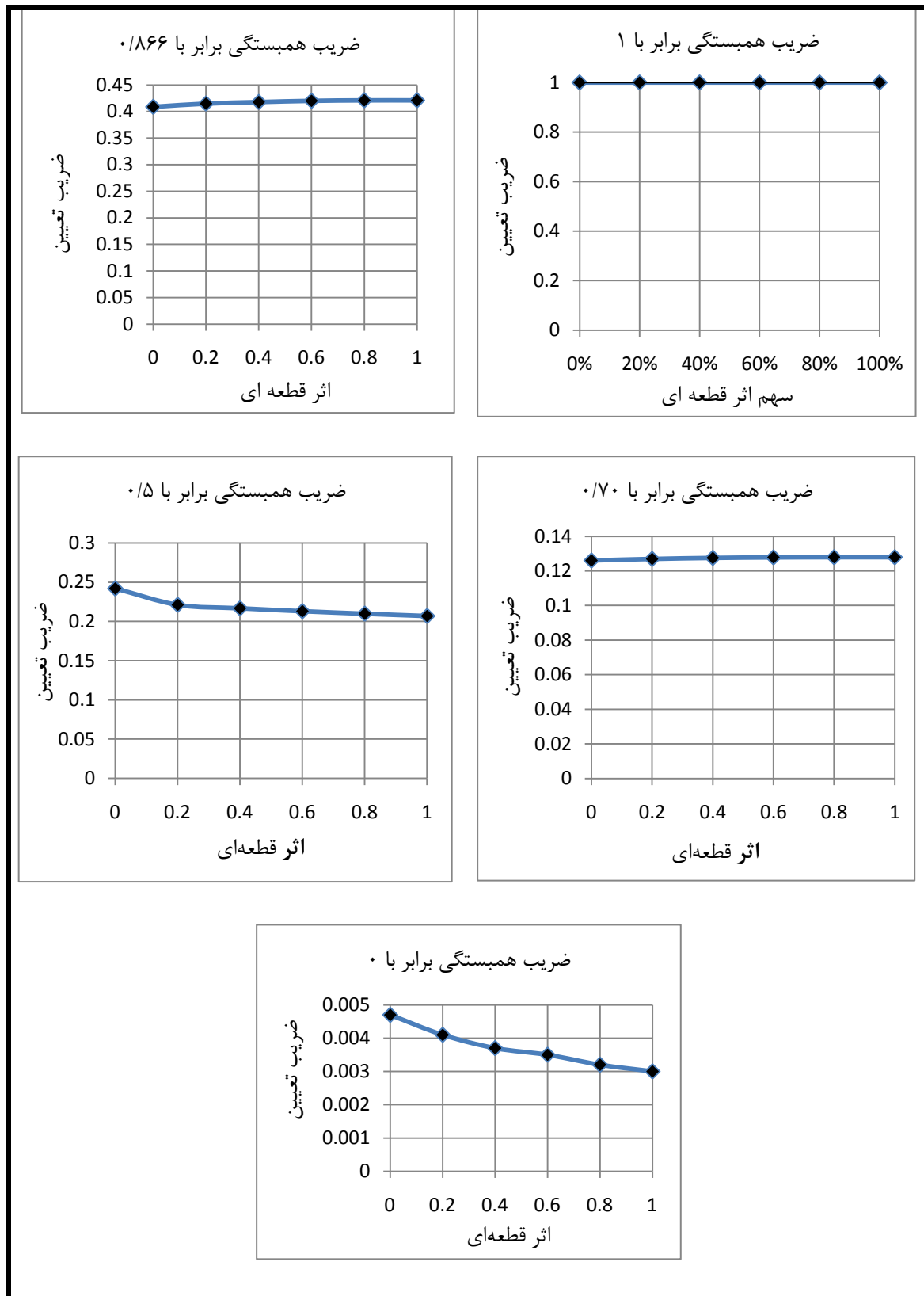
### ۳-۳-۱ نتایج حاصل از حساسیت‌سنجی KED نسبت به اثر قطعه‌ای

نتایج حاصل از حساسیت‌سنجی KED نسبت به اثر قطعه‌ای داده‌های اولیه و در حضور ضرایب همبستگی مذکور بین داده‌های اولیه و ثانویه، در شکل‌های ۳-۵ تا ۳-۸ ارائه شده‌اند.

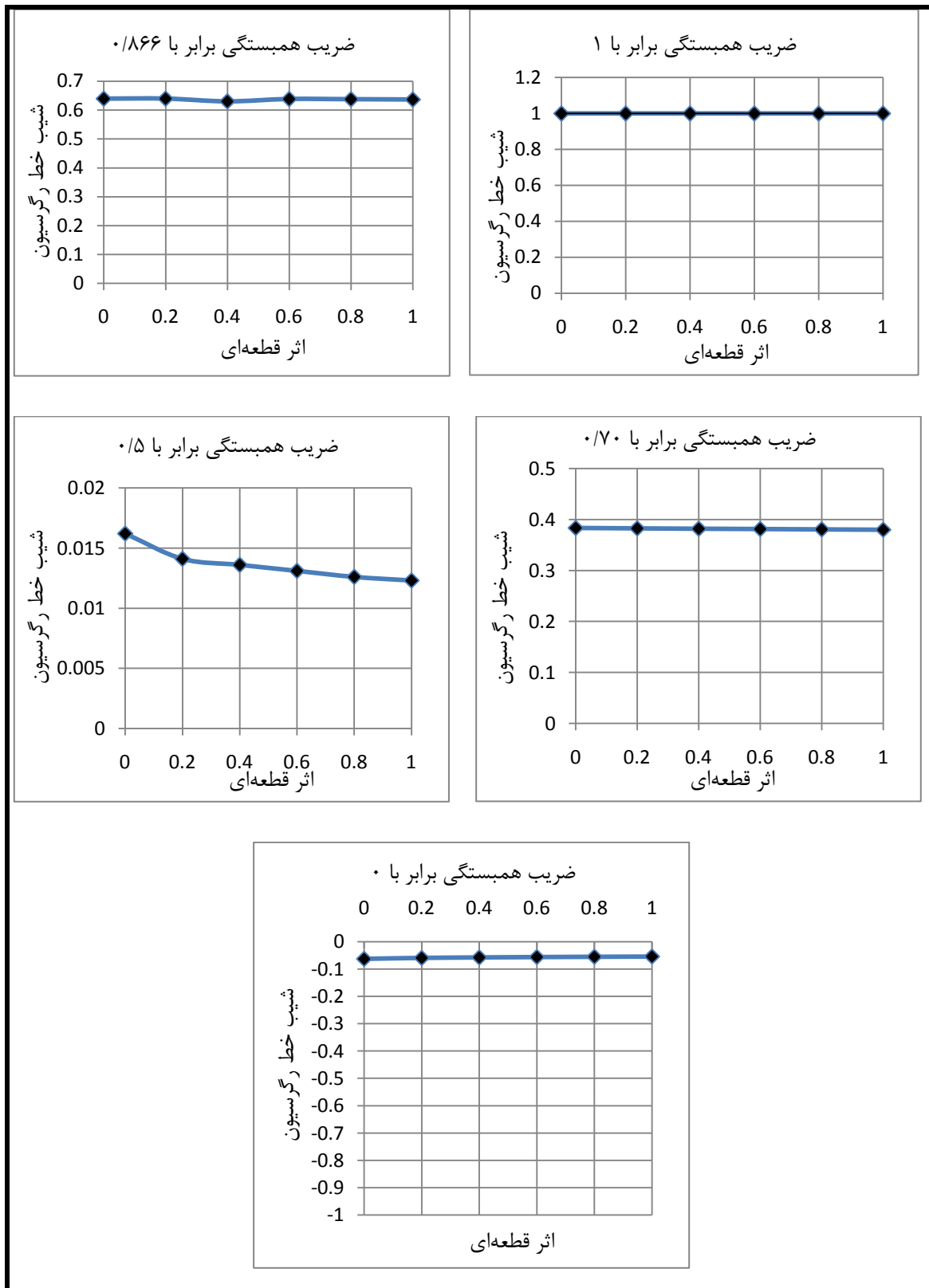
در شکل ۳-۵ حساسیت‌سنجی KED نسبت به اثر قطعه‌ای با استفاده از ضریب تعیین رگرسیون و در حضور ضرایب همبستگی مختلف، انجام شده است. زمانی که ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه برابر با یک است، ساختار فضایی داده‌های اولیه تاثیری در روند تخمین ندارد. به دیگر سخن، داده‌های ثانویه در این حالت تاثیر فراوانی داشته و می‌توان گفت روند تخمین را تحت کنترل خود دارند. با کاهش ضریب همبستگی از یک به  $0/866$  و  $0/7$  تا  $0/5$  باز هم ضریب تعیین بنا به دلایلی که ذکر شد، تغییرات قابل توجهی نسبت به ساختار فضایی داده‌های اولیه ندارد. در ضریب همبستگی برابر با صفر، با افزایش اثر قطعه‌ای، ضریب تعیین به صورت خیلی کمی کاهش می‌یابد. این امر منطقی به نظر می‌رسد چرا که وجود اثر قطعه‌ای با هموار کردن نتایج تخمین از کیفیت تخمین می‌کاهد زیرا در این حالت تاثیر داده‌های ثانویه بر تخمین داده اولیه به حداقل خود می‌رسد و رفتار تخمین مشابه با تخمین تک متغیره خواهد شد.

در شکل ۳-۶ حساسیت‌سنجی KED نسبت به اثر قطعه‌ای با استفاده از تغییرات شیب خط رگرسیون در حضور ضرایب مختلف همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه انجام شده است. همان طور که در شکل دیده می‌شود، زمانی که ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه بالا است، داده‌های ثانویه کنترل تخمین را در دست گرفته و اثر وجود ساختار فضایی داده‌های اولیه را تضعیف می‌کنند. زمانی که ضریب همبستگی به مقدار  $0/5$  می‌رسد، با افزایش اثر قطعه‌ای، شیب خط رگرسیون کاهش می‌یابد

که امری بدیهی است. زمانی که ضریب همبستگی به صفر می‌رسد شیب خط رگرسیون منفی می‌شود که منجر به ارائه نتایج نامطلوب در تخمین می‌شود.



شکل ۳-۵ حساسیت‌سنجی KED نسبت به اثر قطعه‌ای با استفاده از ضریب تعیین خط رگرسیون برازش داده شده به نمودار پراکندگی مقادیر تخمینی در مقابل مقادیر واقعی. ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه در بالای هر نمودار ارائه شده‌اند.

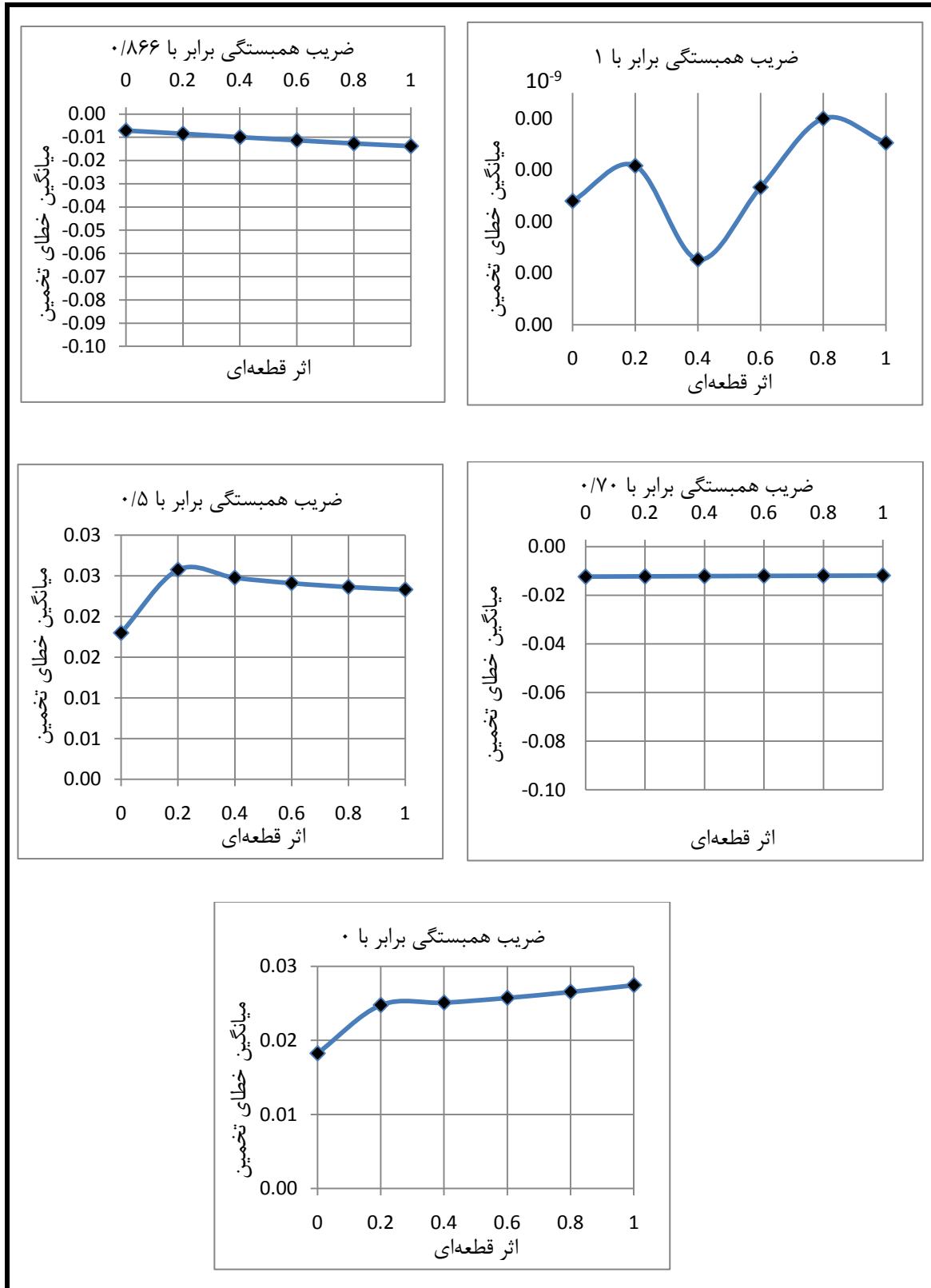


شکل ۳-۶ حساسیت سنجی KED نسبت به اثر قطعه‌ای با استفاده از تغییرات شیب خط رگرسیون برازش داده شده به نمودار پراکندگی مقادیر تخمینی در مقابل مقادیر واقعی. ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه در بالای هر نمودار ارائه شده‌اند.

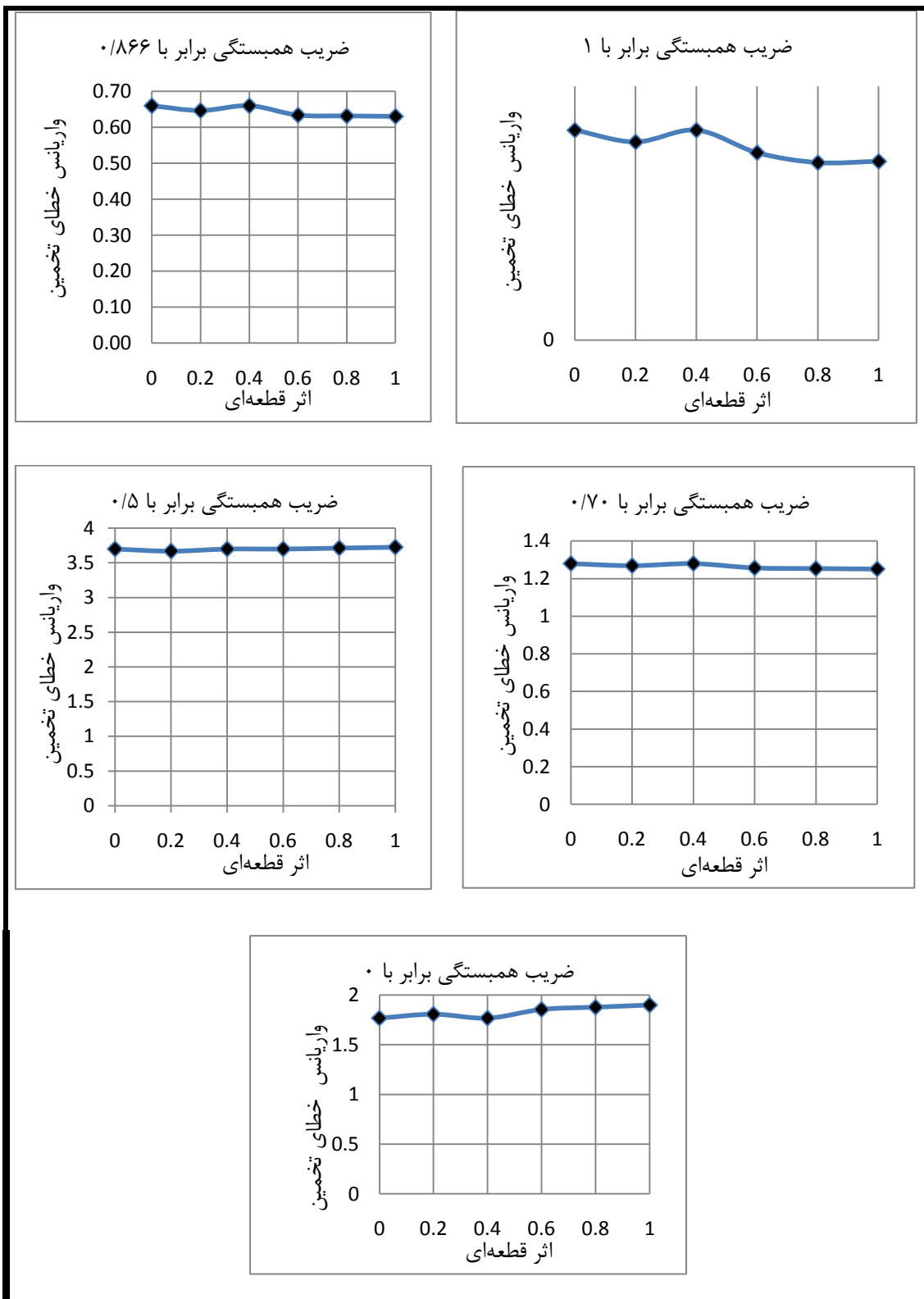
در شکل ۱-۳ حساسیت‌سنجی KED نسبت به اثر قطعه‌ای با استفاده از میانگین خطای تخمین و در حضور ضرایب همبستگی مختلف انجام شده است. زمانی که ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه بالا و قابل توجه است، مشاهده می‌شود که میانگین خطای تخمین ناچیز است. در ضرایب همبستگی بالای ۰/۵ مشاهده می‌شود که افزایش میزان اثر قطعه‌ای، تاثیر چندانی بر میانگین خطای تخمین ندارد. این در حالی است که در ضرایب همبستگی ۰/۵ و کمتر از آن، همان طور که در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود، با افزایش اثر قطعه‌ای داده‌های اولیه، مقدار میانگین خطای تخمین افزایش می‌یابد که این افزایش مخصوصاً در اطراف مبدا چشم‌گیرتر است. در زمانی که ضریب همبستگی نزدیک صفر است به دلیل این که تاثیر داده‌های ثانویه کم می‌شود، اثر قطعه‌ای تاثیر چشمگیری در افزایش میانگین خطای تخمین دارد. در کل در زمانی که ضریب همبستگی پایین است، تغییرات میانگین خطای تخمین نسبت به وجود اثر قطعه‌ای مشابه تخمین گر تک متغیره است.

شکل ۳-۳ نتایج حاصل از حساسیت‌سنجی KED نسبت به اثر قطعه‌ای با استفاده از واریانس خطای تخمین و در حضور ضرایب مختلف همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، زمانی که ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه بالا است، واریانس خطای تخمین مقداری ناچیز و مستقل از تغییرات اثر قطعه‌ای در داده‌های اولیه می‌باشد. با کاهش ضریب همبستگی تا حدود ۰/۵، بر مقدار واریانس خطای تخمین افزوده خواهد شد اما واریانس خطای تخمین مستقل از اثر قطعه‌ای است. در زمانی که ضریب همبستگی برابر با صفر است باز هم به دلیل کاهش تاثیر داده‌های ثانویه در نتیجه تخمین، مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار اثر قطعه‌ای، واریانس خطای تخمین افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که نتایج حاصل شده در این فصل، مورد بازبینی و تایید پروفسور هانس واکرناگل<sup>۱</sup> قرار گرفته‌اند.

<sup>1</sup> Wackernagel. H.



شکل ۳-۷ حساسیت سنجی KED نسبت به اثر قطعه‌ای با استفاده از میانگین خطای تخمین. ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه در بالای هر نمودار ارائه شده‌اند.



شکل ۳-۸ حساسیت‌سنجی KED نسبت به اثر نقطه‌ای با استفاده از واریانس خطای تخمین. ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه در بالای هر نمودار ارائه شده‌اند.

### ۳-۴ جمع بندی کلی

همان طور که قبلا اشاره شد، وجود اثر قطعه‌ای به واسطه هموار کردن نتایج تخمین، از کیفیت آن خواهد کاست. اما این موضوع در مورد روش KED متفاوت است. بر اساس حساسیت‌سنجی که روی وجود اثر قطعه‌ای در داده‌های اولیه در این روش انجام شده است، مشاهده می‌شود که در زمانی که ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه بالا است، افزایش اثر قطعه‌ای در نتایج تخمین تاثیر زیادی نخواهد داشت زیرا در این حالت همبستگی بالای داده‌های اولیه و ثانویه باعث می‌شود در زمانی که اثر قطعه‌ای داده‌های اصلی بالا می‌رود، تاثیر داده‌های ثانویه در تخمین بیشتر شده و این داده‌ها مستقیما در نتایج تخمین تاثیر خواهند گذاشت. اما در شرایطی که این ضریب همبستگی پایین باشد، وجود ساختار در داده‌های اولیه بر تخمین مورد نظر تاثیر گذاشته و نتایج را نامطلوب می‌کند. این موضوع به وضوح در شکل‌های ۳-۵ تا ۳-۸ مشاهده می‌شود. نکته‌ای که باید در اینجا مد نظر داشت این است که داده‌های ثانویه فاقد اثر قطعه‌ای در نظر گرفته شده‌اند.

بنابراین بالا بودن ضریب همبستگی حتی در حالتی که داده‌های اولیه دارای اثر قطعه‌ای باشند، در بهبود نتایج تخمین با استفاده از روش KED یک پارامتر مهم تلقی می‌شود. نکته قابل توجهی که باید مد نظر داشت این است که گرچه روش یاد شده نسبت به ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه از حساسیت زیادی برخوردار است اما هنوز هم بنا به مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است نسبت به سایر روش‌های چندمتغیره زمین آماری مانند کریگینگ توأم و کریگینگ توأم هم‌موقعیت از حساسیت کمتری نسبت به این پارامتر برخوردار است [۱۷].



فصل چهارم:

تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش کریگینگ با

روند سیرونی

## ۴-۱ مقدمه

در این فصل سطح آب زیرزمینی با استفاده از دو روش تخمین زمین آماری OK و KED تخمین زده خواهد شد که اولی یک روش تک متغیره و دومی یک روش چند متغیره است. در واقع هدف از این تخمین‌ها، مقایسه نتایج حاصل از این دو روش با یکدیگر است. در تخمین با روش OK تنها از داده‌های پیزومتریک استفاده خواهد شد. در حالی که در تخمین با استفاده از روش KED علاوه بر استفاده از داده‌های پیزومتریک به عنوان داده اصلی، از داده‌های توپوگرافی موجود در منطقه نیز به عنوان داده ثانویه استفاده شده است. منطقه‌ای که این مطالعات زمین آماری در آن انجام شده است، دشت چناران مشهد می‌باشد. در این منطقه دو نوع داده برداشت شده است که شامل داده‌های پیزومتریک و داده‌های توپوگرافی می‌باشند. منظور از داده‌های پیزومتریک در این فصل و فصل بعدی، ارتفاع مطلق سطح آب زیرزمینی از سطح آب‌های آزاد است که در هر پیزومتر اندازه‌گیری شده است. همچنین منظور از داده‌های توپوگرافی، ارتفاع مطلق سطح زمین از سطح آب‌های آزاد در نقطه مورد نظر می‌باشد.

داده‌های پیزومتریک دارای دقت بالایی برای تعیین و تخمین سطح آب زیرزمینی هستند، اما تعداد این داده‌ها با توجه به وسعت منطقه‌ای که مورد مطالعه قرار می‌گیرد، بسیار ناچیز است. به همین دلیل، تخمینی که با استفاده از فقط این داده‌ها زده می‌شود، از دقت و صحت مناسبی برخوردار نخواهد بود چرا که تعداد کم این داده‌ها منجر به ضعف در توصیف مناسب از ساختار فضایی منطبق بر آنها خواهد شد. از سوی دیگر داده‌هایی که به عنوان داده ثانویه به کار برده شده‌اند با توجه به وسعت منطقه و تعداد مناسب، می‌توانند جبران کننده این نقص باشند.

در این فصل ابتدا سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های پیزومتریک و روش تخمین زمین آماری کریگینگ معمولی (OK) در منطقه مورد نظر، تخمین زده خواهد شد. سپس سطح آب زیرزمین با استفاده از روش KED و به کار گرفتن داده‌های پیزومتریک به عنوان داده‌های اولیه و

داده‌های توپوگرافی به عنوان روند بیرونی، تخمین زده خواهد شد. نقشه‌ی سطح آب زیرزمینی تخمینی برای هر یک از این روش‌ها ارائه شده است. برای مقایسه نتایج حاصل از این دو روش و همچنین ارزیابی کارایی هر یک از این روش‌ها از نتایج حاصل از اعتبارسنجی برای هر یک از این روش‌ها استفاده شده است.

## ۴-۲ منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این فصل، دشت چناران در استان خراسان رضوی واقع در شمال شرقی ایران می‌باشد. این منطقه از شمال با زون کپه داغ و از جنوب با زون بینالود هم‌جوار است. این منطقه دارای ابعادی تقریباً برابر با ۴۰ کیلومتر در امتداد شرقی- غربی و ۱۵ کیلومتر در امتداد شمالی- جنوبی می‌باشد. مختصات جغرافیایی این منطقه به صورت جزئی‌تر در حین طراحی شبکه مورد نظر برای انجام تخمین‌ها، ذکر خواهد شد. مطالعات مقاومت ویژه الکتریکی در این منطقه به منظور شناسایی منابع آب زیرزمینی و تعیین سنگ کف توسط شرکت سازند آب پارس در نیمه دوم سال ۱۳۸۶ انجام شده است. در این مطالعات تعداد ۱۹ پروفیل در امتداد تقریبی شمالی- جنوبی برداشت شده است. در مجموع تعداد ۳۰۰ سونداژ روی این پروفیل‌ها برداشت شده است. به لحاظ این که داده‌های توپوگرافی در هر یک از این سونداژها برداشت شده است، از این نقاط به عنوان موقعیت داده‌های توپوگرافی در این مطالعه استفاده شده است. در کنار پروفیل‌های برداشت شده در این منطقه، تعداد ۲۹ پیزومتر نیز به منظور تعیین دقیق سطح آب زیرزمینی برداشت شده است. طول پروفیل‌های برداشت شده در این منطقه متغیر و به صورت میانگین برابر با ۲۰ کیلومتر می‌باشد که از شمال تا جنوب منطقه را پوشش داده‌اند. با توجه به گستردگی منطقه، فواصل بین سونداژهای متوالی از ۷۰۰ متر تا ۲۰۰۰ متر و فاصله بین پروفیل‌ها تقریباً ۱۰۰۰ متر لحاظ شده است.

## ۴-۳ داده‌های به کار گرفته شده در تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت

### چناران

داده‌هایی که در این بخش از آنها استفاده شده است شامل داده‌های پیزومتریک و داده‌های توپوگرافی برداشت شده در دشت چناران می‌باشد. پیزومترها گمانه‌هایی هستند که منحصرًا جهت مطالعه آبخوان‌های موجود در منطقه، حفر می‌گردند و فرق اصلی آنها با چاه‌های بهره برداری این است که پیزومترها قابلیت بهره برداری نداشته و اصولاً از قطر کمتری نسبت به چاه‌ها برخوردار هستند. تعداد داده‌های پیزومتریک برابر با ۲۹ عدد است و ارتفاع سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده در این پیزومترها، بین ۹۵۰ تا ۱۱۱۷ متر می‌باشد. تعداد داده‌های توپوگرافی ۳۰۰ عدد می‌باشد که بیشینه و کمینه آنها به ترتیب برابر با ۱۲۶۲ و ۱۰۴۰ متر است. داده‌های مورد نظر در ماه‌های مختلف سال برداشت شده‌اند اما به لحاظ این که داده‌های برداشت شده در شهریور ماه از سایر ماه‌ها بیشتر بودند، از این داده‌ها در این مطالعه استفاده شده است. ضریب همبستگی بین داده‌های توپوگرافی و پیزومتریک موجود در این منطقه برابر با ۰/۷۱ است.

## ۴-۴ تحلیل ساختاری

اولین مرحله در هر مطالعه زمین آماری، مطالعات مربوط به تحلیل ساختاری داده‌های مورد نظر است که به معنی مطالعه و بررسی عارضه‌های اصلی منطقه بندی<sup>۱</sup> می‌باشد. تحلیل ساختاری شامل سه مرحله اصلی است که به ترتیب شامل:

۱- بررسی اولیه داده‌ها و درک مسئله.

۲- محاسبه واریوگرام تجربی.

۳- برازش دادن مدل واریوگرام تئوری بر واریوگرام تجربی.

<sup>۱</sup> Regionalization

می‌باشد [۲].

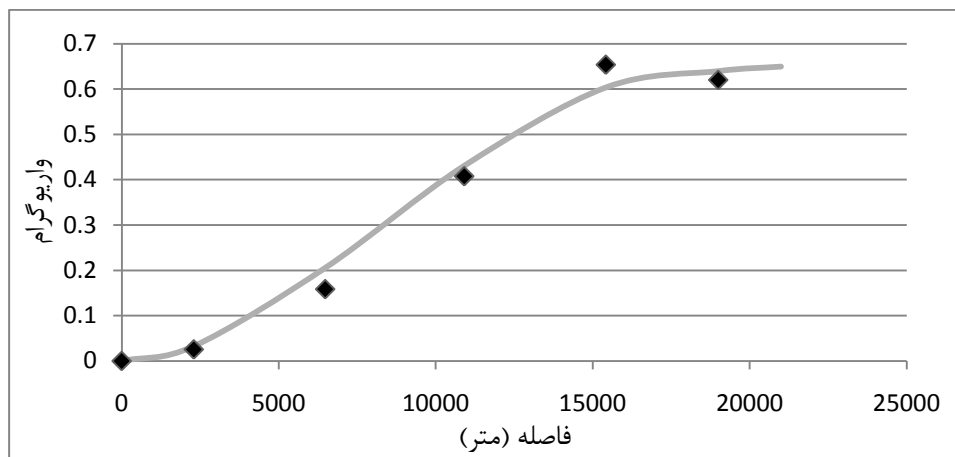
در مرحله اول داده‌ها جمع آوری شده و صحت آنها چک می‌شود. بدین ترتیب که خطاهای عددی در داده‌ها و یا مختصات مربوط به آنها تصحیح می‌گردد و پارامترهای اصلی آماری مانند میانگین، میانه، مد و واریانس محاسبه می‌گردد. نکته‌ی بسیار مهمی که در این مراحل باید به آن توجه کرد این است که یک زمین آماريست باید بتواند با مسئله مورد نظر به خوبی ارتباط برقرار کند و اساس آن را درک کند. بسیاری از ایرادهای بزرگ در مطالعات زمین آماری زمانی بوجود می‌آیند که فرد مطالعه کننده اساس و زمینه مسئله پیش روی خود را درک نکرده است [۲].

در پیوست شماره ۲ تحلیل ساختاری به تفصیل شرح داده شده است.

## ۴-۵ مطالعات تحلیل ساختاری روی داده‌ها

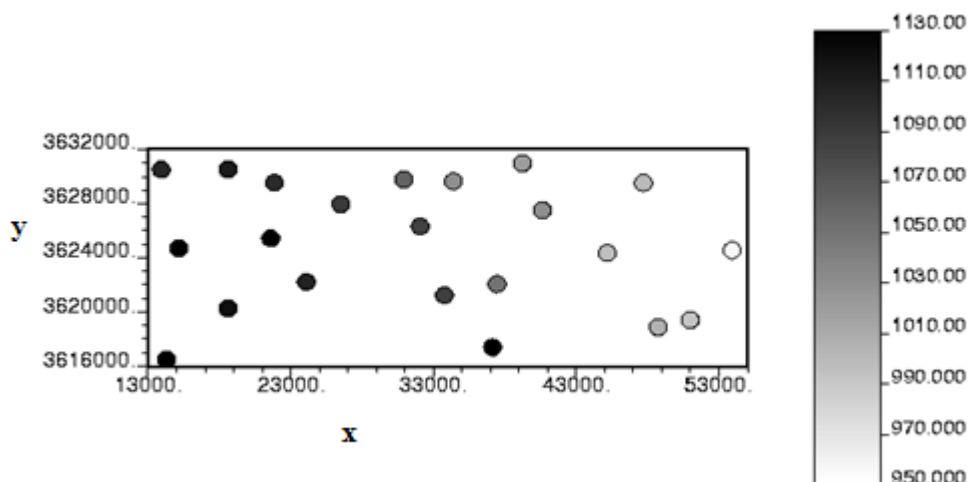
### ۴-۵-۱ داده‌های پیژومتریک

تعداد این داده‌ها همان طور که قبلاً ذکر شد، برابر با ۲۹ عدد است که به دلیل این که یکی از این داده‌ها نسبت به سایر داده‌ها فاصله زیادی داشت، به عنوان داده پرت، کنار گذاشته شد. بنابراین واریوگرافی داده‌های پیژومتریک با استفاده از ۲۸ داده انجام شده است. پس از محاسبه واریوگرام تجربی، یک مدل واریوگرام مکعبی با دامنه‌ای برابر با ۲۶۵۰۰ متر و سقف ۰/۷ و اثر قطعه‌ای برابر با صفر، بر آن برازش داده شده است. شایان ذکر است تمام مطالعات تحلیل ساختاری در این فصل و فصل بعد، در محیط دو بعدی و با استفاده از واریوگرام چندجهتی انجام شده است. در شکل ۴-۱ واریوگرام تجربی و مدل مکعبی برازش داده شده بر آن ارائه شده است.



شکل ۴-۱ واریوگرام تجربی و مدل واریوگرام مکعبی برازش داده شده بر داده‌های پیزومتریک برداشت شده در دشت چناران مشهود.

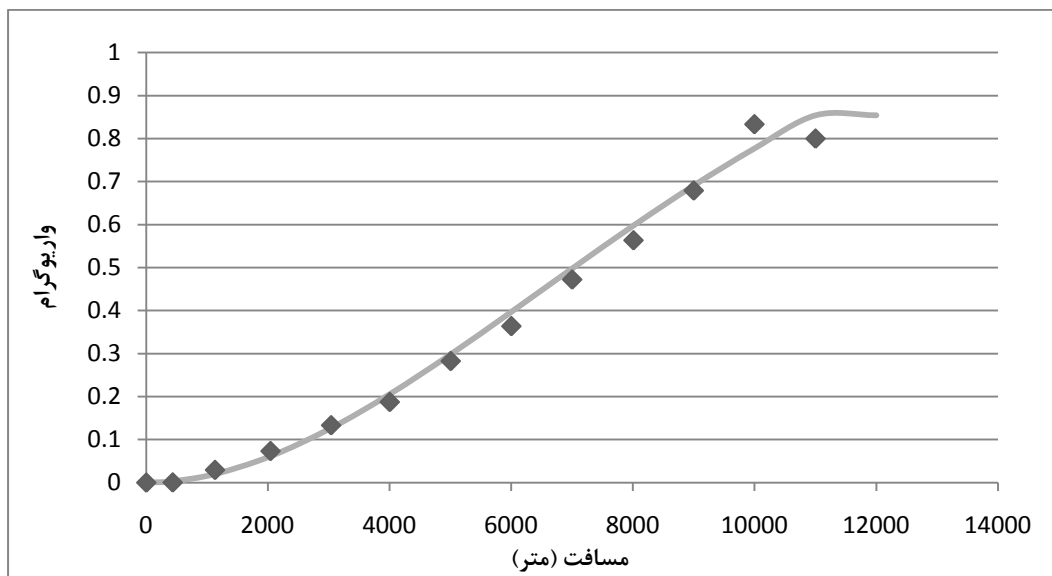
مشکلی که در داده‌های موجود وجود دارد این است که داده‌های توپوگرافی تمام داده‌های پیزومتریک را پوشش نمی‌دهند. با توجه به این که از ملزومات تخمین با روش KED وجود داده‌های ثانویه هم در نقاط هدف و هم در نقاط تخمین می‌باشد، مجبور هستیم داده‌های پیزومتریکی که در اطراف آنها داده‌های توپوگرافی موجود نیستند را کنار بگذاریم. نهایتاً تعداد ۲۲ داده پیزومتریک در تخمین به کار گرفته شده است. برای طراحی بهتر شبکه تخمین داده‌های مورد نظر به اندازه ۳۰ درجه دوران داده شده‌اند همچنین برای افزایش سرعت محاسبات، داده‌های مورد نظر به مختصات محلی انتقال داده شده‌اند. در شکل ۴-۲ موقعیت داده‌های پیزومتریک در مختصات قراردادی نسبت به یکدیگر نشان داده شده است. در این شکل مقدار کمی داده‌ها به صورت یک نوار درجه بندی شده از رنگ سفید با کمترین مقدار تا رنگ سیاه با بیشترین مقدار نشان داده شده است.



شکل ۴-۲ موقعیت داده‌های پیزومتریک برداشت شده در دشت چناران مشهد در مختصات قراردادی. ارتفاع تقریبی سطح آب زیرزمینی در هر پیزومتر در نوارمدرج سمت راست نقشه نشان داده شده است.

#### ۴-۵-۲ داده‌های توپوگرافی

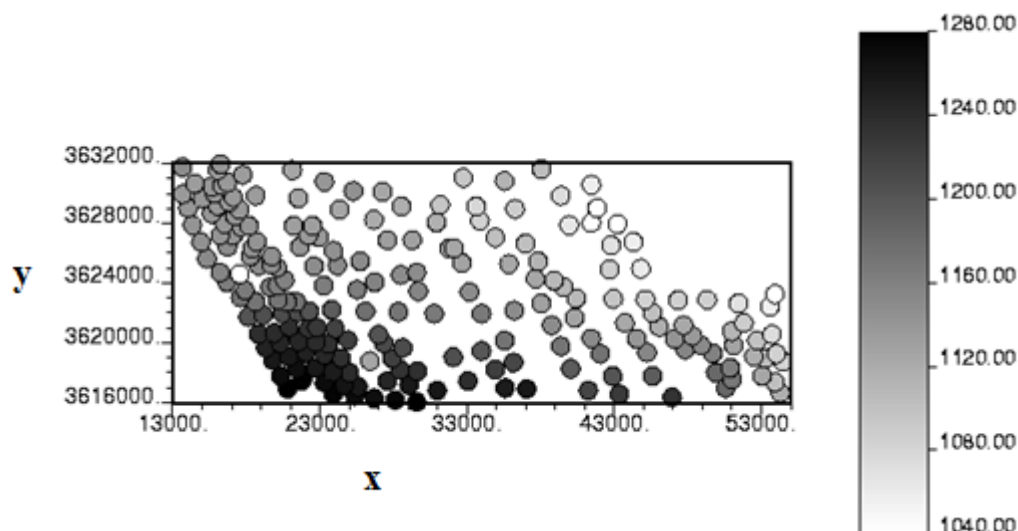
همان طور که در فصل اول اشاره شد، در تخمین با استفاده از روش KED، نیازی به انجام مطالعات تحلیل ساختاری داده‌های ثانویه نیست. اما به لحاظ این که داده‌های ثانویه به کار گرفته شده در این پایان‌نامه در تمام نقاط هدف تخمین وجود ندارند، می‌بایستی ابتدا این داده‌ها در تمام نقاط هدف، تخمین زده شوند، سپس از آنها به عنوان داده ثانویه در تخمین با روش KED استفاده کرد. این داده‌ها از تراکم خوبی برای تخمین برخوردار هستند. واریوگرام تجربی با استفاده از این داده‌ها محاسبه و مدل واریوگرام مربوطه بر آن برازش داده شده است. مدل برازش داده شده یک مدل مکعبی با دامنه‌ای برابر با ۲۱۵۰۰ متر و سقف ۱/۱ و اثر قطعه‌ای برابر با صفر می‌باشد. در شکل ۴-۳ واریوگرام تجربی و مدل مکعبی برازش داده شده بر داده‌های توپوگرافی برداشت شده در دشت چناران، مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۳ واریوگرام تجربی و مدل مکعبی برازش داده شده بر داده‌های توپوگرافی برداشت شده در دشت چناران.

مانند آنچه در مورد داده‌های پیزومتریک ذکر شد، به منظور هم‌پوشانی بیشینه داده‌های توپوگرافی و داده‌های پیزومتریک، تعدادی از داده‌های توپوگرافی نیز به دلیل عدم وجود داده پیزومتریک در نقطه مورد نظر در نظر گرفته نخواهند شد. موقعیت داده‌های توپوگرافی که در تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت چناران به عنوان روند بیرونی به کار گرفته شده‌اند، در شکل ۴-۴ ارائه شده است. این داده‌ها نیز مشابه داده‌های پیزومتریک به مختصات قراردادی انتقال داده شده‌اند. در این حالت تعداد این داده‌ها از ۳۰۰ نقطه به ۲۱۴ نقطه کاهش می‌یابد. زیرا در این حالت در نقاطی که داده پیزومتریک در اطراف آنها وجود نداشته است، حذف شده‌اند.





شکل ۴-۴ موقعیت داده‌های توپوگرافی برداشت شده در دشت چناران مشهد در مختصات قراردادی. مقدار این داده‌ها در نوار مدرج سمت راست شکل نشان داده شده است.

#### ۴-۶ تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت چناران

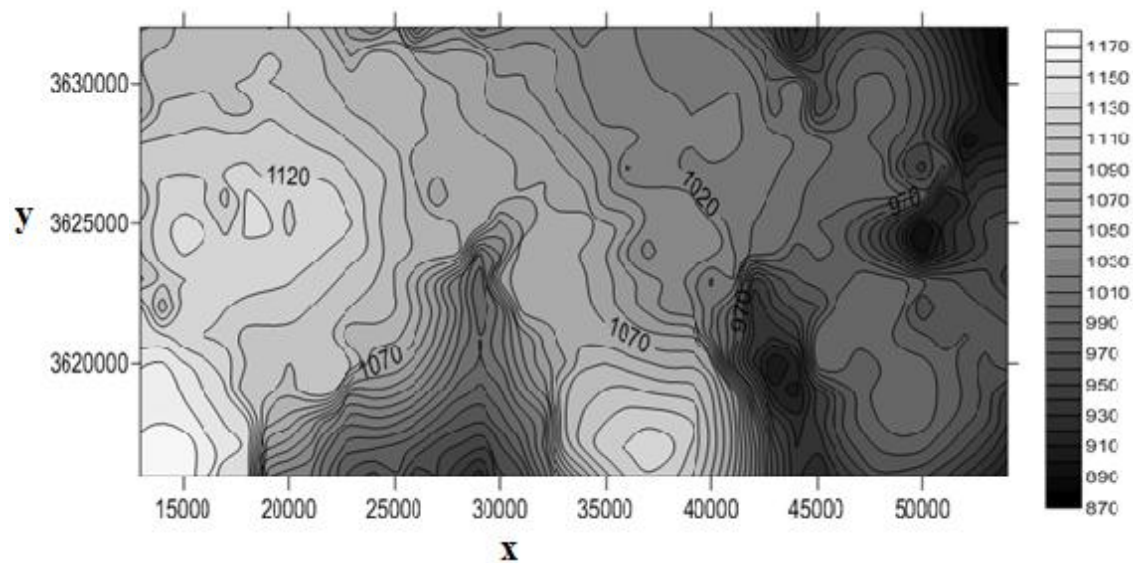
تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت چناران مشهد در این مطالعه در دو حالت انجام گرفته است. در حالت اول تخمین با استفاده از روش تخمین زمین آماری کریگینگ معمولی (OK) و با استفاده از تنها داده‌های پیزومتریک انجام شده است. در حالت دوم، تخمین سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش تخمین زمین آماری کریگینگ با روند بیرونی (KED) انجام شده است. در تخمین با استفاده از روش KED، داده‌های پیزومتریک به عنوان داده اولیه و داده‌های توپوگرافی به عنوان روند بیرونی به کار گرفته شده‌اند. به دلیل اینکه در نرم افزار WinGSLIB1.5.2 امکان تخمین با مدل واریوگرام مکعبی وجود ندارد، تخمین‌های این فصل با استفاده از کدنویسی در نرم افزار MATLAB7®، زده شده‌اند.

#### ۴-۶-۱ شبکه تخمین

شبکه‌ای که برای تمامی تخمین‌های زده شده با روش‌های مختلف در این فصل در نظر گرفته شده است، به صورت یک شبکه مستطیلی با طول ۴۱ کیلومتر در امتداد شرقی-غربی و عرض ۱۶ کیلومتر در امتداد شمالی-جنوبی با مبدا مختصات (۳۶۱۶۰۰۰، ۱۳۰۰۰) در مختصات قراردادی، در نظر گرفته شده است. اندازه گره‌های (نقاط هدف تخمین) این شبکه به صورت مربعی با طول ضلع ۱ کیلومتر طوری در نظر گرفته شده است که بیشترین پوشش را هم از داده‌های پیزومتریک و هم از داده‌های توپوگرافی موجود در منطقه داشته باشد.

#### ۴-۶-۲ تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش OK

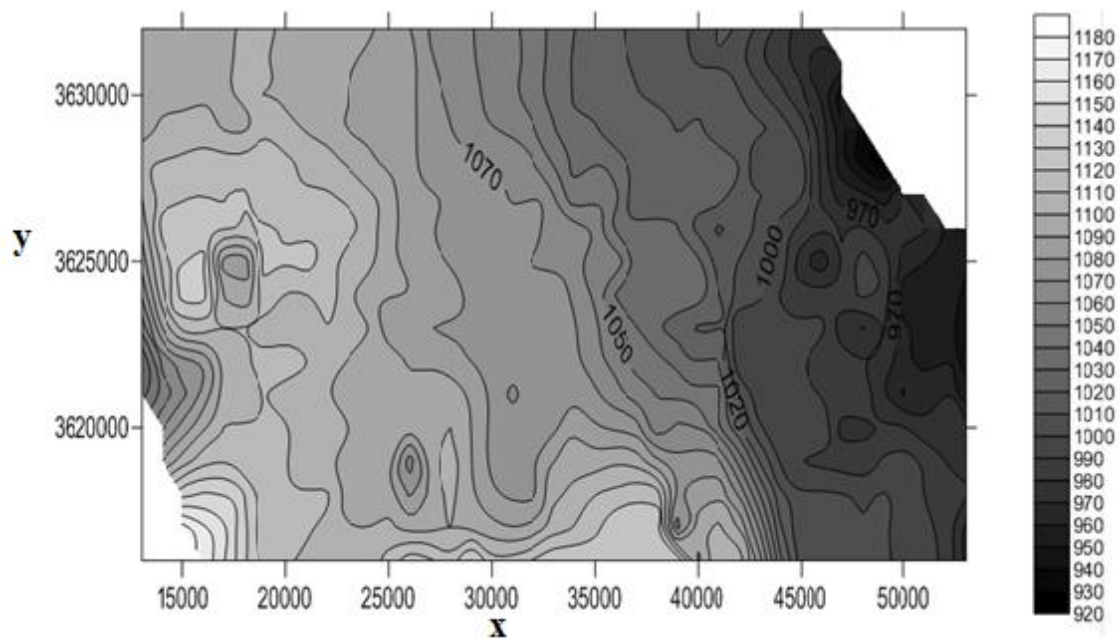
روش OK یکی از روش‌های تخمین زمین آماری تک متغیره است که متغیر مورد نظر در اینجا داده‌های پیزومتریک برداشت شده در منطقه دشت چناران مشهود می‌باشد که به منظور تخمین سطح آب زیرزمینی در این منطقه به کار گرفته شده است. شعاع جستجو برای تخمین مورد نظر با استفاده از این روش در اینجا برابر با ۱۲۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. شعاع جستجو در تمام تخمین‌هایی که در این فصل و فصل بعد زده شده‌اند، بر اساس تعداد نقاط شرکت کننده در تخمین برای هر نقطه و همچنین اوزان کریگینگ، انتخاب شده و سعی بر آن بوده است که شعاع جستجو بهینه اختیار شود. نقشه سطح آب زیرزمینی تخمین زده شده با استفاده از روش OK در منطقه، در شکل ۴-۵ ارائه شده است.



شکل ۴-۵ سطح آب زیرزمینی تخمین زده شده با استفاده از روش OK و به کارگیری داده‌های پیزومتریک در دشت چناران.

### ۳-۶-۴ تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش KED

در تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت چناران مشهد با استفاده از روش KED، داده‌های پیزومتریک به عنوان داده اولیه و داده‌های توپوگرافی به عنوان روند بیرونی به کار گرفته شده‌اند. پس از تخمین داده‌های ثانویه روی شبکه هدف، داده‌های اولیه روی شبکه مورد نظر با استفاده از روش KED تخمین زده شده‌اند. در تخمین با این روش شعاع جستجو برابر با ۱۲۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. نقشه سطح آب زیرزمینی تخمین زده شده با استفاده از روش KED در شکل ۴-۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۶ نقشه سطح آب زیرزمینی تخمین زده شده در دشت چناران با استفاده از روش KED

#### ۴-۷ اعتبارسنجی روش‌های تخمین به کار برده شده

معیاری که برای ارزیابی کارایی در هر تخمین زمین آماری به کار گرفته می‌شود، نتایج حاصل از اعتبارسنجی روش مذکور خواهد بود و بر اساس نتایج گرافیکی حاصل از آن روش تخمین نمی‌توان معیار مناسبی برای مقایسه آن روش با سایر روش‌های تخمین ارائه کرد [۳].

در اینجا ابتدا نتایج حاصل از اعتبارسنجی روش‌های تخمین به کار گرفته شده ارائه می‌شوند، سپس به مقایسه و تحلیل این نتایج پرداخته خواهد شد.

#### ۴-۷-۱ نتایج حاصل از اعتبارسنجی روش‌های تخمین به کار برده شده

همان گونه که قبلاً ذکر شد، اعتبارسنجی به عنوان ابزاری برای ارزیابی کارایی تخمین مورد نظر به کار برده می‌شود. در این بخش نیز با استفاده از اعتبارسنجی روش‌های تخمین به کار گرفته شده برای تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت چناران، که در بخش‌های قبلی ذکر شدند، به ارزیابی کارایی این روش‌های تخمین پرداخته شده است. پارامترهایی که برای اعتبارسنجی به کار برده

شده‌اند، شامل ضریب شیب خط رگرسیون برازش داده شده به نمودار پراکندگی نقطه‌ای داده‌های تخمینی و واقعی (a)، ضریب تعیین این خط ( $R^2$ )، واریانس خطای تخمین و میانگین خطای تخمین می‌باشند که برای هر یک از روش‌های تخمین به کار برده شده محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند (جدول ۴-۱).

جدول ۴-۱ نتایج حاصل از اعتبارسنجی روش‌های تخمین به کار گرفته شده برای تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت چناران.

روش تخمین	کریگینگ معمولی	کریگینگ با روند بیرونی
پارامترهای اعتبارسنجی		
شیب خط رگرسیون	۰/۸۵۸۱	۰/۸۶۱۹
ضریب تعیین	۰/۷۶۵۱	۰/۸۹۳
واریانس خطای تخمین	۳۵۱/۴۳۹	۲۳۵/۴۸
میانگین خطای تخمین	۱/۴۲۸	۰/۶۷۲

#### ۴-۷-۲ مقایسه و تحلیل نتایج حاصل از اعتبارسنجی

برای سنجیدن کارایی یک تخمین، باید توجه داشت که تخمینی بهتر خواهد بود که شیب خط رگرسیون و ضریب تعیین آن به یک و همچنین میانگین خطا و واریانس خطای تخمین آن به صفر نزدیک‌تر باشد. بر اساس نتایجی که در جدول ۴-۱ ارائه شده است، شیب خط رگرسیون برای هر دو روش به کار گرفته شده تقریباً برابر بوده و تفاوت معناداری برای مقدار این پارامتر در هر یک از این دو روش مشاهده نمی‌شود اما بر اساس سه پارامتر دیگر یعنی ضریب تعیین و میانگین خطا و واریانس خطای تخمین، می‌توان نتیجه گرفت روش تخمین زمین آماری کریگینگ با روند بیرونی در بهبود

نتایج حاصل از تخمین سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه بهتر عمل کرده و از کیفیت مطلوب تری در تخمین متغیر مورد نظر نسبت به روش کریگینگ معمولی برخوردار است.

#### ۴-۸ جمع بندی و نتیجه گیری

در این فصل سطح آب زیرزمینی در دشت چناران مشهد با استفاده از دو روش تخمین زمین آماری OK و KED تخمین زده و نتایج حاصل از این تخمین ها به صورت گرافیکی ارائه شده است. همچنین اعتبارسنجی برای هر یک از این روش ها انجام شده است تا بتوان کارآیی هر یک از این روش ها را به صورت نسبی با یکدیگر مقایسه کرد. بر اساس نتایجی که از اعتبارسنجی روش های تخمین مذکور بدست آمده است، نتیجه گرفته می شود که تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت چناران مشهد با استفاده از داده های توپوگرافی برداشت شده در این منطقه از اعتبار بیشتری نسبت به روش کریگینگ معمولی که در آن صرفاً از داده های پیزومتریک استفاده شده است، برخوردار می باشد. بنابراین استفاده از داده های توپوگرافی در کنار داده های پیزومتریک به عنوان روند بیرونی، به واسطه همبستگی فضایی که بین این دو نوع داده برقرار است، در بهبود نتایج حاصل از تخمین سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه نقش چشم گیری ایفا کرده است.

## فصل پنجم:

تخمین سطح آب زیر زمینی با استفاده از روش کریگینگ همراه

با چند متغیر به عنوان روند سیرونی

## ۵-۱ مقدمه

در این فصل پس از توصیف منطقه مورد مطالعه، داده‌های به کار برده شده در مطالعات مورد نظر معرفی شده‌اند. مطالعات تحلیل ساختاری روی هر یک از این داده‌ها انجام شده و سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های تخمین مورد نظر، تخمین زده شده است. داده‌هایی که در این مطالعه به کار برده شده‌اند، شامل داده‌های پیزومتریک، داده‌های توپوگرافی منطقه و داده‌های عمق سطح آب زیرزمینی که با استفاده از مطالعات مقاومت ویژه الکتریکی تخمین زده شده‌اند، می‌باشند. به منظور سهولت بیشتر، داده‌های عمق سطح آب زیرزمینی تخمین زده شده با استفاده از مطالعات مقاومت ویژه، از این به بعد تحت عنوان داده‌های ژئوالکتریک به کار گرفته خواهند شد.

سطح آب زیرزمینی در این فصل به صورت‌های زیر تخمین زده شده است:

۱- در ابتدا با استفاده از رگرسیون بین داده‌های توپوگرافی و داده‌های پیزومتریک، رابطه‌ی خطی بین این دو داده تعیین و با استفاده از این رابطه در نقاطی که داده توپوگرافی وجود دارد، داده‌های پیزومتریک تخمین زده شده و با استفاده از این داده‌ها سطح آب زیرزمینی در منطقه تخمین زده شده است.

۲- تخمین زمین‌آماري سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش کریگینگ معمولی براساس داده‌های پیزومتریک.

۳- تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده روش KED و با استفاده از داده‌های پیزومتریک به عنوان داده اولیه و داده‌های توپوگرافی به عنوان داده ثانویه.

۴- تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده روش KED و با به کارگیری داده‌های پیزومتریک به عنوان داده اولیه اصلی و داده‌های ژئوالکتریک به عنوان داده ثانویه.



۵- تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده روش KED و با به کارگیری داده‌های پیزومتریک به عنوان داده اصلی و داده‌های توپوگرافی و داده‌های ژئوالکتریک به عنوان داده‌های ثانویه.

در پایان این فصل، نتایج حاصل هر یک از این روش‌های تخمین به صورت گرافیکی ارائه شده است. همچنین برای هر یک از روش‌های تخمین مذکور، اعتبارسنجی انجام شده و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

## ۵-۲ منطقه مورد مطالعه

داده‌هایی که در مطالعات این فصل از آنها استفاده شده است، در منطقه دشت دامغان برداشت شده‌اند. در این منطقه مطالعات ژئوالکتریک انجام شده است و داده‌های توپوگرافی و همچنین عمق سطح آب زیرزمینی تخمین زده شده بر اساس نتایج تفسیر ژئوالکتریک، در کنار پیزومترهای حفر شده در منطقه، موجود هستند. در این منطقه تعداد ۴۴ پیزومتر وجود دارد. همچنین تعداد ۱۶۹ سونداژ الکتریکی در منطقه وجود دارد که این نقاط موقعیت داده‌های توپوگرافی و ژئوالکتریک در نظر گرفته شده است. بنابراین در این منطقه ۱۶۹ داده توپوگرافی و به همین تعداد نیز داده ژئوالکتریک وجود دارد<sup>۱</sup>.

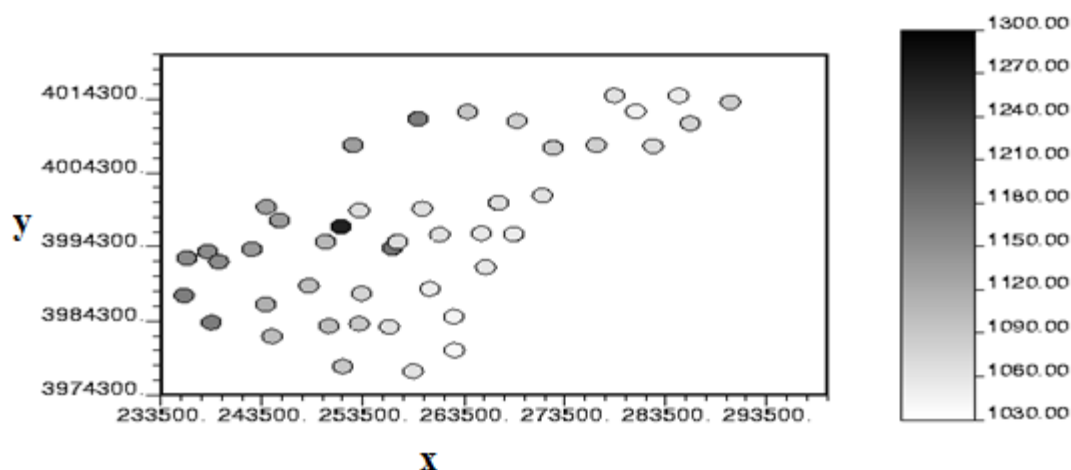
## ۵-۳ داده‌ها

داده‌هایی که برای تخمین سطح آب زیرزمینی در این مطالعه به کار گرفته شده‌اند، مانند تمام مطالعاتی که با استفاده از روش KED انجام می‌شوند، به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. گروه اول شامل داده‌های اولیه است که در این مطالعه شامل داده‌های پیزومتریک می‌باشد. گروه دوم داده‌های ثانویه هستند که در این مطالعه شامل داده‌های توپوگرافی و داده‌های ژئوالکتریک در دشت دامغان می‌باشد.

<sup>۱</sup> ارائه جزئیات بیشتر از منطقه مورد مطالعه بنا به درخواست کارفرما امکان‌پذیر نمی‌باشد.

### ۵-۳-۱ داده‌های اصلی

همان گونه که قبلاً ذکر شد، داده‌های اصلی به کار برده شده در روش KED در این مطالعه، داده‌های پیزومتریک هستند که در دشت دامغان برداشت شده‌اند. نقشه موقعیت جغرافیایی داده‌ها پیزومتریک در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱-۵ مشاهده می‌شود، عمق سطح آب زیرزمینی در این پیزومترها از سطح دریا از ۱۰۳۷ متر تا ۱۲۶۳ متر اندازه‌گیری شده است. مختصات این تمام داده‌ها در این فصل، به صورت سیستم تصویر جهانی مرکاتور<sup>۱</sup> (UTM) می‌باشد. این نقشه بر اساس مختصات داده‌های برداشت شده، تهیه شده است.



شکل ۱-۵ نقشه موقعیت داده‌های پیزومتریک موجود در منطقه دشت دامغان. مقدار کمی این داده‌ها در نوار سمت راست نقشه نشان داده شده است.

همان گونه که در شکل ۱-۵ مشاهده می‌شود، تعداد داده‌های پیزومتریک برای تخمین سطح آب زیرزمینی در شبکه مورد نظر کافی نبوده و تخمین با استفاده از فقط این داده‌ها نخواهد توانست نتایج مطلوبی را ارائه دهد.

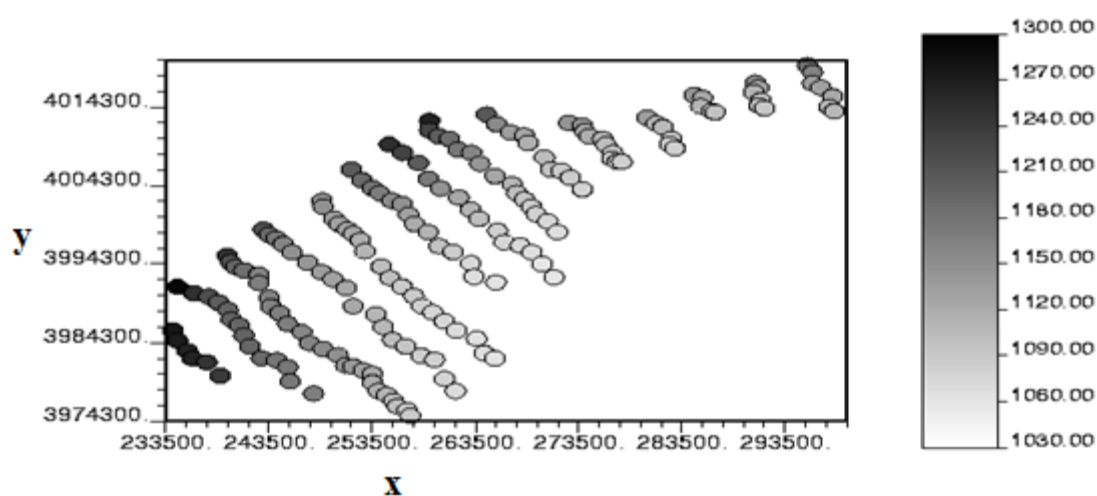
<sup>1</sup> Universal Transverse Mercator

### ۵-۳-۲ داده‌های ثانویه

داده‌های ثانویه به کار گرفته شده در این مطالعه برای تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش KED شامل داده‌های توپوگرافی و داده‌های ژئوالکتریک، می‌باشند.

### ۵-۳-۱ داده‌های توپوگرافی

داده‌های توپوگرافی موجود در منطقه در حین برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی در منطقه تهیه شده‌اند. داده‌های توپوگرافی در تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش KED به عنوان داده‌های ثانویه به کار گرفته شده‌اند. نقشه موقعیت جغرافیایی داده‌های توپوگرافی در شکل ۵-۲ آورده شده است. مقادیر این داده‌ها بر اساس ارتفاع مطلق نقطه برداشت از سطح آب‌های آزاد ارائه شده است. بنابراین مقدار داده‌های توپوگرافی برداشت شده در این منطقه بین ۱۰۵۷ تا ۱۲۹۷ متر از سطح آب‌های آزاد می‌باشد.



شکل ۵-۲ موقعیت داده‌های توپوگرافی برداشت شده در دشت دامغان که به عنوان داده‌های ثانویه در تخمین سطح آب زیرزمینی به کار گرفته شده‌اند. مقدار تقریبی داده‌های موجود از سطح آب‌های آزاد در نوار کنار نقشه نشان داده شده است.

همان گونه که در شکل ۵-۲ مشاهده می‌شود، تعداد داده‌های توپوگرافی در منطقه بسیار بیشتر

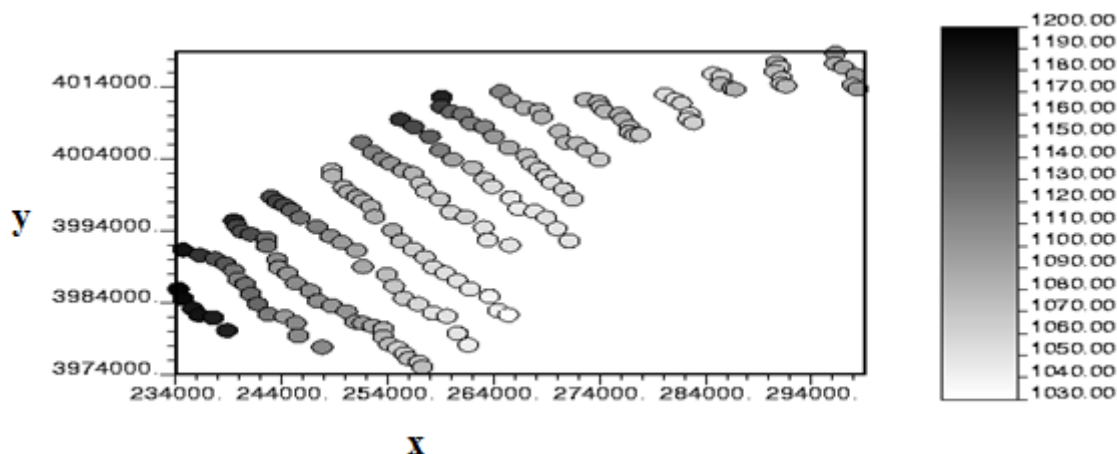
از تعداد داده‌های پیزومتریک که به عنوان داده‌های اصلی به کار گرفته شده‌اند، می‌باشد. انتظار می‌رود

استفاده از این داده‌ها در کنار داده‌های اولیه نتایج تخمین سطح آب زیرزمینی را در حد قابل توجهی افزایش دهد. ضریب همبستگی بین داده‌های توپوگرافی و پیزومتریک موجود در این منطقه برابر با ۰/۸۶ است.

### ۵-۳-۲-۲ داده‌های ژئوالکتریک

استفاده از دو یا چند نوع داده‌تانویه به عنوان روند بیرونی در روش KED دقت تخمین مورد نظر را بالا برده و نتایج مطلوب‌تری حاصل خواهد کرد [۱]. در این تحقیق در کنار داده‌های توپوگرافی، داده‌های مربوط به عمق سطح آب زیرزمینی که با استفاده از مطالعات مقاومت ویژه الکتریکی بدست آورده شده‌اند، نیز در منطقه موجود بودند. بنابراین تصمیم گرفته شد، علاوه بر استفاده از داده‌های توپوگرافی، از داده‌های ژئوالکتریک نیز در تخمین سطح آب زیرزمینی به عنوان روند بیرونی استفاده شود. این داده‌ها در واقع عمق سطح آب زیرزمینی در سونداژهای موجود در منطقه می‌باشند که با استفاده از تحلیل مقاومت ویژه الکتریکی در منطقه تخمین زده شده و با استفاده از پیزومترهای موجود در منطقه کالیبره شده‌اند.

همان گونه که قبلاً ذکر شد، داده‌های ژئوالکتریک و داده‌های توپوگرافی موجود در منطقه در نقاط مشابه برداشت شده‌اند که همان نقاط سونداژهای برداشت شده در برداشت‌های ژئوالکتریک می‌باشند. عمق سطح آب زیرزمینی در این داده‌ها بین ۱۰۳۷ تا ۱۱۹۵ متر از سطح دریا تخمین زده شده است. در شکل ۳-۵ نقشه مربوط به موقعیت جغرافیایی داده‌های بدست آمده از مطالعات ژئوالکتریک به تصویر کشیده شده است. ضریب همبستگی بین این داده‌ها و داده‌های توپوگرافی برابر با ۰/۹۱ است که این مقدار می‌تواند به دلیل کالیبره شده داده‌های ژئوالکتریک با استفاده از داده‌های پیزومتریک باشد.



شکل ۵-۳ نقشه موقعیت جغرافیایی داده‌های ژئوالکتریک برداشت شده در دشت دامغان. مقدار تقریبی این داده‌ها در نوار سمت راست شکل نشان داده شده است.

## ۴-۵ مطالعات تحلیل ساختاری روی داده‌ها

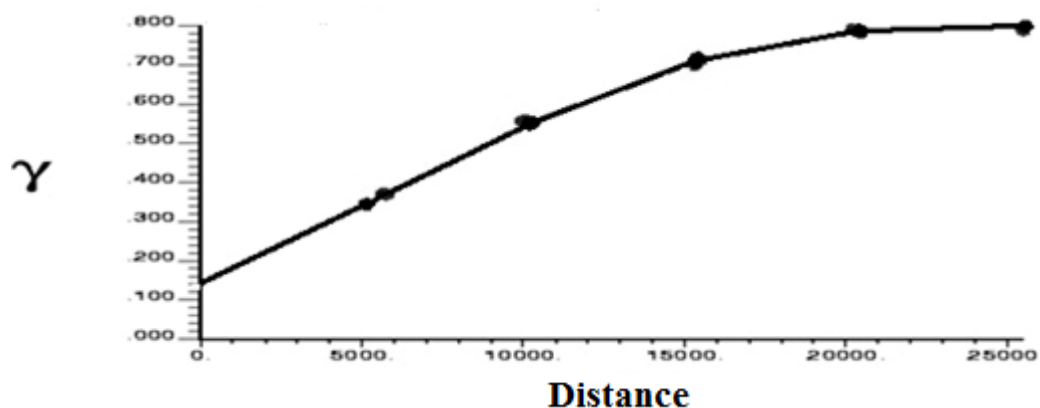
### ۱-۴-۵ داده‌های پیزومتریک

تحلیل ساختاری داده‌های اصلی در محیط نرم افزار زمین آماری © WinGSLIB 1.5.6 انجام و نتایج مرتبط بدست آمده است؛ در اولین مرحله دو داده حذف شده‌اند. که یکی از این داده‌ها دارای فاصله زیاد از سایر نقاط است که بسیار بیشتر شعاع جستجوی مورد نظر برای تخمین است و بنابراین در همسایگی هیچ یک از نقاط هدف تخمین واقع نخواهد شد و عملاً کارایی خود را در تخمین نقاط مورد نظر از دست خواهد داد. داده دوم، داده‌ای است که مقدار آن نسبت به نقاط اطرافش بسیار بیشتر است و احتمال می‌رود این مقدار به اشتباه برای این نقطه ثبت شده باشد. این داده به عنوان داده پرت در نظر گرفته شده است. نهایتاً تعداد ۴۲ داده به عنوان داده اصلی به کار گرفته شدند. در ادامه داده‌های پیزومتریک واریوگرافی شده‌اند که پارامترهای واریوگرام تجربی بدست آمده‌اند (نقاط کم رنگ).

مدل واریوگرامی که بر واریوگرام تجربی این داده‌ها برازش داده شده است، یک مدل کروی با

دامنه ۲۲۵۰۰ و سقف ۰/۶۸ و اثر قطعه‌ای برابر با ۰/۱۲ است (خطوط سیاه رنگ).

در شکل ۴-۵ واریوگرام تجربی داده‌های پیزومتریک و مدل برازش داده شده بر آن ارائه شده است.

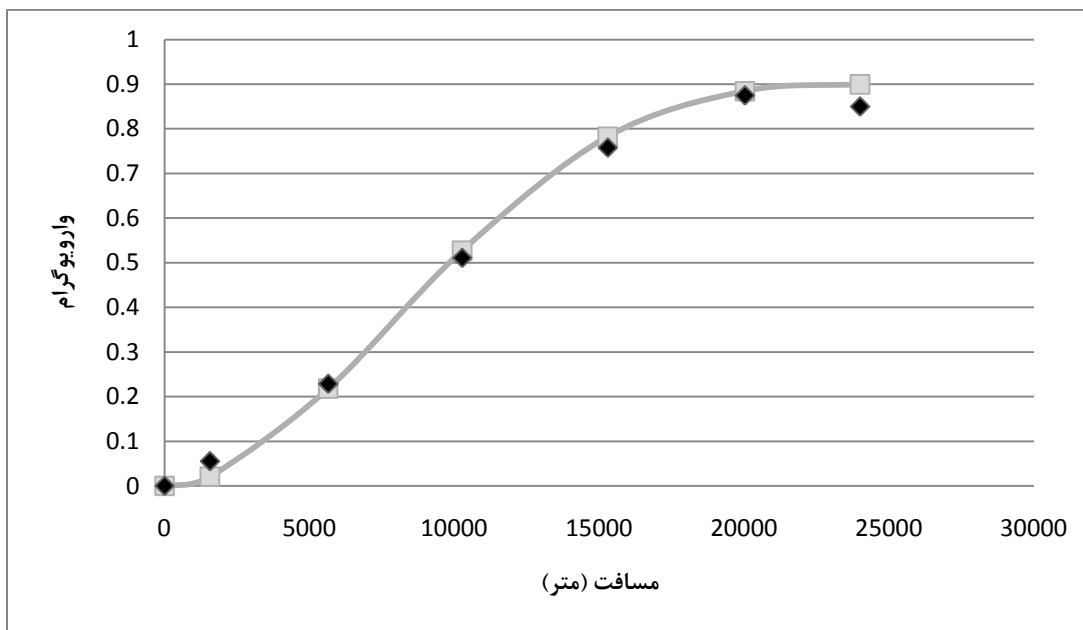


شکل ۴-۵ واریوگرام تجربی داده‌های پیزومتریک و مدل کروی برازش داده شده بر آن همراه با اثر قطعه‌ای.

### ۲-۴-۵ داده‌های توپوگرافی

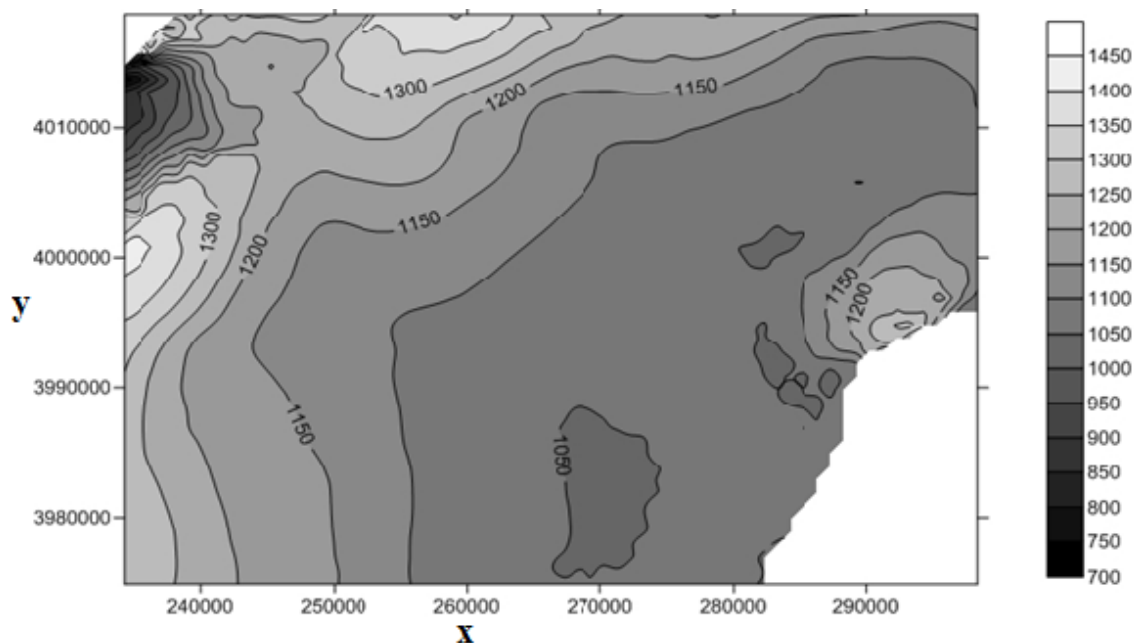
تعداد داده‌های توپوگرافی موجود برابر با ۱۶۹ عدد می‌باشد که روی این داده‌ها نیز مطالعات تحلیل ساختاری انجام شده واریوگرام تجربی آنها محاسبه شده است. مدل واریوگرام برازش داده شده یک مدل گوسی با سقف ۰/۹۵ و دامنه ۲۰۵۰۰ متر است. مدل گوسی دارای ناپایداری‌هایی است که تخمین را دچار اختلال می‌کند، بنابراین تصمیم گرفته شد به جای این مدل از مدل مکعبی<sup>۱</sup> که دارای رفتاری مشابه با مدل گوسی است، استفاده شود. بنابراین، مدل واریوگرام برازش داده شده یک مدل مکعبی با سقفی برابر با ۰/۹ و دامنه‌ای برابر با ۲۵۰۰۰ متر و اثر قطعه‌ای برابر با صفر می‌باشد. در شکل ۵-۵ واریوگرام تجربی و مدل مکعبی برازش داده شده بر آنها مشاهده می‌شود. نقطه‌های لوزی شکل مربوط به واریوگرام تجربی و نقاط مربعی شکل مربوط به مدل واریوگرام مکعبی برازش داده شده است.

<sup>۱</sup> Cubic



شکل ۵-۵ واریوگرام تجربی و مدل واریوگرام کروی برازش داده شده بر داده‌های توپوگرافی برداشت شده در دشت دامغان که به عنوان روند بیرونی در تخمین سطح آب زیرزمینی در منطقه به کار گرفته شده‌اند.

به دلیل این که در تخمین زمین آماری با استفاده از روش KED لازم است داده‌های ثانویه در تمام نقاط هدف تخمین موجود باشند، داده‌های توپوگرافی با استفاده از مدل واریوگرامی که بر آنها برازش داده شده است، در نقاط هدف که همان شبکه تخمین می‌باشد، تخمین زده شده‌اند. روشی که برای تخمین این داده‌ها به کار گرفته شده است روش تخمین زمین آماری کریگینگ معمولی است. نقشه مربوط به تخمین داده‌های توپوگرافی در نقاط هدف، در شکل ۶-۵ ارائه شده است. این نقشه با انتقال خروجی نرم افزار MATLAB7® به نرم افزار Surfer9® تهیه شده است. به دلیل این که داده‌های توپوگرافی برداشت شده پوشش خوبی را از منطقه مورد نظر ایجاد نمی‌کنند، نمی‌توان این داده‌ها را در تمام نقاط هدف با دقت مناسبی تخمین زد. نهایتاً در تخمین سطح آب زیرزمینی در این نقاط نیز با مشکل مواجه خواهیم بود.



شکل ۵-۶ نقشه داده‌های توپوگرافی تخمین زده شده با استفاده از مدل مکعبی برازش داده شده در نقاط هدف در دشت دامغان.

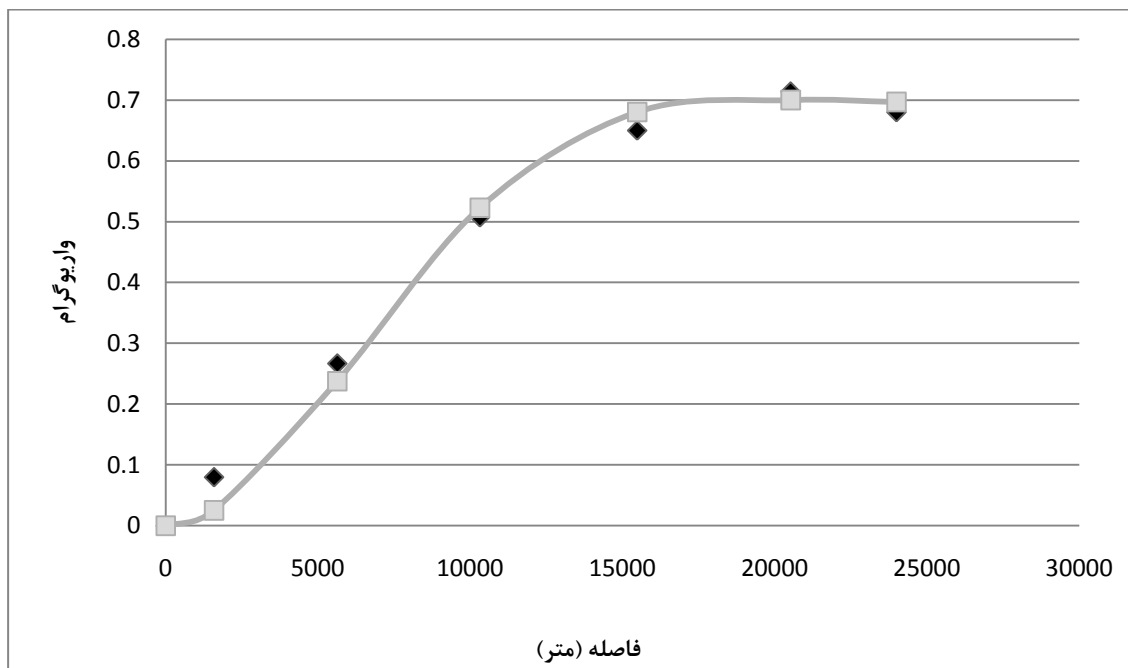
### ۳-۴-۵ داده‌های ژئوالکتریک

در این بخش داده‌های ژئوالکتریک که همان سطح آب زیرزمینی بدست آمده در هر سونداژ هستند، به عنوان داده ثانویه به کار گرفته شده‌اند. یعنی از سطح آب بدست آمده در هر سونداژ، که از تفسیرهای ژئوفیزیکی داده‌های ژئوالکتریک بدست آمده است، به عنوان روند بیرونی استفاده خواهد شد.

برای این داده‌ها نیز پس از مطالعات ساختاری، یک مدل واریوگرام گوسی بر مدل تجربی برازش داده شده که سقفی برابر با  $0.71$  و دامنه‌ای برابر با  $16500$  متر برازش داده شده است. بر این داده‌ها نیز باید همان گونه که قبلاً ذکر شد، یک مدل مکعبی برازش داده شده است که با استفاده از داده‌های خروجی از نرم‌افزار WinGSLIB 1.5.6® و انتقال آنها به محیط Excell®، این برازش ثانویه انجام می‌پذیرد. در نهایت یک مدل مکعبی با دامنه  $21000$  متر و سقف  $0.7$  و اثر قطعه‌ای برابر با صفر بر داده‌های ژئوالکتریک برازش داده شده است. در شکل ۷-۵ واریوگرام تجربی و مدل برازش داده

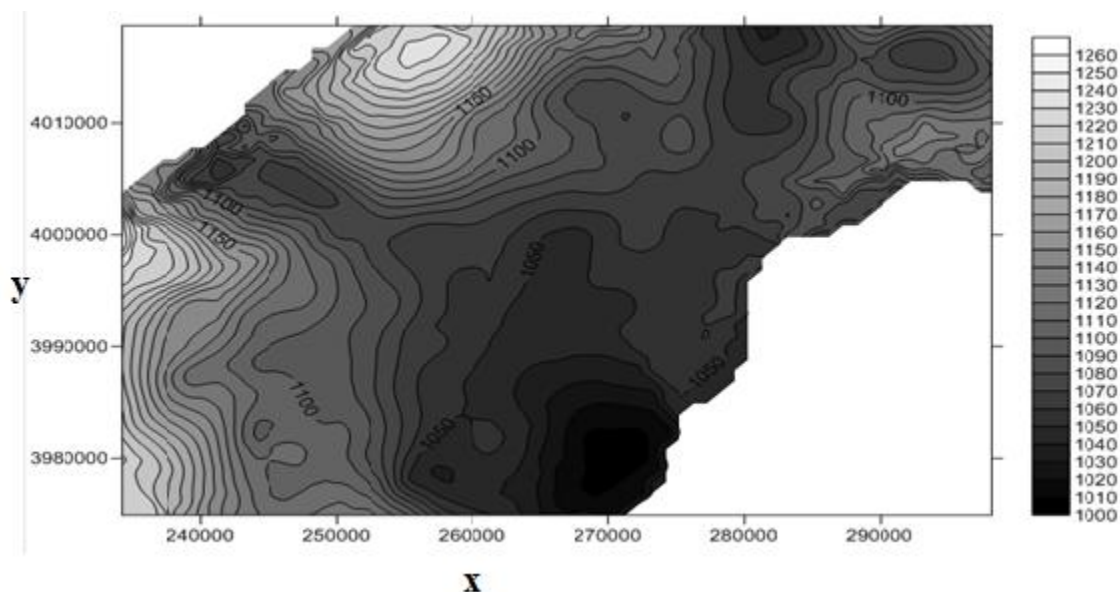


شده بر داده‌های ژئوالکتریک نشان داده شده است. نقطه‌های لوزی شکل مربوط به واریوگرام تجربی و نقاط مربعی شکل مربوط به مدل واریوگرام برازش داده شده است.



شکل ۵-۷ واریوگرام تجربی و مدل واریوگرام مکعبی برازش داده شده بر داده‌های ژئوالکتریک در دشت دامغان.

مطابق آنچه در مورد داده‌های توپوگرافی ذکر شد، داده‌های ژئوالکتریک نیز در نقاط هدف با استفاده از مدل واریوگرام تجربی و با روش تخمین زمین آماری کریگینگ معمولی تخمین زده شده‌اند. در شکل ۵-۸ نقشه کنتموری مربوط به داده‌های ژئوالکتریک که با استفاده از مدل واریوگرام یاد شده تخمین زده شده‌اند، نشان داده شده است. این نقشه در محیط نرم‌افزار Surfer 9® تهیه شده است. به لحاظ این که نقاط برداشت این داده‌ها نیز مشابه داده‌های توپوگرافی است، مشکل پوشش مناسب این داده‌ها از منطقه مورد مطالعه در اینجا نیز وجود دارد.



شکل ۵-۸ تخمین داده‌های ژئوالکتریک با استفاده از مدل واریوگرام معکبی برازش داده شده و با روش تخمین زمین‌آماري کریگینگ معمولی در دشت دامغان. مقدار داده‌ها در نوار سمت راست شکل نشان داده شده است.

## ۵-۵ تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت دامغان

برای تخمین سطح آب زیرزمینی در این فصل از پنج روش زیر استفاده شده است:

- ۱- استفاده از رگرسیون خطی بین داده‌های توپوگرافی و پیزومتريک و تخمین پیزومترها در نقاطی که داده‌های توپوگرافی وجود دارند.
- ۲- تخمین سطح آب زیرزمینی با به کار گرفتن داده‌های پیزومتريک با روش کریگینگ معمولی.
- ۳- کریگینگ با روند بیرونی با استفاده از داده‌های پیزومتريک به عنوان داده‌های اصلی و داده‌های توپوگرافی به عنوان داده‌های ثانویه.
- ۴- کریگینگ با روند بیرونی با استفاده از داده‌های پیزومتريک به عنوان داده‌های اصلی و داده‌های ژئوالکتريک، به عنوان داده ثانویه.

۵- کریگینگ با روند بیرونی با استفاده از داده‌های پیزومتریک به عنوان داده‌های اصلی و داده‌های ژئوالکتریک و داده‌های توپوگرافی به عنوان روندهای بیرونی.

### ۵-۱-۵ مشخصات شبکه تخمین

منطقه‌ای که سطح آب زیرزمینی در آن تخمین زده شده است، همان طور که در ابتدای فصل ذکر شد، در منطقه دشت دامغان واقع شده است. این منطقه بر اساس مطالعات مقاومت ویژه‌ای که در آن انجام شده است، دارای وسعت  $45 \times 65$  کیلومتر مربع است. بر همین اساس، شبکه‌ای که با عنوان شبکه تخمین در نظر گرفته شده است، دارای ابعادی برابر با ۶۵ کیلومتر در راستای شرقی- غربی و ۴۵ کیلومتر در راستای شمالی- جنوبی می‌باشد. فاصله نقاطی که در این شبکه تخمین زده شده‌اند برابر با ۱۰۰۰ متر است به دیگر سخن فاصله گره‌های این شبکه برابر با ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. مبدا این شبکه نقطه‌ای با مختصات UTM برابر با (۳۹۷۴۰۰۰، ۲۳۴۰۰۰) در نظر گرفته شده است.

### ۵-۲-۵ تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از رگرسیون خطی

در این روش در ابتدا بین داده‌های توپوگرافی و داده‌های پیزومتریک یک رگرسیون خطی برقرار کرده و رابطه خطی بین داده‌های پیزومتریک و داده‌های توپوگرافی با استفاده از این رگرسیون خطی محاسبه شده است. سپس از این رابطه استفاده شده و در نقاطی که داده‌های توپوگرافی موجود و معلوم هستند، داده‌های پیزومتریک با استفاده از این رابطه خطی تخمین زده شده است. در انتها نیز داده‌های تخمینی به صورت یک نقشه کنترولی نمایش داده شده‌اند.

رابطه‌ای که به کمک آن داده‌های پیزومتریک تخمین زده خواهند شد به صورت رابطه (۵-۱)

است:

$$\text{Piezo} = a * \text{Topography} + b$$

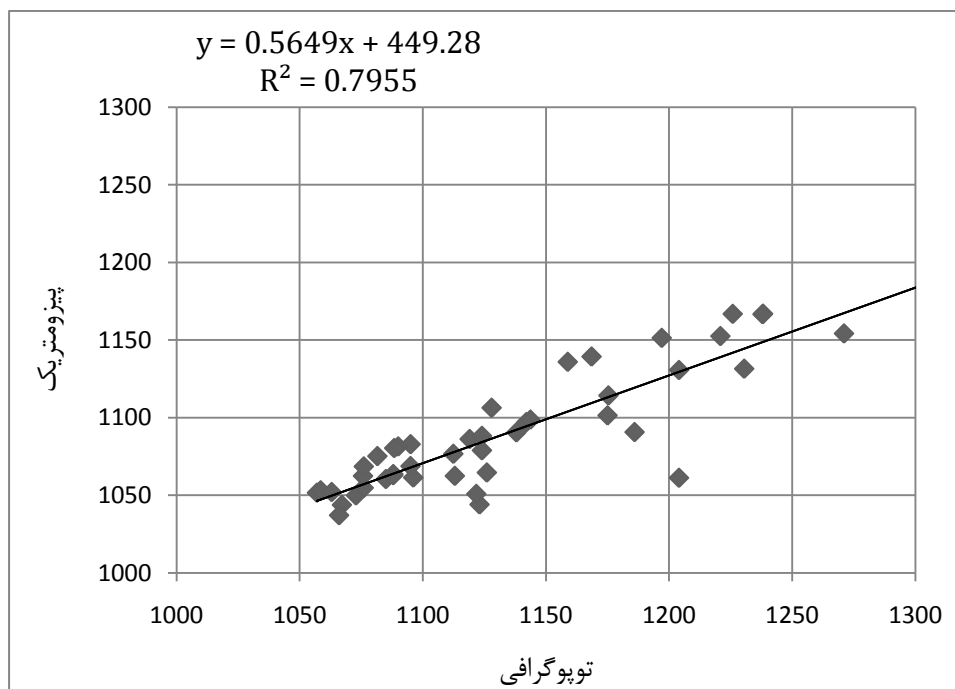
(۵-۱)

که ضرایب  $a$  و  $b$  به کمک رگرسیون خطی بین داده‌های توپوگرافی و داده‌های پیزومتریک بدست خواهند آمد. همان گونه که در شکل ۵-۹ نشان داده شده است، رابطه خطی که از رگرسیون خطی بدست آمده است، به صورت رابطه (۵-۲) است:

$$Y = 0.5649X + 449.28 \quad (۵-۲)$$

نهایتاً از این رابطه داریم:

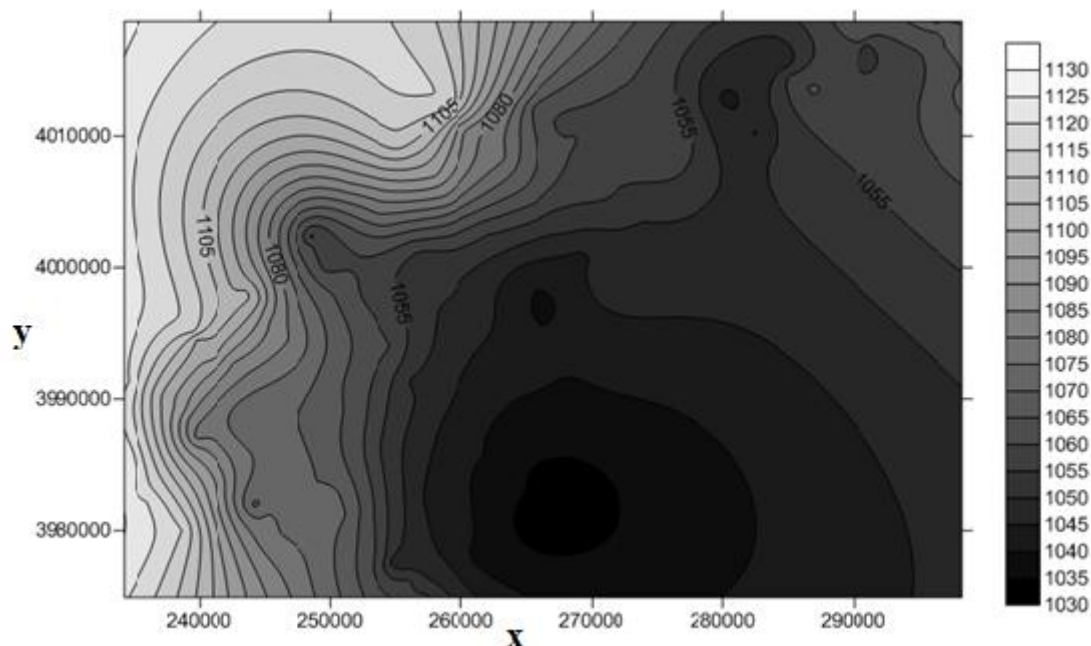
$$\text{Piezo} = 0.5649 * \text{Topography} + 449.28 \quad (۵-۳)$$



شکل ۵-۹ رگرسیون خطی بین داده‌های پیزومتریک و توپوگرافی و رابطه خطی بین پیزومتریک و توپوگرافی.

پس از این که رابطه خطی بین داده‌های پیزومتریک و توپوگرافی با استفاده از رگرسیون خطی بین آنها بدست آمد، داده‌های پیزومتریک در نقاطی که داده‌های توپوگرافی موجود هستند، تخمین زده می‌شوند. سپس با استفاده از مقادیر تخمینی داده‌های پیزومتریک از رگرسیون، نقشه سطح

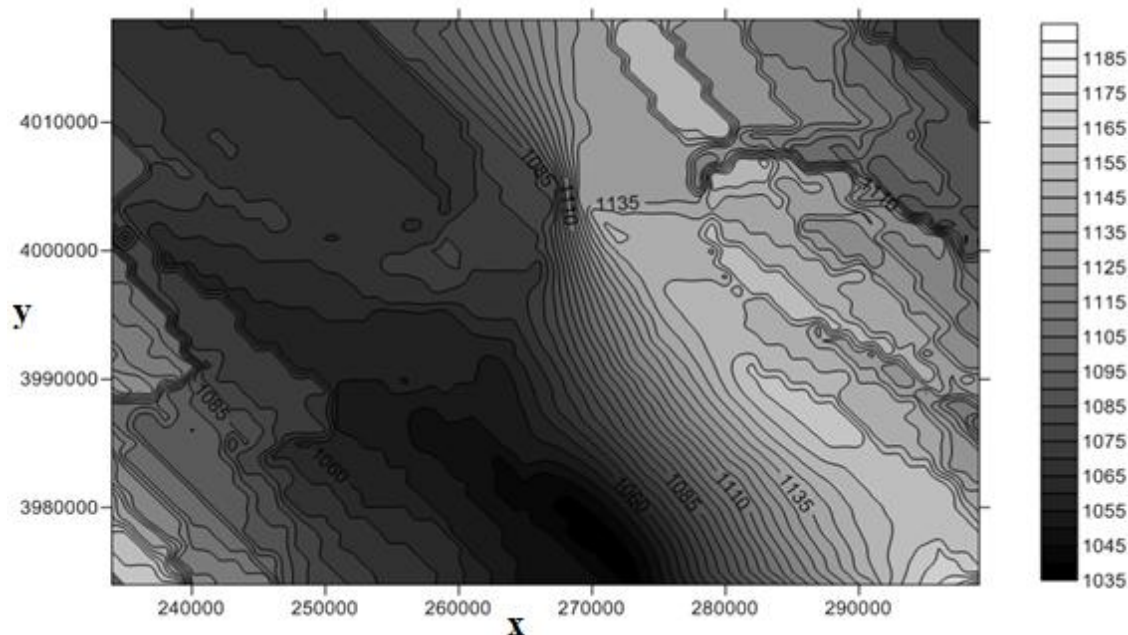
ایستایی ترسیم شده است ( تعداد داده‌ها از ۴۶ عدد به ۱۶۹ عدد ارتقا یافته‌اند). پس می‌توان با تعداد داده‌های بیشتر سطح آب زیرزمینی را در منطقه تخمین زد. برای تخمین سطح آب زیرزمینی در منطقه، این داده‌ها وارد نرم افزار Surfer 9® و یک نقشه کنتوری تهیه شده است (شکل ۵-۱۰).



شکل ۵-۱۰ نقشه کنتوری سطح آب زیرزمینی که با استفاده از داده‌های پیزومتریک بدست آمده از رگرسیون خطی در دشت دامغان تهیه شده‌اند.

### ۵-۳-۵ تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش کریگینگ معمولی

داده‌های به کار گرفته شده در این روش، داده‌های پیزومتریک هستند. پس از انجام مطالعات تحلیل ساختاری روی داده‌های پیزومتریک، در محیط نرم افزار WinGSLIB 1.5.6®, با استفاده از روش کریگینگ معمولی، این داده‌ها در شبکه مورد نظر تخمین زده شده‌اند. سپس داده‌های خروجی از نرم افزار WinGSLIB 1.5.6® وارد محیط نرم‌افزار Surfer 9® شده و به صورت نقشه کنتوری ارائه شده‌اند (شکل ۵-۱۱).



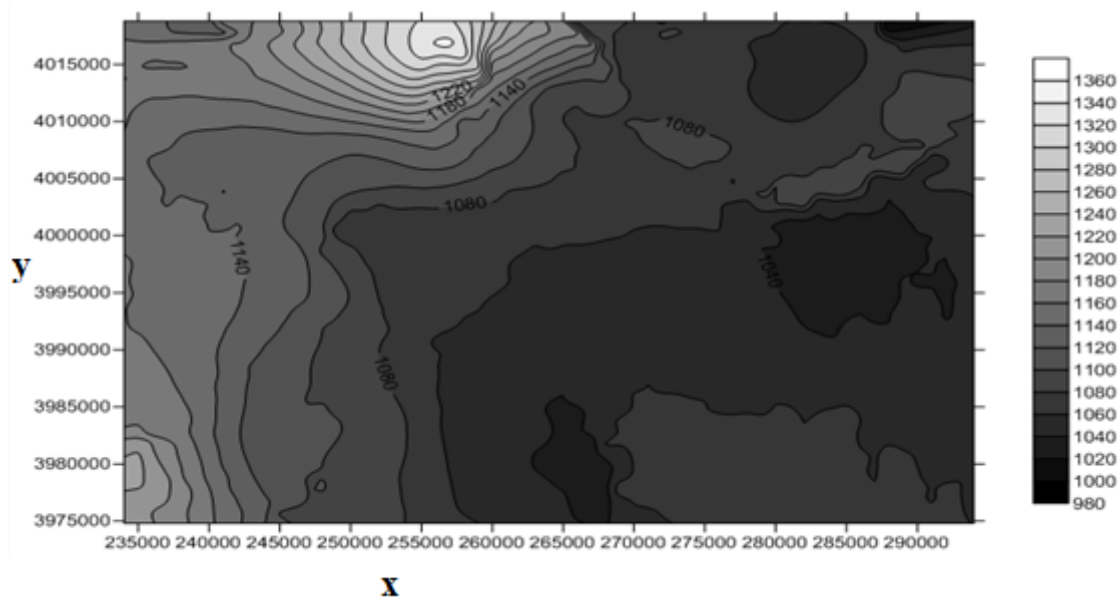
شکل ۵-۱۱ سطح آب زیرزمینی تخمین زده شده با روش کریگینگ معمولی و با استفاده از داده‌های پیزومتریک در دشت دامغان.

#### ۵-۴-۵ تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش KED و استفاده از

#### داده‌های توپوگرافی به عنوان روند بیرونی

داده‌های توپوگرافی به کار گرفته شده در این مطالعه به صورت یک شبکه منظم که منطبق بر شبکه هدف تخمین مورد نظر باشد، وجود ندارند بنابراین باید این داده‌ها را روی شبکه‌ای منطبق بر شبکه هدف، تخمین زد. پس از این که داده‌های توپوگرافی روی شبکه یاد شده به صورت منظم روی گره‌هایی با فاصله  $1000 \times 1000$  تخمین زده شدند، از آن‌ها به عنوان داده‌های ثانویه در تخمین پیزومترها استفاده می‌شود. برای تخمین سطح آب زیرزمینی در این شرایط از نرم افزار زمین آماری WinGSLIB1.5.6® استفاده شده است. البته کدهای لازم برای این تخمین در نرم افزار MATLAB7® نیز تهیه شده‌اند. بدلیل این که نتایج حاصل شده از این روش با نتایج حاصل از نرم افزار WinGSLIB1.5.6® مشابه هستند. نتایجی که در اینجا ارائه شده است حاصل از نرم افزار زمین آماری WinGSLIB1.5.6® هستند. نقشه حاصل از تخمین سطح آب زیرزمین با استفاده از

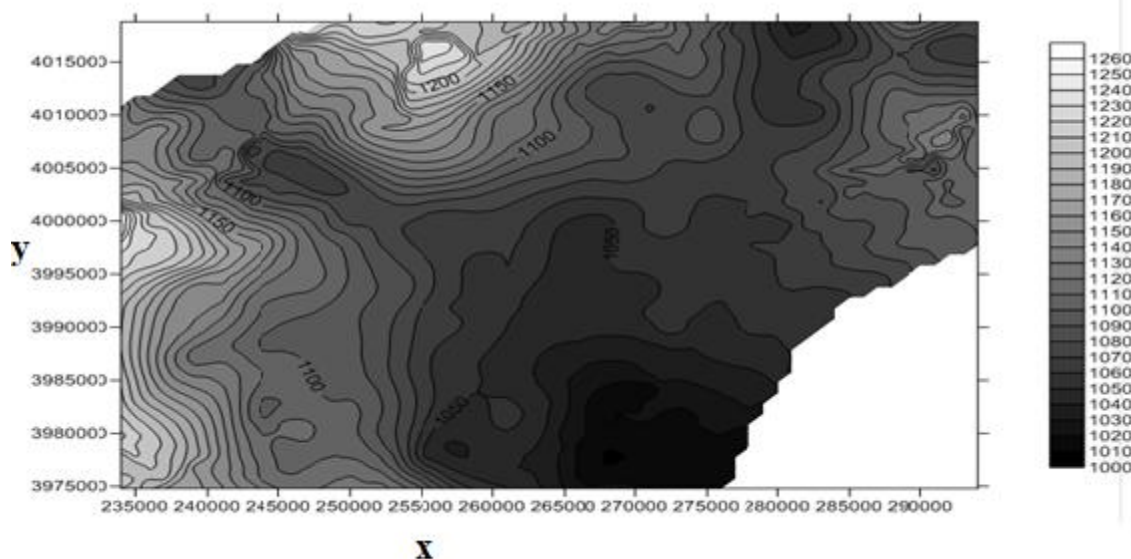
روش KED و استفاده از داده‌های پیزومتریک به عنوان داده‌های اولیه و داده‌های توپوگرافی به عنوان روند بیرونی در شکل ۵-۱۲ ارائه شده است.



شکل ۵-۱۲ سطح آب زیرزمین تخمین زده شده با روش KED و استفاده از داده‌های پیزومتریک به عنوان داده اولیه و داده‌های توپوگرافی به عنوان روند بیرونی در منطقه دشت دامغان.

### ۵-۵-۵ تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش KED و استفاده از داده‌های ژئوالکتریک به عنوان روند بیرونی

شرایط استفاده از داده‌های ژئوالکتریک به عنوان روند بیرونی در تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش KED در دشت دامغان مشابه با شرایطی است که برای داده‌های توپوگرافی در بخش ۵-۵-۴ ذکر شده است. نهایتاً نقشه سطح آب زیرزمینی با استفاده از این داده‌ها تهیه شده است که در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است.



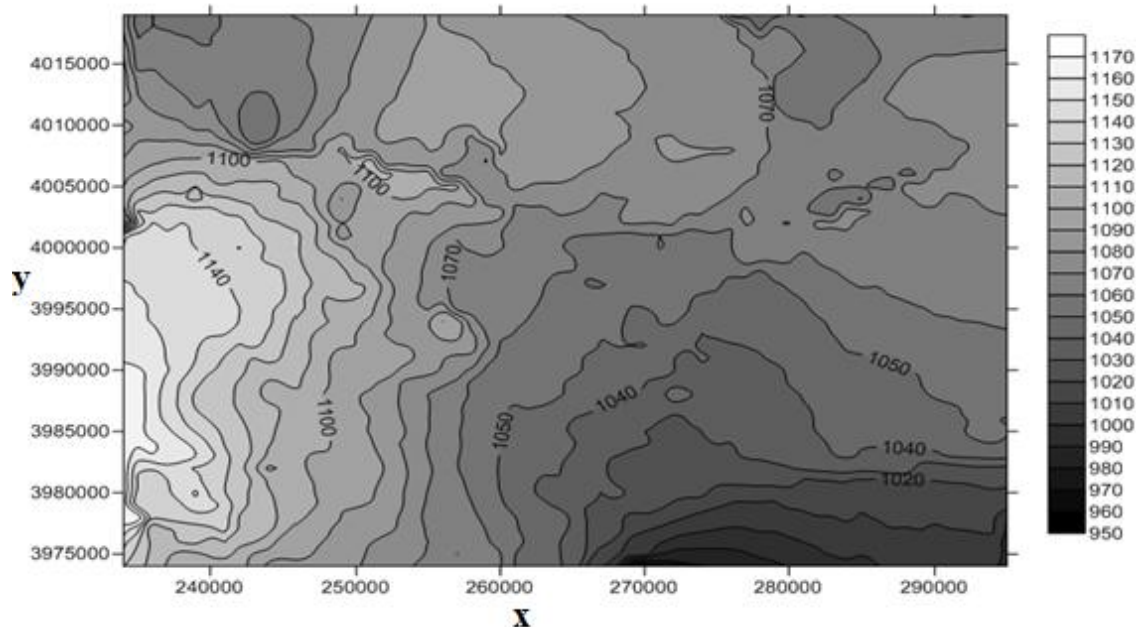
شکل ۵-۱۳ سطح آب زیرزمینی تخمین زده شده با استفاده روش KED و به کار گرفتن داده‌های پیزومتریک به عنوان داده اولیه و داده‌های ژئوالکتریک به عنوان روند بیرونی در دشت دامغان.

### ۵-۵-۶ تخمین سطح آب زیرزمینی با روش KED و با استفاده از دو داده توپوگرافی و ژئوالکتریک به عنوان روند بیرونی

استفاده از داده‌های توپوگرافی و ژئوالکتریک به عنوان روند بیرونی در بخش‌های قبلی ارائه شد. در این بخش سطح آب زیرزمینی در دشت دامغان با استفاده از روش کریگینگ با روند بیرونی و با استفاده توأم از داده‌های توپوگرافی و ژئوالکتریک به عنوان روند بیرونی، تخمین زده شده است. شکل ۵-۱۴ نقشه سطح آب زیرزمینی حاصل از تخمین زمین آماری کریگینگ همراه با چند روند بیرونی در دشت دامغان و با استفاده از داده‌های پیزومتریک به عنوان داده اولیه و داده‌های توپوگرافی و ژئوالکتریک به عنوان روندهای بیرونی را نشان می‌دهد. شبکه تخمین نیز مانند سایر تخمین‌هایی که در بخش‌های قبلی انجام شدند، یک شبکه  $45 \times 65$  کیلومتر با فاصله گر ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. به دلیل این که گزینه کریگینگ همراه با چند روند بیرونی در نرم افزار زمین آماری WinGSLIB 1.5.6® وجود ندارد، انجام این تخمین به کمک برنامه نویسی در محیط نرم افزار



MATLAB7® انجام شده است. نتایج خروجی از این کد وارد نرم افزار Surfur9® شده و به صورت یک نقشه کنتموری ارائه شده‌اند (شکل ۵-۱۴).



شکل ۵-۱۴ نقشه سطح آب زیرزمینی تخمین زده شده با روش کریگینگ همراه با داده‌های توپوگرافی ژئوالکتریک به عنوان روندهای بیرونی در دشت دامغان.

## ۵-۶ اعتبارسنجی روش‌های تخمین به کار برده شده

### ۵-۶-۱ نتایج حاصل از اعتبارسنجی روش‌های تخمین به کار گرفته شده

همان گونه که قبلاً ذکر شد، اعتبارسنجی به عنوان ابزاری برای ارزیابی کارایی تخمین مورد نظر به کار برده می‌شود. در این بخش نیز با استفاده از اعتبارسنجی روش‌های تخمین به کار گرفته شده برای تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت دامغان، که در بخش‌های قبلی ذکر شدند، به ارزیابی کارایی این روش‌های تخمین پرداخته شده است. پارامترهایی که برای اعتبارسنجی به کار برده شده‌اند، شامل ضریب شیب خط رگرسیون برازش داده شده به نمودار پراکندگی نقطه‌ای داده‌های تخمینی و واقعی (a)، ضریب تعیین این خط ( $R^2$ )، واریانس خطای تخمین و میانگین خطای تخمین

می‌باشند که برای هر یک از روش‌های تخمین به کار برده شده محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند (جدول ۵-۱).

جدول ۵-۱ نتایج حاصل از اعتبارسنجی روش‌های تخمین به کار گرفته شده برای تخمین سطح آب زیرزمینی در دشت دامغان. بهترین نتایج به صورت پر رنگ و ضعیف‌ترین نتایج به صورت کج نمایش داده شده‌اند.

روش تخمین	عامل بیرونی به عنوان روند در تخمین KED				
	کریگینگ معمولی	رگرسیون خطی	توپوگرافی	ژئوالکتریک	توپوگرافی و ژئوالکتریک
پارامترهای اعتبارسنجی					
شیب خط رگرسیون	۰/۶۸۶۳	۰/۵۶۴۹	۰/۸۵۴۶	۰/۸۴۳۲	۰/۸۷۱۲
ضریب تعیین	۰/۵۵۵۷	۰/۶۹۵۶	۰/۸۳۵۴	۰/۸۹۱۲	۰/۹۲۴۸
واریانس خطای تخمین	۴۰۸/۰۲۰۳	۳۴۰/۷۴۵۸	۲۵۷/۰۲۸۱	۲۳۶/۴۳۵۷	۲۰۱/۳۵۴۱
میانگین خطای تخمین	۳/۵۵۴۹	۲/۰۵۱۷	۰/۰۲۳۳۱	۰/۰۱۷۲۱	۰/۰۰۸۱۲

### ۵-۶-۲ تحلیل نتایج اعتبارسنجی و جمع‌بندی

با استفاده از نتایجی که در جدول ۵-۱ ارائه شده‌اند، همان‌طور که انتظار می‌رفت، تخمین با روش کریگینگ همراه با توپوگرافی و ژئوالکتریک به عنوان روندهای بیرونی، از بهترین کارایی در بین سایر روش‌های تخمین موجود برخوردار است. استفاده از داده‌های ژئوالکتریک به عنوان روند بیرونی، تخمین بهتری نسبت به استفاده از داده‌های توپوگرافی در روش کریگینگ با روند بیرونی ارائه می‌دهد. این امر ناشی از این است که ساختار فضایی داده‌های ژئوالکتریک نسبت به داده‌های توپوگرافی داده‌های از تشابه بیشتری با ساختار داده‌های پیزومتریک برخوردار است که می‌تواند ناشی از کالیبره کردن این داده‌ها با پیزومترهای موجود در منطقه باشد. همانگونه که در ابتدای این فصل نیز ذکر شد، همبستگی بین داده‌های ژئوالکتریک و پیزومتریک بیشتر از همبستگی بین داده‌های توپوگرافی و پیزومتریک است. بنا به آنچه در فصل سوم ذکر شد، هرچه ضریب همبستگی بین

داده‌های اولیه و ثانویه بالاتر باشد، تخمین از کارایی بهتری برخوردار خواهد بود. در کل روش KED هم در حالت یک متغیره و هم در حالت چند متغیره، از نتایج مطلوب‌تری نسبت به روش‌های کریگینگ معمولی و رگرسیون خطی برخوردار است. آنچه شایان توجه است این است که بر اساس جدول ۵-۱، نتایجی که از رگرسیون خطی بدست آمده است، در بیشتر معیارها، بهتر از نتایجی است که تخمین با روش کریگینگ معمولی ارائه داده است. این امر می‌تواند به دلیل تعداد داده‌های به کار رفته در هر روش باشد. بر این اساس تعداد داده‌هایی که در تخمین با روش رگرسیون به کار گرفته شده‌اند، حدوداً چهار برابر تعداد داده‌هایی بوده‌اند که در روش کریگینگ معمولی به کار گرفته شده‌اند (۱۶۹ در مقابل ۴۵). ضعیف بودن نتایج حاصل از روش کریگینگ معمولی نسبت به روش‌های KED به کار برده شده، امری مورد انتظار و منطقی است. همان طور که در مباحث قبلی عنوان شد، کم بودن تعداد داده‌ها نسبت به منطقه مورد مطالعه، باعث ایجاد ضعف در نتایج حاصل از روش کریگینگ معمولی خواهد شد. استفاده از داده‌ثانویه در تخمین با روش کریگینگ، منجر به بهبود اوزان کریگینگ و در نتیجه بهبود نتایج حاصل از تخمین خواهد شد. در واقع داده‌های ثانویه به دلیل تشابه ساختاری که با داده اولیه دارند، موجب بهبود تخمین خواهند شد. بنابراین استفاده از روش KED در تمام شرایط بهینه‌تر از روش کریگینگ معمولی و سایر روش‌هایی که بر اساس کریگینگ تک متغیره کار می‌کنند، می‌باشد. همچنین در زمانی نیز که از KED استفاده می‌شود، هرچه انواع داده‌های ثانویه بیشتری به کار گرفته شود، نتایج تخمین مطلوب‌تر خواهند شد.

فصل هشتم:

نتیجہ گیری و پیشہ اداوات

## ۶-۱ نتیجه‌گیری

تکنیک‌های زمین آماری به دلیل در نظر گرفتن موقعیت فضایی متغیر مورد نظر، از توانایی‌های قابل توجهی در تخمین برخوردار هستند. استفاده از این روش‌ها در علوم مانند علوم زمین که موقعیت فضایی متغیر مورد نظر از اهمیت زیادی برخوردار است، می‌توانند به خوبی جای تکنیک‌های موجود در آمار کلاسیک را پر کنند. این روش‌ها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: دسته اول: روش‌های تک‌متغیره و دسته دوم: روش‌های چندگانه (چند متغیره). روش‌های تک‌متغیره به روش‌هایی اطلاق می‌شود که فقط یک متغیر را در تخمین مورد بررسی قرار می‌دهند و از همان متغیر در تخمین خودش استفاده می‌کنند، مانند کریگینگ معمولی، کریگینگ ساده و غیره. روش‌های چندگانه در تخمین متغیر مورد نظر علاوه بر بررسی این متغیر، از متغیر(های) دیگری نیز استفاده می‌کنند. روش‌های چندگانه علی‌رغم پیچیدگی‌های بیشتری که نسبت به روش‌های تک‌متغیره دارند، معمولاً نتایج بهتری در تخمین حاصل می‌کنند. از معمول‌ترین روش‌های چندگانه می‌توان به کریگینگ توام، کریگینگ توام هم موقعیت، و کریگینگ همراه با یک یا چند روند بیرونی ... اشاره کرد.

روش تخمین زمین آماری که در این پایان‌نامه به آن پرداخته و از آن در بهبود تخمین سطح آب زیرزمینی استفاده شده است، روش کریگینگ با روند بیرونی است. این روش همان طور که قبلاً ذکر شد، یکی از روش‌های چند متغیره در تخمین‌های زمین آماری است که از داده ثانویه به صورت جامع استفاده می‌کند یعنی لازم است داده ثانویه هم در نقاطی که داده اولیه وجود دارد و هم در نقاط هدف تخمین وجود داشته باشند. مباحثی که در این پایان‌نامه به آنها پرداخته شد شامل حساسیت‌سنجی روش کریگینگ با روند بیرونی نسبت به ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه و همچنین مقدار اثر قطعه‌ای داده ثانویه، تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش

کریگینگ همراه با یک و دو متغیر به عنوان روند بیرونی، است. نتایجی که از مطالبی که در سه فصل گذشته ارائه شده است، را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

✓ ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه در تخمین با روش کریگینگ با روند بیرونی، از اهمیت بسیاری در نتایج حاصل شده از این روش دارد. اندازه این ضریب همبستگی بین صفر تا یک تغییر می‌کند. بر اساس نتایجی که از اعتبارسنجی این روش در فصل سوم حاصل شده است، در زمانی که مقدار ضریب همبستگی به سمت یک میل می‌کند، تاثیر داده‌های ثانویه در نتایج تخمین حاصل از روش کریگینگ با روند بیرونی افزایش یافته نتایج تخمین بهبود می‌یابد. این امر به این دلیل است که داده‌های ثانویه از تراکم خوبی در منطقه مورد مطالعه برخوردار هستند و تخمین حاصل از این داده‌ها از نتایج بهتری نسبت به داده اولیه برخوردار خواهد بود. با کاهش ضریب همبستگی و نزدیک شدن آن به صفر، نتایج حاصل از تخمین با روش کریگینگ با روند بیرونی ضعیف شده و از کارایی تخمین کاسته خواهد شد. نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که نتایج حاصل از تخمین با روش کریگینگ با روند بیرونی در هر صورت از نتایج حاصل از روش کریگینگ معمولی بهتر خواهد بود. مگر در حالتی که ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه صفر باشد که در این حالت نتایج تخمین با این دو روش مشابه خواهد بود. در این حالت تاثیر داده ثانویه در تخمین به صفر خواهد رسید. با توجه به نکاتی که در فصل دوم به آنها اشاره شد، در این حالت رابطه خطی بین داده‌های اولیه و ثانویه از بین خواهد رفت و عملاً داده‌های ثانویه مذکور نمی‌توانند به عنوان داده ثانویه در روش کریگینگ با روند بیرونی به کار گرفته شوند چراکه بر اساس تعریفی که از داده ثانویه شد، این داده‌ها شرایط داده ثانویه را ندارند. تاثیر ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه در نتایج ارائه شده در جدول‌های ۴-۱ و ۵-۱ به خوبی مبین مطالب بالا است.

✓ وجود اثر قطعه‌ای در توزیع فضایی یک متغیر به علت هموار شدگی که در نتایج تخمین بوجود می‌آورد، از کیفیت تخمین خواهد کاست. این مورد مخصوصاً در روش‌های تخمین تک متغیره به چشم می‌خورد. تاثیر این پارامتر در نتایج حاصل از تخمین با روش کریگینگ با روند بیرونی با روش‌های دیگر مخصوصاً با روش‌های تخمین تک متغیره مانند کریگینگ معمولی، متفاوت است. بر اساس نتایج بدست آمده از اعتبارسنجی انجام شده در فصل سوم، زمانی که ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه بالا باشد (به یک نزدیک باشد)، تاثیر وجود اثر قطعه‌ای در واریوگرام داده‌های اولیه بسیار ناچیز خواهد بود. اما در زمانی که این ضریب همبستگی به مقدار صفر نزدیک شود، تاثیر منفی بر نتایج حاصل از تخمین خواهد گذاشت. همان طور که در بند قبلی نیز اشاره شد، در زمانی که ضریب همبستگی بین داده‌های اولیه و ثانویه بالا باشد، داده‌های ثانویه تاثیر بیشتری بر نتایج حاصل از تخمین گذاشته و تاثیر داده اولیه کم خواهد شد. بنابراین از تاثیر اثر قطعه‌ای مذکور نیز در نتایج تخمین کاسته خواهد شد. اما در ضریب همبستگی پایین این اتفاق نخواهد افتاد و تاثیر اثر قطعه‌ای موجود در واریوگرام داده اولیه چشم‌گیرتر خواهد شد. بنابراین گرچه وجود اثر قطعه‌ای بر نتایج حاصل از تخمین تاثیرگذار است، اما نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که ضریب همبستگی بر این پارامتر ارجحیت داشته و آن را کنترل می‌کند.

✓ بر اساس نتایج اعتبارسنجی که در جدول ۴-۱ ارائه شده‌اند، تخمین سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش کریگینگ با روند بیرونی نسبت به روش کریگینگ معمولی، کارآیی بیشتری داشته است. به دیگر سخن، استفاده از روش تخمین کریگینگ با روند بیرونی منجر به بهبود نتایج حاصل از تخمین سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد نظر شده است. آنچه مسلم است این است که استفاده از داده‌های توپوگرافی به عنوان روند بیرونی در این روش، به این بهبود منجر شده است. یعنی به جای استفاده از تعداد داده پیزومتریک بیشتر در روش کریگینگ

معمولی، به منظور بهبود دادن نتایج تخمین، از داده‌های توپوگرافی به عنوان روند بیرونی، استفاده شده است. این کار در عمل حداقل دو مزیت دارد: اول این که دقت تخمین افزایش یافته است و دوم این که از هزینه‌های تخمین (که در هر پروژه از پارامترهای مهم محسوب می‌شوند) کاسته شده است.

✓ بر اساس نتایج اعتبارسنجی ارائه شده در جدول ۵-۱، استفاده از بیش از یک متغیر به عنوان روند بیرونی منجر به بهبود نتایج حاصل از تخمین نسبت به زمانی که فقط از یک نوع متغیر به عنوان روند بیرونی استفاده می‌شود، خواهد شد. زمانی که از چند نوع متغیر به عنوان روند بیرونی استفاده می‌شود، هر یک از این متغیرها در تصحیح اوزان کریگینگ تاثیرگذار هستند و در مجموع منجر به بهینه شدن اوزان کریگینگ نسبت به حالتی که فقط از یک متغیر به عنوان عامل بیرونی استفاده می‌شود، خواهد شد.

با توجه به مواردی که در بالا ذکر گردید، استفاده از روش کریگینگ با روند بیرونی نسبت به روش‌های معمول تخمین مانند کریگینگ معمولی، منجر به بهبود نتایج حاصل از تخمین متغیر مورد نظر که در اینجا سطح آب زیرزمینی است، خواهد شد. این امر اصلی‌ترین هدفی است که این پایان‌نامه در راستای نایل شدن به آن تدوین گردیده است. بنابراین اهدافی که در این پایان‌نامه دنبال شده‌اند، تحقق یافته‌اند.

## ۶-۲ پیشنهادات

بر اساس مطالعات انجام شده و نتایجی که از این پایان‌نامه حاصل شده است، موارد زیر برای استفاده از روش کریگینگ در تخمین‌های زمین آماری، پیشنهاد می‌شوند:

❖ در مبحث مطالعات اکتشاف نفت با استفاده از روش‌های لرزه، می‌توان از داده‌های گمانه‌های اکتشافی به دلیل هزینه زیادی که دارند، به عنوان داده اولیه و از داده‌های بدست آمده از



مطالعات لرزه به عنوان داده ثانویه کمک کرد. زیرا داده‌های لرزه هم از هزینه کمتری نسبت به حفاری برخوردار بوده و هم می‌توان به تعداد زیادی از آنها در منطقه مورد نظر برداشت کرد.

- ❖ به منظور تخمین میزان پوشش گیاهی در یک منطقه می‌توان با استفاده از داده‌های تراکم پوشش گیاهی که در عکس‌های ماهواره‌ای موجود هستند و رابطه آن با ارتفاع استفاده کرده و داده‌های تراکم پوشش گیاهی را به عنوان داده اولیه و داده‌های ارتفاع را به عنوان داده ثانویه در نظر گرفته و با استفاده از روش کریگینگ با روند بیرونی، تراکم پوشش گیاهی را در منطقه مورد نظر تخمین زد.
- ❖ برای تخمین دمای محیط در یک منطقه می‌توان از داده‌های توپوگرافی به عنوان روند بیرونی برای این تخمین با استفاده از روش کریگینگ با روند بیرونی استفاده کرد.
- ❖ در اکتشافات ژئوشیمیایی می‌توان برای تخمین عیار عناصری مانند طلا در مناطق امیدبخش می‌توان از رابطه این عنصر با عناصری مانند آرسنیک، آنتیموان و جیوه استفاده کرده و از آنها به عنوان روند بیرونی در تخمین این عنصر استفاده کرد.
- ❖ در مطالعات ژئوفیزیکی در اکتشافات معدنی و در روش‌هایی مانند مغناطیس می‌توان از داده‌های برداشت شده با روش مغناطیس هوایی، به عنوان روند بیرونی برای تخمین داده‌های برداشت شده در روی زمین استفاده کرد.
- ❖ در حساسیت‌سنجی روش کریگینگ با روند بیرونی، پارامترهایی مانند شعاع جستجوی تخمین و همچنین ضریب همبستگی بین داده‌های ثانویه در روش کریگینگ همراه با چند روند بیرونی در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. پیشنهاد می‌شود، حساسیت‌سنجی روش مذکور برای این پارامترها نیز مورد بررسی قرار گیرد.

پوستہ

## پیوست ۱: اعتبارسنجی

در عمل، تخمین  $Z(x_\alpha)$  به کمک نقاط موجود در همسایگی‌اش معمولاً با استفاده از همسایگی متحرک انجام می‌پذیرد. در برخی موارد مانند زمانی که داده‌ها دسته بندی<sup>۱</sup> شده باشند یا در امتداد یک رخنمون<sup>۲</sup> قرار گرفته باشند، تعیین نقاط همسایگی برای تخمین داده در نقطه مورد نظر با محدودیت روبروست. این مورد از کاستی‌های روش کریگینگ است. یعنی کریگینگ توانایی تفکیک داده‌های دسته‌بندی شده را ندارد و نمی‌تواند برای تخمین نقاط موجود در یک دسته، از نقاط موجود در همسایگی آن که در همان دسته قرار دارند، انتخاب کند. به دیگر سخن کریگینگ در نقاط نزدیک به مرز دسته‌ها نمی‌تواند نقاط همسایگی را از همان دسته انتخاب کند و ممکن است از نقاط موجود در دسته دیگر که دارای فاصله‌ای کمتر از شعاع جستجو هستند، برای تخمین نقطه مورد نظر استفاده کند. این عمل باعث بالا رفتن میزان هموارشدگی در نقاط یاد شده خواهد شد [۳].

اساس این روش (که آن را رها کردن یک نقطه<sup>۳</sup> نیز می‌نامند)، این است که اگر ما تعداد  $N$  داده با مقادیر  $Z(x_\alpha)$  و مدل واریوگرام تئوری (که بر واریوگرام تجربی برازش داده شده است)، و همسایگی تعیین شده برای تخمین را در اختیار داشته باشیم. تخمین مقدار  $Z(x)$  در هر یک از نقاط  $x_\alpha$  با استفاده از داده‌های  $Z(x_\beta)$  که  $\beta \neq \alpha$  انجام می‌شود. در هر یک از نقاط  $x_\alpha$  مقدار  $Z^*(x_\alpha)$  بدست می‌آید. مقدار واقعی در نقاط  $x_\alpha$  نیز معلوم هستند. در هر نقطه مقدار خطای تخمین مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$E_\alpha = Z^*(x_\alpha) - Z(x_\alpha) \quad (1)$$

<sup>۱</sup> Clustering

<sup>۲</sup> Profile

<sup>۳</sup> Leave-one-out

که  $Z^*_\alpha$  مقدار تخمین زده شده و  $Z_\alpha$  مقدار واقعی داده مورد نظر در نقطه  $\alpha$  هستند. با استفاده از معادله کریگینگ می‌توان مقدار واریانس کریگینگ ( $\sigma^2_{K\alpha}$ ) در آن نقطه را نیز بدست آورد. همچنین مقدار خطای استاندارد در نقطه  $\alpha$  از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$e_\alpha = E_\alpha / \sigma^2_{K\alpha} \quad (۲)$$

خطای تخمین ( $E_\alpha$ ) یک متغیر تصادفی است که میانگین آن برابر با صفر و واریانس آن برابر با واریانس کریگینگ ( $\sigma^2_{K\alpha}$ ) است. خطای استاندارد ( $e_\alpha$ ) یک متغیر تصادفی با میانگین صفر و واریانس ثابت است. باید توجه داشت که خطاهای کریگینگ از یکدیگر مستقل نیستند. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان موارد زیر را در یک اعتبارسنجی بررسی کرد: [۳]

- خطاهای استاندارد شده ( $e_\alpha$ )
- هیستوگرام خطاهای استاندارد شده
- نمودار پراکندگی نقطه‌ای مقادیر تخمینی در مقابل مقادیر واقعی ( $Z^*_\alpha, Z_\alpha$ ).
- نمودار پراکندگی نقطه‌ای مقادیر تخمینی در مقابل خطاهای استاندارد شده ( $Z^*_\alpha, e_\alpha$ ).

این نمودارها باید با توجه به خواص تخمین‌گر کریگینگ بررسی شوند. در مورد کریگینگ ساده، می‌توان روابط مربوط به هموار شدگی، تعامد بین تخمین و خطا و خاصیت ناریبی شرطی در حالت گوسی را بررسی کرد. در کریگینگ معمولی این ویژگی‌ها لزوماً در نظر گرفته نمی‌شوند. با این وجود، نمودارهای پراکندگی نقطه‌ای به ما این امکان را می‌دهند که بررسی کنیم وضعیت نسبت به یک مورد ایده‌آل در کریگینگ ساده، چگونه است. با استفاده از هیستوگرام خطاهای استاندارد شده می‌توان دریافت که آیا توزیع این پارامتر از توزیع گوسی تبعیت می‌کند یا نه؟ علاوه بر این، این نمودارها اساس تفسیر داده‌ها هستند. برای مثال این نمودارها، داده‌هایی را که به کمک داده‌های

موجود در همسایگی خود به خوبی توصیف نمی‌شوند و می‌توان آنها را به عنوان یک آنومالی در نظر گرفت، مشخص می‌کنند [۳].

مقدار خطایی که از اعتبارسنجی بدست می‌آید، همان طور که قبلا اشاره شد، به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\{e(u_i) = z(u_i) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \lambda^{CV}_j(u_i) z(u_j), i = 1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

که در آن  $z(u_i)$  مقدار داده در نقطه هدف و  $\lambda^{CV}_j(u_i)$  اوزان کریگینگ در نقاط به جز نقطه هدف و  $z(u_j)$  مقدار داده در سایر نقاط به جز هدف است. خطایی که بدست آمده است باید دارای ویژگی‌هایی باشد تا بتوان به کمک آن کارآیی تخمین مورد نظر را ارزیابی کرد. در حالت ایده‌آل این مقدار باید برابر با صفر باشد که منطبق با شرط نااریبی تخمین گر کریگینگ است همچنین واریانس این مقادیر باید کمینه شود. اگر مقادیر خطا در مقابل مقادیر واقعی به صورت نمودار پراکندگی نقطه‌ای رسم شود، توزیع خطا باید به صورت نامنظم نسبت به مقادیر واقعی باشد [۱۸].

## پیوست ۲: تحلیل ساختاری

به طور کلی مراحل که در حین انجام یک تخمین زمین آماری باید مد نظر داشت شامل موارد

زیر می‌باشد: [۲]

- ۱- نوع نمونه برداری و روش تجزیه و بررسی نمونه‌ها.
- ۲- شناخت زون‌های مختلف زمین شناسی موجود در منطقه و بعضاً شناخت ساختارهای احتمالی موجود.
- ۳- تشخیص کار در محیط سه بعدی یا دو بعدی.
- ۴- تعیین محدوده منطقه مورد مطالعه و پوشش<sup>۱</sup> نمونه‌ها و پایداری آنها.
- ۵- محاسبه پارامترهای آماری اصلی مانند میانگین، واریانس، میانه، همبستگی، هیستوگرام و ... .
- ۶- محاسبه داده‌های پرت<sup>۲</sup>.
- ۷- تشخیص داده‌های ناهمگن (جامعه‌های مخلوط).
- ۸- محاسبه واریوگرام تجربی.
- ۹- برازش دادن مدل واریوگرام تئوری بر واریوگرام تجربی.
- ۱۰- کریجینگ یا شبیه سازی.

---

<sup>1</sup> Support

<sup>2</sup> Outlier

## ۱- واریوگرافی

واریوگرافی یکی از مباحث مهم مربوط به تحلیل ساختاری است که شامل محاسبه واریوگرام تجربی داده‌ها و همچنین برازش دادن یک مدل واریوگرام تئوری بر مدل تجربی موجود می‌باشد. در این زمینه نیاز به مهارت‌ها و دانش‌هایی است که یک زمین‌آماردان به کمک آنها می‌تواند بهترین مدل واریوگرام موجود را بدست آورد. در واقع پیش زمینه واریوگرافی، یک دید زمین‌آماری به پارامترهایی چون: چگونگی توزیع فضایی داده‌ها، زمین‌شناسی داده‌ها و ... است [۳].

واریوگرام (تغییرنما) به صورت مختصر در مقدمه معرفی شد. اما بنا به ضرورت و اهمیت آن در زمین‌آمار، در این بخش مفصل‌تر آن را توضیح خواهیم داد. چراکه اساس مطالعات زمین‌آماری، مطالعات واریوگرافی و بدست آوردن پارامترهای واریوگرامی است که بتوان به کمک آن ساختار فضایی بین داده‌ها را تعیین نمود [۲].

### ۱-۱ محاسبه واریوگرام تجربی

واریوگرام تجربی را می‌توان با استفاده از رابطه ریاضی آن که در فصل اول ارائه شد محاسبه کرد. بار دیگر به این رابطه رجوع می‌کنیم:

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

در این رابطه،  $x_i$  نقاط مربوط به موقعیت داده‌ها و  $Z(x_i)$  مقادیر داده در نقاط یاد شده و  $N(h)$  تعداد جفت نقاط  $(x_i, x_i + h)$  که با فاصله  $h$  از یکدیگر واقع شده‌اند، می‌باشند. استفاده از این فرمول در حالی که داده‌ها به صورت منظم و در یک بعد، مانند یک گمانه حفاری توزیع شده‌اند، بسیار ساده است. اگر توزیع نمونه‌ها منظم نباشد، نمی‌توان با استفاده از میانگین‌گیری از نقاط موجود در همسایگی نقاط مورد نظر، یک شبکه منظم بدست آورد. همچنین نمی‌توان به جای نقاطی که مقادیر آنها مشخص نیست، مقدار صفر را در نظر گرفت، زیرا این موارد باعث خارج کردن تغییرپذیری متغیر مورد

نظر از حالت طبیعی خود می‌شوند. در این حالت باید مربع فاصله را بازای تمام جفت نقاط موجود محاسبه کرد. بسته به این که داده‌های موجود دارای توزیع دو بعدی یا سه بعدی باشند، واریوگرام تجربی در دو یا سه بعد محاسبه می‌شود [۲].

اگر داده‌ها منظم نباشند، واریوگرام تجربی با در نظر گرفتن یک حد تغییرات<sup>۱</sup> که معمولاً برابر با نصف فاصله (h) در نظر گرفته می‌شود، محاسبه خواهد شد. استفاده از این حد تغییرات باعث خواهد شد که تمام فواصل ممکن پوشش داده شوند [۲].

در ادامه محاسبه واریوگرام در دو و سه بعد نیز به صورت مختصر آورده شده است.

#### ۲-۱ محاسبه واریوگرام تجربی در دو بعد (صفحه)

زمانی که داده‌ها در دو بعد توزیع شده‌اند، واریوگرام باید حداقل در چهار جهت محاسبه شود تا بتوان ناهمگنی را بررسی کرد. برای این کار باید ابتدا گام واریوگرام و حد تغییرات گام را تعیین کرد و سپس زاویه‌های اصلی و حدتغییرات زاویه‌ای را مشخص نمود. پس از این، با استفاده از فاصله و زاویه تعیین شده، یک نقطه انتخاب و فاصله آن از سایر نقاطی که در محدوده مورد نظر قرار می‌گیرند، محاسبه می‌شود. سپس مقدار مربع فواصل محاسبه می‌شود. با تغییر نقطه مورد نظر و تکرار عملیات، در انتها با استفاده از مربعات فاصله و تعداد جفت نقاط موجود، واریوگرام در جهت مورد نظر محاسبه می‌شود [۲].

#### ۳-۱ محاسبه واریوگرام تجربی در سه بعد (فضا)

روشی که برای محاسبه واریوگرام تجربی توزیع دو بعدی داده‌ها گفته شده را می‌توان به توزیع سه بعدی نیز تعمیم داد. منتها در این حالت باید یک زاویه ثابت<sup>۲</sup> دیگر نیز در نظر گرفت. در عمل،

<sup>1</sup> Tolerance

<sup>2</sup> Solid



بعد سوم معمولاً دارای اهمیت خاصی است. زیرا معمولاً تغییرات در جهت قائم با تغییرات در جهت افقی دارای تفاوت‌های محسوسی است؛ به دلیل این که در پدیده‌های طبیعی که مد نظر زمین آمار هستند، معمولاً طبقه بندی‌هایی وجود دارد که با یکدیگر تفاوت‌های محسوسی دارند [۲].

کاملاً منطقی است که در جاهایی که طبقه بندی وجود دارد، نه تنها باید واریوگرام دو بعدی برای هر یک از طبقات به صورتی که قبلاً ذکر شد محاسبه شود، که باید یک واریوگرام در امتداد قائم نیز محاسبه شود. این واریوگرام معمولاً در راستای گمانه‌های حفاری محاسبه می‌شود. همچنین اگر منطقه مورد نظر تحت تاثیر پدیده‌های تکتونیکی قرار گرفته و صفحاتی در امتدادهایی غیر از افق یا قائم بوجود آمده باشند، باید واریوگرام‌هایی نیز در داخل این صفحه و نیز عمود بر آن محاسبه شود. زمانی که از یک مدل واریوگرام سه بعدی استفاده می‌شود، این مدل باید بتواند تغییرات را در تمام جهات بررسی کند. بنابراین مدلی که نهایتاً در فضا به کار گرفته می‌شود، نمی‌تواند به صورت افقی و قائم که در قسمت‌های قبلی به آنها اشاره شد، تفکیک شود و باید تنها به صورت یک مدل واحد تعریف شود [۲].

#### ۴-۱ برازش دادن مدل واریوگرام

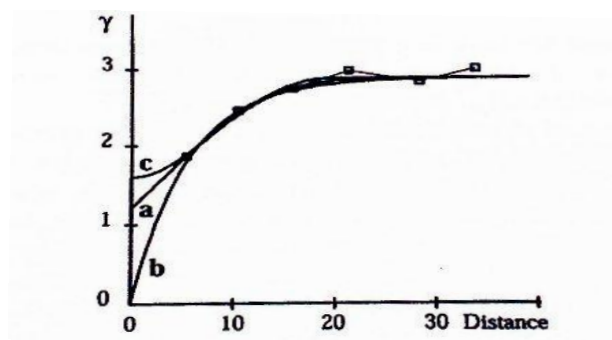
به جز برخی مدل‌های واریوگرام مانند مدل خطی همراه با اثرقطعه‌ای، سایر مدل‌های واریوگرام دارای رفتار غیرخطی مخصوصاً در پارامترهایی مانند دامنه و ناهمسانگردی هستند. واریوگرام نمونه‌ها نیز دارای رفتار نوسانی هستند. بنا به مسائلی که ذکر شد، برازش دادن واریوگرام توسط یک زمین آمردان می‌تواند به بهترین نحو ممکن انجام پذیرد. استفاده از کامپیوتر مخصوصاً در زمینه گرافیکی، کار را بسیار آسان‌تر می‌کند. برای مثال می‌توان از کامپیوتر برای برازش اولیه مدل واریوگرام استفاده کرد اما برازش نهایی و تعیین مدل بهینه واریوگرام توسط زمین آمردان انجام می‌شود. در حالت کلی برازش مدل واریوگرام به دو صورت دستی و اتوماتیک انجام می‌پذیرد که هر کدام در ادامه به اختصار توضیح داده خواهد شد [۳].

## ۵-۱ برآزش دستی

برآزش در نزدیکی مبدأ مختصات از مهم‌ترین بخش‌های برآزش یک مدل واریوگرام محسوب می‌شود. در این حالت برآزش دادن نیاز به مهارت خاصی دارد و زمین آماردان باید از یک سری فرضیه‌ها استفاده کند که منتج از دانش زمین شناسی یا درک فیزیکی او از مسئله می‌باشد. برای مثال اگر واریوگرام شکل ۱ را در نظر بگیریم، در وهله اول ما می‌توانیم یک رفتار خطی را برای چند نقطه ابتدایی در نزدیکی مبدأ در نظر بگیریم که برآزشی مشابه  $a$  در شکل داده شده و اثر قطعه‌ای معادل با  $1/2$  بدست می‌آید. اما دلیل وجود ندارد که بتواند ما را از سایر برآزش‌های ممکن در این نقاط باز دارد. برآزش‌های دیگری مانند موارد زیر را نیز می‌تواند در نظر گرفت: [۳]

۱. ساختاری با دامنه کمتر از فاصله داده‌ها و بدون اثر قطعه‌ای (برآزش  $b$ ).

۲. یک رفتار بسیار منظم در نزدیکی مبدأ که همراه با اثر قطعه‌ای قابل توجه است (برآزش  $c$ ).



شکل ۱ انواع برآزش مدل واریوگرام در نزدیکی مبدأ به صورت دستی [۳].

انتخاب رفتار واریوگرام در اطراف مبدأ، یک پیش بینی آسیب پذیر است زیرا ممکن است با اضافه شدن داده‌ها روی یک شبکه متراکم‌تر، این رفتار تایید یا رد شود. در زمانی که برخی داده‌ها موجود نیستند، ممکن است بتوان اقدامات بعدی مانند تخمین با استفاده از کریگینگ را انجام داد اما در این حالت خطاهایی به وجود می‌آیند؛ مثلاً ممکن است کریگینگ بهینه بودن خود را از دست بدهد و واریانس کریگینگ صحت خود را از دست بدهد. این نکته توسط خانم آرمسترانگ (Margaret Armstrong) و آقای واکرناگل (Hance Wakernagle) روی ۵۲ داده توپوگرافی به کار برده شد.

نتایجی که در این زمینه برای شبیه سازی شرطی بدست آمد، کاملا متفاوت از یکدیگر بود که مدعی بازتولید تغییر پذیری جزئی است [۳].

داشتن اطلاعاتی در مورد مسئله پیش رو می تواند در انتخاب نوع برازش مدل، کمک بسیار خوبی باشد. برای مثال در مورد شکل ۱ ما می توانیم موارد زیر را در انتخاب نوع برازش در نظر بگیریم:

[۳]

۱. اگر ما با یک میدان پتانسیل ژئوفیزیکی (گرانی یا مغناطیس) روبرو هستیم، می توان از برازش نوع c استفاده کرد زیرا این میدانها دارای ساختار فضایی منظم بوده و اثر قطعه‌ای موجود را نیز می توان به حساب خطاهای موجود در اندازه‌گیری گذاشت.

۲. اگر با ساختاری سروکار داریم که دارای پیوستگی خوبی است و اگر داده‌ها از گمانه‌های حفاری و فاقد خطا بدست آمده باشند، اثر قطعه‌ای یک ساختار با دامنه کوتاه است. در این زمینه می توان از برازشی مانند برازش b استفاده کرد. برای مثال می توان از یک مدل کروی استفاده کرد و دامنه مناسب برای آن را می توان از داده‌های دیگر بدست آورد.

۳. برازش a برای متغیرهایی مانند عیار و تخلخل که تغییرپذیری قوی از خود نشان می دهند و دارای پوشش کوچکی هستند، به کار می رود. این مدل در واقع وجود ریزساختارها<sup>۱</sup> را بارز می کند.

### ۱-۶ برازش اتوماتیک

برازش اتوماتیک یک مدل به واریوگرام نمونه‌ها را می توان با استفاده از تکنیک‌های زیر انجام

داد: [۳]

۱- تکنیک کمینه مربعات.

<sup>1</sup> Microstructures

۲- تکنیک بیشترین درست‌نمایی و روش بیزین.

۳- استفاده از روش فازی برای برازش دادن مدل به واریوگرام.

جزئیات موارد ذکر شده در بالا در بحث ما نمی‌گنجد. برای اطلاع از این جزئیات می‌توان به منبع ذکر شده در این زمینه مراجعه کرد.

## ۲- ناهمسانگردی

زمانی که واریوگرام در جهات مختلف محاسبه می‌شود، بعضاً در برخی از جهات رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. این رفتار متفاوت در جهات مختلف را تحت عنوان ناهمسانگردی می‌شناسند. اگر این تفاوت رفتاری در جهات مختلف در واریوگرام به چشم نخورد، واریوگرام فقط به فاصله بین دو نقطه بستگی داشته و در این حالت گفته می‌شود واریوگرام همسانگرد است. ناهمسانگردی بر دو نوع ناهمسانگردی هندسی و ناهمسانگردی زونال<sup>۱</sup> می‌باشد.

### ۲-۱ ناهمسانگردی هندسی

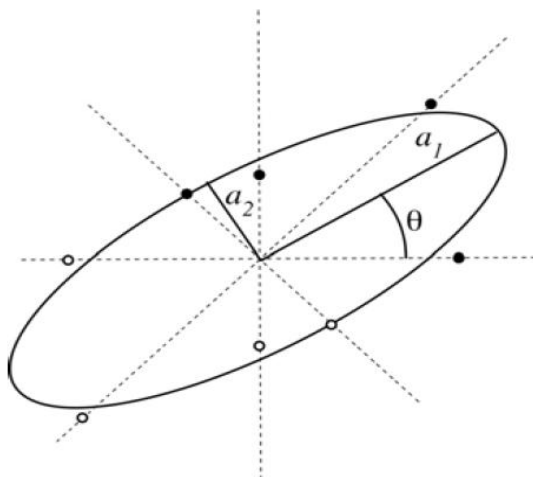
در این حالت واریوگرام‌های جهتی دارای دامنه متفاوت اما مقدار سقف مشابه هستند. شکل دیگری از این نوع ناهمسانگردی می‌تواند به صورت تفاوت در شیب واریوگرام‌های جهتی ظاهر شود. در این حالت واریوگرام‌ها به صورت خطی هستند اما شیب آنها با هم متفاوت است. این تفاوت در مقدار دامنه یا شیب واریوگرام‌ها را می‌توان به صورت یک بیضوی نشان داد. در شکل زیر این بیضوی هم برای دامنه و هم برای شیب واریوگرام‌ها در حالت دو بعدی نشان داده شده است. ویژگی این ناهمسانگردی این است که با تغییر کوچکی در محورهای مختصات می‌توان این بیضوی را به دایره تبدیل کرد [۲].

<sup>۱</sup> Zonal

## ۲-۲ ناهمسانگردی زونال

این نوع ناهمسانگردی بیشتر مربوط به تفاوت‌های ساختاری در جهت قائم است. در مواردی که مورد مطالعه دارای طبقات مختلفی در امتداد قائم است، این نوع ناهمسانگردی ظاهر می‌شود. در این مواقع سقف واریوگرام‌ها در جهات مختلف یکسان نیست. در این حالت می‌توان واریوگرام را به دو بخش تقسیم کرد: بخشی که همسانگرد است به اضافه بخشی که تنها تغییرپذیری در جهت قائم را نشان می‌دهد [۲].

در عمل وقتی با ناهمسانگردی روبرو می‌شویم، برای مثال اگر در دو بعد کار می‌کنیم، باید ابتدا واریوگرام را در حداقل چهار جهت اصلی محاسبه و در هر جهت دامنه واریوگرام را بدست آوریم. برای مثال می‌توان جهت‌های ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه در محورهای مختصات قائم را در نظر گرفت. سپس مقدار دامنه در هر جهت را مطابق شکل ۲ به محورهای مختصات انتقال می‌دهیم. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، علاوه بر این چهار نقطه که به رنگ سیاه نشان داده شده‌اند، می‌توان از قرینه هر یک از این چهار نقطه نسبت به مبدأ مختصات استفاده کرد و یک بیضوی بر این هشت نقطه برازش داد. این امر با این فرض که  $\gamma(\mathbf{h}) = \gamma(-\mathbf{h})$ ، امکان پذیر است. سپس قطر بزرگ بیضی به عنوان بیشینه دامنه و قطر کوچک آن به عنوان کمینه دامنه به کار برده می‌شوند. زاویه  $\theta$  به عنوان زاویه ناهمسانگردی به کار برده می‌شود [۱۸].



شکل ۲ بیضوی ناهمسانگردی و محاسبه دامنه واریوگرام جهتی با استفاده از قطرهای آن [۱۸].

در مطالعات ناهمسانگردی در سه بعد، پیچیدگی کار کمی بیشتر خواهد شد. در این حالت بیضی تبدیل به بیضی گون خواهد شد که دارای سه محور است. زاویه‌های آن نیز به دو زاویه افزایش خواهد یافت. محور سوم دامنه بدست آمده در جهت قائم و زاویه دوم، زاویه محور بیضوی از افق است [۱۸].

### ۳- شعاع همسایگی

یکی از موارد مهمی که باید در تخمین در نظر گرفت، شعاع همسایگی یا شعاع جستجو است. این شعاع در واقع دایره‌ای به مرکز نقطه هدف در نظر می‌گیرد و نقاطی از داده‌ها که در این دایره واقع می‌شوند، به عنوان نقاط همسایگی در تخمین متغیر در نقطه هدف به کار گرفته می‌شوند. به چند دلیل استفاده از شعاع همسایگی مهم است: [۸]

۱- مقادیر کوواریانس برای مسافت‌های بزرگ قابل اعتماد نیستند زیرا تعداد جفت نقاط کمی برای این فواصل وجود دارند.

۲- استفاده از نقاط همسایگی در مختصات قراردادی با استفاده از کریگینگ معمولی امکان در نظر گرفتن انحراف محلی از پایایی را فراهم می‌کند.

۳- استفاده از تعداد داده‌های محدود امکان بررسی تاثیر هر یک بر تخمین را آسان تر می‌کند.

۴- استفاده از داده‌های محدود در محدوده جستجو باعث ساده‌تر شدن ماتریس کریگینگ و کوچک‌تر شدن اندازه آن و همچنین افزایش سرعت محاسبات در حد قابل توجهی خواهد شد.

اگر با ناهمسانگردی مواجه باشیم این دایره جستجو تبدیل به یک بیضی خواهد شد که قطر بزرگ آن در امتداد بیشینه پیوستگی داده‌ها خواهد بود. این کار باعث استفاده از داده‌های مطمئن‌تر خواهد شد. برای حذف تاثیر داده‌های دسته بندی شده می‌توان همسایگی مورد نظر را به بخش<sup>۱</sup>هایی تقسیم کرد که در محیط دو بعدی به چهارک و درسه بعد به هشتک<sup>۲</sup> معروف است و در هر یک از این بخش‌ها تعداد مشخصی از نزدیک‌ترین داده‌ها قرار می‌گیرند و در تخمین به کار گرفته می‌شوند.

[۸].

---

<sup>1</sup> Sector

<sup>2</sup> Octan

### پیوست ۳: تخمین و شبیه سازی

همان گونه که قبلا ذکر شد، نمونه برداری تنها راهی است که می‌توان اطلاعات دقیقی نسبت به نقطه مورد نظر بدست آورد اما مشکل اینجاست که تقریبا در تمام موارد امکان نمونه برداری از نقاط مورد نظر به هر دلیلی، وجود ندارد. این امر ضرورت استفاده از راه‌کارهایی که بتوان اطلاعات مورد نیاز را از نقاط مدنظر بدست آورد، را ایجاب کرده است. از جمله راه‌کارهایی که در این‌گونه مواقع به کار گرفته می‌شوند می‌توان به تخمین (با روش‌های مختلف) و شبیه سازی و ... اشاره نمود. دو روش یاد شده هر یک دارای ویژگی‌ها و خصوصیات هستند که بر این اساس کاربرد هر یک تعیین می‌شود. در ادامه هر یک از این دو روش به طور خیلی مختصر شرح داده و به منظور درک بهتر مسئله با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

#### ویژگی‌های تخمین و شبیه سازی

فرض می‌کنیم داده‌های  $\{z^*(u), u \in A\}$ ، مجموعه‌ای از تخمین‌های کریگینگ متغیر  $u$  و روی منطقه  $A$  هستند. هر تخمین  $z^*(u)$  به صورت جداگانه زده شده است، یعنی مستقل از تخمین‌های زده شده در همسایگی نقطه مورد نظر می‌باشد. این ویژگی از لحاظ کمترین مربعات، گزینه برتر است چرا که واریانس محلی خطا<sup>۱</sup> یعنی  $\text{Var}\{Z^*(u) - Z(u)\}$  کمینه خواهد بود. اما نقشه یا به دیگر سخن نتایجی که از تخمین محلی بدست می‌آیند، ممکن است بهترین نتیجه نباشند. بدین دلیل که الگوریتم‌های درونیابی تغییرات فضایی در مختصات قراردادی را هموار می‌کنند. به دیگر سخن، مقادیر کوچک، بزرگ و مقادیر بزرگ، کوچک تخمین زده می‌شوند. این امر موجب می‌شود بایاس شرطی<sup>۲</sup> در زمانی که تلاش می‌شود که الگویی برای مقادیر بزرگ مانند یک زون غنی از فلز و ... کشف شود، به صورت چشم گیری کاهش می‌یابد. کاستی دیگر تخمین این است که هموار شدگی معمولا یکنواخت

<sup>1</sup> Local error variance

<sup>2</sup> Conditional Bias



نیست. بلکه هموارشدگی بستگی به آرایش محلی داده‌ها دارد؛ هموارشدگی در نزدیکی داده‌های معلوم کم و با فاصله گرفتن از داده‌ها، افزایش می‌یابد. هموارشدگی در نقشه‌های کریگینگ که از داده‌هایی با تراکم زیاد بدست آمده‌اند، نسبت به زمانی که داده‌ها دارای پراکندگی بیشتری هستند، کمتر است. بنابراین نقشه‌ای که از کریگینگ بدست آمده است ممکن است ساختارهای غیرواقعی ارائه دهد [۸].

نقشه‌هایی که حاصل از درونیابی هستند به دلیل هموارشدگی که همراه با خود دارند، نباید در جایی که نیاز به حساسیت بالا در نتایج لازم است، به کار گرفته شوند. به عنوان مثال در اندازه‌گیری مقدار آب زیرزمینی نفوذی از هسته سفره به سطح زمین در واحد زمان، نمی‌توان از این گونه نقشه‌ها استفاده کرد [۸].

در مقابل نقشه‌ای که از تخمین بدست آمده است، شبیه سازی تصادفی زمین آماری نقشه یا مفهومی<sup>۱</sup> از مقادیر  $Z$  با فرض  $\{z^l(u), u \in A\}$  ارائه می‌دهد که در آن  $I$  در واقع لامین مفهومی است که آماره‌هایی که برای مسئله در حال بررسی مهم هستند، بازتولید می‌کند. نکات اصولی در شبیه سازی شامل موارد زیر است: [۸]

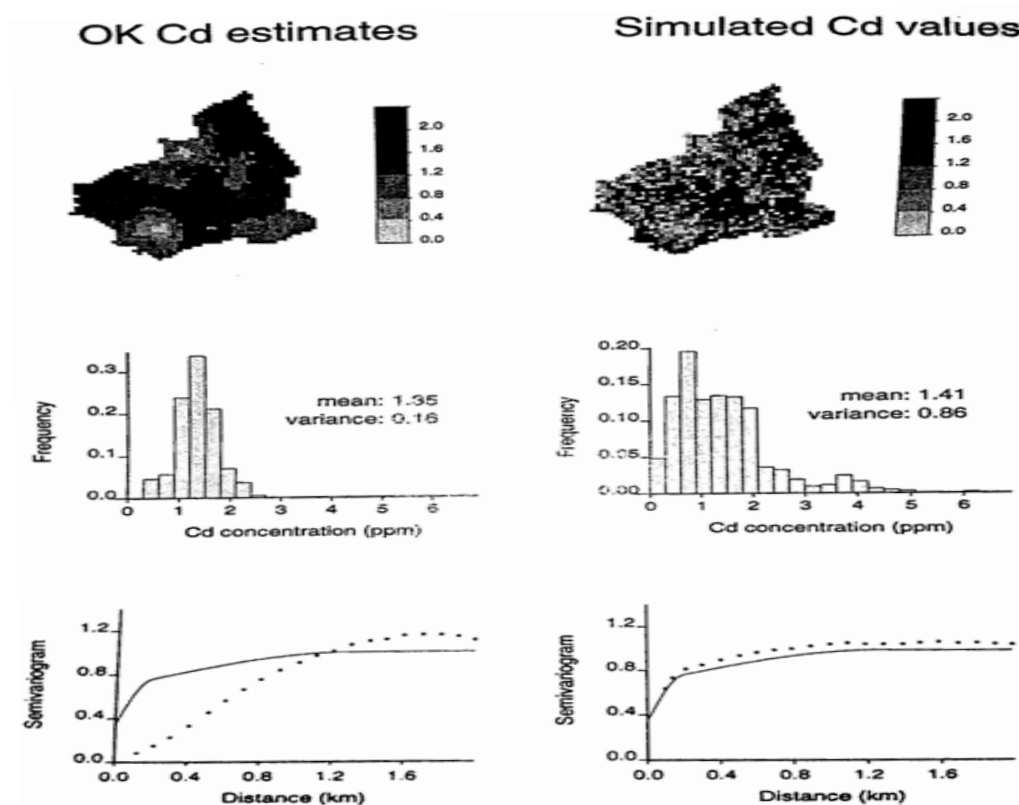
۱- مقدار داده‌ها در موقعیت خود دارای اولویت هستند (شبیه سازی شرطی).

۲- هیستوگرام مقادیر شبیه سازی شده منحصرأ هیستوگرام نمونه‌های دسته بندی شده را باز تولید می‌کند.

۳- مدل کوواریانس یا مجموعه‌ای از کوواریانس‌های شاخص، برای حدود آستانه‌ای متعدد بازسازی می‌شوند.

<sup>1</sup> Realization

شکل ۱، نقشه تمرکز مقادیر Cd روی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در هر دو مورد موقعیت و تعداد نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. نقشه‌های سمت چپ توسط کریگینگ معمولی و سمت راست توسط شبیه سازی تولید شده‌اند [۸].



شکل ۱ تخمین‌های زده شده با روش کریگینگ معمولی و مقادیر شبیه سازی شده‌ی تمرکز Cd روی منطقه مورد مطالعه. شکل‌های وسط مربوط به هیستوگرام فراوانی داده‌های تخمین زده شده برای هر روش می‌باشد. شکل‌های پایین مربوط به واریوگرام تجربی (خط چین) و مدل برازش (خط پیوسته) داده شده بر آنها است. به اثر هموارسازی کریگینگ که منجر به کم تخمین زدن تمرکز Cd در فواصل دامنه کم می‌شود، دقت کنید [۸].

با توجه به شکل، موارد زیر به چشم می‌خورد: [۸]

- واریانس تخمین‌هایی که توسط کریگینگ بدست آمده‌اند بسیار کمتر از واریانس نمونه‌هاست.

- سمی واریوگرام تخمین‌های بدست آمده از کریگینگ، دارای اثر نقطه‌ای نسبی بسیار کمتری از مدل سمی واریوگرامی که با خط پر در شکل نشان داده شده است، می‌باشد که کم تخمین زدن تغییرپذیری مقادیر Cd را منعکس می‌کند.
- بازتولید هیستوگرام نمونه‌ها و مدل سمی واریوگرام که توسط مقادیر شبیه سازی شده بدست آمده‌اند، بسیار بهتر است هر چند که هنوز ساختار حقیقی را نشان نمی‌دهند.

# منابع و ماخذ

## References

1. Wackernagel. H. (2003), "Multivariate geostatistic: an introduction with applications, third ed, springer, pp. 387.
2. Armstrong. M. (1999), "Introduction to Basic Linear Geostatistics", springer ,pp, 153.
3. Chiles. J. P. and Pierre .P. (1999), "Geostatistic modeling Spatial Uncertainty", Wiley Interscience, pp. 346
4. Marechal. A. (1984), "Kriging seismic data in presence of faults", **J. of. Geostatistics for natural resources characterization**, pp. 294.
5. Ahmed. S, and De Marsily. G. (1987), Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity, **J. of. Water Resources Research**, 23, pp. 1717.
6. Hudson. G. and Wackernagel. H. (1994), Mapping temperature using kriging with external drift: theory and an example from Scotland, **J. of. International Journal of Climatology**, 14, pp. 77.
7. Zquiza. I. and Eulogio. P. (1998), Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography, **J. of. Climatol**, 18, pp. 1031.
8. Goovaerts. P. (1997), "Geostatistics for Natural Resources Evaluation", Oxford University Press, pp. 371.
9. Troisi. C. and Fallico. S. and Migliari. E. (2000), Application of kriging with external drift to estimate hydraulic conductivity from electrical-resistivity data in unconsolidated deposits near Montalto Uffugo, Italy, **J. of. hydrogeology**, 8, pp. 356.
10. Bourennane. H. and King. D (2002), Using multiple external drifts to estimate a soil variable, **J. of. Geoderma**, 114, pp. 18.
11. Isselmou. Y. O. and Wackernagel. H. (2008), Geostatistical Estimation of Electromagnetic Exposure, **J. of. Geostatistics for Environmental Applications**, pp. 12.
12. Baume. O. and Wackernagel. H. and Gauvreau. B. (2008), Geostatistical Modeling of Environmental Sound Propagation. **J. of. Geostatistics for Environmental Applications**, pp. 113.
13. Degan. G. A. and Pinzari. M. (2008), Improvement of Forecast Noise Levels in Confined Spaces by Means of Geostatistical Methods, **J. of. Geostatistics for Environmental Applications**, pp. 37.

14. Rivest. M. and Marcotte. D. and Pasquier. P. (2008), Including Conceptual Model Information when Kriging Hydraulic Heads, **J. of. Geostatistics for Environmental Applications**, pp. 141.
15. Vanderlinden. K. and Jiménez. J. A. (2008), Interpolation of Soil Moisture Content Aided by FDR Sensor Observations, **J. of. Geostatistics for Environmental Applications**, pp. 237.
16. Desbarats. A. J. and Logan. C. E. and Hinton. M. J. and Sharpe. D. R. (2001), On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model, **J. of. Geological Survey of Canada**, pp. 20.
17. Dimitrakopoulos. R. and Kay. M. (2000), Integrated Interpolation Methods for Geophysical Data: Applications to Mineral Exploration, **J. of. Natural Resources Research**, 9, pp. 15
18. Gomez. J. (2005), "**Geostatistic in Hydrogeophysics**", Springer, pp. 157.

## **Abstract**

Geostatistics techniques have many applications in estimations made in different branch of geosciences. Estimation of groundwater table has always been of great importance. The routine method to estimate this depth is to use geophysical methods such as electrical resistivity that is an indirect method. These methods are usually relatively costly. Due to insufficient data for depth estimation with sufficient accuracy, we have to use other relevant data that have lower costs and can give us information in this regard. Between these methods, the kriging with an external drift method is an useful tool for estimation. In this study, sensitivity of the Kriging with an External Drift (KED) method are measured based on its relevant parameters like as correlation coefficient between primary and secondary data and the portion of nugget effect in the structure of primary data. This study gives some thumb rules to use this method more efficiently. Two cases are studied; in first case-study, the available piezometric data as the main data and topographic data as supplementary data in Chanaran-Mashad have been used. Finally, the results obtained from cross validation of the used method(s) have compared with the Conventional ordinary kriging (OK) estimation. It has been observed that the kriging method with an external drift leads to better estimation than the conventional method of ordinary kriging. The second case consists of developing a multivariable KED to estimate the piezometric level of underground water table in Damghan-plain. The available piezometric data are assumed as primary data and topographic data and estimated depth by geo-electrical survey are taken as secondary data. In this study also the result OK has been compared with the result of KED with topography as secondary variable, and results of KED with the estimated depth as secondary variable. All of them are compared with results of multivariable KED. The results show the multivariable KED gives a better estimation than univariate forms of KED. The results of univariate forms of KED have the better results than OK. In this research the capability of KED estimators are examined and the method is applied on two real cases, in them, the results are improved in comparison with the results of routine method.

**Keywords:** *kriging with external drift, underground water table estimation, topography, sensitivity, electrical resistivity.*



**Shahrood university of technology**

**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering**

**Improvement of the Estimation of Groundwater Table from  
Electrical Resistivity and Topography Data using Kriging  
with External Drift Method**

***Mohsen Yavari***

Supervisors:

***Dr. Mohamad Koneshloo***

***Dr. Abolghasem Kamkar Rohani***

October 2011