



## تخمین ضریب قابلیت انتقال آبخوان با استفاده از روش‌های درون‌یابی (مطالعه‌ی موردی: آبخوان دامنه-داران)

سیدرضا موسوی‌زاده<sup>۱</sup>، رامتین معینی<sup>۲\*</sup>، احمد شانه‌ساز زاده<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران-مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، ایران
- ۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، ایران
- ۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، ایران

\* (نویسنده مسئول). [r.moeini@eng.ui.ac.ir](mailto:r.moeini@eng.ui.ac.ir)

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۰۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۷

### چکیده

قابلیت انتقال آبخوان از جمله پارامترهای مهم در بررسی و شبیه‌سازی وضعیت کمی و کیفی و چگونگی حرکت آب زیرزمینی در آبخوان‌ها می‌باشد. با توجه به کمبود اطلاعات موجود ناشی از محدود بودن تعداد آزمایش‌های پمپاژ و یا ابهام در صحت مقادیر اندازه‌گیری شده در برخی نقاط، برآورد قابلیت انتقال بر اساس اطلاعات موجود در شبیه‌سازی آبخوان ضروری است. در این تحقیق، مقادیر پارامتر قابلیت انتقال آبخوان دامنه-داران با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی شامل روش‌های معکوس وزنی فاصله، کریجینگ، ترند و اسپلاین تعیین و نتایج مقایسه می‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد که انجام درون‌یابی با روش اسپلاین در حالت منظم دارای کم‌ترین دقت و با روش کریجینگ عادی در حالت توان‌دار با ۲۰/۱۱ درصد خطای نسبی دارای بیش‌ترین دقت محاسباتی است. با این وجود، روش مذکور برای درون‌یابی در نواحی مرزی محدوده مورد بررسی کارایی ندارد. در مقابل روش معکوس وزنی فاصله با حداکثر ۲۱/۳۶ درصد خطای نسبی، برای درون‌یابی در همه نقاط محدوده قابل‌استفاده است. در نهایت به‌منظور ارزیابی نتایج، با شبیه‌سازی آبخوان با استفاده از نرم‌افزار GIS و بر اساس نتایج حاصل از روش معکوس وزنی فاصله به‌عنوان مقادیر اولیه، با کاهش قابل‌ملاحظه تعداد تکرارها در مرحله واسنجی مدل، هزینه محاسباتی به‌طور چشم‌گیری کاهش یافت. با مقایسه نتایج حاصل از واسنجی مدل بر اساس تراز سطح آب در آبخوان با مقادیر به‌دست‌آمده از درون‌یابی، حداکثر مقدار خطای نسبی ۲۲/۲۲ درصد و متوسط خطای نسبی در سطح آبخوان ۱۵/۶۹ درصد می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آبخوان، دامنه-داران، درون‌یابی، زمین‌آمار، قابلیت انتقال.

### مقدمه

ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان معروف هستند، معرفی می‌شود. این پارامترها میزان حجم ذخیره آب در محیط‌های متخلخل، نحوه حرکت آن از خلال منافذ و تغییر سطح ایستابی یا پیزومتریک آبخوان را نشان می‌دهند (علیزاده، ۱۳۸۹). قابلیت انتقال عبارت است از مقدار آبی که از کل ضخامت آبخوان تحت شیب هیدرولیکی واحد در واحد زمان به‌طور افقی حرکت می‌کند. یکی از بهترین و دقیق‌ترین روش‌های تخمین پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان بررسی و تفسیر داده‌های

بررسی و شبیه‌سازی وضعیت کمی و کیفی و چگونگی حرکت آب زیرزمینی در آبخوان‌ها نیازمند استفاده از مقادیر نسبتاً دقیق پارامترهای هیدرولیکی آبخوان می‌باشد؛ بنابراین تعیین این پارامترها به‌منظور مطالعه، ارزیابی و مدیریت منابع آب زیرزمینی ضروری است. معمولاً خصوصیات هیدرولیکی یک آبخوان با سه پارامتر هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال و ضریب ذخیره (برای آبخوان‌های آزاد آبدهی ویژه) که به نام

و همکاران، ۱۳۹۷؛ Sattar et al., 2016) تخمین زده شد. همچنین، با استفاده از روش صوت‌سنجی مقادیر قابلیت انتقال مناطق مختلف اندازه‌گیری و ساختارهای زیرزمینی آن مناطق مشخص شد (Akaolisa, 2006; Bello and Makinde, 2007; Omosuyi et al., 2007; Asfahan, 2007).  
Opara et al. (2012) با استفاده از روش‌های تطابق منحنی و نرم‌افزار OFFIX 3.1، داده‌های حاصل از سونداژ زنی الکتریکی را تفسیر نموده و با تلفیق اطلاعات لاگ چاه‌ها، آزمون‌های پمپاژ انجام شده در منطقه و پارامترهای دارزاروک<sup>۲</sup>، پارامترهای هیدرولیکی را برآورد نمودند.  
بررسی سوابق تحقیقاتی نشان‌دهنده آن است که در اکثر این تحقیقات با انجام آزمایش‌های تکمیلی و صرف هزینه‌های مالی، مقدار پارامترهای هیدروژئولیکی از جمله قابلیت انتقال تعیین شده است؛ بنابراین ارائه روش‌هایی کم‌هزینه و قابل قبول بدین منظور ضروری است. روش‌های درون‌یابی از جمله روش‌های کاربردی است و تاکنون روش‌های مختلفی جهت درون‌یابی مقادیر یک پارامتر در نقاط مختلف ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روش‌های معکوس وزنی فاصله<sup>۴</sup>، کریجینگ<sup>۵</sup>، همسایگی طبیعی<sup>۶</sup>، اسپلاین<sup>۷</sup>، ترند<sup>۸</sup>، شبکه‌ی نامنظم مثلثی<sup>۹</sup> و انواع روش‌های رگرسیون‌گیری اشاره نمود. از این روش‌ها در تحقیقات مختلف در حوزه آب‌های زیرزمینی از جمله تخمین مقادیر هدایت الکتریکی و سولفات موجود در سطح آبخوان با استفاده از روش کریجینگ (حسینی و همکاران، ۱۳۸۲)، برآورد هدایت هیدرولیکی آبخوان با استفاده از روش‌های رگرسیون‌گیری، کریجینگ (ساده، معمولی و عمومی)، کوکریجینگ، روش‌های خودهمبستگی، نیم‌تغییرنما<sup>۱۰</sup> و TPSS<sup>۱۱</sup> (دلبری و همکاران، ۱۳۸۳؛ بارانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ Gupta et al., 2004; Sepaskhah and Ataee, 2004; Patriarche et al., 2005; al., 2006) برآورد شوری آب زیرزمینی با روش معکوس وزنی فاصله (باری و کوچک‌زاده، ۱۳۸۷)، و یا استفاده از روش کریجینگ (تقی‌زاده و همکاران،

به‌دست آمده از آزمون پمپاژ انجام شده در محدوده مورد بررسی است (صفوی، ۱۳۹۰). در مواردی که به دلایل مختلف آزمون‌های پمپاژ به تعداد کافی انجام نشده باشد، برآورد پارامترهای آبخوان در محدوده مورد بررسی بر اساس اطلاعات موجود به راحتی امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین لازم است روش‌های کارآمد برای این منظور معرفی شوند. بررسی سوابق تحقیقاتی نشان‌دهنده آن است که به‌منظور تعیین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان، روش‌های مختلفی استفاده شده است که در ادامه به برخی از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود.  
میرحاجی و اصغری‌مقدم (۱۳۸۴) با استفاده از یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار متلب، معادله ژاکوب را بسط داده و ضریب قابلیت انتقال آبخوان دشت چالدران را محاسبه نمودند. در این تحقیق برای بسط مقادیر ضریب قابلیت انتقال به سایر نقاط دشت، از همبستگی بین مقادیر مقاومت عرضی و قابلیت انتقال به‌دست آمده از نتایج ظرفیت ویژه و آزمون پمپاژ استفاده شد. در تعدادی از این تحقیقات، با اندازه‌گیری ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان شامل ضریب‌ذخیره و قابلیت انتقال در چند نقطه، روند تغییرات آن در بخش‌های مختلف محدوده مورد بررسی ارزیابی شده است (آبدار اصفهانی و کلانتری، ۱۳۹۲). محققان بسیاری بر اساس تحلیل نتایج حاصل از برداشت سونداژ الکتریکی قائم<sup>۱</sup>، داده‌های مقاومت ویژه آبخوان را محاسبه نموده و سپس با روش‌های مختلف، پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان را محاسبه کرده‌اند. در این تحقیقات پارامترهای مذکور، بر اساس تشابه خصوصیات جریان آب زیرزمینی و جریان الکتریکی در محیط متخلخل (عزیزی و محمدزاده، ۱۳۹۵؛ Oseji et al., 1968; Gabrysch, 2005; Taheri Tizro et al., 2012; Ebong et al., 2014; George and Ibuot, 2015; Harry et al., 2018) تحلیل نتایج با استفاده از نرم‌افزار IPI2Win (طاهری‌تیزرو و همکاران، ۱۳۹۶؛ دشتی و همکاران، ۱۳۹۸) و یا استفاده از روابط تجربی مانند رابطه کوزنی-کارمن<sup>۲</sup> (پاسپار و انصاری، ۱۳۹۶؛ خالدی

<sup>۲</sup> Spline

<sup>۸</sup> Trend

<sup>۹</sup> Triangulated Irregular Network (TIN)

<sup>۱۰</sup> Semi Varugram

<sup>۱۱</sup> Thin Plate Smoothing Splines (TPSS)

<sup>۱</sup> V.E.S. data

<sup>۲</sup> Kozeny-Carman equation

<sup>۳</sup> Dar-Zurrock Parameters

<sup>۴</sup> IDW (Inverse Distance Weighted)

<sup>۵</sup> Kriging

<sup>۶</sup> Natural Neighbor

روش‌های مختلف از جمله روش‌های معکوس وزنی فاصله، کریجینگ، اسپلاین و ترند تعیین و نتایج تجزیه و تحلیل می‌شود. در نهایت به منظور بررسی صحت نتایج به دست آمده، آبخوان مذکور در محیط نرم‌افزار GIS و بر اساس مقادیر قابلیت انتقال حاصل از درون‌یابی (به عنوان مقادیر اولیه) مدل‌سازی و سپس واسنجی شده و نتایج تجزیه و تحلیل می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی دامنه-داران یکی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز گاوخونی با وسعت ۷۱۱/۲ کیلومتر مربع شامل ۲۹۳/۷ کیلومتر مربع دشت و ۴۱۷/۶ کیلومتر مربع ارتفاعات می‌باشد که در قسمت شمال غرب حوضه واقع شده است. حداقل ارتفاع این محدوده ۲۲۱۲ متر، مربوط به بخش جنوبی محدوده مطالعاتی و در مجاور دشت بوئین-میان‌دشت و حداکثر ارتفاع محدوده ۳۲۸۶ متر از سطح دریا مربوط به قسمت شمالی آن می‌باشد. از جمله شهرهای مهم این محدوده می‌توان به شهر دامنه و داران اشاره نمود (وزارت نیرو، ۱۳۹۴). در شکل ۱ تصویر ماهواره‌ای موقعیت محدوده مطالعاتی دامنه-داران نسبت به محدوده‌های مطالعاتی مجاور نمایش داده شده است.

آبخوان آبرفتی دامنه-داران با مساحت ۲۲۰/۳ کیلومتر مربع در ۷۵ درصد از مساحت دشت محدوده گسترده شده است. نتایج حاصل از آزمایش پمپاژ ۷ حلقه چاه اکتشافی در این محدوده در جدول ۱ و موقعیت چاه‌های مذکور نیز در شکل ۲ ارائه شده است. بر اساس مقادیر جدول ۱، مشاهده می‌شود که حداکثر ضریب قابلیت انتقال مربوط به چاه آشجرد (۲۹۵۰ مترمربع در روز) می‌باشد. با توجه به تعداد و پراکندگی نسبتاً مناسب چاه‌ها و نیز وسعت نسبتاً کم آبخوان، امکان درون‌یابی ضرایب هیدرودینامیک به منظور تعیین ضریب قابلیت انتقال در سایر نقاط آبخوان وجود دارد (وزارت نیرو، ۱۳۹۴).

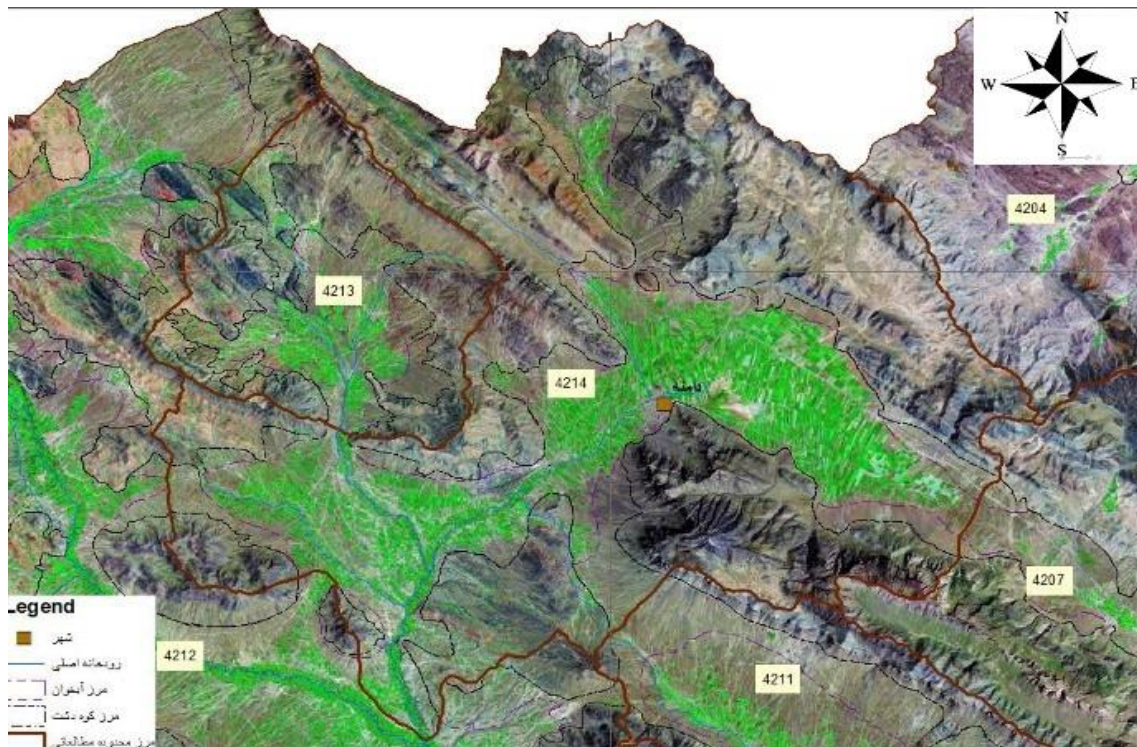
(۱۳۸۷) و نیز استفاده از روش کوکریجینگ و بر اساس داده‌های تصاویر ماهواره‌ای NDVI (Douaoui et al., 2006). برآورد تراز سطح آب آبخوان با استفاده از روش‌های معکوس وزنی فاصله، رگرسیون چندجمله‌ای، توابع پایه شعاعی، کریجینگ، لاگ کریجینگ، کوکریجینگ (محمدی و همکاران، ۱۳۹۱؛ Evans et al., 2020; Ohmer et al., 2017; Yao et al., 2014; YueSun et al., 2009)، برآورد غلظت پارامتر نیترات در نقاط مختلف آبخوان بر اساس روش‌های درون‌یابی معکوس وزنی فاصله و کریجینگ (استواری و همکاران، ۱۳۹۱)، برآورد غلظت یون فلوراید در سطح آبخوان با استفاده از روش‌های معکوس وزنی فاصله، تخمین گر موضعی<sup>۱۲</sup>، تخمین گر عام<sup>۱۳</sup>، تابع پایه شعاعی<sup>۱۴</sup> و کریجینگ (المدرسی و همکاران، ۱۳۹۸)، تخمین پارامترهای کیفی آبخوان شامل هدایت الکتریکی، کلسیم، کلر، منیزیم، بی‌کربنات، سولفات، سدیم، نیترات، کل ذرات محلول، سختی کل، منگنات، نیتروژن، قلیائیت و اسیدیته با استفاده از انواع مدل‌های روش کریجینگ (عبدالهی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Safarbeiranvand et al., 2018; Gorai and Kumar, 2013; Zaiming et al., 2012) استفاده شده است.

بررسی سوابق تحقیقات نشان می‌دهد در تحقیقات مختلف مقادیر قابلیت انتقال در سطح آبخوان، با بسط معادله ژاکوب و بر اساس هم‌بستگی بین مقادیر مقاومت عرضی و قابلیت انتقال، تشابه خصوصیات جریان آب زیرزمینی و جریان الکتریکی در محیط متخلخل، تحلیل نتایج حاصل از برداشت سونداژ الکتریکی قائم با استفاده از نرم‌افزار IPI2Win و یا استفاده از روابط تجربی تخمین زده شده است. هم‌چنین از روش‌های مختلف درون‌یابی و زمین‌آمار در حوزه منابع آب زیرزمینی و به منظور تخمین پارامترهای مختلف کمی و کیفی آبخوان‌ها استفاده شده است. در این تحقیق به منظور کاهش هزینه‌های روش‌های معمول و در رویکردی متفاوت، از روش‌های درون‌یابی و زمین‌آمار به منظور تعیین قابلیت انتقال در نقاط مختلف آبخوان استفاده می‌شود. به عنوان مطالعه موردی، مقادیر قابلیت انتقال آبخوان دامنه-داران با استفاده از

<sup>۱۲</sup> Radial Basis Function (RBF)

<sup>۱۳</sup> Local Polynomial Interpolation (LPI)

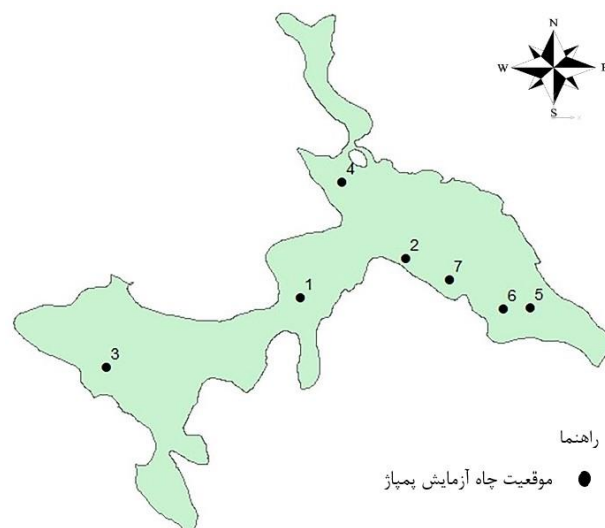
<sup>۱۴</sup> Global Polynomial Interpolation (GPI)



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی دامنه-داران نسبت به محدوده‌های مطالعاتی مجاور بر روی تصویر ماهواره‌ای (وزارت نیرو، ۱۳۹۴).

جدول ۱- مقادیر ضریب قابلیت انتقال حاصل از آزمایش پمپاژ در محدوده موردنظر (وزارت نیرو، ۱۳۹۴).

شماره چاه در نقشه	نام چاه آزمایش	UTMx	UTMy	ضریب قابلیت انتقال (m <sup>2</sup> /day)
۱	آشجرد	۴۴۸۳۰۰	۳۶۵۱۲۸۰	۲۸۲۱
۲	باتلاق	۴۵۴۴۸۱	۳۶۵۳۵۸۱	۱۷۶۰
۳	درختک	۴۳۶۸۵۰	۳۶۴۷۱۸۰	۲۱۴۲/۷۵
۴	دره بید	۴۵۰۷۰۰	۳۶۵۸۱۰۰	۵۶۵
۵	کیز	۴۶۱۸۳۰	۳۶۵۰۷۰۰	۱۹۷/۷۵
۶	گندمزار	۴۶۰۲۳۸	۳۶۵۰۵۹۷	۲۰۱
۷	مسیر آبرسانی	۴۵۷۱۰۶	۳۶۵۲۳۴۹	۱۸۳/۳۳



شکل ۲- موقعیت چاه‌های آزمایش پمپاژ در محدوده موردنظر.

## روش‌های درون‌یابی

اساس مدل کریجینگ بر تئوری متغیر ناحیه‌ای استوار است. متغیر ناحیه‌ای، متغیری تصادفی است که مقدار آن در هر نقطه از فضا، تابع مختصات آن نقطه باشد. به عبارت دیگر، تفاضل مقدار متغیر ناحیه‌ای در دو نقطه از فضا، به فاصله‌ی آن دو از هم‌بستگی دارد. در حالت کلی، این روش درون‌یابی شامل دو دسته‌ی عادی<sup>۱۵</sup> و فراگیر<sup>۱۶</sup> می‌باشد (Myers, 2008). علاوه بر این، روش کریجینگ عادی نیز شامل مدل‌های کروی، دایره‌ای، نمایی، گاوسی و خطی می‌باشد (Heine, 1986). این روش با این فرض که سطح یا حجم مفهومی از یک تابع تصادفی با کوواریانس مکانی مشخص است، بر پایه مفهوم توابع تصادفی استوار است؛ بنابراین، مطابق رابطه ۲ خواهیم داشت:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2\text{var}[Z(r+h)-Z(r)]} \quad (2)$$

که در این رابطه،  $z(r)$  معادل مقدار پارامتر در نقاط برداشت‌شده ( $r$ ) توسط نقشه‌برداری و یا هیدروگرافی و  $\gamma(h)$  مقدار پارامتر در سایر نقاط محاسباتی ( $h$ ) و  $\text{var}$  بیانگر عملگر واریانس داده‌ها می‌باشد (Royle et al., 1981).

## ج) روش ترند

در این روش، یک تابع چندجمله‌ای<sup>۱۷</sup> با استفاده از کم‌ترین مربعات رگرسیون (خطای جذر میانگین مربعات<sup>۱۸</sup>) برازش می‌یابد. سطوح تشکیل شده ممکن است بر اساس تمامی نقاط برازش داده شود (برازش سراسری<sup>۱۹</sup>) و یا بخش کوچکی از داده‌های مجاور در نظر گرفته شوند (برازش محلی<sup>۲۰</sup>). این روش شامل دو نوع رگرسیون خطی<sup>۲۱</sup> و لجستیک<sup>۲۲</sup> می‌باشد و سطح برازش داده شده از تمامی نقاط عبور نمی‌کند. با توجه به موارد مذکور، مطابق رابطه ۳ خواهیم داشت:

$$\text{RMSD}(\theta_1, \theta_2) = \sqrt{\text{MSE}(\theta_1, \theta_2)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}} \quad (3)$$

که در این رابطه،  $\text{MSE}$  عملگر میانگین مجذور انحراف مقادیر  $\theta_1$  و  $\theta_2$  و  $E$  عملگر میانگین می‌باشند. همچنین، مقادیر پارامترهای  $\theta_1$  و  $\theta_2$  به فرم کلی رابطه ۴ محاسبه می‌شوند (Wu et al., 2019).

در حالت کلی، اصل نزدیک‌ترین همسایه که بر پایه شباهت نقاط مجهول به نزدیک‌ترین نقاط معلوم می‌باشد، اساس روش‌های درون‌یابی است. چگونگی استفاده از این اصل در هریک از این روش‌ها متفاوت بوده و به مدل ریاضی و آماری به‌کار گرفته شده در آن بستگی دارد؛ بنابراین روش‌های متنوعی به‌منظور درون‌یابی پارامترهای مجهول پیشنهاد شده است. در هر یک از روش‌های درون‌یابی، مقادیر پارامتر موردنظر در مجموعه‌ای از نقاط به‌عنوان ورودی به مدل وارد شده و سپس اطلاعات نقاط مجهول با استفاده از مدل ریاضی و آماری مورد استفاده در آن روش، درون‌یابی می‌شود. میزان صحت و دقت نتایج حاصل به‌دقت مکانی، تعداد و توزیع نقاط معلوم و مدل مورد استفاده بستگی دارد. به‌علاوه، بهترین نتایج هنگامی به‌دست می‌آید که رفتار تابع ریاضی مورد استفاده با رفتار پدیده موردنظر متشابه باشد. در این تحقیق عملکرد ۴ روش درون‌یابی بررسی می‌شود. در ادامه به‌طور اختصار این روش‌ها معرفی می‌شوند.

## الف) روش معکوس وزنی فاصله

این روش بر این فرض استوار است که تأثیر پدیده موردنظر با افزایش فاصله کاهش می‌یابد؛ بنابراین از معکوس فاصله به‌عنوان وزن نقاط اندازه‌گیری شده در پیش‌بینی نقاط مجهول استفاده و درون‌یابی بر اساس رابطه ۱ انجام می‌شود (Nielson and FRUNK, 2010):

$$F(r) = \sum_{i=1}^m w_i z(r_i) = \frac{\sum_{i=1}^m (z(r_i) / |r - r_i|^p)}{\sum_{i=1}^m (1 / |r - r_i|^p)} \quad (1)$$

که در این رابطه  $F(r)$  مقدار پارامتر در نقطه فاقد برداشت،  $w_i$  و  $z(r)$  به‌ترتیب مقدار پارامتر در نقاط برداشت شده و ضریب تأثیر نظیر آن،  $r$  فاصله وزنی معکوس بین نقاط فاقد برداشت و نقاط برداشت شده و  $p$  پارامتر تأثیر است که معمولاً برابر ۲ در نظر گرفته می‌شود.

## ب) روش کریجینگ

<sup>۱۹</sup> Global

<sup>۲۰</sup> Local

<sup>۲۱</sup> Linear regression

<sup>۲۲</sup> Logistic regression

<sup>۱۵</sup> Ordinary Kriging

<sup>۱۶</sup> Universal Kriging

<sup>۱۷</sup> Polynomial

<sup>۱۸</sup> Root Mean Square Error (RMSE)

اندازه‌گیری شده از آزمایش پمپاژ در آن نقطه مقایسه و دقت روش درون‌یابی ارزیابی می‌شود.

برای این منظور در محیط نرم‌افزار Arc map، مقدار ضریب قابلیت انتقال اندازه‌گیری شده در نقطه موردنظر از فایل اطلاعات اولیه حذف و بر اساس اطلاعات سایر نقاط و با استفاده از روش‌های درون‌یابی مختلف، مقادیر این پارامتر در کل سطح آبخوان درون‌یابی و تعیین می‌شود. این روش‌ها شامل معکوس وزنی فاصله، کریجینگ، ترند و اسپلاین می‌باشد. در روش معکوس وزنی فاصله درون‌یابی در نقاط مختلف بر اساس رابطه ۱ تعیین می‌شود. در این روش،  $F(r)$  مقدار قابلیت انتقال در نقطه فاقد برداشت،  $Z(r)$  و  $W_i$  به ترتیب مقدار قابلیت انتقال در محل آزمون چاه پمپاژ و ضریب تأثیر نظیر آن،  $r$  فاصله وزنی معکوس بین نقاط فاقد برداشت و نقاط برداشت‌شده و  $p$  پارامتر تأثیر است که برابر ۲ در نظر گرفته شده است. در روش کریجینگ درون‌یابی در نقاط مختلف بر اساس رابطه ۲ انجام می‌شود که در این رابطه،  $Z(r)$  مقادیر قابلیت انتقال در نقاط آزمون چاه پمپاژ،  $r$  موقعیت نقاط آزمون،  $\gamma(h)$  مقدار قابلیت انتقال محاسبه شده برای سایر نقاط و  $h$  موقعیت این نقاط می‌باشد. در روش ترند، مرتبه چندجمله‌ای مورد استفاده برابر یک در نظر گرفته شده و مقادیر  $X_{1,1}$  تا  $X_{2,n}$  با استفاده از تابع چندجمله‌ای خطی محاسبه می‌شوند. در روش اسپلاین درون‌یابی در نقاط مختلف بر اساس رابطه ۵ انجام می‌شود که در این رابطه،  $\lambda$  برابر  $0.1$  و  $r_j$  فاصله نقطه محاسباتی تا نقطه‌ی چاه پمپاژ  $\lambda$  می‌باشد.

در این روش‌ها، مقدار حاصل از درون‌یابی در نقطه حذف شده با مقدار اندازه‌گیری شده از آزمایش پمپاژ در آن نقطه مقایسه و دقت روش درون‌یابی با استفاده از شاخص آماری درصد خطای نسبی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار این شاخص از رابطه ۶ تعیین می‌شود.

$$\text{Error}(\%) = \frac{|T_{\text{exact}} - T_{\text{calc}}|}{T_{\text{exact}}} \times 100 \quad (6)$$

که در این رابطه  $T_{\text{exact}}$  و  $T_{\text{calc}}$  به ترتیب مقدار ضریب قابلیت اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه شده با استفاده از روش درون‌یابی انتخابی در نقطه مورد بررسی می‌باشد. در ادامه و به

$$\theta_1 = \begin{bmatrix} x_{1,1} \\ x_{1,2} \\ \vdots \\ x_{1,n} \end{bmatrix}, \theta_2 = \begin{bmatrix} x_{2,1} \\ x_{2,2} \\ \vdots \\ x_{2,n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در این رابطه، مقادیر  $x_{1,1}$  تا  $x_{2,n}$  با استفاده از تابع چندجمله‌ای انتخابی محاسبه می‌شوند.

#### د) روش اسپلاین

در این روش برای تخمین درون‌یابی از دو روش حالت منظم<sup>۲۳</sup> و حالت کششی<sup>۲۴</sup> استفاده می‌شود. روش حالت منظم بر مبنای هموارسازی نقشه‌ی خروجی تنظیم می‌شود و برای مناطق کاملاً مسطح به کار می‌رود و نتیجه آن یک سطح کاملاً هموار و مسطح<sup>۲۵</sup> است. حالت کششی بر مبنای ناهموارسازی نقشه خروجی است و هر چه میزان وزن وارد شده بزرگ‌تر باشد، درون‌یابی ناهموارتر خواهد بود و بنابراین هموارسازی صورت نمی‌گیرد. این روش نسبت به روش حالت منظم دقیق‌تر بوده ولیکن دارای پیچیدگی و جزئیات بیش‌تری است. در روش اسپلاین، درون‌یابی با استفاده از چندجمله‌ای‌ها انجام می‌شود و از برازش یک تابع چندجمله‌ای بر اساس داده‌های نمونه، مقادیر نقاط نامعلوم برآورد می‌شود. روش درون‌یابی اسپلاین با استفاده از رابطه ۵ انجام می‌شود.

$$Z_{(x,y)} = T_{(x,y)} + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r_j) \quad (5)$$

که در این رابطه،  $N$  تعداد نمونه،  $\lambda_j$  ضریب راه‌حل معادلات خطی،  $r_j$  فاصله از نقطه‌ی نمونه  $\lambda$ ،  $T_{(x,y)}$  و  $R(r_j)$  با توجه به نوع گزینه انتخابی توسط کاربر بر اساس یکی از دو روش حالت منظم و یا حالت کششی تعیین می‌شود (Hall et al., 1976).

#### روش پیشنهادی

در این تحقیق با استفاده از روش‌های درون‌یابی ارائه شده در بخش ۲، ضریب قابلیت انتقال محدوده مطالعاتی دامنه-داران تعیین و با مقادیر به‌دست آمده از آزمایش پمپاژ مقایسه می‌شود. بدین منظور، مقدار این ضریب در نقاطی از محدوده که مقدار قابلیت انتقال آن قبلاً با انجام آزمایش چاه پمپاژ اندازه‌گیری شده است، با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی تعیین و سپس مقدار حاصل از درون‌یابی با مقدار

<sup>۲۵</sup> Smooth

<sup>۲۳</sup> Spline- Regularized

<sup>۲۴</sup> Spline- Tension

اصلاح می‌شود. با اتمام مرحله واسنجی مدل، مقادیر ضخامت آبخوان مجدداً بر اساس تراز سطح آب محاسباتی در هر نقطه محاسبه شد و با ضرب آن در مقادیر هدایت هیدرولیکی حاصل از مرحله واسنجی، قابلیت انتقال آبخوان در نقاط مختلف و بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی به‌دست آمد. در نهایت مقادیر قابلیت انتقال به‌دست آمده با مقادیر حاصل از درون‌یابی بر اساس روش معکوس وزنی فاصله مقایسه شد.

### نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از درون‌یابی مقادیر قابلیت انتقال آبخوان دامنه-داران ارائه می‌شود. در جدول ۲ مقادیر ضریب قابلیت انتقال حاصل از انجام آزمایش چاه پمپاژ در چاه‌های مختلف و نیز مقادیر به‌دست‌آمده از درون‌یابی با استفاده از روش‌های مختلف برای هر یک از این چاه‌ها ارائه شده است. همچنین در جدول ۳ مقادیر شاخص درصد خطای نسبی برای روش‌های مختلف در هر یک از چاه‌های مورد بررسی ارائه شده است. ذکر این نکته ضروری است که با توجه به محدود بودن تعداد نقاط با مقادیر معلوم قابلیت انتقال، عملکرد روش کریجینگ برای نقاط مجاور نواحی مرزی مناسب نبوده ولی برای نقاط میانی مناسب است. همچنین، روش‌های اسپلاین منظم و اسپلاین با مانع نیز در برخی نقاط قابل استفاده نیست. این موارد در جداول ۲ و ۳ با خط تیره نشان داده شده است. علاوه بر این، روش معکوس وزنی فاصله نیز علی‌رغم دقت کم‌تر نسبت به روش کریجینگ، برای همه نقاط محدوده مناسب است.

بررسی مقادیر و نتایج جداول ۲ و ۳ نشان‌دهنده آن است که در کلیه روش‌های درون‌یابی استفاده شده، مقادیر شاخص درصد خطای نسبی برای چاه‌های ۴ و ۷ به‌شدت افزایش یافته است. متوسط درصد خطای نسبی برای این دو چاه به ترتیب ۳۸۸/۴۶ و ۴۷۱/۴۴ درصد می‌باشد. این موضوع ممکن است ناشی از خطای اندازه‌گیری پارامتر ضریب قابلیت انتقال در چاه‌های مذکور و یا کمبود اطلاعات در همسایگی چاه شماره ۴ باشد؛ بنابراین، در ادامه، فرآیند درون‌یابی ضریب قابلیت انتقال سایر چاه‌ها بدون در نظر گرفتن اطلاعات این دو چاه تکرار می‌شود. در جدول ۴ مقادیر ضریب قابلیت انتقال حاصل از انجام آزمایش چاه پمپاژ در نقاط مختلف و نیز مقادیر

ازای کلیه روش‌های درون‌یابی مورد استفاده، مقادیر شاخص درصد خطای نسبی برای هر یک از چاه‌های آزمون پمپاژ به‌صورت جداگانه محاسبه و نتایج حاصل بررسی می‌شود. در صورتی که مقدار این شاخص برای یک چاه به ازای کلیه روش‌ها زیاد باشد، فرآیند درون‌یابی بدون در نظر گرفتن اطلاعات مربوط به آن چاه تکرار می‌شود.

به‌منظور ارزیابی نتایج حاصل از درون‌یابی با روش معکوس وزنی فاصله، مقادیر حاصل از این روش به‌عنوان مقادیر اولیه برای مدل‌سازی آبخوان در نرم‌افزار GMS استفاده و نتایج حاصل از مرحله واسنجی مدل با نتایج به‌دست آمده از روش درون‌یابی مقایسه می‌شود. برای این منظور، با کسر تراز سطح آب اندازه‌گیری شده در محل چاه‌های مشاهده‌ای از تراز سنگ بستر در همان نقاط، ضخامت آبخوان محاسبه و با درون‌یابی مقادیر حاصل بر اساس روش معکوس وزنی فاصله، مقادیر ضخامت آبخوان در سایر نقاط به‌دست آمد. سپس با تقسیم قابلیت انتقال بر ضخامت آبخوان در هر نقطه، هدایت هیدرولیکی محاسبه شد. در ادامه، محدوده آبخوان مورد بررسی بر اساس این مقادیر پلی‌گون‌بندی شده و متوسط مقادیر محاسبه شده در سطح هر پلی‌گون به‌عنوان مقدار اولیه هدایت هیدرولیکی جهت شبیه‌سازی آبخوان در نرم‌افزار GMS وارد شد. سایر اطلاعات مورد نیاز شامل اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای، چاه‌های بهره‌برداری، مقادیر مرزی، توپوگرافی منطقه، تراز سنگ کف، حجم آب نفوذ یافته حاصل از بارش و نیز آب برگشتی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی به مدل وارد شد.

سپس واسنجی مدل بر مبنای مقادیر تراز سطح آب اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده در محل چاه‌های مشاهده‌ای انجام شد. برای این منظور، در ابتدا با استفاده از کد PEST موجود در نرم‌افزار، واسنجی خودکار و در ادامه بر اساس مقادیر تراز سطح آب اندازه‌گیری شده در محل چاه‌های مشاهده‌ای و در یک فرآیند تکراری، واسنجی دستی آبخوان انجام شد. تکرار این مرحله تا حداقل شدن اختلاف مقادیر تراز سطح آب محاسباتی و اندازه‌گیری شده در محل چاه‌های مشاهده‌ای و رسیدن به‌دقت مورد نظر ادامه یافت. در این مرحله، پیش از هر تکرار و با توجه به نتایج حاصل از تکرار قبل و نیز جنس لایه‌های زمین، مقادیر هدایت هیدرولیکی

به دست آمده از درون یابی با استفاده از روش های مختلف بدون در نظر گرفتن اطلاعات نقاط ۴ و ۷ ارائه شده است. همچنین در جدول ۵ مقادیر شاخص درصد خطای نسبی برای روش های مختلف ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می دهد که با کاهش تعداد نقاط معلوم، روش های کریجینگ، اسپلین و ترند

در برخی نقاط قابل استفاده نیست. این موارد در جداول ۴ و ۵ با خط تیره نشان داده شده است. و لیکن با استفاده از روش معکوس وزنی فاصله می توان مقدار پارامتر مورد نظر در نقاط مختلف را تعیین نمود.

جدول ۲- مقادیر ضریب قابلیت انتقال حاصل از انجام آزمایش چاه پمپاژ و مقادیر به دست آمده از درون یابی با استفاده از روش های مختلف (m<sup>2</sup>/day).

روش	چاه ۱	چاه ۲	چاه ۳	چاه ۴	چاه ۵	چاه ۶	چاه ۷
مقادیر اندازه گیری شده (آزمایش چاه پمپاژ)	۲۸۲۱	۱۷۶۰	۲۱۴۲/۷۵	۵۶۵	۱۹۷/۷۵	۲۰۱	۱۸۳/۳۳
روش معکوس وزنی فاصله	۹۵۳/۱۹	۵۴۸/۱۸	۱۴۶۱/۰۱	۱۵۱۲/۳۳	۲۹۵/۶۷	۳۱۶/۱۲	۱۰۶۱/۰۸
روش کریجینگ عادی- کروی	۱۲۴۹/۰۱	۷۷۹/۱۶	۱۰۸۷/۷۲	۲۱۱۹/۴۶	۵۱۶/۷۱	۳۰۵/۳۴	۱۱۴۲/۵۸
روش کریجینگ عادی- دایروی	۱۳۶۸/۹۲	۷۸۹/۶۸	۱۰۴۹/۶۵	۲۱۴۴/۷۷	۴۹۱/۸۴	۲۸۷/۶۱	۱۱۳۰/۵۶
روش کریجینگ عادی- نمایی	۱۳۷۰/۱۱	۷۶۵/۳۹	۱۴۹۳/۵۴	۱۸۴۶/۵۹	۶۲۰/۷۸	۵۵۸/۶۶	۱۱۵۹/۰۳
روش کریجینگ عادی- گاوسین	۱۳۰۷/۱۱	۵۳۸/۵۹	۶۵۴/۶۱	۳۰۱۵/۵۶	۵۷۰/۲۱	۴۵۹/۵۱	۱۱۳۰/۵۱
روش کریجینگ عادی- خطی	۱۳۱۸/۵۷	۷۹۰/۴۵	۱۰۰۴/۳۱	۲۱۹۴/۷۹	۵۴۹/۵۳	۷۱۵/۰۸	۱۱۳۱/۲۴
روش کریجینگ فراگیر خطی با دریافت خطی	۱۲۵۲/۳۱	۷۳۹/۶۱	۶۳۹۹/۳۴	۳۵۸۱/۳۶	۴۴۶/۲۳	۶۴۵/۰۱	۸۴۶/۳۶
روش اسپلین منظم	۴۹۷۰/۹۳	۵۲۵/۲۷	۲۶۲۰/۹۶	۴۸۵۷/۷۸	۲۶۱/۴۱	-	۱۰۲۰/۲۳
روش اسپلین کششی	۲۱۳۸/۶۲	۵۵۹/۳۸	۳۶۳۵/۵۱	۳۰۳۲/۷۳	۳۸/۰۲	۱۶۰/۰۸	۱۰۵۱/۱۵
روش اسپلین با مانع	۱۸۴۵/۵۹	۶۷۱/۳	۳۵۶۶/۰۹	۲۴۷۱/۱۲	-	۲۶۴/۹۸	۱۰۰۴/۶۷
روش ترند خطی	۱۲۵۲/۳۱	۷۳۹/۶۱	۶۳۹۹/۳۴	۳۵۸۱/۳۶	۴۴۶/۲۳	۶۴۵/۰۱	۸۴۶/۳۶

جدول ۳- مقادیر شاخص درصد خطای نسبی برای روش های مختلف درون یابی.

روش	چاه ۱	چاه ۲	چاه ۳	چاه ۴	چاه ۵	چاه ۶	چاه ۷	متوسط درصد خطای نسبی برای هر روش
روش معکوس وزنی فاصله	۶۶/۲۱	۶۸/۸۵	۳۱/۸۲	۱۶۷/۶۷	۴۹/۵۲	۵۷/۲۷	۴۷۸/۷۸	۱۳۱/۴۵
روش کریجینگ عادی- کروی	۵۵/۷۲	۵۵/۷۳	۴۹/۲۴	۲۷۵/۱۳	۱۶۱/۲۹	۵۱/۹۱	۵۲۳/۲۴	۱۶۷/۴۷
روش کریجینگ عادی- دایروی	۵۱/۴۷	۵۵/۱۳	۵۱/۰۱	۲۷۹/۶۱	۱۴۸/۷۲	۴۳/۰۹	۵۱۶/۶۸	۱۶۳/۶۷
روش کریجینگ عادی- نمایی	۵۱/۴۳	۵۶/۵۱	۳۰/۳۰	۲۲۶/۸۳	۲۱۳/۹۲	۱۷۷/۹۴	۵۳۲/۲۱	۱۸۴/۱۶
روش کریجینگ عادی- گاوسین	۵۳/۶۶	۶۹/۴۰	۶۹/۴۵	۴۳۳/۷۳	۱۸۸/۳۵	۱۲۸/۶۱	۵۱۶/۶۵	۲۰۸/۵۵
روش کریجینگ عادی- خطی	۵۳/۲۶	۵۵/۰۹	۵۳/۱۳	۲۸۸/۴۶	۱۷۷/۸۹	۲۵۵/۷۶	۵۱۷/۰۵	۲۰۰/۰۹
روش کریجینگ فراگیر خطی با دریافت خطی	۵۵/۶۱	۵۷/۹۸	۱۹۸/۶۵	۵۳۳/۸۷	۱۲۵/۶۵	۲۲۰/۹۰	۳۶۱/۶۶	۲۲۲/۰۵
روش اسپلین منظم	۷۶/۲۱	۷۰/۱۶	۲۲/۳۲	۷۵۹/۷۸	۳۲/۱۹	-	۴۵۶/۵۰	۲۳۶/۱۹
روش اسپلین کششی	۲۴/۱۹	۶۸/۲۲	۶۹/۶۷	۴۳۶/۷۷	۸۰/۷۷	۲۰/۳۶	۴۷۳/۳۶	۱۶۷/۶۲
روش اسپلین با مانع	۳۴/۵۸	۶۱/۸۶	۶۶/۴۳	۳۳۷/۳۷	-	۳۱/۸۳	۴۴۸/۰۱	۱۶۳/۳۵
روش ترند خطی	۵۵/۶۱	۵۷/۹۸	۱۹۸/۶۵	۵۳۳/۸۷	۱۲۵/۶۵	۲۲۰/۹۰	۳۶۱/۶۶	۲۲۲/۰۵



جدول ۴- مقادیر ضریب قابلیت انتقال حاصل از انجام آزمایش چاه پمپاژ و نیز مقادیر به دست آمده از درون یابی با استفاده از روش های مختلف بدون در نظر گرفتن چاه های ۴ و ۷ (m<sup>2</sup>/day).

چاه ۶	چاه ۵	چاه ۳	چاه ۲	چاه ۱	روش
۲۰۱	۱۹۷/۷۵	۲۱۴۲/۷۵	۱۷۶۰	۲۸۲۱	مقادیر اندازه گیری شده (آزمایش چاه پمپاژ)
۲۵۹/۴۱	۲۶۲/۸۴	۱۹۰۸/۷	۱۵۷۱/۴۴	۲۱۶۷/۳۹	روش معکوس وزنی فاصله
-	-	۱۵۲۳/۱۲	۱۵۶۰/۴۷	۱۶۶۲/۲	روش کریجینگ عادی- کروی
-	-	۱۵۲۲/۷۹	۱۵۳۹/۵۵	۱۶۲۶/۰۷	روش کریجینگ عادی- دایروی
-	-	۲۰۲۶/۴۷	۱۵۴۳/۴۱	۱۶۱۹/۱۴	روش کریجینگ عادی- نمایی
-	-	۲۶۴۷/۰۶	۱۶۳۵/۰۳	۱۴۹۴/۲۲	روش کریجینگ عادی- گاوسین
-	-	۱۶۵۲/۶۵	۱۴۹۳/۱	۱۵۴۹/۴۸	روش کریجینگ عادی- خطی
۳۸۲/۱۹	۱۳/۴۶	-	۳۲۳۸/۰۹	۱۶۷۵/۸	روش کریجینگ فراگیر خطی با دریافت خطی
-	-	-	-	۱۶۸۹/۹۱	روش اسپلاین منظم
-	-	۳۷۶۱/۳۶	۱۴۵۲/۱۶	۲۰۷۰/۶	روش اسپلاین کششی
-	-	۳۵۷۱/۱۳	۱۵۶۱/۴۷	۲۱۶۵/۶۳	روش اسپلاین با مانع
۳۸۲/۱۹	۱۳/۴۶	-	۳۲۳۸/۰۹	۱۸۷۵/۸	روش ترند خطی

جدول ۵- مقادیر شاخص درصد خطای نسبی برای روش های مختلف درون یابی بدون در نظر گرفتن چاه های ۴ و ۷.

روش	چاه ۱	چاه ۲	چاه ۳	چاه ۵	چاه ۶	متوسط درصد خطای نسبی برای هر روش
روش معکوس وزنی فاصله	۲۳/۱۷	۱۰/۷۱	۱۰/۹۲	۳۲/۹۲	۲۹/۰۶	۲۱/۳۶
روش کریجینگ عادی- کروی	۴۱/۰۸	۱۱/۳۴	۲۸/۹۲	-	-	۲۷/۱۱
روش کریجینگ عادی- دایروی	۴۲/۳۶	۱۲/۵۳	۲۷/۵۳	-	-	۲۷/۴۷
روش کریجینگ عادی- نمایی	۴۲/۶	۱۲/۳۱	۵/۴۳	-	-	۲۰/۱۱
روش کریجینگ عادی- گاوسین	۴۷/۰۳	۷/۱۰	۲۳/۵۴	-	-	۲۵/۸۹
روش کریجینگ عادی- خطی	۴۵/۰۷	۱۵/۱۶	۲۲/۸۷	-	-	۲۷/۷۰
روش کریجینگ فراگیر خطی با دریافت خطی	۳۳/۵۱	۸۳/۹۸	-	۹۳/۱۹	۹۰/۱۴	۷۵/۲۱
روش اسپلاین منظم	۴۰/۱	-	-	-	-	۴۰/۱۰
روش اسپلاین کششی	۲۶/۶	۱۷/۴۹	۷۵/۵۴	-	-	۳۹/۸۸
روش اسپلاین با مانع	۲۳/۲۳	۱۱/۲۸	۶۶/۶۶	-	-	۳۳/۷۲
روش ترند خطی	۳۳/۵۱	۸۳/۹۸	-	۹۳/۱۹	۹۰/۱۴	۷۵/۲۰

مقدار خطا برای نقاط مورد نظر حاصل می شود. دلیل این مورد آن است که روش کریجینگ فراگیر بر اساس فرضیات نظریه ی تغییرپذیری ناحیه ای است و میانگین نقاط، تابعی از مختصات جغرافیایی آن ها منظور می شود. این در حالی است که در روش کریجینگ عادی روند تغییرات میانگین در کل ناحیه مقداری ثابت فرض شده است.

روش های کریجینگ، اسپلاین و ترند در برخی نقاط قابل استفاده نیست. ولیکن با استفاده از روش معکوس

در مجموع با توجه به نتایج به دست آمده برای درون یابی ضریب قابلیت انتقال نتایج زیر حاصل می شود:

- در اکثر روش های استفاده شده، نقطه ی دوم کم ترین مقدار خطا را دارا است. این موضوع می تواند ناشی از موقعیت نسبی مناسب نقاط انجام آزمون چاه پمپاژ در اطراف این نقطه باشد.
- به طور کلی با استفاده از روش کریجینگ فراگیر خطی با دریافت خطی، بیش ترین مقدار و روش کریجینگ عادی در حالت توان دار (با حداکثر ۲۰/۱۱ درصد خطا) کم ترین

مناطق با قابلیت انتقال کم موجب یک لایه شدن کل سطح می‌گردد. چون این روش بر خلاف روش معکوس وزنی فاصله که یک روش درون‌یابی محلی است، روشی منطقه‌ای است. به این معنا که در این روش از تمام مشاهدات منطقه موردنظر استفاده می‌شود. در روش ترند بسته به معادله به‌دست آمده، ممکن است ارزش مقادیر ورودی‌ها برای ترسیم سطح نیز تغییر کند.

روش معکوس وزنی فاصله (با حداکثر ۲۱/۳۶ درصد خطا) جهت درون‌یابی قابلیت انتقال برای همه‌ی نقاط محدوده مورد بررسی قابل استفاده است؛ اما سایر روش‌ها در برخی نقاط دارای دقت کافی نیستند. چون در این روش با افزایش فاصله‌ی داده‌ی معلوم از نقطه مجهول، مقدار ضریب تأثیر آن داده بر اساس فاصله کاهش می‌یابد.

در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی این آبخوان در نرم‌افزار GIS ارائه می‌شود. در شکل ۳، پلی‌گون‌بندی آبخوان بر اساس مقادیر قابلیت انتقال حاصل از روش معکوس وزنی فاصله و در جدول ۶ مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی هر پلی‌گون بر اساس روش مذکور و نیز مقدار حاصل از واسنجی ارائه و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بررسی نتایج نشان می‌دهد حداکثر مقدار اختلاف نتایج در نواحی مرز شرقی آبخوان و به میزان ۲۲/۲۲ درصد و متوسط اختلاف در نقاط مختلف سطح آبخوان برابر ۱۵/۶۹ درصد می‌باشد؛ بنابراین با استفاده از روش‌های درون‌یابی، نتایج قابل قبولی برای ضریب قابلیت انتقال آبخوان حاصل می‌شود.

وزنی فاصله، تعیین مقدار پارامتر موردنظر در نقاط مختلف امکان‌پذیر است. دلیل این مورد آن است که در روش معکوس وزنی فاصله تأثیر پدیده‌ی موردنظر با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. به‌بیان‌دیگر، این روش بر این فرض استوار است که پدیده پیوسته در نقاط اندازه‌گیری نشده، بیش‌ترین شباهت را به نزدیک‌ترین نقاط برداشت شده دارد.

- بر اساس نتایج به‌دست آمده، مشاهده می‌شود که انجام درون‌یابی به روش اسپلاین موجب حذف نقاط حداکثری و کاهش نقاط شکست و در نتیجه حذف نقاط با تغییرات ناگهانی مقادیر ضریب قابلیت انتقال می‌گردد. دلیل این مورد آن است که در این روش، درون‌یابی با استفاده از چندجمله‌ای‌ها انجام می‌شود و از برازش یک تابع چندجمله‌ای بر اساس داده‌های نمونه، مقادیر نقاط نامعلوم برآورد می‌شود؛ بنابراین، مقدار انحنای سطح حداقل شده و در نتیجه یک سطح نسبتاً هموار به‌دست می‌آید.

- در روش معکوس وزنی فاصله فردیت نقاط بهتر از سایر روش‌ها حفظ شده اما یکنواختی مقادیر ضریب مورد بررسی از بین می‌رود. دلیل این مورد آن است که اساس این روش بر این اصل استوار است که برای تخمین نقاط مجهول، نمونه‌های اطراف باید مشارکت بیش‌تری نسبت به آن‌هایی که در فاصله‌ی دورتر قرار دارند، داشته باشند. در روش کریجینگ بیش‌ترین حالت میانگین‌گیری در داده‌ها رخ می‌دهد، به‌طوری‌که استفاده از این روش در



شکل ۳- پلی‌گون بندی آبخوان محدوده مطالعاتی بر اساس مقادیر اولیه‌ی ضریب هدایت هیدرولیکی.

جدول ۶- مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان (بر اساس روش درون‌یابی و نیز حاصل از واسنجی آبخوان دامنه-داران).

شماره پلیگون	ضریب هدایت هیدرولیکی (m/day)	
	روش درون‌یابی IDW	نتایج واسنجی
۱	۳/۴۴	۴/۴۱
۲	۵/۸۶	۷/۳۲
۳	۵/۴۰	۴/۹۱
۴	۱۲/۳۶	۱۰/۹۴
۵	۸/۵	۷/۱
۶	۴/۰۵	۳/۳۲
۷	۷/۸۸	۷/۳۱
۸	۶/۶۲	۶/۰۲
۹	۸/۱۲	۷/۴۵
۱۰	۷/۵۲	۸/۴۵
۱۱	۲۸/۹۸	۳۴/۱۱
۱۲	۱۴/۰۱	۱۶/۵
۱۳	۳/۰۶	۳/۶۵
۱۴	۲/۵۵	۳/۰۴
۱۵	۳۲/۲۲	۴۱/۸۵
۱۶	۱۷/۴۵	۲۲/۱

### نتیجه‌گیری

روش اسپلاین در حالت منظم کم‌ترین دقت و با روش کریجینگ عادی در حالت توان‌دار (با حداکثر ۲۰/۱۱ درصد خطا) بیش‌ترین دقت محاسباتی حاصل شد. علاوه بر این، روش معکوس وزنی فاصله (با حداکثر ۲۱/۳۶ درصد خطا) برای همه نقاط محدوده مورد بررسی قابل استفاده بود. در نهایت از مقادیر حاصل از درون‌یابی بر اساس روش معکوس وزنی فاصله به‌عنوان مقادیر اولیه در مدل‌سازی آبخوان در نرم‌افزار GMS استفاده و واسنجی مدل در دو بخش خودکار و دستی انجام شد. با مقایسه نتایج حاصل از واسنجی و نتایج به‌دست آمده از درون‌یابی با روش مذکور، متوسط اختلاف مقادیر هدایت هیدرولیکی حاصل از دو روش در نقاط مختلف سطح آبخوان برابر ۱۵/۶۹ درصد به‌دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش درون‌یابی معکوس وزنی فاصله در تعیین ضریب قابلیت انتقال آبخوان بود و لذا برای برآورد مقدار این پارامتر در سطح آبخوان توصیه می‌شود.

مطالعه، ارزیابی و مدیریت منابع آب زیرزمینی مستلزم مشخص بودن مقادیر پارامترهای هیدرولیکی آبخوان از جمله ضریب قابلیت انتقال است. با توجه به کمبود اطلاعات موجود ناشی از محدود بودن تعداد آزمایش‌های پمپاژ و یا نادرست بودن اطلاعات اندازه‌گیری شده در برخی آبخوان‌ها، برآورد پارامترهای هیدرولیکی آبخوان بر اساس اطلاعات محدود موجود اجتناب‌ناپذیر است؛ بنابراین، در این تحقیق به‌عنوان رویکردی متفاوت، با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی و زمین‌آمار، ضریب قابلیت انتقال حوضه آبریز دامنه-داران به‌عنوان مطالعه موردی محاسبه و با مقادیر به‌دست آمده از آزمایش پمپاژ مقایسه شد. این روش‌ها شامل روش معکوس وزنی فاصله، کریجینگ عادی (حالت‌های کروی، دایروی، نمایی، گاوسین و خطی) و فراگیر (حالت خطی با دریافت خطی) اسپلاین (حالت‌های منظم، کششی و با مانع) و ترند (حالت خطی) بود. بررسی نتایج به‌دست آمده برای شاخص آماری درصد خطای نسبی نشان داد که با انجام درون‌یابی با

### سپاسگزاری

استفاده از کریجینگ. ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، ۱-۸.

خالدی، م.، مجنونی هریس، ا.، فاخری فرد، ا.، ۱۳۹۷. تعیین هدایت هیدرولیکی بر اساس قابلیت انتقال تصحیح شده و تأثیر تراکم چاه‌ها و مازاد برداشت آب بر آبخوان دشت شبستر. هیدروژئولوژی، ۳(۲): ۱۹-۳۲.

دشتی، ز.، رضایی، م.، آزادی، ا.، ارجمند شریف، م.، ۱۳۹۸. برآورد ضرایب هیدرودینامیک آبخوان دشت زوزن با استفاده از داده‌های سونداژ الکتریکی. علوم مهندسی و آبخیزداری، ۱۳(۴۴): ۳۸-۴۷.

دلبری، م.، خیاط خلقی، م.، مهدیان، م.، ح.، ۱۳۸۳. ارزیابی روش‌های زمین‌آمار در برآورد هدایت هیدرولیکی خاک در مناطق شیب آب و پشت آب پایین دشت سیستان. مجله علوم کشاورزی ایران، ۳۵(۱): ۱-۱۲.

صفوی، ح.، ۱۳۹۸. هیدرولوژی مهندسی. چاپ چهارم، انتشارات ارکان دانش (اصفهان)، ۷۰۴ ص.

طاهری تیزرو، ع.، عابدینی، ش.، کمالی، م.، ۱۳۹۶. برآورد پارامترهای هیدرولیکی لایه‌های آبدار با روش ژئوالکتریک (مطالعه موردی: دشت چهاردولی). هیدروژئولوژی، ۲(۱): ۸۵-۱۰۱.

عبداللهی منصورخانی، م.، محمدزاده، ح.، امینی، م.، عزیزی، ف.، ۱۳۹۸. ارزیابی تغییر مکانی کیفیت و تعیین شبکه‌ی بهینه‌ی پایش آب زیرزمینی دشت شهرکرد با روش‌های زمین‌آمار. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۲(۲): ۶۰-۷۸.

عزیزی، ف.، محمدزاده، ح.، ۱۳۹۵. برآورد پارامترهای هیدروژئولوژیک با استفاده از روش‌های ژئوالکتریک و مقاومت و معادلات تجربی. مجله دانشگاه تربیت معلم، ۳(۱): ۱۹۱-۲۰۲.

علیزاده، ا.، ۱۳۹۸. اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ چهل و چهارم، دانشگاه امام رضا (ع) (مشهد)، ۹۶۳ ص.

محمدی، ص.، سلاجقه، ع.، مهدودی، م.، باقری، ر.، ۱۳۹۱. بررسی تغییرات مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی دشت

این مقاله خروجی طرح تحقیقاتی مصوب با شماره‌ی ۹۸۰۰۲۸۳۶ صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور می‌باشد. نویسندگان مقاله از حمایت مالی آن صندوق در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را دارند.

## منابع

آبدار اصفهانی، س.، کلانتری، ن.، ۱۳۹۲. بررسی هیدروژئولوژیکی سفره آب زیرزمینی دشت قم. سی و دومین نشست و اولین کنگره بین‌المللی علوم زمین، بررسی زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، تهران، ایران، ۴۲-۵۰.

استواری، ی.، بیگی هرچگانی، و.، داودیان، ع.، ۱۳۹۱. بررسی تغییرات مکانی نیترات در آب زیرزمینی دشت لردگان. مدیریت آب و آبیاری، ۲(۱): ۵۵-۶۷.

المدرسی، س. ع.، مقدم، ع.، پیروی، ر.، ۱۳۹۸. انتخاب بهترین مدل درون‌یابی قطعی و زمین‌آماري جهت بررسی تغییرات مکانی فلوراید در آبخوان یزد با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی. علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۲۱(۱۰): ۶۵-۷۸.

بارانی، س.، پاپن، پ.، الباجی، م.، ۱۳۹۲. تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی خاک در منطقه زیدون. چهارمین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب، ۲۰۳۸-۲۰۲۵.

پاسیار، ع.، انصاری، ع.، ۱۳۹۶. بررسی هدایت هیدرولیکی و ضریب قابلیت انتقال آب با استفاده از مقاومت ویژه الکتریکی و آزمایش پمپاژ در دشت پیرانشهر. پژوهش آب، ۱۱(۴): ۱۳-۲۱.

تقی‌زاده، ر.، محمودی، ش.، خزایی، ح.، حیدری، ا.، ۱۳۸۷. مطالعه تغییرات مکانی شوری آب‌های زیرزمینی با استفاده از زمین‌آمار (مطالعه موردی: رفسنجان). دومین همایش تخصصی مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه تهران، دانشکده محیط‌زیست، تهران، ایران، ۳۸۵۶-۳۸۶۷.

حسینی، م.، قهرمان، ب.، عسکری، ا.، ۱۳۸۲. تخمین هدایت الکتریکی و سولفات موجود در آب زیرزمینی مشهد با

- Evans, S., Jones, N., Williams, G., Ames, D., Nelso, J. 2020. Groundwater Level Mapping Tool: An open source web application for assessing groundwater sustainability. *Environmental Modelling and Software*, 131: 104782.
- Gabrysch, R. K. 1968. The relationship between specific capacity and aquifer transmissibility in the Houston area, Texas. *Groundwater*, 6 (4): 9-14.
- George, N. J., Ibuot, J. C. 2015. Obiora D N. Geo electro hydraulic parameters of shallow sandy aquifer in Itu, Akwa Ibom State (Nigeria) using geoelectric and hydrogeological measurements. *Journal of African Earth sciences*, 110: 52-63.
- Gorai, A., Kumar, S. 2013. Spatial Distribution Analysis of Groundwater Quality Index Using GIS: A Case Study of Ranchi Municipal Corporation (RMC) Area. *Geoinfor Geostat: An Overview*, 1(2): 1-11.
- Gupta, N., Rudra, R.P., Parkin, G. 2006. Analysis of spatial variability of hydraulic conductivity at field scale. *Canadian Biosystems Engineering/Le génie des biosystèmes au Canada*, 48: 1.55 - 1.62.
- Hall, Charles, A., Meyer, Weston, W. 1976. Optimal Error Bounds for Cubic Spline Interpolation. *Journal of Approximation Theory*, 16 (2): 105-122
- Harry, T. A., Ushie, F. A., Agbasi, O. E. 2018. Hydraulic and Geoelectric relationships of Aquifers Using Vertical Electrical Sounding (VES) in parts of Obudu, Southern Nigeria. An international scientific journal, 94(2): 261-275.
- Heine, G. W. 1986. A Controlled Study of Some Two-Dimensional Interpolation Methods. *COGS Computer Contributions*, 3 (2): 60-72.
- Myers, D. 2008. Co-Kriging- new developments. *Journal A, Marechal A (eds) Geostatistics for natural resource characterisation Part 1, Dordrecht, Reidel*, 28: 295-305.
- Nielson, G., FRUNK, P. 2010. Scattered data modeling. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 13: 60-70.
- Ohmer, M., Liesch, T., Goepfert, N., Goldscheider, N. 2017. On the optimal selection of interpolation methods for groundwater contouring: An example of propagation of uncertainty regarding inter-aquifer exchange, *Advances in Water Resources*, 109: 121-132.
- Omosuyi, G. O., Adeyemo, A., Adegoke, A. O. 2007. Investigation of Groundwater Prospect Using Electromagnetic and Geoelectric Sounding at Afunbiowo, Near Akure, Southwestern Nigeria. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 8(2): 172- 182.
- Opara, A. I., Onu, N. N., Okerefor, D. U. 2012. Geophysical Sounding for the Determination of کرمان با استفاده از روش زمین‌آماری مناسب (طی یک دوره آماری ۱۰ ساله، ۱۳۷۵ - ۱۳۸۵). فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱۹(۱): ۶۰-۷۱.
- میرحاجی، ن.، اصغری مقدم، ا.، ۱۳۸۴. محاسبه و بسط ضریب قابلیت انتقال آبخوان دشت چالدران با استفاده از داده‌های ظرفیت ویژه و ژئوفیزیک. بیست و چهارمین سمپوزیوم علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران، ایران، ۱-۱۰.
- وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۴. بهنگام‌سازی بیلان منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوزه آبریز گاوخونی منتهی به سال آبی ۹۰-۱۳۸۹. جلد پنجم: ارزیابی منابع آب، ضمیمه شماره ۱۴: گزارش بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی دامنه و داران (کد ۴۲۱۴).
- یاری، ر.، کوچک‌زاده، م.، ۱۳۸۷. مقایسه روش‌های زمین‌آماری برای پیش‌بینی مکانی شوری آب زیرزمینی. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ۵۲۱۵-۵۲۲۷.
- Akaolisa, C. 2006. Aquifer Transmissivity and Basement Structure Determination Using Resistivity Sounding at Jos Plateau state Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*. 114: 27- 34.
- Asfahan, J. 2007. Neogene Aquifer Properties Specified through the Interpretation of Electrical Sounding Data, Salamiyeh Region. *Central Syria. Hydrological Processes*; 21: 2934- 2943.
- Bello, A. A., Makinde, V. 2007. Delineation of the Aquifer in the South-Western Part of the NupeBasin, Kwara State, Nigeria. *Journal of American Science*; 3 (2): 36-44.
- Douaoui, A.E.K., Nicolas, H., Walter, C. 2006. Detecting Salinity hazard within a semi-arid context by means of combining soil and remote-sensing data. *Geoderma*, 134: 217-230.
- Ebong, E. D., Akpan, A. E., Onwuegbuche, A. A. 2014. Estimation of geo hydraulic parameters from fractured shales and sandstone aquifers of Abi (Nigeria) using electrical resistivity and hydrogeologic measurements. *Journal of African Earth Sciences*, 96: 99-109.

groundwater level and its chemistry characteristics in the low plain around the Bohai sea. *North China Environmental Monitoring and Assessment* 184 (6): 3697- 3710.

Aquifer Hydraulic Characteristics from Dar-Zurrock Parameters: Case study of Ngor Okpala, Imo River Basin, Southeastern Nigeria. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 13 (1): 590-603.

- Oseji, J. O., Atakpo, E. A., Okolie, E. C. 2005. Geoelectric Investigation of the Aquifer Characteristics and Groundwater Potential in Kwale, Delta state, Nigeria. *J. Applied Sci. Environ. Mgt*, 9 (1): 157-160.
- Patriarche, D., Clara Castro, M., Pierre Goovaerts. 2005. Estimating Regional Hydraulic Conductivity Fields A Comparative Study of Geostatistical Methods. *Mathematical Geology*, 37 (6): 587-613.
- Royle, A. G., Clausen, F. L., Frederiksen, P. 1981. Practical Universal Kriging and Automatic Contouring. *Geoprocessing*, 1: 377-394.
- Safarbeiranvand, M., Amanipoor, H., Battaleb-Looie, S., Ghanemi, K., Ebrahimi, B. 2018. Quality Evaluation of Groundwater Resources using Geostatistical Methods (Case Study: Central Lorestan Plain, Iran). *Water Resource Management*, 32: 3611-3628.
- Sattar, G. S., Keramat, M., Shahid, S. 2016. Deciphering transmissivity and hydraulic conductivity of the aquifer by vertical electrical sounding (VES) experiments in Northwest Bangladesh. *Applied Water Science*, 6 (1): 1-11.
- Sepaskhah, A.R., Ataee, J. 2004. A Simple model to determine saturated hydraulic conductivity for large-scale subsurface drainage. *Biosystems Engineering*, 89(4): 505-513.
- Taheri Tizro, A., Voudouris, K., Basami, Y. 2012. Estimation of porosity and specific yield by application of geoelectrical method—a case study in western Iran. *Journal of Hydrology*, 454: 160-172.
- Wu, C., Mossa, J., Mao, L., Almulla, M. 2019. Comparison of different spatial interpolation methods for historical hydrographic data of the lowermost Mississippi River. *Annals of GIS*, 25(2): 133-151.
- Yao, L., Huo, Z., Feng, S., Mao, X., Kang, S., Chen, J., Xu, J., Steenhuis, T. 2014. Evaluation of spatial interpolation methods for groundwater level in an arid inland oasis, northwest China. *Environmental Earth Science*, 71:1911-1924.
- YueSun, A., Shaozhong Kang, A., Li, F., Zhang, L. 2009. Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China. *J. Environ. Model. and Software*, (24): 1163-1170.
- Zaiming, Z., Guanghui, Z., Mingjiang, Y., and W. 2012. Spatial variability of the shallow