تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال هفدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰
Volume 17, No. 1, Spring 2021 (IR-WRR)
۱۹۵-۲۱۱

برآورد مؤلفه‌های بیلان جریان آب‌زیرزمینی و بهبود خطای آن با استفاده از روش تاگوچی (مطالعه موردی: آبخوان مه‌ولات)

احسان بهرامی جوین[۱*]، امین غیوری مطلق[۲] و مسعود گوهری‌منش[۳]

چکیده

تهیه مدل مفهومی جریان آب زیرزمینی به عنوان مهمترین گام در مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی، یکی از اصلی‌ترین اقدامات در فرایند مدیریت درست منابع آب زیرزمینی، بخصوص در نواحی خشک که بیشتر مصرف متوجه منابع آب زیرزمینی است، می‌باشد. تهیه بیلان منابع آب زیرزمینی به عنوان جزء اساسی مدل مفهومی جریان آب زیرزمینی با مشکلاتی از قبیل کمبود و ناهمگنی اطلاعات به علت نبود شبکه پایش مناسب مکانی- زمانی همراه است. در تحقیق حاضر سعی شده با استفاده از داده‌های کمکی، ابزارهای ریاضی- آماری و قابلیت‌های نوین سامانه اطلاعات جغرافیایی از جمله تحلیلگر مکانی زمین‌آمار، روش‌هایی جهت برآورد هر چه دقیق‌تر مؤلفه‌های بیلان ارائه شود. این روش‌ها در آبخوان مه‌ولات که از آبخوان‌های بحرانی کشور بوده، برای سال‌های آبی ۱۳۸۰ الی ۱۳۹۱ به مدت ۱۲ سال پیاده‌سازی گردید. خطای متوسط معادله بیلان با استفاده از روش‌های پیشنهادی تحقیق حاضر، ۲۶/۹ درصد مجموع مؤلفه‌های ورودی بیلان محاسبه گردید که با توجه به عدم قطعیت زیاد مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی نشان از کارآیی روش‌های پیشنهادی در تدقیق مؤلفه‌های بیلان دارد. در ادامه، با توجه به وجود خطا در سطح اطلاعات موجود، با درنظر گرفتن ضرایبی اصلاحی برای مؤلفه‌های موجود در معادلات بیلان در مقیاس سالانه، در یک فرآیند بهینه‌یابی با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، مجموع قدرمطلق خطاهای موجود در معادله بیلان آب زیرزمینی مه‌ولات کمینه شدند. خروجی این محاسبات، مقادیر بهینه ضرایب اصلاحی در دامنه تغییرات منظور شده برای آن‌ها بود. پس از کمینه‌سازی مجموع قدرمطلق خطاها، این خطا با حدود ۹۷ درصد کاهش از ۲۲۷ به ۱۱۵ میلیون مترمکعب تقلیل یافت.

کلمات کلیدی: آبخوان مه‌ولات، سیستم اطلاعات جغرافیایی، مدل مفهومی، معادله بیلان، روش تاگوچی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱۲/۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۲/۲۶

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

Estimation of Groundwater Flow Balance Components and Its Error Improvement Using Taguchi Method (Case Study: Mahvelat Aquifer)

E. Bahrami Jovein[1], A. Ghayouri Motlagh[2], and M. Goharimanesh[3]*

Abstract

Preparation of the conceptual model of groundwater flow, as an essential step in groundwater flow modeling, is one of the primary measures in properly managing groundwater resources, especially in arid areas where most consumption is directed to groundwater resources. Preparation of groundwater balance as an essential component of the conceptual model of groundwater flow is associated with problems such as lack and heterogeneity of information due to lack of proper spatial-temporal monitoring network. In the present study, we tried to provide methods for estimating the groundwater balance equation's components as accurately as possible by using auxiliary data, mathematical-statistical tools, and new capabilities of GIS, such as a geostatistical analyst. These methods were implemented in the Mahvelat aquifer, one of Iran's critical aquifers, for 2001-2012 (12 Years). The balance equation's mean error was calculated to be 26.9% of the total components of the balanced input using the proposed methods of the present study. Then, due to the significant amount of error in the available information, by considering the correction coefficients for the balance equation's components on an annual scale, the absolute value of the errors was minimized using the Taguchi method. The output of these calculations was the optimal values of the corrective coefficients. The result showed that the error was reduced by 97%; from 227 to 115 million cubic meters.

Keywords: Balance Equation, Conceptual Model, GIS, Mahvelat Aquifer, Taguchi Method.

Received: February 20, 2021

Accepted: May 16, 2021

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Torbat Heydarieh, Torbat Heydarieh, Iran.
Email: e-bahramij@torbath.ac.ir

2- Graduated M.Sc. Water Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Torbat Heydarieh, Torbat Heydarieh, Iran. Email: m.goharimanesh@torbath.ac.ir

*- Corresponding Author

Dor: 20.1001.1.17352347.1400.17.1.12.3

۱- مقدمه

آب زیرزمینی یکی از مهمترین منابع حیاتی آب شیرین دنیا است. آمار جامعی از بهره‌برداری‌های منابع آب زیرزمینی موجود نیستند. اما گمان می‌رود که آب شرب ۱/۵ میلیارد نفر از مردم دنیا به آن وابسته است. با افزایش جمعیت جهان انتظار می‌رود که نیاز مردم به منابع آب زیرزمینی مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک افزایش یابد (Healy and Scanlon, 2010). ایران با قرار گرفتن در کمربند خشک جهانی بیش از بسیاری از کشورها با مسأله بحران آب روبرو است و در نتیجه مدیریت منابع آب در آن که سهم مصارف، بیشتر متوجه منابع آب زیزمینی است، از اهمیت بالایی برخوردار است. برآورد مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی در حوضه‌های خشک، یکی از راهکارهای مؤثر در مدیریت منابع آب با توجه به شرایط کمبود آب است. در حقیقت، مطالعه بیلان آب کاربرد هیدرولوژیکی اصل بقای جرم برای آب است که معادله پیوستگی نامیده می‌شود (Sokolov and Chapman, 1974). مطالعه آب‌های زیرزمینی، آب‌های سطحی و تغییرات ذخیره نیز وابسته به نتایج تجزیه و تحلیل تعادل آب در یک آبخوان یا حوضه آبریز می‌باشد (Todd and Mays, 2005). به منظور نشان دادن اهمیت هر یک از مؤلفه‌های آب‌های ورودی به سامانه، جهت‌های جریان و آب‌های خروجی از سامانه که منجر به تغییر در ذخیره سامانه می‌شوند، تهیه یک بیلان آبی بر پایه داده‌های به دست آمده از مطالعات صحرایی ضروری است (Water Technical Standards, 2017).

برآورد ویژگی‌های زمانی و مکانی مؤلفه‌های کلیدی بیلان آب به عنوان یک چالش بزرگ در سراسر جهان ذکر شده است (Ngongondo et al., 2015). مشکلاتی از قبیل کمبود اطلاعات به علت نبود تجهیزات پایش و اندازه‌گیری کافی (مکانی- زمانی)، مشکل بودن اندازه‌گیری برخی از مؤلفه‌های بیلان آب در سطح حوضه و وجود خطا در اطلاعات مربوط به عوامل قابل اندازه‌گیری به علت تغییرات شدید آن‌ها مانع از برآورد دقیق اجزای بیلان آب می‌شود (Khazaei and Hosseini, 2015).

دقت مطالعات بیلان می‌تواند در بسیاری از موارد از طریق به روزرسانی، جایگزینی یا افزودن تجهیزات و روش‌های مورد نیاز برای جمع‌آوری و پردازش داده‌ها بهبود یابد، با این حال ممکن است در کشورهایی که محدودیت بودجه دارند، وقت‌گیر و هزینه‌بر باشد. استفاده از تکنیک‌های جدید در تعیین اجزای مختلف بیلان و افزایش دقت معادلات تعادل آب از طریق افزایش کارآیی روش‌های محاسباتی می‌تواند نگرانی غیر قابل اطمینان بودن برآورد مؤلفه‌های بیلان را تا حد زیادی کاهش دهد.

در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های جدید نظیر سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و ابزارهای در دسترس آن مانند زمین‌آمار[1]، در نقاط مختلف دنیا جهت تدقیق برآورد مؤلفه‌های بیلان مورد توجه قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات صورت گرفته توسط Wegehenkel and Zhang (2007) در کشور کامبرا، Frantar et al. (2006) در اسلوونی، Mekonnen (2005) در پرتغال، Thakur et al. (2017) در هند، Meresa et al. (2019) در اتیوپی و Bahrami and Hosseini (2015) و Khodaverdi et al. (2019) در ایران اشاره کرد.

علاوه بر استفاده از روش‌های جدید فوق‌الذکر، استفاده از تکنیک‌های بهینه‌یابی جهت کمینه‌سازی خطای معادله بیلان یکی از روش‌های کارا و کم هزینه‌ای است که می‌تواند در زمینه افزایش کارایی روش‌های محاسباتی جهت تدقیق معادله بیلان مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات اندکی وجود دارند که با استفاده از این روش اقدام به اصلاح مؤلفه‌های بیلان نموده باشند. Khazaei and Hosseini (2015) خطای بیلان آب عمومی آبخوان ازغند را با استفاده از منطق فازی کمینه کرده و مؤلفه‌های بیلان را اصلاح نمودند. Daneshvar (2012) یک فرآیند بهینه‌یابی به منظور کاهش خطا در معادله بیلان آب عمومی با استفاده از روش GRG ارائه کرد و Ghayouri (2013) تغذیه آبخوانی در استان خراسان را با به کارگیری روش بهینه‌یابی GRG در کمینه‌سازی همزمان خطای معادلات بیلان آب عمومی و زیرزمینی برآورد نمود.

هرچند طیف وسیعی از روش‌های بهینه‌سازی می‌تواند برای کمینه کردن خطای بیلان مورد توجه قرار بگیرد، در تحقیق حاضر کمینه کردن خطای بیلان با استفاده از روش تاگوچی انجام شده است، چرا که به جز انجام بهینه‌سازی می‌توان فاکتورهای مؤثر بر خطا را نیز بررسی نمود. روش تاگوچی ابزاری قدرتمند برای طراحی، آنالیز و بهینه‌سازی عملکرد است. این روش طیف وسیعی از برنامه‌ها را با مزایایی مانند مفهوم ساده، سهولت استفاده و همچنین کاهش تغییرات ارائه می‌دهد و با طیف وسیعی از کاربردهای تجربی و صنعتی می‌تواند در کاهش تعداد آزمایش‌های لازم، هزینه و وقت را کاهش دهد. همچنین با توجه به معیارهای موجود در این روش، می‌توان کمینه کردن خطا را با استفاده از نسبت آماری سیگنال به نویز تحلیل نمود و با توجه به نتایج به دست آمده، سطح بهینه برای کمینه کردن خطای

بیلان و همچنین تأثیرپذیری هر کدام از فاکتورهای مورد مطالعه در خطای بیلان را رصد کرد.

به دلیل استفاده از جداول متعامد آماری و تعداد محدود آزمایش، اخیراً این روش به صورت گسترده مورد توجه دانشمندان و صنعتگران قرار گرفته است. کاربرد این روش را می‌توان در صنایع مختلف نظیر جوشکاری (Kondapalli et al., 2013)، ماشین‌کاری صنعتی (Samavi et al., 2018)، طراحی فیلتر غیر خطی (Goharimanesh and Akbari, 2015) و افزایش عملکرد کانال‌های میکرو در کاهش میزان انتقال حرارت (Javadpoor et al., 2020) مشاهده نمود. به صورت تخصصی در حوزه مهندسی آب نیز این روش در طراحی کانال‌های آب (Liu et al., 2021)، انـدازه‌گیری کیفیت آب (Dehnoei and Taheri, 2017)، افزایش بازدهی فرایند حذف یون نتیرات در آب (Ghanizadeh et al., 2015) و همچنین تصفیه آب آشامیدنی به کار رفته است (Reyhani et al., 2015).

با توجه به اهمیت مطالعات بیلان آب زیرزمینی در مدیریت منابع آبی کشور و چالش اساسی در برآورد دقیق مؤلفه‌های بیلان، علی‌الخصوص در شرایط کمبود و ناهمگنی اطلاعات، هدف اصلی تحقیق حاضر ارائه راهکارهایی جهت تدقیق مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی می‌باشد. تحقق این هدف در پژوهش حاضر در دو گام اساسی پیگیری شده است. در گام اول سعی گردیده تا با استفاده از تمامی ابزار ریاضی، آماری، نرم‌افزاری و تجربی در دسترس، روش‌هایی جهت بالابردن دقت هر یک از مؤلفه‌های بیلان ارائه گردد و در گام دوم با تخصیص ضریب اصلاحی به هر یک از مؤلفه‌های بیلان و کمینه کردن خطای بیلان با روش تاگوچی مؤلفه‌های بیلان تدقیق گردیده‌اند. فرایند کمینه‌سازی خطای بیلان با استفاده از روش تاگوچی تاکنون در مطالعات بیلان آب زیرزمینی مورد استفاده قرار نگرفته است. دشت مه‌ولات یکی از دشت‌های ممنوعه واقع در خراسان رضوی و در مجاورت کویر بجستان به عنوان مطالعه موردی جهت پیاده‌سازی راهکارهای پیشنهادی، مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی از سال آبی ۱۳۸۰ تا سال آبی۱۳۹۱ برآورد و تدقیق گردیده‌اند. نتایج حاصل از تحقیق می‌تواند در آبخوان‌های دیگر در راستای مدیریت بهره‌برداری از آبخوان‌ها و نیز ارائه دستورالعمل‌های لازم در این زمینه به کار گرفته شوند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش شناسی

بیلان آب، کلیه تبادلات آبی را در یک محدوده مطالعاتی مورد بررسی قرار می‌دهد. این معادلات بر اصل بقای ماده در چرخه آبی استوار است. بیلان آب، تمامی آب‌هایی که به یک منطقه وارد می‌شوند و در آن مصرف، ذخیره یا به شکل‌های گوناگون از آن خارج می‌شوند را در یک دوره زمانی معین مورد ارزیابی قرار می‌دهد. تمامی مؤلفه‌های بیلان در طول زمان تغییر می‌کنند، بنابراین بیلان آب بایستی در یک بازه زمانی مشخص مطرح گردد (Bredehoeft, 2009). برای مطالعه آب زیرزمینی بازه‌های زمانی مختلف مانند ماهانه، فصلی و یا سالانه را می‌توان انتخاب کرد، اما بسته به هدف مطالعه و اقلیم منطقه انتخاب بازه زمانی متفاوت خواهد بود. برای مناطق خشک و نیمه‌خشک که تراز آب زیرزمینی پایین است، انتخاب بازه‌های زمانی طولانی مناسب‌تر هستند، زیرا در رسیدن تغذیه به تراز آب زیرزمینی تأخیر زمانی وجود دارد (Manghi et al., 2009). با توجه به این مطلب در تحقیق حاضر بازه زمانی سالانه انتخاب گردیده است و محاسبات بیلان از سال آبی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۱ مدنظر می‌باشد. معادله بیلان آب زیرزمینی را می‌توان به شکل معادله (۱) بیان کرد:

(۱)

$$\left(R_{ra}+R_{fo}+R_{ag}+R_{ar}\right)+Q_{in}^{gw}-ET^{gw}-Q_{D}-Q_{P}-Q_{out}^{gw}=\Delta S^{gw}$$

که در آن، R_{ra} تغذیه ناشی از بارندگی، R_{fo} تغذیه ناشی از رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و برکه‌ها، R_{ag} تغذیه ناشی از بازگشت آب کشاورزی، R_{ar} تغذیه مصنوعی، Q_{in}^{gw} جریان ورودی آب زیرزمینی به محدوده آبخوان از آبخوان‌های اطراف، ET^{gw} تبخیر و تعرق از آبخوان، Q_{D} تخلیه طبیعی از محدوده آبخوان مثل چشمه‌ها، Q_{P} برداشت از منابع آب زیرزمینی مثل چاه‌های کشاورزی و قنات‌ها، Q_{out}^{gw} جریان آب خروجی زیرزمینی از محدوده آبخوان به آبخوان‌های اطراف و ΔS^{gw} تغییرات ذخیره آب زیرزمینی، هستند. کلیه مؤلفه‌ها دارای بعد حجم $[L^3]$ می‌باشند.

۲-۱-۱- برآورد مؤلفه‌های بیلان

در این تحقیق، برای برآورد هر یک از مؤلفه‌های معادله بیلان، اطلاعات خام مرحله اول که حاوی داده‌های نقطه‌ای بوده، درون‌یابی شده و به صورت لایه‌های توزیع مکانی برآورد شدند. جهت این امر از ابزار تحلیل‌گر زمین‌آمار نرم‌افزار ArcGIS استفاده گردید. برآورد هر یک از مؤلفه‌ها با توجه به نواقص اطلاعاتی، پیچیدگی‌ها و مشکلاتی را به همراه خواهد داشت که این امر تسلط بر علوم آماری، هیدرولیک آب زیرزمینی و وضعیت منطقه را به صورت توأم، نیاز داشته و نیازمند نوآوری‌هایی در این زمینه می‌باشد. در تحقیق حاضر برای انتخاب روش درون‌یابی منتخب از روش ارزیابی متقاطع[۲] برای هر یک از مؤلفه‌های معادله بیلان استفاده شد. به کمک این روش می‌توان

دریافت که مدل برآورد کننده تا چه میزان توانایی برآورد مناسب از داده‌ها را داشته است. در این روش ابتدا نقطه‌ای با مقدار معلوم حذف شده، سپس مقدار آن به کمک سایر نقاط و مدل استفاده شده، برآورد می‌شود. هرچه اختلاف برآورد با مقدار اندازه‌گیری شده نقطه کمتر باشد، مدل بهتر عمل کرده است. این فرایند برای تمامی داده‌های اندازه‌گیری شده انجام می‌شود (Johnston et al., 2001). خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، مبنای انتخاب بهترین روش برای توزیع مکانی داده‌ها قرار گرفت. برای این منظور روش‌های مختلف شامل:

۱. چند جمله‌ای محلی[۳] با توابع هسته نمایی، گوسی[۴]، اپانکنیکوف[۵]، چندجمله‌ای[۶] و کوآرتیک[۷]؛

۲. کریجینگ با توابع مختلف سمی‌واریوگرام پایدار، نمایی، گوسی، جی بسل[۸] و کروی[۹]؛

۳- کوکریجینگ (با داده‌های کمکی ارتفاع ایستگاه‌های باران‌سنجی از سطح دریا) با توابع مختلف سمی‌واریوگرام نمایی، گوسی و کروی

در طی سالهای ۱۳۸۰ الی ۱۳۹۱ اعمال گردید. از بین روش‌های فوق، روشی که کمترین مقدار RMSE را دارا بوده به عنوان بهترین روش انتخاب گردید و به عنوان روش توزیع مکانی به کار برده شد.

برای محاسبه جریان آب زیرزمینی ورودی به محدوده آبخوان، از معادله دارسی به فرم معادله (۲) استفاده گردید:

$$Q_{in}^{gw}=T.I^{gw}.l \qquad (۲)$$

که در آن T ضریب انتقال آبخوان بر حسب مترمربع بر روز، I^{gw} گرادیان هیدرولیکی جریان آب زیرزمینی، l طولی از سلول عمود بر جهت جریان و Q_{in}^{gw} جریان آب زیرزمینی ورودی به آبخوان بر حسب مترمکعب بر روز، هستند. ضریب انتقال با معادله (۳) محاسبه می‌شود:

$$T=K.b \qquad (۳)$$

که در آن K هدایت هیدرولیکی بر حسب متر بر روز و b ضخامت لایه اشباع بر حسب متر هستند.

برای محاسبه تغییرات ذخیره آب زیرزمینی که تفاوت بین مجموع عوامل تغذیه و تخلیه آبخوان، می‌باشد از معادله (۴) استفاده گردید (Delleur, 1999):

$$\Delta S^{gw}=S_y.A.\Delta H \qquad (۴)$$

که در آن S_y آبدهی مخصوص لایه اشباع در تراز آب زیرزمینی، A مساحت محدوده مطالعاتی بر حسب مترمربع، ΔH میانگین تغییرات سالانه تراز آب زیرزمینی بر حسب متر و ΔS^{gw} تغییرات ذخیره آب زیرزمینی بر حسب مترمکعب هستند.

مقدار تغذیه آب زیرزمینی در تحقیق حاضر با جمع تغذیه ناشی از بارندگی R_{ra} و تغذیه ناشی از بازگشت آب کشاورزی R_{ag} در قالب معادله (۵) محاسبه گردید:

$$R_{ra}+R_{ag}=R_t=\alpha_{ra}.(P.A)+\alpha_{ag}.Q_p \qquad (۵)$$

که در آن R_t تغذیه کل بر حسب مترمکعب، P بارندگی بر حسب متر، A مساحت محدوده مطالعاتی بر حسب مترمربع، Q_p برداشت از منابع آب زیرزمینی برحسب مترمکعب، α_{ra} ضریب تغذیه ناشی از بارندگی و α_{ag} ضریب تغذیه ناشی از بازگشت آب کشاورزی هستند.

۲-۱-۲- خطا در معادله بیلان

با توجه به مشکلات متعدد در اندازه‌گیری و برآورد مستقل مؤلفه‌های معادله بیلان آب که ناشی از خطای انسانی، دستگاهی و محاسباتی هستند، یک عبارت خطا به معادله بیلان افزوده می‌شود که می‌تواند مقدار قابل توجهی نیز داشته باشد. بنابراین معادله بیلان را می‌توان به شکل معادله (۶) تغییر داد (Sokolov and Chapman, 1974):

$$I-O-\Delta S=\eta \qquad (۶)$$

که در آن I حجم آب ورودی به محدوده بیلان، O حجم آب خروجی از محدوده بیلان، ΔS حجم تغییرات ذخیره آب و η خطای معادله بیلان هستند.

به همین ترتیب می‌توان به معادله بیلان آب زیرزمینی یک عبارت خطا اضافه کرد. بنابراین، می‌توان معادله بیلان آب زیرزمینی که مربوط به محدوده مطالعاتی است (معادله (۱۲)) را به صورت معادله (۷) نوشت:

$$R_{ra}+R_{ag}+Q_{in}^{gw}-Q_P-\Delta S^{gw}=\eta^{gw} \qquad (۷)$$

که در آن η^{gw} خطای بیلان آب زیرزمینی بر حسب مترمکعب می‌باشد.

۲-۱-۳- کمینه‌سازی خطا در معادله بیلان

اندیشه اصلی در این قسمت معرفی یک روش بهینه‌یابی است که بر روی معادله بیلان آب زیرزمینی در طول دوره آماری دوازده ساله پیاده می‌شود و ضمن کاهش خطای کلی در معادلات بیلان، مقادیر مؤلفه‌ها را نیز به مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌کند. به منظور اصلاح و نزدیک کردن مقادیر مؤلفه‌ها به مقادیر واقعی، به هر یک از مؤلفه‌ها یک ضریب اصلاحی اعمال می‌شود. سپس این ضرایب اصلاحی به گونه‌ای مشخص می‌شوند که معیار خطا حداقل شود. قیود مسأله بهینه‌یابی، در حقیقت، محدوده منطقی و قابل توجیه از ضرایب اصلاحی هستند که با توجه به خطای موجود در برآورد مؤلفه‌ها به مسئله بهینه‌یابی دیکته می‌شوند. مدل بهینه‌یابی با معیار مجموع قدرمطلق خطا به صورت معادله (۸) بیان می‌شود:

$$\text{Min}\sum_{i=1}^{n}|\eta_i| \quad (۸)$$

که در آن η_i خطای معادله بیلان در سال مورد نظر است.

از ترکیب مدل بهینه‌یابی با معادله (۷) که به عنوان معادله بیلان آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی دشت مه‌ولات همراه با خطا معرفی شد، معادله (۹) حاصل می‌شود:

(۹)

$$\text{Min}\sum_{i=1}^{12}\left|x_1\left(R_{ra}\right)_i+x_2\left(R_{ag}\right)_i+x_3\left(Q_{in}^{gw}\right)_i-x_4\left(Q_p\right)_i-x_5\left(\Delta S^{gw}\right)_i\right|$$

که در آن x_1 ضریب اصلاحی تغذیه ناشی از بارندگی، x_2 ضریب اصلاحی تغذیه ناشی از بازگشت آب کشاورزی، x_3 ضریب اصلاحی جریان ورودی آب زیرزمینی، X_4 ضریب اصلاحی برداشت از منابع آب زیرزمینی، x_5 ضریب اصلاحی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی و i اندیس زمان، هستند.

باتوجه به این‌که ضرایب اصلاحی، منعکس کننده خطا در برآورد هر یک از مؤلفه‌های معادلات بیلان هستند، بایستی برای هر یک از این ضرایب، محدوده فیزیکی قابل قبول درنظر گرفته شود. این محدوده برای هر حوضه بر مبنای روش برآورد مؤلفه‌های معادله بیلان برای آن حوضه تعیین می‌شود. این محدوده‌ها با توجه به مطالعات صورت گرفته در آمریکا (Heilweil and Brooks, 2010) که عدم قطعیت مؤلفه‌های تغذیه و تخلیه بیلان آب زیرزمینی را به ترتیب مثبت و منفی ۵۰ و ۳۰ درصد معرفی کرده است و با توجه به محدوده پیشنهادی برای تغییرات ذخیره آب زیرزمینی توسط Khazaei and Hosseini (2015)، به صورت قیدهایی با معادله (۱۰)، به مدل بهینه‌یابی اعمال می‌شوند:

(۱۰)

$$.5<c_{R_{ra}}<1.5,.5<c_{R_{ag}}<1.5,.5<c_{Q_{out}^{gw}}<1.5,.7<c_{Q_p}<1.3,0.49<c_{\Delta S^{gw}}<1.51$$

برای بهبود وضعیت میزان خطا در این بخش از روش طراحی آزمایش بر پایه تاگوچی استفاده می‌شود. پیدا کردن حالت بهینه برای هر کدام از ضرایب، چالشی است که در این بخش با استفاده از جداول متعامد پیشنهادی به صورت بهبودیافته شده ارائه می‌شود. در روش تاگوچی، آماره‌ای به نام نسبت سیگنال به نویز (SNR) برای کمینه کردن هدف آزمایش به صورت رابطه (۱۱) معرفی می‌شود که بیشتر بودن آن در یک سطح، بیانگر تأثیرگذارتر بودن سطح مورد نظر در فاکتور مطالعه شده است (Goharimanesh et al., 2014).

$$SNR=-10\log_{10}^{Error^2} \quad (۱۱)$$

در این روش آماری، فاکتورها، همان کمیت‌های آزمایشی هستند که در مقاله حاضر بیانگر ضرایب تصحیح شونده معادله بیلان نام دارند. گرچه هر فاکتور می‌تواند دامنه وسیعی از اعداد را از آن خود نماید، در روش تاگوچی سطوح محدودی پیشنهاد می‌شود که میزان آن در این پژوهش، پنج سطح برای هر فاکتور است. در حالت کلی می‌توان فهمید تعداد 5^5 آزمایش باید انجام بگیرد تا سطوح بهینه استخراج شود. اما در روش تاگوچی با استفاده از جدول متعامد L_{25} میتوان آزمایش‌ها را به ۲۵ عدد کاهش داد و با درنظر گرفتن صرفا ۲۵ محاسبه، به سطوح قابل قبولی دست یافت. در صورتی که انجام یک مرحله تاگوچی نتواند کاربر را در احصاء مقادیر قابل قول راضی نماید می‌توان روش تاگوچی را با درنظر گرفتن بازه‌ای جدید و موثر تکرار نمود و آن را انجام داد. جدول ۱، فاکتورهای پنج گانه و سطوح آن را متناسب با بازه مشخص هر یک نشان می‌دهد.

۲-۲- منطقه مورد مطالعه

۲-۲-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

دشت مه‌ولات با مساحت ۲۱۴۵ کیلومتر مربع، واقع در حوضه آبریز کویر مرکزی است و در استان خراسان رضوی قرار دارد. این منطقه با مختصات طول جغرافیایی ′۵۸ °۵۷ تا ′۰۳ °۵۹ و عرض جغرافیایی ′۴۸ °۳۴ تا ′۱۱ °۳۵ بوده و با کشیدگی شرقی-غربی، از شمال با حوضه مطالعاتی کاشمر و ازغند، از شرق با حوضه مطالعاتی رشتخوار و جنگل، از جنوب با حوضه مطالعاتی بجستان- یونسی و از غرب با حوضه مطالعاتی کاشمر هم مرز است. موقعیت دشت مه‌ولات و مدل رقومی ارتفاع آن در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

Table 1- Factor/Levels arrangement of Taguchi method

جدول ۱- فاکتورهای روش تاگوچی و سطوح مورد نظر

Level-Factor	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	0.5	0.5	0.5	0.7	0.49
2	0.75	0.75	0.75	0.85	0.745
3	1	1	1	1	1
4	1.25	1.25	1.25	1.15	1.255
5	1.5	1.5	1.5	1.3	1.51

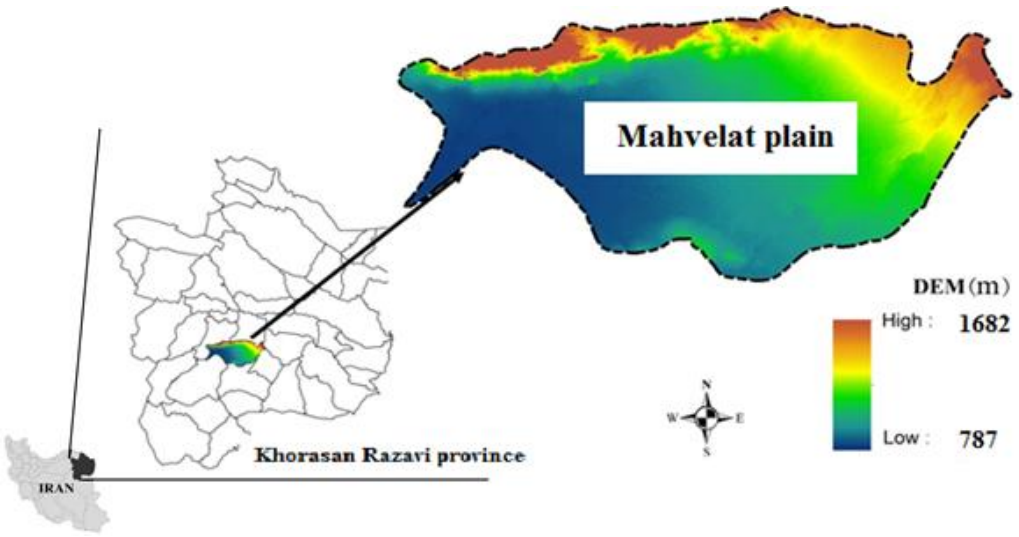

Fig. 1- Location of Mahvelat plain in Khorasan Razavi province

شکل ۱- موقعیت دشت مه‌ولات در استان خراسان رضوی

۲-۲-۲- معادله بیلان منطقه مورد مطالعه

با توجه به افت هر ساله آب زیرزمینی منطقه، همچنین شوری و پایین آمدن کیفیت آب زیرزمینی آبخوان، وجود جریان آب زیرزمینی خروجی از آبخوان مه‌ولات تأیید نگردیده و ورود جریان آب شور زیرزمینی مورد تاکید قرار گرفته است (Khorasan Razavi Regional Water Com., 2011). به همین دلیل از مؤلفه جریان آب زیرزمینی خروجی از آبخوان (Q_{out}^{gw}) صرفنظر شد. قابل ذکر است که این موضوع در طی فرآیند محاسبات، با توجه به جهت گرادیان هیدرولیکی و بردارهای سرعت جریان آب زیرزمینی تأیید شد.

ضخامت لایه غیراشباع در محدوده بیلان آب زیرزمینی آبخوان مه‌ولات حدود ۶۰ متر است. از این‌رو تبخیر و تعرق از تراز آب زیرزمینی (ET^{gw})، صفر درنظر گرفته شد (Khorasan Razavi Regional Water Com., 2015). عدم وجود رودخانه و چشمه در محدوده آبخوان باعث شد از مؤلفه تخلیه طبیعی از محدوده آبخوان (Q_D) صرفنظر شود. از طرفی مؤلفه‌های اصلی تغذیه آبخوان دشت مه‌ولات، تغذیه ناشی از بارندگی (R_{ra}) و تغذیه ناشی از بازگشت آب برداشت شده از منابع آب زیرزمینی (R_{ag}) هستند. با این توضیحات معادله بیلان آب زیرزمینی برای آبخوان دشت مه‌ولات با معادله (۱۲) بیان می‌شود:

$$(R_{ra}+R_{ag})+Q_{in}^{gw}-Q_P=\Delta S^{gw} \quad (۱۲)$$

۲-۲-۳- برآورد مؤلفه‌های بیلان منطقه مورد مطالعه

۲-۲-۳-۱- بارندگی

در برآورد بارندگی، به دلیل کمبود ایستگاه‌های باران‌سنجی داخل منطقه مورد مطالعه، از ایستگاه‌های باران‌سنجی اطراف دشت مه‌ولات استفاده شد. از بین کل ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه مورد مطالعه، تعدادی از ایستگاه‌ها اعم از باران‌سنجی، تبخیرسنجی و سینوپتیک که از نظر خصوصیات اقلیمی و جغرافیایی به محدوده مطالعاتی نزدیک‌تر بودند، به منظور تجزیه و تحلیل بارش در منطقه انتخاب شدند. اطلاعات مورد نیاز از شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی (۱۶ ایستگاه: ششطراز، قند تربت حیدریه، گناباد، ازغند، کاشمر، کاریز کاشمر، شیخ ابوالقاسم، فدیهه، نامق، ده چنار، بیروت، سهل‌آباد، گردنه کلات، شریف‌آباد، یونسی و رشتخوار) و خراسان جنوبی (۳ ایستگاه: فردوس، فرخی و بنرک) اخذ گردیده و سپس لایه اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های باران‌سنجی و مقدار میانگین بارندگی آن ایستگاه در هر سال، در نرم‌افزار Arc GIS تهیه شد. در ادامه، روش‌های درون‌یابی موجود در تحلیل‌گر زمین‌آمار به همراه توابع مختلف آن‌ها برای هر سال اجرا شدند. از بین روش‌های درون یابی پیش گفته شده (بخش ۲-۱-۱)، روش چند جمله‌ای محلی با تابع هسته اپانکنیکوف با توان یک بر اساس معیار RMSE با مقدار ۴۴/۳ میلیمتر، به عنوان بهترین روش انتخاب گردید و به عنوان روش توزیع مکانی داده‌های بارندگی انتخاب شد. قابل توجه است که از متوسط رستر به دست آمده برای توزیع مکانی بارندگی، به عنوان میانگین بارندگی سالانه استفاده گردید.

۲-۲-۳-۲- جریان ورودی آب زیرزمینی

جهت محاسبه جریان ورودی آب زیرزمینی به محدوده مطالعاتی طبق معادله‌های (۲) و (۳) نیاز به محاسبه ضخامت لایه اشباع و گرادیان هیدرولیکی جریان آب زیرزمینی بوده و برای برآورد این دو پارامتر به موقعیت تراز سنگ کف و تراز آب زیرزمینی نیاز است. موقعیت محدوده آبخوان، تعیین مرزهای ورودی جریان آب زیرزمینی، جهت جریان در سلول‌های واقع بر مرزها و مقدار هدایت هیدرولیکی در این سلول‌ها از دیگر موارد مورد نیاز برای محاسبه جریان ورودی آب زیرزمینی هستندکه چگونگی برآورد این پارامترها در ادامه آورده شده است.

الف- تراز آب زیرزمینی

اطلاعات تراز آب زیرزمینی در هر یک از چاه‌های پیزومتری محدوده مطالعاتی مبنای تولید لایه آب زیرزمینی قرار گرفت. موقعیت مکانی پیزومترها در شکل ۲ مشاهده می‌گردد.

بعد از اخذ اطلاعات تراز آب زیرزمینی پیزومترها، لایه مربوط به میانگین سالانه تراز آب زیرزمینی در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. با استفاده از داده‌های میانگین سالانه تراز آب زیرزمینی و تحلیل‌گر زمین‌آمار، روش مناسب برای توزیع مکانی داده‌های تراز آب زیرزمینی بر اساس کمترین مقدار RMSE، روش درون‌یابی چند جمله‌ای محلی انتخاب شد. از بین توابع موجود در این روش درون‌یابی، تابع چندجمله ای به عنوان بهترین تابع مشخص شد. در بررسی بیشتر این روش برای حصول نتایج بهتر، توان بهینه تابع برابر با دو بدست آمد. متوسط رستر تهیه شده برای تراز آب زیرزمینی در هر سال به عنوان میانگین تراز آب زیرزمینی انتخاب شد و آبنمود آبخوان مه‌ولات رسم گردید. قابل ذکر است برای برآورد حجم تغییرات ذخیره آب زیرزمینی به میانگین تراز آب زیرزمینی در ماه‌های مهر و شهریور هر سال آبی نیاز است. برای رسم دقیق‌تر آبنمود آبخوان، این اطلاعات نیز استفاده شده‌اند. شکل ۳ آبنمود آبخوان مه‌ولات را نشان می‌دهد. با بررسی آبنمود آبخوان مه‌ولات می‌توان دریافت، به طور متوسط تراز آب زیرزمینی سالانه ۱/۳ متر افت می‌کند که حاکی از شرایط بحرانی این آبخوان است.

ب- سنگ کف

برای تعیین ضخامت لایه اشباع نیاز به موقعیت تراز سنگ کف است. با مقایسه بین سنگ کف حاصل از سوندژهای ژئوفیزیک آبخوان و عمق چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق آبخوان، نفوذ برخی چاه‌ها در سنگ کف مشاهده گردید. از طرفی با توجه به نزدیکی مقاومت ویژه ظاهری آب شور و سنگ کف، احتمال خطا در مطالعات ژئوفیزیک وجود دارد (Khorasan Razavi Regional Water Com., 1996). لذا سنگ کف با استفاده از روش زیر مجدد برآورد گردید:

لایه‌ای از نقاط سوندژ و چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق تهیه گردید. از بین نقاطی که به لحاظ مکانی به یکدیگر نزدیک بودند اما تغییرات زیادی در عمق داشتند، نقاط با عمق کمتر حذف شدند. سپس با استفاده از تحلیل‌گر زمین‌آمار مناسب‌ترین رویه گذرنده از بین نقاط، تولید شد. در این مرحله ملاک انتخاب روش مناسب، فقط کمترین مقدار RMSE نبوده بلکه رویه‌های با تغییرات زیاد در عمق نیز، حذف شدند. روش مناسب برای برآورد سنگ کف با توجه به توضیحات داده شده، روش درون‌یابی چند جمله‌ای محلی با تابع چندجمله‌ای مشخص گردید. چگونگی تغییرات سنگ کف محدوده مطالعاتی در آبخوان مه ولات در شکل ۴ نشان داده شده است.

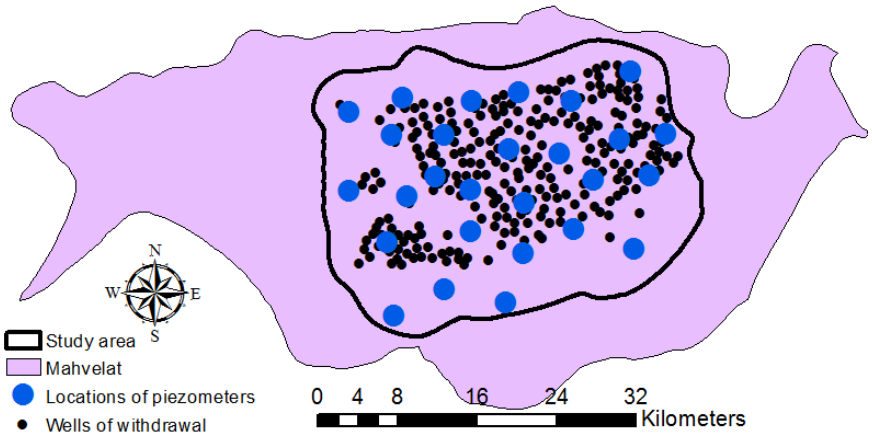

Fig. 2- Location of piezometric and withdrawal wells

شکل ۲- موقعیت پیزومترها و چاه‌های برداشت

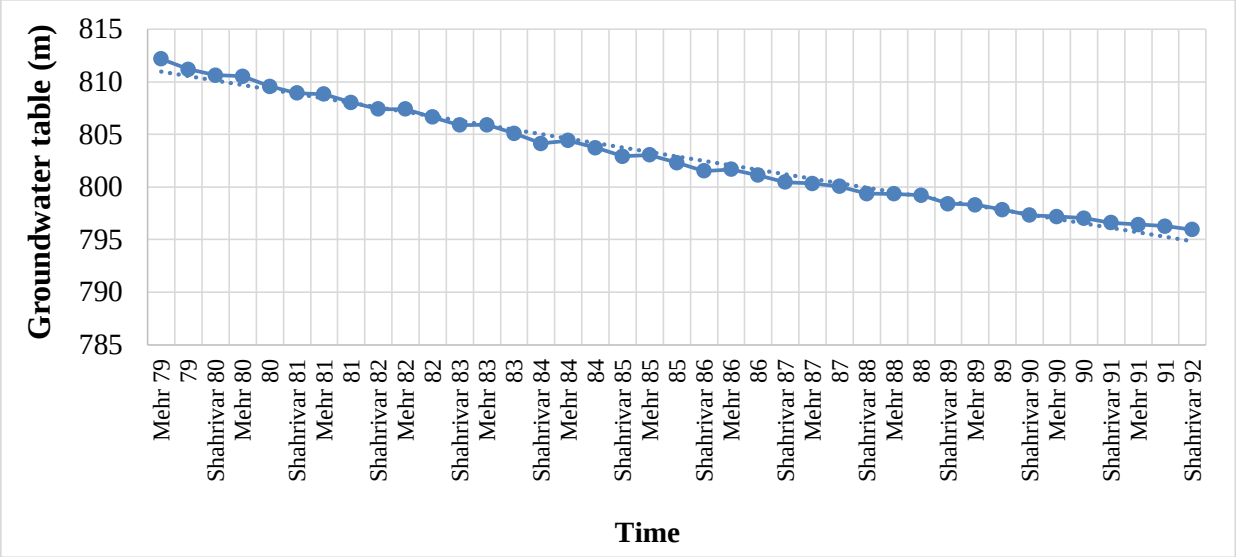

Fig. 3- Mehvalat aquifer hydrograph

شکل ۳- آبنمود آبخوان مه‌ولات

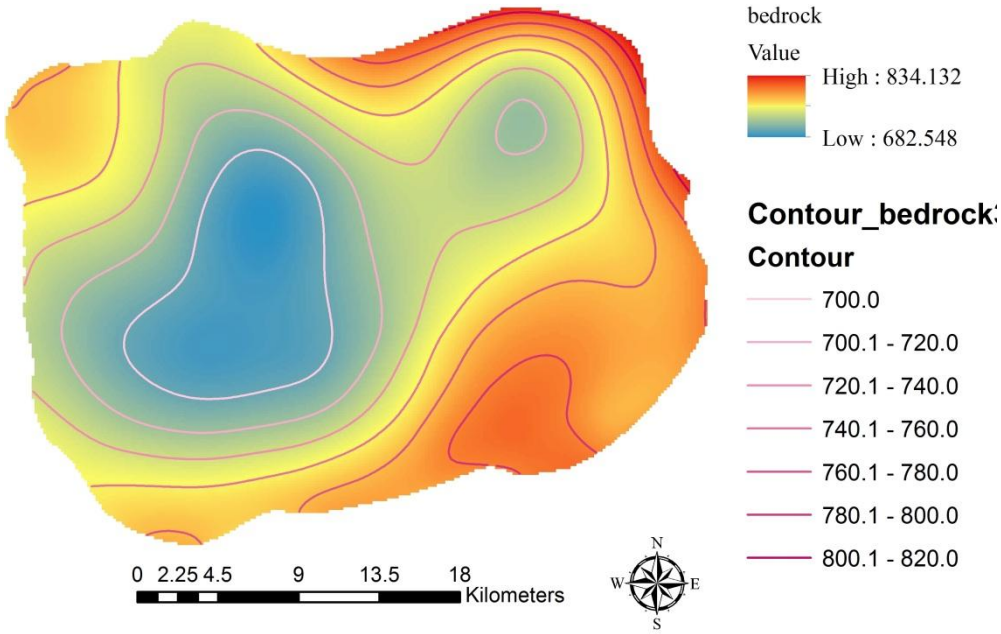

Fig. 4- Variation in the bedrock level of Mehvalat aquifer

شکل ۴- تغییرات تراز سنگ کف آبخوان مه‌ولات

ج- تعیین محدوده مطالعاتی و جبهه‌های ورودی آب زیرزمینی

برای تعیین محدوده مطالعاتی از سه رستر توپوگرافی، تراز آب زیرزمینی و سنگ کف منطقه استفاده شد. رویه آب زیرزمینی با رویه سنگ کف و سپس با رویه توپوگرافی قطع داده شده و در نهایت مرزهای مدل با توجه به واقعیت‌های طبیعی و زمین شناسی منطقه تعیین گردید. ناحیه شمال و شمال شرق محدوده مطالعاتی که تراز آب زیرزمینی تقریباً مساوی تراز سنگ کف بوده و بیرون‌زدگی سنگ کف بر اساس واقعیت طبیعی منطقه مشهود بود، مرزهای بدون جریان یا نفوذناپذیر درنظر گرفته شدند. در سایر نواحی که تراز آب زیرزمینی بالاتر از تراز سنگ کف بود، مرزهای حاصل از آن سلول‌ها، ورودی تشخیص داده شدند.

برای تعیین جهت جریان و تشخیص ورودی یا خروجی بودن جریان آب زیرزمینی از ابزار جریان دارسی از زیرمجموعه ابزارهای تحلیل‌گر مکانی نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. ابزار جریان دارسی با ورودی‌های: رستر تراز آب زیرزمینی، رستر تراز سنگ کف، رستر ضریب انتقال آبخوان و رستر تخلخل موثر آبخوان، می‌تواند خروجی‌های: رستر مقدار سرعت نشت، رستر جهت جریان آب زیرزمینی نسبت به شمال جغرافیایی و رستر حجم لازم برای به تعادل رساندن سلول مورد نظر را ارائه دهد (Tauxe, 1994).

محدوده مطالعاتی، مرزهای ورودی و تراز آب زیرزمینی در آن‌ها با شکل ۵ نشان داده شده است.

د- محاسبه جریان ورودی آب زیرزمینی

با توجه به معادله (۲) می‌توان جریان ورودی به هر سلول در مرزهای ورودی را محاسبه و با یکدیگر جمع کرد تا حجم جریان آب زیرزمینی، ورودی به محدوده مطالعاتی محاسبه شود. برای این کار از معادله (۱۳) استفاده شد:

$$Q_{in}^{gw} = \sum_{i=1}^{n} T_i . I_i^{gw} . l_i \qquad (۱۳)$$

که در آن T_i ضریب انتقال در سلول مورد نظر بر حسب مترمربع بر روز، I_i^{gw} گرادیان هیدرولیکی در سلول مورد نظر، l_i طولی از سلول مورد نظر عمود بر جهت جریان بر حسب متر و اندیس i نشان‌دهنده سلول موردنظر، هستند.

برای محاسبه ضریب انتقال، نیاز به محاسبه هدایت هیدرولیکی می‌باشد. با توجه به کمبود اطلاعات مورد نیاز برای برآورد هدایت هیدرولیکی از جمله آزمایشات پمپاژ (Khorasan Razavi Regional Water Com., 2011)، جهت برآورد مقدار هدایت هیدرولیکی در محدوده مطالعاتی مراحل زیر انجام پذیرفت:

۱- محدوده مطالعاتی در محیط GIS به صورت شبکه‌های منظم مربعی ۲/۵ کیلومتری گسسته‌بندی شد.

۲- لایه پراکندگی چاه‌ها در روی مش‌های تولید شده در گام قبل پیاده‌سازی شده و نزدیکترین چاه به مرکز هر شبکه انتخاب گردید. در این مرحله ۶۲ حلقه چاه (مجموعاً ۴۵ چاه بهره‌برداری و ۱۷ پیزومتر) دارای لاگ زمین‌شناسی انتخاب گردیدند.

۳- هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف بین سنگ بستر و سطح آزاد آب هر لاگ بر اساس جنس آن لایه تخمین زده شده و در نهایت هدایت هیدرولیکی نهایی هر لاگ با استفاده از میانگین‌گیری حسابی میان هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف همان لاگ محاسبه گردید.

۴- لایه رستری هدایت هیدرولیکی محدوده مورد مطالعه بر اساس هدایت هیدرولیکی لاگ‌های محاسبه شده در مرحله سه و به وسیله تحلیل‌گر زمین‌آمار بر اساس کمترین مقدار RMSE، به روش درون یابی چند جمله‌ای محلی با تابع نمایی محاسبه شد که نتیجه آن در شکل ۶ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است نتایج هدایت هیدرولیکی به دست آمده با سایر مطالعات صورت پذیرفته در منطقه از جمله نتایج به دست آمده از مطالعات ژئوفیزیک همخوانی و هماهنگی نشان می‌دهد (Khorasan Razavi Regional Water Com., 1996).

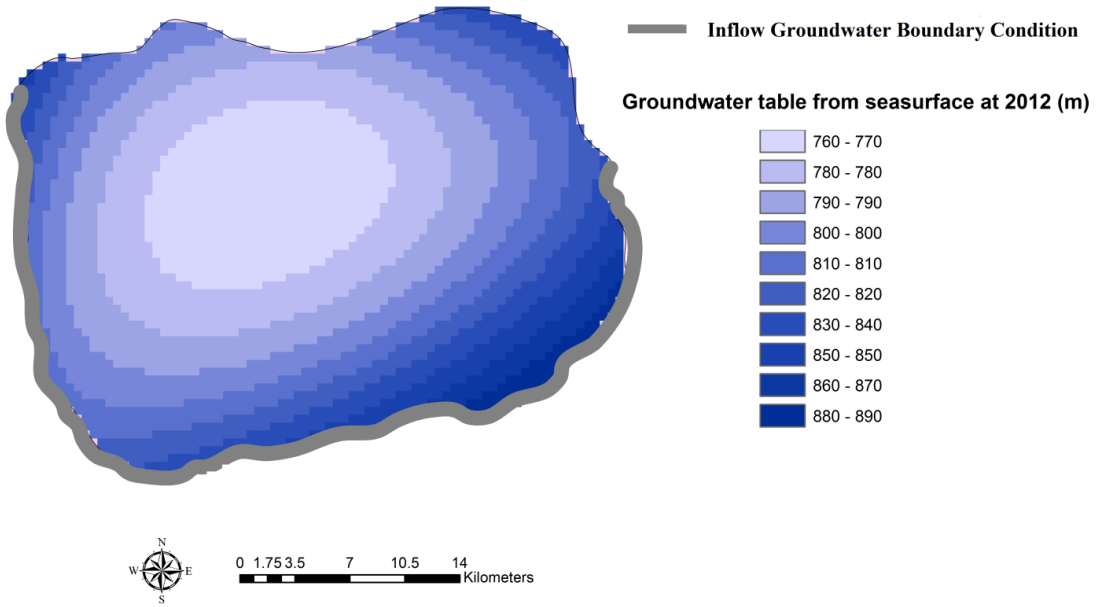

Fig. 5- Study area, inflow boundaries and groundwater level

شکل ۵- محدوده مطالعاتی، مرزهای ورودی و تراز آب زیرزمینی

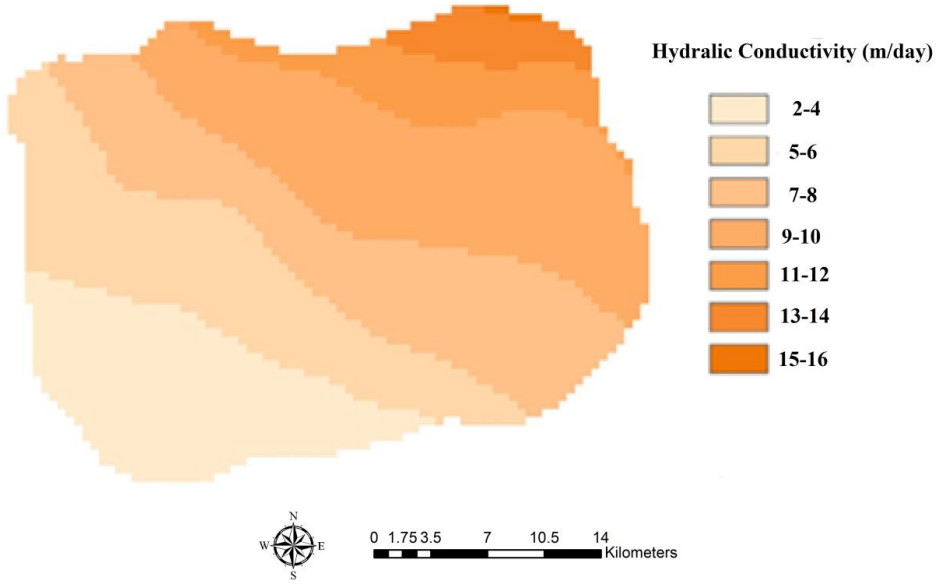

Fig. 6- Hydraulic conductivity changes in the study area
شکل ۶- تغییرات هدایت هیدرولیکی در محدوده مطالعاتی

پس از برآورد رستر هدایت هیدرولیکی، این رستر در رستر ضخامت لایه اشباع هر سال ضرب شد تا رستر ضریب انتقال سال مورد نظر حاصل شود. مقدار گرادیان هیدرولیکی با رستر تراز آب زیرزمینی هر سال و ابزار شیب از مجموعه ابزارهای تحلیل‌گر سه‌بعدی محاسبه شد. با داشتن جهت جریان نسبت به شمال و اندازه سلول می‌توان طولی از سلول که عمود بر جریان است را محاسبه کرد. با استفاده از اطلاعات ذکر شده و معادله (۱۳) حجم جریان آب زیرزمینی ورودی سالانه به محدوده مطالعاتی محاسبه گردید.

۲-۲-۳-۳- برداشت از منابع آب زیرزمینی

برای محاسبه حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی در هر سال، زمان کارکرد و دبی برداشتی از هر چاه تعیین و از حاصلضرب آنها حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی برآورد گردید. برای برآورد زمان کارکرد چاه‌ها از آمار و اطلاعات مصرف برق هر اشتراک استفاده شده و کارکرد آن‌ها با توجه به دیماند و مصرف برق اعلام شده، محاسبه گردید. برای تعیین زمان کارکرد چاه‌هایی که وضعیت نامشخص داشته و ساعت کارکردی برای آنها اعلام نشده بود، ضریب حاصل از تقسیم متوسط ساعت کارکرد سالیانه چاه‌های برداشت محدوده مطالعاتی بر متوسط ساعت کارکرد مجاز چاه‌ها محاسبه و در ساعت کارکرد مجاز هر چاه ضرب شد تا اطلاعات ناقص مربوط به ساعت کارکرد چاه‌ها تکمیل شوند. استفاده از این روش، کمترین تأثیر را بر روی متوسط زمان کارکرد سالانه دارد. همچنین برای نواقص اطلاعاتی مربوط به دبی برداشتی چاه‌ها در سال‌های دارای آمار، ضریبی مشابه ساعت کارکرد حاصل از تقسیم متوسط دبی سالانه به متوسط دبی پروانه، محاسبه و در دبی مجاز پروانه هر اشتراک ضرب گردید. برای محاسبه دبی در سال‌های فاقد آمار نیز روند تغییرات متوسط دبی در طول ۱۲ سال بازه مطالعاتی رسم گردیده و با استفاده از معادله خط برازش شده بر آن، متوسط سالانه دبی در سال‌های فاقد آمار بدست آمد. پراکندگی چاه‌های انتخاب شده در محدوده مطالعاتی در شکل ۲ آمده است.

۲-۲-۳-۴- تغییرات ذخیره آب زیرزمینی

جهت محاسبه تغییرات ذخیره آب زیرزمینی آبخوان دشت مه‌ولات که از نوع آزاد است، بر طبق معادله (۵) نیاز به محاسبه آبدهی مخصوص لایه اشباع محدوده مطالعاتی می‌باشد. برای تعیین آبدهی مخصوص لایه اشباع با توجه به نبود اطلاعات آزمایش‌های پمپاژ، فرآیند زیر با تکیه بر اطلاعات لایه‌های زمین‌شناسی انجام شد:

ابتدا برای داشتن توزیعی یکنواخت از اطلاعات نقطه‌ای، شبکه‌ای به ابعاد دو و نیم کیلومتر تهیه شد. سپس با توجه به چاه‌های بهره‌برداری و پیزومترهای محدوده مورد مطالعه، نزدیک‌ترین چاه به مرکز شبکه انتخاب شد. حاصل این کار شبکه‌ای بود با ۹۲ چاه که از بین آنها ۶۲ چاه (مجموعاً ۴۵ چاه بهره‌برداری و ۱۷ پیزومتر) دارای لاگ زمین‌شناسی بودند. لاگ‌های زمین‌شناسی چاه‌های یادشده گردآوری شده و جنس لایه‌ای که تراز آب زیرزمینی در بازه زمانی مطالعات (سال آبی ۸۰ الی ۹۱) در آن لایه نوسان کرده بود، مشخص گردید. در ادامه

مقدار آبدهی مخصوص لایه با توجه به جنس آن تخمین زده شد و برای چاه مورد مطالعه ثبت گردید. در انتها اطلاعات تکمیل شده تحت عنوان اطلاعات نقطه‌ای به نرم‌افزار ArcGIS اضافه گردید و لایه رستری آبدهی مخصوص محدوده مورد مطالعه به وسیله تحلیل‌گر زمین‌آمار بر اساس کمترین مقدار RMSE، به روش درون‌یابی چند جمله‌ای محلی با تابع نمایی محاسبه شد. شکل ۷ تغییرات مکانی آبدهی مخصوص را در محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد. با توجه به رستر تولید شده از آنالیز زمین‌آمار، میانگین آبدهی مخصوص ۹/۵ درصد بدست آمد. برای محاسبه تغییرات تراز آب زیرزمینی از اختلاف تراز آب زیرزمینی ماه‌های مهر و شهریور در یک سال آبی استفاده شده است. مساحت محدوده مطالعاتی، در تمام محاسبات ۹۰۸/۵ کیلومترمربع در نظر گرفته شد و حجم تغییرات ذخیره آب زیرزمینی بر اساس رابطه (۴) محاسبه گردید.

۲-۲-۳-۵- تغذیه آب زیرزمینی

جهت محاسبه تغذیه آب زیرزمینی آبخوان دشت مه‌ولات بر طبق معادله (۵) نیاز به برآورد ضرایب تغذیه ناشی از بارندگی و بازگشت آب کشاورزی است. انتخاب مقدار اولیه برای محاسبه ضرایب تغذیه می‌تواند با بررسی مطالعات گذشته انجام گیرد. Scanlon et al. (2006) در مطالعه‌ای که بر روی ۱۴۰ منطقه خشک و نیمه‌خشک انجام دادند، دریافتند که در زمین‌هایی که علاوه بر بارندگی، آبیاری کشاورزی نیز صورت می‌گیرد، مقدار ضریب تغذیه در حدود ۱ تا ۲۵ درصد از مجموع بارندگی و آب آبیاری کشاورزی است. Nyagwamb (2006) تغذیه آب زیرزمینی را با سه روش مختلف در حوضه‌ای واقع در زیمباوه برآورد کرده و هر سه روش مقدار تغذیه را بین ۸ تا ۱۵ درصد از میانگین بارندگی سالانه برآورد کرده‌اند. Ahmadi (2013) نیز در دشت نیشابور ۱۱ تا ۱۳ درصد از بارندگی و ۱۷ تا ۳۳ درصد از آب آبیاری کشاورزی را سهم تغذیه دانسته و Omidifar (2019) در دشت ازغند تربت حیدریه ضریب تغذیه ناشی از بارندگی و بازگشت آب کشاورزی را به ترتیب ۱۰ و ۲۰ درصد برآورد کرده است.

با توجه به مطالعات گذشته فوق‌الذکر و با عنایت به تحقیق انجام شده توسط Ghayouri (2013) که با روش کمینه‌سازی خطای بیلان، ضریب تغذیه آبخوان مه‌ولات را ۶/۱ درصد از مجموع بارندگی و آبیاری کشاورزی برآورد کرده است، ضریب تغذیه ناشی از بارندگی و بازگشت آب کشاورزی به ترتیب ۵ و ۱۰ درصد درنظر گرفته شد. مقادیر تغذیه در محدوده مطالعاتی با انتخاب این ضرایب و با استفاده از معادله (۵) محاسبه گردید.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

با محاسبه مقدار تغذیه آب زیرزمینی، تمام پارامترهای موردنیاز مدل مفهومی و بیلان آب زیرزمینی آبخوان مه‌ولات که هدف نهایی تحقیق حاضر بوده محاسبه گردیده که نتایج نهایی مقادیر مؤلفه‌های بیلان در جدول ۲ ارائه شده است.

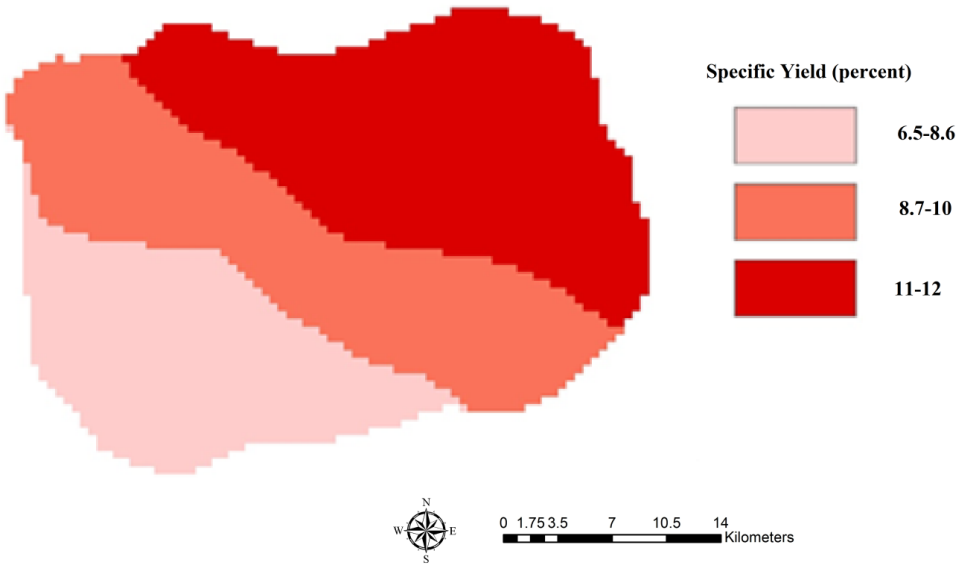

Fig. 7- Specific yield changes in the study area
شکل ۷- تغییرات آبدهی مخصوص در محدوده مطالعاتی

Table 2- The values of groundwater balance components in the study area (in millions of cubic meters)
جدول ۲- مقادیر مؤلفه‌های بیلان در محدوده مطالعاتی (میلیون متر مکعب)

Water year	Groundwater recharge due to precipitation	Groundwater recharge due to irrigation return flow	Groundwater inflow	Groundwater withdrawal	Annual groundwater storage changes
1380	7.3	17.4	39.9	174.8	-137.7
1381	9.9	18.9	41.5	189.1	-122.6
1382	9.1	19.6	42.9	195.5	-133.2
1383	9.4	19.3	44.4	192.7	-153
1384	5.0	18.8	45.6	188.1	-129.6
1385	8.9	16.5	47.3	165	-131.8
1386	3.1	16.8	48.6	168.2	-105
1387	7.4	14.8	49.7	148.4	-81.6
1388	8.4	14.5	52.1	145.1	-83.3
1389	5.0	11.3	51.7	112.7	-85.4
1390	9.3	9.7	51.9	96.8	-50.1
1391	7.5	9.8	51.7	97.9	-43

با توجه به مشکلات متعدد در اندازه‌گیری و برآورد مستقل مؤلفه‌های معادله بیلان آب که ناشی از خطای انسانی، دستگاهی و محاسباتی هستند، طبق معادله (۷) یک عبارت خطا به معادله بیلان افزوده شد که می‌تواند مقدار قابل توجهی نیز داشته باشد. مقادیر خطای بیلان آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی آبخوان مه‌ولات در جدول ۳ ارائه شده است.

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌گردد علیرغم این که در تحقیق حاضر نهایت تلاش صورت پذیرفت تا با استفاده از تمامی ابزار ریاضی، آماری، نرم‌افزاری و تجربی در دسترس، پارامترهای بیلان با دقت بالایی برآورد گردند ولی با توجه به کمبود و ناهمگنی اطلاعات در دسترس باز هم خطا در برآورد مؤلفه‌های بیلان مشهود است. جهت درک و دریافت بهتر میزان خطای موجود، مجموع خطای معادله بیلان آب زیرزمینی بر مجموع مؤلفه‌های ورودی معادله بیلان (I) در طول ۱۲ سال مورد مطالعه تقسیم گردیده تا درصد خطای میانگین محاسبه گردد. نتیجه این محاسبه نشان‌دهنده ۲۶/۹ درصد خطا به صورت میانگین در برآورد مؤلفه‌های بیلان می‌باشد.

۳-۱- کمینه‌سازی خطای بیلان و تدقیق مؤلفه‌های آن

همانطور که در بخش ۲-۱-۳ گفته شد، برای بهبود وضعیت میزان خطا در این بخش از روش طراحی آزمایش بر پایه تاگوچی استفاده شد. با استفاده از جدول متعامد L_{25} پیشنهادی در نرم‌افزار Minitab16، آزمایش‌ها در ۲۵ سطر مطابق جدول ۴ پی‌ریزی گردید. مجموع خطای کل در ستون آخر برای هر آزمایش نشان داده شده است. به عنوان مثال آزمایش هفتم بیان می‌کند که مجموع خطا با توجه به ضرایب پیشنهادی حدوداً ۵۱۷ شده است که بسیار زیاد است.

Table 3- The error of the groundwater balance equation (in million cubic meters)
جدول ۳- خطای معادله بیلان آب زیرزمینی (میلیون متر مکعب)

Water year	Absolute error of groundwater balance equation
1380	27.5
1381	3.8
1382	9.3
1383	33.4
1384	10.9
1385	39.5
1386	5.3
1387	5.1
1388	13.2
1389	40.7
1390	24.2
1391	14.1
Sum of absolute errors	227.0
Average of absolute errors	18.9

Table 4- Design of Experiments based on Taguchi method

جدول ۴- طراحی آزمایش‌ها بر پایه روش تاگوچی

No.	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Error
1	0.50	0.50	0.50	0.70	0.490	273.87
2	0.50	0.75	0.75	0.85	0.745	119.97
3	0.50	1.00	1.00	1.00	1.000	184.13
4	0.50	1.25	1.25	1.15	1.255	409.78
5	0.50	1.50	1.50	1.30	1.510	637.66
6	0.75	0.50	0.75	1.00	1.255	289.34
7	0.75	0.75	1.00	1.15	1.510	517.22
8	0.75	1.00	1.25	1.30	0.490	856.67
9	0.75	1.25	1.50	0.70	0.745	776.93
10	0.75	1.50	0.50	0.85	1.000	295.69
11	1.00	0.50	1.00	1.30	0.745	749.23
12	1.00	0.75	1.25	0.70	1.000	884.38
13	1.00	1.00	1.50	0.85	1.255	1112.26
14	1.00	1.25	0.50	1.00	1.510	631.02
15	1.00	1.50	0.75	1.15	0.490	742.88
16	1.25	0.50	1.25	0.85	1.510	1219.70
17	1.25	0.75	1.50	1.00	0.490	280.79
18	1.25	1.00	0.50	1.15	0.745	635.44
19	1.25	1.25	0.75	1.30	1.000	407.56
20	1.25	1.50	1.00	0.70	1.255	1226.05
21	1.50	0.50	1.50	1.15	1.000	212.86
22	1.50	0.75	0.50	1.30	1.255	305.79
23	1.50	1.00	0.75	0.70	1.510	1333.50
24	1.50	1.25	1.00	0.85	0.490	157.40
25	1.50	1.50	1.25	1.00	0.745	192.75

با توجه به هدف از آزمایش‌های انجام شده که کمینه کردن میزان خطا است، در روش تاگوچی رابطه آماره نسبت سیگنال به نویز برای کمینه کردن هدف آزمایش به صورت رابطه (۱۱) معرفی می‌شود. با انجام محاسبات آماری، جدول ۵ به دست آمده که در واقع نسبت این آماره را برای هر فاکتور در سطوح مشخص نشان می‌دهد. بیان گرافیکی این جدول را می‌توان در شکل ۸ مشاهده نمود.

در شکل ۸ هرچه نمودار SNR به افق نزدیکتر باشد بیانگر کم اهمیت بودن آن فاکتور است و هر چه سطوح در سطح بالایی باشند به معنای بهبود یافتن آن فاکتور در آن سطح مشخص است. همان‌طور که جدول ۵ و نمودار ۸ نیز نشان می‌دهند، ضرایب اول، چهارم، پنجم، دوم و سوم به ترتیب رتبه یک تا پنج را دارند. همچنین همانـطور که در شکل ۸ نشان داده شده است سطح اول از فاکتور اول، سطح دوم از فاکتور دوم، سطح اول از فاکتور سوم، سطح سوم از فاکتورهای چهارم و پنجم، بهترین حالت را برای این ترکیب آزمایش نشان می‌دهد.

چنانچه این ترکیب را مورد آزمایش قرار دهیم، میزان خطا به عدد ۱۸۵/۸۵۳ می‌رسد که با توجه به وجود عدد ۱۱۹/۹۷ در آزمایش دوم تاگوچی، این کاهش خطا چندان چشمگیر نیست. از همین رو، آزمایش دیگری با سطوح جدید مطابق جدول ۶ پی‌ریزی گردید.

همانطور که نمودار سیگنال به نویز در این حالت (شکل ۹) نشان می‌دهد، ترکیب جدیدی از سطوح بهینه شکل گرفته است که این ترکیب در جدول ۷ نشان داده شده است.

Table 5- Signal to Noise Ratio for the factors in the first Taguchi design

جدول ۵- نسبت سیگنال به نویز فاکتورها آزمایش تاگوچی اول

Level	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	-48.8	-52.75	-51.99	-57.95	-51.55
2	-53.88	-50.69	-52.59	-51.52	-51.73
3	-58.15	-56.69	-52.56	-49.04	-50.48
4	-56.15	-52.44	-55.45	-53.31	-54.78
5	-49.68	-54.08	-54.07	-54.83	-58.12
Delta	9.36	6	3.47	8.91	7.63
Rank	1	4	5	2	3

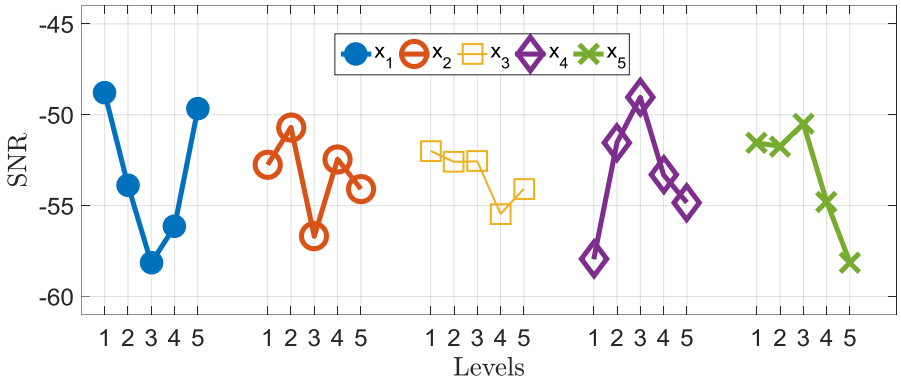

Fig. 8- Signal to noise ratio graph in the first Taguchi design

شکل ۸- نمودار سیگنال به نویز در آزمایش تاگوچی اول

Table 6- New Factor/Levels arrangement of Taguchi method for the second round

جدول ۶- فاکتورهای روش تاگوچی و سطوح مورد نظر جدید برای مرحله دوم آزمایش

Level-Factor	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	0.5	0.5	0.5	0.7	0.49
2	0.75	0.75	0.5625	0.775	0.6175
3	1	1	0.625	0.85	0.745
4	1.25	1.25	0.6875	0.925	0.8725
5	1.5	1.5	0.75	1	1

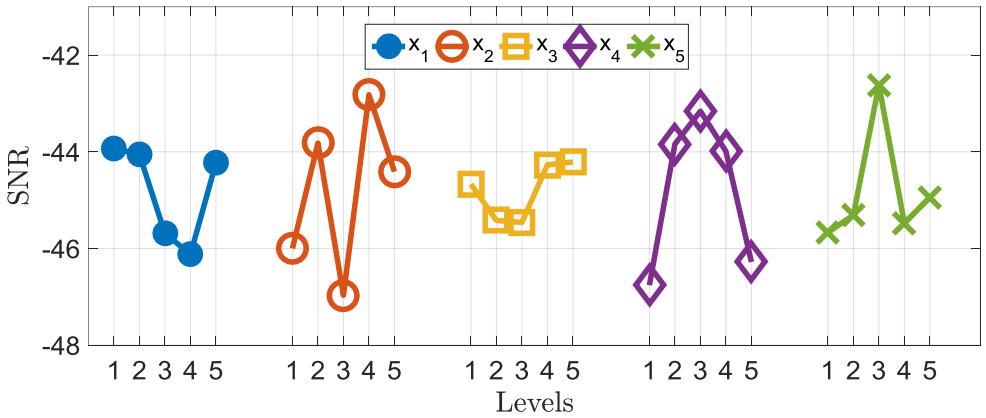

Fig. 9- Signal to noise ratio graph in the second Taguchi design

شکل ۹- نمودار سیگنال به نویز در آزمایش تاگوچی دوم

Table 7- Improved Confidents using Taguchi Analsis

جدول ۷- ضرایب بهبودیافته شده به کمک آنالیز تاگوچی

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Error
0.5	1.25	0.75	0.925	0.8725	115.1608

بر اساس نتایج جدول (۷)، موارد زیر را می‌توان نتیجه‌گیری نمود:

- مجموع خطاهای مطلق در معادله بیلان آب زیرزمینی از ۲۲۷/۶۷ به ۱۱۵/۱۶ میلیون متر مکعب کاهش یافته است. به عبارت دیگر، با اعمال ضرایب تصحیح و استفاده از روش تاگوچی میزان خطای معادله بیلان در حدود ۹۷ درصد کاهش یافته است. این درصد کاهش خطا، بیانگر توانایی روش مورد استفاده در اصلاح مؤلفه‌های معادله بیلان بوده و می‌تواند به عنوان ابزاری در اصلاح مؤلفه‌های بیلان به ویژه در حوضه‌هایی که اطلاعات

کافی و مناسبی برای تخمین پارامترهای بیلان وجود ندارد، مورد استفاده قرار گیرد.

- ضریب اصلاحی برای مؤلفه تغذیه ناشی از بازگشت آب کشاورزی بیشتر از ۱ محاسبه شده است. از این برآورد می‌توان نتیجه گرفت که مؤلفه‌ی تغذیه ناشی از بازگشت آب کشاورزی در بررسی اولیه کمتر از مقدار واقعی برآورد شده است. دیگر ضرایب اصلاحی برای مؤلفه‌های تغییرات ذخیره مخزن، جریان ورودی آب زیرزمینی، برداشت از منابع آب زیرزمینی و تغذیه آب زیرزمینی ناشی از بارندگی کوچکتر از ۱ محاسبه گردیده که دلالت بر برآورد اولیه بالادست مؤلفه‌ها نسبت به مقدار واقعی آن‌ها دارد.
- ضریب تصحیح تغذیه ناشی از بارندگی (x_1)، ۰/۵ محاسبه شده است. با توجه به مقدار اولیه ۵ درصد برای تغذیه ناشی از بارندگی، ضریب تغذیه ناشی از بارندگی در پژوهش حاضر ۲/۵ درصد به دست می‌آید. ضریب تصحیح تغذیه ناشی از بازگشت آب کشاورزی (x_2) نیز مطابق جدول ۷، ۱/۲۵ محاسبه شده است. در نتیجه، ضریب تغذیه نهایی ناشی از بازگشت آب کشاورزی در منطقه مورد مطالعه، ۱۲/۵ درصد محاسبه می‌گردد.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

مطالعات بیلان آب زیرزمینی موضوعی اساسی در مدیریت منابع آبی به خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد چراکه برداشت پایدار از منابع آب زیرزمینی نیاز به مطالعات دقیق بیلان آب زیرزمینی دارد. همچنین، برآورد مقدار صحیح مؤلفه‌های بیلان در تهیه یک مدل مفهومی کمی صحیح در فرآیند مدل‌سازی ریاضی آب زیرزمینی در یک آبخوان امری مهم و اجتناب‌ناپذیر است. این در حالی است که با توجه به کمبود و ناهمگنی اطلاعات مورد نیاز در اکثر آبخوان‌های ایران، برآورد دقیق مؤلفه‌های بیلان با چالش جدی مواجه است. در تحقیق حاضر سعی گردید تا با استفاده از ابزارهای ریاضی- آماری، تجربی (نظرات کارشناسان فنی مرتبط) و قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (تحلیلگر مکانی زمین آمار، ابزار جریان دارسی، ابزار شیب و غیره)، روش‌هایی جهت برآورد هر چه دقیق‌تر مؤلفه‌های بیلان ارائه شود. این روش‌ها در آبخوان مه‌ولات و برای سال‌های آبی ۱۳۸۰ الی ۱۳۹۱ پیاده‌سازی گردید. به کارگیری روش‌های پیشنهادی هر چند خطای معادله بیلان را صفر نکرده ولی به دست آمدن خطای متوسط ۲۶ درصد مجموع مؤلفه‌های ورودی بیلان، با توجه به عدم قطعیت زیاد مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی نشان از کارآیی روش‌های پیشنهادی در تدقیق مؤلفه‌های بیلان دارد. بر اساس نتایج به دست آمده با استفاده از تحلیل‌گر زمین‌آمار و معیار کمترین مقدار RMSE، در برآورد مؤلفه‌های بارندگی، روش چند جمله‌ای محلی با تابع هسته اپانکنیکوف، در برآورد رویه تراز آب زیرزمینی و سنگ کف روش درون‌یابی چند جمله‌ای محلی با تابع چندجمله‌ای و در برآورد هدایت هیدرولیکی و آبدهی مخصوص روش درون‌یابی چند جمله‌ای محلی با تابع نمایی به عنوان بهترین تابع مشخص شدند. در ادامه، با توجه به اینکه علیرغم اعمال تمام فرایندهای ممکن کاهش خطا، باز هم وجود خطای بیلان محسوس بود، با درنظر گرفتن ضرایبی اصلاحی برای مؤلفه‌های موجود در معادلات بیلان در مقیاس سالانه، در یک فرآیند بهینه‌یابی با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی مجموع قدرمطلق خطاهای موجود در معادله بیلان آب زیرزمینی کمینه شدند. در این روش که از آماره سیگنال به نویز برای کمینه کردن خطای به وجود آمده استفاده می‌شود، سطوح بهینه هر ضریب در دامنه تغییرات منظور شده برای آن‌ها به دست آمد. بر اساس نتایج به دست آمده در این قسمت، مجموع قدر مطلق خطای بیلان آب زیرزمینی از ۲۲۷ به ۱۱۵ میلیون متر مکعب (حدود ۹۷ در صد) کاهش یافت و ضریب تغذیه ناشی از بارندگی و بازگشت آب کشاورزی به ترتیب ۲/۵ و ۱۲/۵ درصد به دست آمد.

با عنایت به نتایج به دست آمده، کم کردن خطای مؤلفه‌های بیلان مستلزم افزایش سطح و همگنی اطلاعات مورد نیاز می‌باشد. طراحی و اجرای شبکه پایش اطلاعات برای آبخوان‌های بحرانی کشور جهت مدیریت هر چه بهتر منابع آبی این آبخوان‌ها پیشنهاد ضروری در این زمینه به نظر می‌رسد. علاوه بر پشنهاد کلی و عملیاتی فوق، استفاده از روش‌های ریاضی کمینه‌سازی خطای معادله بیلان مشابه روش تاگوچی با تعریف حدود خطای هر کدام از مؤلفه‌های بیلان، می‌تواند به عنوان یک روش ارزان جایگزین، جهت تدقیق مؤلفه‌های بیلان استفاده شود. روش‌های منطق فازی، ژنتیک و الگوریتم‌های یادگیری ماشین از جمله روش‌های بهینه‌یابی است که می‌تواند در این زمینه نیز به کار گرفته شود و با اعمال ضریب اصلاحی به هریک از مؤلفه‌های بیلان ضمن کمینه کردن خطای بیلان، هر کدام از مؤلفه‌ها را تدقیق نماید. این روش‌های بهینه‌یابی به خصوص در آبخوان‌های دارای کمبود و ناهمگنی اطلاعات که امکان جمع‌آوری و تکمیل اطلاعات وجود ندارد، می‌تواند به عنوان روشی مؤثر به کار گرفته شود. نکته قابل تأمل در استفاده از این روش‌ها، وابستگی نتایج به تعریف بازه تغییرات هر کدام از مؤلفه‌ها است که بایستی مورد توجه قرار گیرد.

۵- تشکر

نویسندگان از اداره آب منطقه‌ای خراسان رضوی به جهت حمایت از این تحقیق در قالب طرح پژوهشی، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

پی‌نوشت‌ها

1- Geostatistical Analyst
2- Cross Validation
3- Local Polynomial
4- Gaussian
5- Epanechnikov
6- Polynomial5
7- Quartic
8- J-Bessel
9- Spherical

۶- مراجع

Ahmadi T (2013) Groundwater recharge estimation using various methods and making comparison their results, case study: Neishaboor Plain. M.Sc. Thesis, Ferdowsi University, Iran (In Persian)

Bahrami Jovein E, Hosseini S (2015) A systematic comparison of geostatistical methods for estimation of groundwater salinity in desert areas case study: Feyz Abad-Mahvelat Plain. Iran-Water Resources Research 11(2):1-15 (In Persian)

Bredehoeft JD (2003) From models to performance assessment: The conceptualization problem. Groundwater 41(5):571-577

Daneshvar A (2012) Provide an optimization process to reduce errors in the water balance equation. M.Sc. Thesis, Ferdowsi University, Iran (In Persian)

Dehnoei A, Taheri R (2017) A new strategy to reduce factors number in water quality measurements using Taguchi method-case study: the Karaj River. Desalination and Water Treatment 60:106-113

Delleur JW (1999) The handbook of groundwater engineering. CRS Press

Frantar P, Dolinar M, Kurnik B (2006) GIS based water balance of Slovenia. In 6th Annual Meeting of the European Meteorological Society Ljubljana, Geophysical Research Abstracts, 8, 13

Ghanizadeh G, Azari A, Akbari H, Kalantary RR (2015) Performance evaluation of nanocomposit magnetic graphene sheet-iron oxide in removal of nitrate from water using Taguchi experimental design. Journal of Mazandaran University of Medical Sciences 25(127):49-64

Ghayouri A (2013) Groundwater recharge estimation using water budget analysis based on minimization of the total error in overall water balance and groundwater balance equations case study: Feyzabad-Mahvelat Catchment. M.Sc. Thesis, Ferdowsi University, Iran (In Persian)

Goharimanesh M, Akbari A (2015) Optimum parameters of nonlinear integrator using design of experiments based on Taguchi method. Journal of Computational Applied Mechanics 46(2):233-241

Goharimanesh M, Akbari AA, Akbarzadeh-Tootoonchi AA (2014) More efficiency in fuel consumption using gearbox optimization based on Taguchi method. Journal of Industrial Engineering International 10(2):1-8

Healy RW, Scanlon BR (2010) Estimating groundwater recharge. Cambridge University Press

Heilweil VM, Brooks LE (2010) Conceptual model of the Great Basin carbonate and alluvial aquifer system. US Geological Survey Scientific Investigations Report, 5193, p.191

Javadpour SM, Abadi EAJ, Akbari OA, Goharimanesh M (2020) Optimization of geometry and nano-fluid properties on microchannel performance using Taguchi method and genetic algorithm. International Communications in Heat and Mass Transfer, 119, 104952

Johnston K, Ver-Hoef JM, Krivoruchko K, Lucas N (2001) Using ArcGIS geostatistical analyst. Esri Redlands 380

Khazaei B, Hosseini SM (2015) Improving the performance of water balance equation using fuzzy logic approach. Journal of Hydrology 524:538-548

Khodaverdi M, Hashemi S, Siuki A, Bilondi M (2019) Optimal design of groundwater-quality sampling networks with MOPSO-GS (Case Study: Neyshabour Plain). Journal of Water and Irrigation Management 9(2):199-210 (In Persian)

Khorasan Razavi Regional Water Company (2015) Explanatory report on the ban on Feyzabad plain (In Persian)

Khorasan Razavi Regional Water Company (2011) Report of the consolidation of water resources studies in the desert basin. Volume III, Analysis of statistics and information and water balance, Section V Combined studies and water bill, Appendix No, 22, Water Balance in the Mahvelat Studies Area (In Persian)

Khorasan Razavi Regional Water Company (1996) Geoelectric studies report of Feyzabad plain (In Persian)

Kondapalli SP, Chalamalasetti SR, Damera NR (2013) Application of Taguchi based design of experiments to fusion arc weld processes: A review. International Journal of Business Research and Development 2(1):1-8

operating conditions in ultrafiltration process for produced water treatment via Taguchi methodology. Desalination and Water Treatment 54(10):2669-2680

Samavi J, Goharimanesh M, Akbari A, Dezyani E (2018) Optimisation of drilling parameters on St37 based on Taguchi method. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 40(8):1-9

Scanlon BR, Keese KE, Flint AL, Flint LE, Gaye CB, Edmunds, WM, Simmers I (2006) Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. Hydrological Processes 20(15):3335-3370

Sokolov AA, Chapman TG (1974) Methods for water balance computations: an international guide for research and practice. UNESCO Press

Thakur PK, Nikam BR, Garg V (2017) Hydrological parameters estimation using remote sensing and GIS for Indian Region: A review proceedings of the national academy of sciences. India Section A: Physical Sciences 87(4):641-659

Tauxe JD (1994) Porous medium advection-dispersion modeling in a geographic information system. Ph.D. Thesis, University of Texas, Austin

Todd KD, Mays LW (2005) Groundwater hydrology. Third ed. John Wiley & Sons, New Jersey

Water Technical Standards (2017) Guide to preparing a numerical model of groundwater. N174 (In Persian)

Wegehenkel M, Zhang Y (2007) The use of remote sensing data for water balance modeling. Geophysical Research Abstracts 9:27

Liu W, Engel BA, Chen W, Wei W, Wang Y, Feng Q (2021) Quantifying the contributions of structural factors on runoff water quality from green roofs and optimizing assembled combinations using Taguchi method. Journal of Hydrology 593(7):125864

Manghi F, Mortazavi B, Crother C, Hamdi MR (2009) Estimating regional groundwater recharge using a hydrological budget method. Water Resources Management 23(12):2475-2489

Mekonnen SC (2005) Assesment of cathment water balance using GIS and remote sensing. M.Sc. Thesis, ITC Enschede, Netherland

Meresa E, Girmay A, Gebremedhin A (2019) Water balance estimation using integrated GIS-Based WetSpass model in the Birki Watershed, Eastern Tigray, Northern Ethiopia. Physical Science International Journal 22(3):1-17

Ngongondo C, Xu ChY, Tallaksen LM, Alemaw B (2015) Observed and simulated changes in the water balance components over Malawi, during 1971–2000. Quaternary International 369:7-16

Nyagwambo NL (2006) Groundwater recharge estimation and water resources assessment in a tropical crystalline basement aquifer. Ph.D. Thesis, UNESCO– IHE Institute for Water Education, Netherlands

Omidifar H (2019) Investigation of the stability of Azghand aquifer in Khorasan Razavi province using a numerical model. M.Sc. Thesis, Shahrood University of Technology, Iran (In Persian)

Reyhani A, Sepehrinia K, Seyed Shahabadi SM, Rekabdar F, Gheshlaghi A (2015) Optimization of