



Balkh International Journal of Natural Science

ISSN – P 0000 -0000 E: 0000- 0000

Vol.1 NO.1 2025

URL: <https://bjns.ba.edu.af/index.php/bjns>

پیش بینی و مدل سازی کمی آب های زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW
(مطالعه موردی: شهر هرات- افغانستان)

Quantitative groundwater prediction and modeling using MODFLOW model (Case study: Herat City-Afghanistan)

1. Nizamuddin Timory¹ 

Teaching Assistant, Faculty of Engineering, Jami Heart University

2. Alif shah Ehsan 

Teaching Assistant, Faculty of Engineering, Jami Heart University

Received: 24/6/2025 Accepted: 31/10/2025 Published: 20/12/2025

Abstract

Herat city is located in the southwest of Afghanistan and is considered a semi-arid region, and the average rainfall in this city is 200 mm per year. The direction of groundwater flow is also from the northeast to the southwest of the city. According to the obtained information, the water level has dropped significantly in this area in recent years. In order to more accurately understand the aquifer from a hydrogeological point of view and optimally utilize groundwater resources, a mathematical model of groundwater in Herat City has been prepared using the MODFLOW model. Initially, the required information including meteorological, hydrological, hydrogeological and other field and required information was collected and then a conceptual groundwater model was prepared using the available information. At this stage, information regarding alluvial thickness, boundary conditions, balance information, etc. was prepared using GIS software and entered into the mathematical model. This model was

¹. Email: N.timory@Jami.edu.af

implemented for the water year in 1402-1403 with 12 time steps. After the implementation and calibration of the model, the results of the computational load and observation load in stable and unstable conditions indicate a drop of approximately 3 meters in the groundwater of this city in the next 5 years.

Keywords: groundwater, simulation, prediction, and MODFLOW

چکیده

شهر هرات در جنوب غرب افغانستان موقعیت دارد و از جمله مناطق نیمه خشک محسوب شده و متوسط بارندگی در این شهر ۲۰۰ میلی متر در سال می باشد. جهت جریان آب زیرزمینی نیز با توجه به خطوط هم پتانسیل از شمال شرق به طرف جنوب غرب شهر می باشد. نظر به اطلاعات دست یافته سطح آب در سال های اخیر افت چشم گیری در این ناحیه داشته است. به منظور شناخت دقیق تر اکیفر از نظر هیدروژئولوژیکی و بهره برداری بهینه از منابع آب های زیرزمینی، مدل ریاضی آب های زیرزمینی شهر هرات با استفاده از مدل MODFLOW تهیه شده است. در ابتدا اطلاعات مورد نیاز شامل اطلاعات هواشناسی، هیدرولوژی، هیدروژئولوژی و سایر اطلاعات صحرایی و مورد نیاز گردآوری شده و سپس با استفاده از اطلاعات موجود مدل مفهومی آب های زیرزمینی تهیه شد. در این مرحله با استفاده از نرم افزار GIS اطلاعاتی در خصوص ضخامت آبرفت، شرایط مرزی، اطلاعات بیلان و غیره تهیه گردید و به مدل ریاضی وارد شد. این مدل برای سال آبی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ با اعمال ۱۲ گام زمانی اجرا شد. بعداً از اجرا و واسنجی مدل نتایج حاصل از بار محاسباتی و بار مشاهداتی در شرایط ماندگار و غیر ماندگار بیانگر افت تقریباً ۳ متری آب های زیرزمینی این شهر در ۵ سال آینده می باشد.

کلمات کلیدی: آب های زیرزمینی، شبیه سازی، پیش بینی مدل

۱. مقدمه

دسترسی به منابع مطمئن و پایدار آب، یکی از چالش های اساسی جهان معاصر به شمار می رود. افزایش جمعیت و توسعه فعالیت های انسانی سبب افزایش مصرف آب گردیده، در حالی که حجم کل آب موجود در کره زمین ثابت است. در این میان، کشورهایی که در اقلیم خشک و نیمه خشک قرار دارند بیش از دیگران در معرض بحران کم آبی هستند (علیزاده، ۱۳۸۹). افغانستان نیز طی دهه های اخیر با رشد سریع نفوس و گسترش فعالیت های زراعتی و شهری، فشار زیادی بر منابع آبی خود تجربه کرده است. آب های زیرزمینی در افغانستان نقش حیاتی در تأمین آب آشامیدنی و آبیاری دارند؛ اما برداشت بی رویه، نبود مدیریت درست و حفر خودسرانه چاه های عمیق باعث کاهش چشمگیر سطح آب گردیده

است. شهر هرات از نمونه‌های بارز این مسئله است؛ به گونه‌ای که در برخی نقاط افت سطح آب تا ۷ متر و در نواحی شمالی شهر حتی تا ۲۰ متر گزارش شده است. استفاده گسترده از سیستم‌های پمپاژ سولری برای آبیاری هزاران هکتار زمین و مصرف بی‌رویه آب‌های شیرین، این بحران را تشدید نموده است. وابستگی کامل شهروندان هرات به منابع زیرزمینی برای تأمین آب شرب، نگرانی‌های جدی در مورد بروز بحران کم‌آبی در آینده ایجاد کرده است (حسینی، ۱۳۹۷).

بر همین اساس، ضرورت تحقیق حاضر ناشی از نیاز فوری به مدیریت علمی و پایدار منابع آب زیرزمینی می‌باشد. این پژوهش سه هدف اساسی را دنبال می‌کند: مدیریت بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی هرات، شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW، و کنترل برداشت‌های غیرمجاز. استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری و تعریف سناریوهای مختلف بهره‌برداری می‌تواند امکان پیش‌بینی روند آینده اکيفرها را فراهم ساخته و مبنای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و کاهش بحران کم‌آبی در این ولایت گردد. در همین راستا، مطالعات متعددی در خارج کشور انجام شده که کارایی مدل‌های شبیه‌سازی ریاضی در تحلیل و مدیریت آبخوان‌ها را نشان می‌دهد.

سهرابی و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی منابع آب زیرزمینی اکيفر آبرفتی دشت اوان با استفاده از مدل ریاضی آبهای زیرزمینی (GMS, MODFLOW2000) پرداختند. در این تحقیق مدل کالیبره و با استفاده از داده‌های تراز آب مشاهده‌ای و محاسبه‌ای برای دوره‌های ۲۰۰۵-۲۰۰۶ و ۲۰۰۶-۲۰۰۷ تأیید شد. مدل برای تولید سناریوهای آب زیرزمینی برای دوره ۱۰ ساله ۲۰۰۵-۲۰۱۵ اجرا شد و نتایج نشان داد که بهره‌برداری بیش از حد از آبهای زیرزمینی منجر به کاهش شدید منابع آب در دوره ۲۰۱۴-۲۰۱۵ خواهد شد. دقت بالای مدل در پیش‌بینی رفتار اکيفر میتواند محققان را در برنامه‌ریزی و تصمیم در استراتژی‌های مدیریت مطمئن سازد.

مهدوی و همکاران (۱۳۹۰) جریان آب‌های زیرزمینی دشت بهار-همدان را در دو حالت ماندگار و غیر ماندگار (از سال ۱۳۸۶-۱۳۸۴) با MODFLOW شبیه‌سازی و با ضریب جذر میانگین مربعات ۱٫۲ و ۱٫۵ واسنجی و صحت‌سنجی کردند. نتایج بیانگر این است که در صورت ادامه روند فعلی برداشت از اکيفر حتی در صورت افزایش بارش، سطح ایستابی همچنان افت خواهد داشت. بررسی سه‌گزینه حذف چاه‌های غیرمجاز، تغییر الگوی کشت، و تغییر شیوه آبیاری، حاکی از تاثیر مثبت این عملیات بر وضعیت آینده اکيفره می‌باشد. از این میان گزینه تغییر شیوه آبیاری به دلیل صرف‌جویی در مصرف آب، به میزان ۱۴۱ میلیون مترمکعب در سال بیشترین تاثیر را بر کاهش میزان افت سطح تراز اکيفر در آینده خواهد داشت.

در این تحقیق سعی می‌شود که آب‌های زیرزمینی شهر هرات از نظر کمی بررسی شده و روش‌های مناسب و علمی برای جلوگیری از افت آب‌های زیرزمینی پیشنهاد شود. روش تحقیق در این مقاله متکی بر شبیه‌سازی کامپیوتری آب‌های زیرزمینی هرات خواهد بود. این امر با جمع‌آوری آمار و اطلاعات

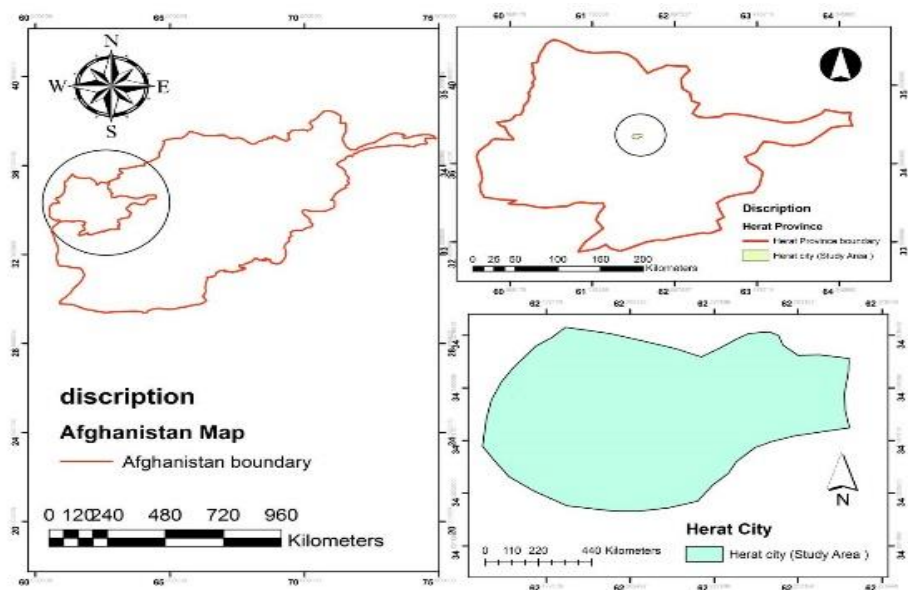
مورد نیاز و برپاسازی مدل آب زیرزمینی و سپس تلاش برای واسنجی این مدل صورت خواهد گرفت (شهسواری و خدایی، ۱۳۸۴). با در دست داشتن این مدل می‌توان سناریوهای بهره‌برداری آینده آب‌ها زیرزمینی را تعریف و شبیه‌سازی کرد تا اثرات آنها در آینده اکيفر آشکار شود (شمسای و امیربیگی، ۱۳۸۴). به نظر می‌رسد با شبیه‌سازی کمی و برنامه ریزی مدیریت اکيفر شهر هرات بتوان میزان خسارات احتمالی در آینده را کاهش داد و نیز میزان افت سطح آب در اکيفر منطقه مورد مطالعه در آینده از روند افزایش برخوردار باشد.

۲. مواد و روش کار

۱،۲ مشخصات منطقه مورد مطالعه

شهر هرات، از جمله شهرهای بزرگ و مهم افغانستان، پس از کابل دومین شهر پرجمعیت کشور به شمار می‌آید. (NSIA) این شهر یکی از قطب‌های صنعتی و مهم‌ترین کانون فرهنگی-هنری افغانستان است. دریا معروف هریرود از کنار این شهر می‌گذرد و نام هرات از نام این دریا گرفته شده است. (Macrotrends, 2023) هرات از طرف شمال به ولایت بادغیس و جمهوری ترکمنستان، از طرف جنوب به ولایت فراه، از طرف شرق به ولایت غور و از طرف غرب با جمهوری اسلامی ایران هم‌مرز است. طبق برآورد منابع داخلی، حدود یک میلیون نفر از جمعیت سه میلیونی ولایت هرات در این شهر زندگی می‌کنند. (Macrotrends, 2023) هرات از جمله شهرهای سردسیر محسوب می‌شود؛ تابستان‌های آن گرم و زمستان‌های آن سرد است. (Climatestotravel, 2023) اطلاعات دقیق درباره ترسبات اتمسفری و نوسانات درجه حرارت در سال‌ها موجود نیست، اما یخبندان در این ولایت در فصل زمستان آغاز می‌شود و ندرتاً به منفی ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در زمستان سال ۱۴۰۱ به طور استثنایی درجه حرارت به منفی ۲۴ درجه سانتی‌گراد رسید. در تابستان، دما به طور میانگین ۳۵ درجه سانتی‌گراد و گاهی تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد صعود می‌کند (Climatestotravel, 2023).

شهر هرات در یکی از هموارترین مناطق جغرافیایی افغانستان واقع شده و ارتفاع آن از سطح دریا حدود ۹۶۴ متر است. موقعیت جغرافیایی آن ۳۴,۲۲° شمالی و ۶۲,۲۲° شرقی است. (Climate.top, 2023)



شکل 1- منطقه مورد مطالعه (شهر هرات)

۲,۲ آبدهی منابع آب زیرزمینی شهر هرات

نظر به اطلاعات گرفته شده از حوضه هریود شهر هرات اکیفر مورد مطالعه از نوع آزاد می باشد. مساحت اکیفر برابر به ۱۰۲ کیلومتر مربع می باشد. نظر به آمار ریاست حوضه هریود به تعداد ۵۵۰ حلقه چاه در منطقه مورد مطالعه قرار دارد که عمدتاً به مصارف شرب، زراعت و صنعت استفاده می شود. در منطقه مورد مطالعه چشمه و یا قناتی وجود نداشت. وضعیت بهره برداری از چاه های فوق قرار ذیل است. (ریاست حوزه هریود).

جدول 1- آب‌دهی چاه‌های منطقه مورد مطالعه شهر هرات (ریاست حوزه‌ی هریورد)

موقعیت	تعداد چاه	مصارف	آب دهی M3/year	M3/sec
شبکه آبرسانی	۳۰ حلقه	خانگی، فضای سبز، صنعتی، شرب و اطفایه	۱۷۰۰۰۰۰	۰,۵۴
چاه‌های عمیق در نقاط متفاوت شهر	۳۵۰ حلقه	خانگی، فضای سبز، صنعتی، شرب و اطفایه	۱۲۰۰۰۰۰	۰,۳۸
چاه‌های نیم عمیق در نقاط متفاوت شهر	۱۷۰ حلقه	خانگی، فضای سبز، صنعتی، شرب	۳۰۰۰۰۰	۰,۰۹۵

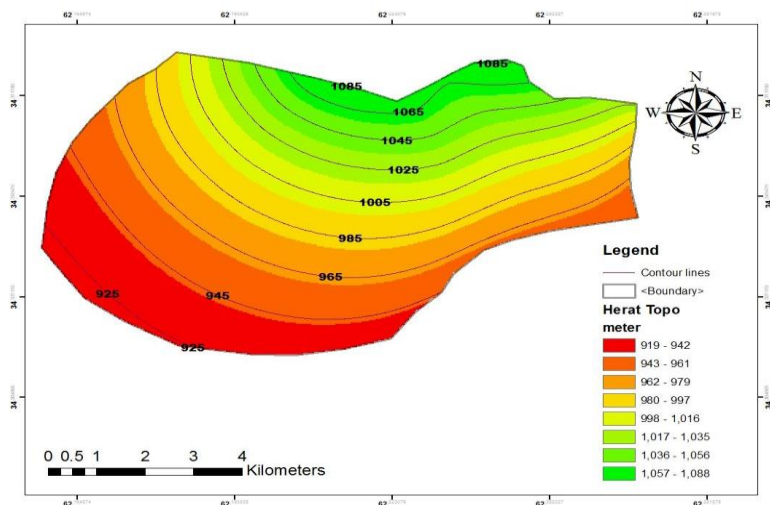
۲,۳ عمق سطح آب‌های زیرزمینی در شهر هرات

جهت بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی، جریان آب زیرزمینی، نقاط تغذیه و تخلیه و سایر ارزیابی‌ها هیدروژئولوژیکی وجود یک شبکه پیزومتری مناسب ضروری می‌باشد (صداقت، ۱۳۸۷). اما در شهر هرات شبکه پیزومتری موجود نمی‌باشد تا بتوان توسط شبکه پیزومتری عمق سطح آب را معلوم کرد. برای تعیین عمق سطح آب در شهر هرات از روش نمونه‌گیری استفاده شده است. در این روش از نقاط متفاوت شهر تقریباً از ۲۰۰ چاه عمیق و نیم عمیق نمونه‌گیری به عمل آمد که توسط این نمونه‌گیری‌ها عمق سطح آب در این شهر به دست آمد که قرار ذیل است.

۲,۴ تهیه مدل مفهومی

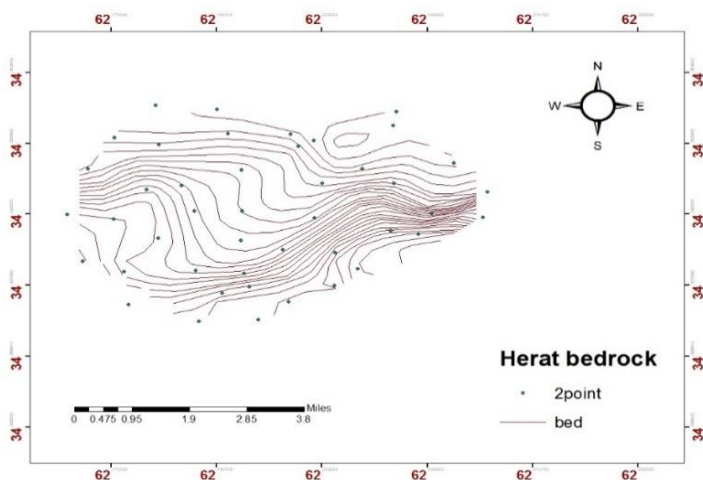
برای ایجاد مدل جریان در نرم افزار GMS از روش مدل مفهومی استفاده شده است. در این روش، ابزارهای GIS و گوگل Map به کار برده می‌شوند (مرادی، ۱۳۹۶). موقعیت منابع تغذیه و تخلیه مانند موقعیت چاه‌ها و تغذیه سطحی، پارامترهای لایه از قبیل هدایت هیدرولیکی، مرزهای مدل و اطلاعات دیگر مورد نیاز برای مدلسازی در سطح مدل مفهومی به نرم افزار داده می‌شود و سپس شبکه ایجاد و مدل مفهومی به مدل شبکه‌ای Grid Model تبدیل گردید (اکبرپور و عزیزی، ۱۳۸۹). در ابتدا، محدوده دشت به مدل وارد می‌شود، سپس هر یک از ویژگی‌های آکifer، منابع تغذیه و تخلیه و پیزومترها در یک پوشش جداگانه تعریف می‌شوند (صفوی، ۱۳۸۵). در مدل مفهومی محدوده مورد مطالعه، موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و مشاهدات به مدل داده شد.

۲,۵ توپوگرافی محدوده مطالعاتی



شکل ۲- نقشه توپوگرافی محدوده مورد مطالعه (شهر هرات-افغانستان)

۲,۶ نقشه تراز سنگ کف اکیفر



شکل ۳- نقشه سنگ کف اکیفر محدوده مورد مطالعه (شهر هرات- افغانستان)

جدول 2- مقادير نقشه سنگ کف اکیفر محدوده مورد مطالعه (شهر هرات)

No	latitude	longitude	bedrock	No	latitude	longitude	bedrock
1	34.370571°	62.240734°	453	23	34.339930°	62.204145°	640
2	34.360674°	62.255215°	470	24	34.337350°	62.214245°	670
3	34.366664°	62.221730°	432	25	34.331088°	62.204903°	677
4	34.359073°	62.233355°	488	26	34.331893°	62.193366°	690
5	34.374390°	62.241412°	492	27	34.331545°	62.176245°	722
6	34.368300°	62.216000°	500	28	34.340400°	62.184398°	755
7	34.375035°	62.198473°	478	29	34.353444°	62.181621°	762
8	34.376062°	62.183760°	502	30	34.345613°	62.173718°	770
9	34.367419°	62.173879°	508	31	34.346806°	62.162622°	779
10	34.359198°	62.167526°	522	32	34.334201°	62.166367°	812
11	34.365662°	62.184529°	528	33	34.327422°	62.206100°	843
12	34.368427°	62.201158°	534	34	34.322657°	62.177312°	850
13	34.365160°	62.217925°	566	35	34.318179°	62.194136°	877
14	34.355149°	62.223614°	543	36	34.325840°	62.199662°	993
15	34.355268°	62.240967°	577	37	34.318623°	62.208377°	993
16	34.347163°	62.249943°	590	38	34.323572°	62.215692°	993
17	34.352826°	62.263261°	587	39	34.327829°	62.226673°	993
18	34.345973°	62.221880°	600	40	34.336602°	62.226807°	993
19	34.347889°	62.204541°	609	41	34.342555°	62.240084°	993
20	34.358707°	62.204307°	625	42	34.332249°	62.232259°	993
21	34.354662°	62.189943°	660	43	34.341595°	62.246782°	993
22	34.347889°	62.193076°	655	44	34.346165°	62.262228°	993

عوامل تغذیه

• تغذیه از ریزش های جوی

بخشی از نزولات جوی بعد از رسیدن به سطح زمین به داخل خاک نفوذ می کند و این پدیده فقط شامل وارد شدن آب به داخل خاک است. این آب ممکن است در داخل زمین نیز به حرکت عمقی خود ادامه دهد تا سرانجام وارد لایه های آبدار زیر زمینی شده و جزء منابع آب زیرزمینی به حساب آید یا آن که صرف مرطوب کردن خاک شده و دوباره در اثر تبخیر و تعرق به هوا برگردد. در این تحقیق جهت تعیین مقدار نفوذ از فرمول (1) استفاده شده است و نیز جدول ۴ مقدار آب نفوذ یافته به دشت از سبب نزولات جوی را نشان می دهد.

$$F = \sum_{i=1}^{12} 0.8 (R - C \log E)^{0.5} \quad \text{Warren Viessman Gary L. Lewi } (^1)$$

اجزای فرمول فوق:-

- F میزان نفوذ سالیانه (mm)
- E تبخیر و تعرق پتانسیل ماهیانه (mm)
- R بارندگی (mm)
- C ضریب ثابت وابسته به دما $C=0.6917 \times T^{0.3981}$
- T متوسط درجه حرارت ماهیانه C

جدول ۳- ضریب ثابت وابسته به دما 1401-1400C

Jan	Feb	March	April	May	June	July	August	Sep	Oct	Nov	Dec
1.31	1.58	2	2	2.3	2.5	2.6	2.53	2.3	2.27	1.97	1.8
1.65	2	2.36	2.5	2.7	2.8	2.5	2.3	1.7	1.65	1.5	۲

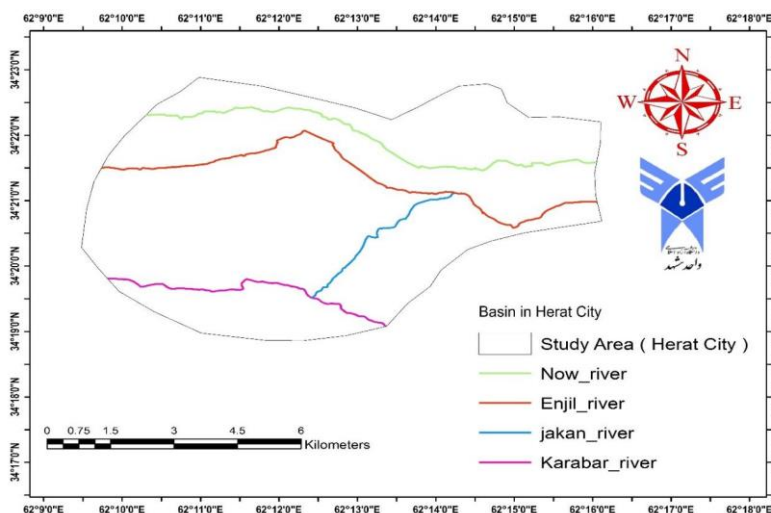
جدول 4- مقدار آب نفوذ یافته به دشت از سبب نزولات جوی 1401-1400

Jan	Feb	March	April	May	June	July	August	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
3	4	3.6	2.9	2.5	0	0	0	0	3.55	2.5	0.8	22.85m m
3.96	8.11	7.8	6.55	0	0	0	0	0	3.6	4	1	34.02m m

براساس آمار و اطلاعات دریافت شده از سازمان آب منطقه ای شهر هرات و محاسبات انجام یافته در سال اوسط بارش در شهر هرات ۱۸۵ میلی متر می باشد. با توجه به بافت خاک و الگوی کشت، ۱۵ فیصد از این مقدار در زمین نفوذ می کند. و باقی مانده به صورت جریان سطحی جاری می شود. با توجه به مساحت محدوده ۱,۵ میلیون مترمکعب به آکیفر نفوذ می کند.

تغذیه از جریانات دریا

همان طوری که در نقشه مشخص شده جریان های عبوری از چهار دریا انجیل ، نو ، کاربار و جکان در مسیر خود از داخل شهر هرات عبور می کنند مقدار آبی که از دریای های ذیل وارد دشت هرات میشود از فرمول (۲) به دست می آید.



(۲)

شکل 4- جریان رودخانه ها در منطقه مورد مطالعه

$$Qg = K \cdot b \cdot I \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad \text{علیزاده}$$

اجزای فرمول فوق :-

Qg - میزان آب ورودی از رودخانه

K - ضریب هدایت هیدرولیکی

b - عرض قسمت خیس شده کانال

I - طول قسمتی از مسیر رودخانه که باعث تغذیه می شود

$\frac{\Delta h}{\Delta x}$ - شیب هیدرولیکی بین سطح آب و رودخانه

جدول 5- مقدار آب نفوذ یافته به دشت از طریق دریا ها

شماره	رودخانه ها	طول (کیلومتر)	شیب	عرض (کیلومتر)	ضریب هدایت هیدرولیکی	میلیون متر مکعب
1	انجیل	۱۷	۰,۰۲۲	۶	$۲*۱۰^{-۴}$	۷,۵
2	نو	۱۰	۰,۰۳	۸	$۱,۷*۱۰^{-۴}$	۷,۵
3	کاربار	۱۰	۰,۰۱۵	۶	$۱,۸*۱۰^{-۴}$	۳
4	جکان	۶	۰,۰۳۶	۶	$۱,۳۵*۱۰^{-۴}$	۳

تغذیه ناشی از برگشت آب چاهای کشاورزی، شرب و صنعت

بر اساس اطلاعات حاصل، مصرف آب از منابع سطحی و زیرزمینی در محدوده آکifer برابر با ۳۲ میلیون متر مکعب در سال می باشد. میزان تخلیه منابع آب زیرزمینی در سال تهیه بیلاس، حجمی معادل به ۳ میلیون مترمکعب به سفره آب زیرزمین نفوذ می نماید و همچنین حجمی در حدود ۵ میلیون مترمکعب از مصارف شرب و صنعت دوباره به سفره آب زیرزمینی شهر هرات برگشت می کند.

۲,۸ خلاصه تغذیه آکifer

باتوجه به اعداد ارایه شده و بررسی پارامترهای ورودی و خروجی منطقه مورد مطالعه می توان به این نتیجه رسید که بیلان در شهر هرات در سال ۱۴۰۱ منفی و به میزان ۱,۵ میلیون متر مکعب خروجی از ورودی ها بیشتر است. بین عدد به دست آمده از تغییرات حجم در دوره بیلان و مقدار بیلاس بدست آمده از ورودی ها و خروجی ها به میزان ۰,۴۸ میلیون متر مکعب اختلاف است که می تواند به علت در دسترس نبودن اطلاعات کافی از شهر هرات و تقریبی بودن بسیاری از فاکتورها باشد. جدول ۶ خلاصه اجزای تغذیه سالانه آب های زیرزمینی شهر هرات را نشان می دهد. (ریاست حوضه هریورد-مرغاب ولایت هرات)

جدول 6- خلاصه اجزای تغذیه سالانه آب های زیرزمینی دشت هرات (ریاست زراعت و مالدری

شماره	اجزای	میلیون متر مکعب
1	ورودی از طریق نفوذ حاصل از ریزش های جوی	1.5
2	ورودی از طریق نفوذ رودخانه ها	21
3	ورودی از طریق نفوذ آبهای برگشت زراعتی	3
4	ورودی از طریق آب شرب و صنعت	5
5	ورودی از طریق چشمه ها	0
6	مجموع تغذیه	30.5

۲,۹ عوامل تخلیه

• برداشت از آب های زیرزمینی

با توجه به آمار و اطلاعات موجود تعداد ۴۵۰ حلقه چاه در سال بیلان فعال بوده و مورد بهره برداری قرار گرفته اند. میزان تخلیه این چاه ها ۳۲ میلیون متر مکعب در سال می باشد که در جدول ۷ به صورت خلاصه بیان گردیده است.

جدول ۷- خلاصه اجزای تخلیه سالانه اکیفر دشت هرات

شماره	اجزای	میلیون متر مکعب
۱	تخلیه توسط چاها	۳۰,۸
۲	خروجی از طریق جریانهای زیرزمینی	۱,۲
۳	حجم زهمکشی	۰
۴	تخلیه توسط چشمه های و قنوات	۰
۵	مجموع تخلیه	۳۲

۲,۱۰ محاسبه تغییرات حجم آب زیرزمینی

برای برآورد تغییرات حجم ذخیره اکیفر از نتایج حاصل از ترسیم هیدروگراف واحد دشت و همچنین از رابطه (۳) بدست می آید که در جدول ۸ بیلاتس آب های زیرزمینی بیان شده است.

$$\Delta S = A \cdot S \cdot (\pm \Delta h) \quad \text{Warren Viessman Gary L. Lewis} \quad (3)$$

ΔS تغییرات حجم مخزن در سال آبی

A مساحت محدوده بیلان

S ضریب ذخیره اکیفر

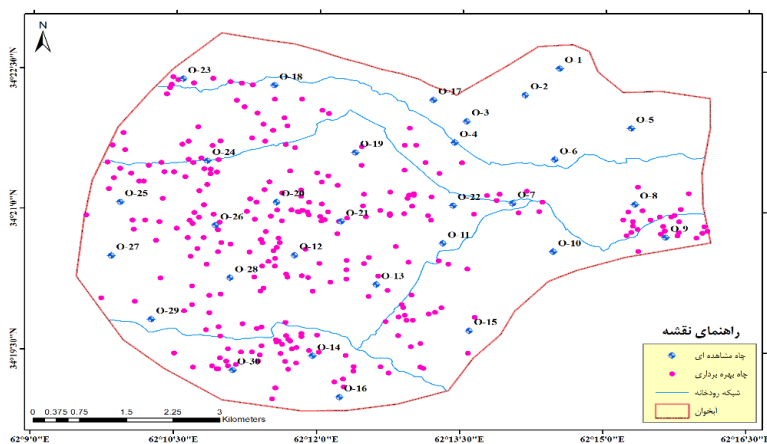
Δh تغییرات سطح آب

جدول ۸- بیلاتس آب زیرزمینی اکیفر شهر هرات

شماره	اجزای	میلیون متر مکعب
۱	مجموعه پارامتراهای ورودی	۳۰,۵
۲	مجموعه پارامترهای خروجی	۳۲
۳	تغییرات حجم	-۱,۵

۲.۱۱ چاه‌های بهره‌برداری

چاه یکی از قدیمی ترین روش های استفاده از آب زیرزمینی برای مصرف شرب و زراعت می باشد (مقدم و بندانی، ۱۳۸۶). البته نقش چاه‌ها در تامین آب زراعت به دلیل مشکلات در بهره‌برداری از آنها، کمتر از سایر روش‌ها می باشد. چرا که برداشت آب از چاه مستلزم مصرف انرژی است. در گذشته در افغانستان از چاه‌های کم عمق استفاده می شد و برای انرژی مورد نیاز نیز از حیوانات استفاده شده است. براساس تخمین های سال ۱۹۶۰ در سطح کشور ۱۲۰۰ حلقه چاه کم عمق وجود داشته است که توسط آنها اراضی زراعتی آبیاری می شده اما امروزه با استفاده از تکنولوژی های جدید چاه‌های عمیق حفری و آب آنها توسط پمپاژ استخراج می گردد. بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی جهت مصارف شرب، صنعت، کشاورزی و سایر مصارف دیگر عمده ترین عامل در کاهش حجم منابع آبی موجود در هر منطقه می باشد. از طرف دیگر به علت کاهش نزولات جوی و تبع آن کاهش جریانات سطحی، کشاورزان اقدام به حفر چاه های غیر مجاز نموده اند که این حفاری ها بدون توجه به وضعیت اکیفر انجام شده که باعث افت چشم گیر آب های زیرزمینی گردیده است.



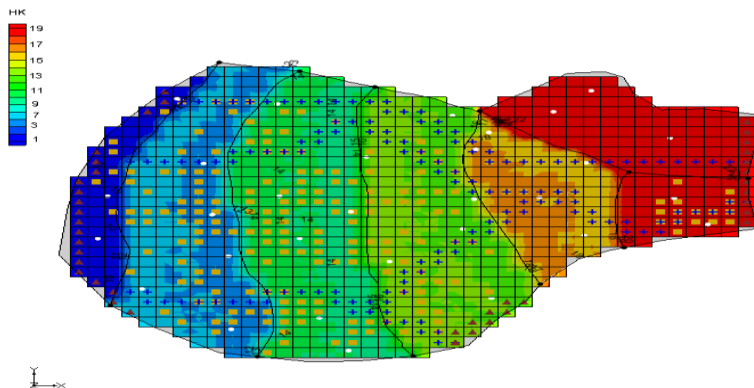
شکل ۵- چاه‌های ناحیه مورد مطالعه شهر هرات (ریاست حوزه‌ی هریود-مرغاب)



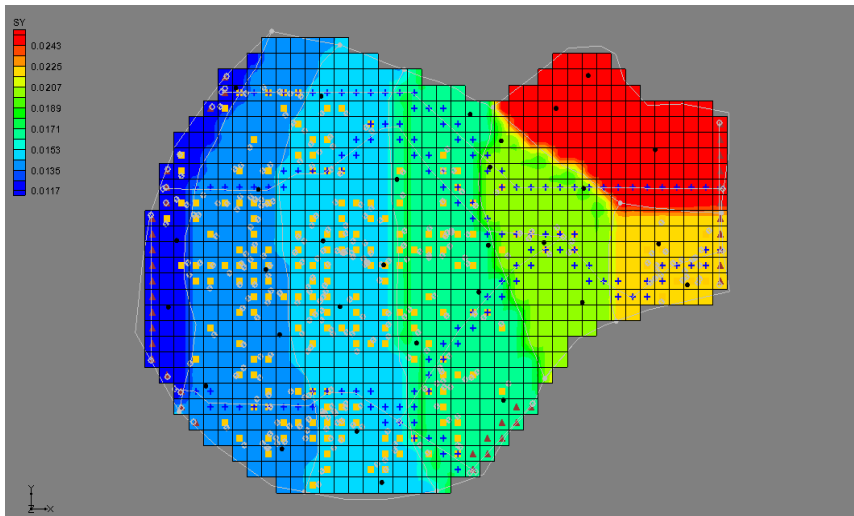
شکل 6- چاه‌های سولری و استخراج آب‌های زیرزمینی (شهر هرات-افغانستان)

۲،۱۲ هدایت هیدرولیکی

هدایت هیدرولیکی توانایی یک محیط متخلخل برای عبور آب را نشان می‌دهد. یکی از ویژگی‌های مهم رسوبات و سنگ‌ها از نظر حرکت آب‌های زیرزمینی و تشکیل طبقات آبدار ضریب هدایت هیدرولیکی آنها می‌باشد. مقدار این ضریب در رسوبات و سنگ‌ها به اندازه و تعداد فضاهای خالی و نحوه آرایش آنها بستگی دارد. پس از تعیین ضخامت اشباع آکifer و قابلیت انتقال، هدایت هیدرولیکی در محل هر چاه محاسبه گردید. مقادیر حداقل و حداکثر هدایت هیدرولیکی به ترتیب ۱ تا ۲۰ متر در روز در پهنه آکifer بدست آمد است. (حافظی، ۱۳۸۳، ص ۲۲).



شکل 7- نقشه میزان هدایت هیدرولیکی محدوده مورد مطالعه (شهر هرات-افغانستان)



شکل 8- نقشه میزان آبدهی ویژه محدوده مورد مطالعه (شهر هرات-افغانستان)

۳. یافته‌ها/ نتایج

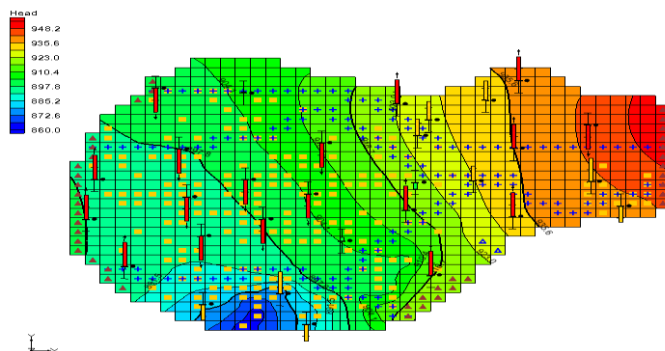
۳،۱ اجرای مدل کمی اکیفر

بعد از طی مراحل فوق و وارد کردن کلیه پارامترهای مورد نیاز، مدل برای اجرا آماده می‌شود. اجرای مدل در دو حالت ماندگار و غیرماندگار صورت می‌گیرد.

۳،۲ حالت ماندگار

در شرایط ماندگار، کلیه اطلاعات مورد نیاز شامل تغذیه از بارش و تخلیه از طریق تبخیر، سطح آب و مقدار ثابت مرزهای هیدرولیکی و دریا‌های برای مدت زمان یک ماهه (میزان) 1401 وارد مدل شد. پس از اجرای مدل بین سطح آب محاسباتی و مشاهداتی اختلافاتی وجود داشت که به دلیل عدم قطعیت در اطلاعات مورد استفاده و ساده سازی‌های صورت گرفته در مدل می‌باشد. در GMS حد مجاز اختلاف سطح آب مشاهداتی و محاسباتی به عنوان Interval به مدل معرفی می‌گردد که در این تحقیق مقدار Interval برابر ۱ متر در نظر گرفته شد. اگر اختلاف سطح آب مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در بازه تعیین شده قرار گیرد رنگ میله چاه مشاهداتی سبز خواهد بود. اگر میزان خطا کمتر از بازه معین شده باشد به رنگ زرد و اگر بیش از این مقدار باشد به رنگ سرخ خواهد بود. همانطور که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود در تعداد زیادی از چاه‌ها اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی بیشتر از حد مجاز است. در نمودار شکل (۷) پراکنش تعدادی از نقاط اطراف نیز همین موضوع را مورد تأیید قرار می‌دهد. شکل (۸) نقشه تراز آب زیرزمینی در اولین اجرای مدل در حالت پایدار را نشان می‌دهد. نتایج

گرفته از اجرای مدل نشان داد که موقعیت سنگ کف اکيفر به خوبی ارزیابی نشده است به گونه ای که در برخی نواحی ارتفاع سنگ کف از تراز آب زیرزمینی بالاتر بود که نتیجه آن ایجاد سلول خشک بود بنابراین سنگ کف اکيفر با توجه به سنگ کف چاه های بهره برداری اصلاح گردید.

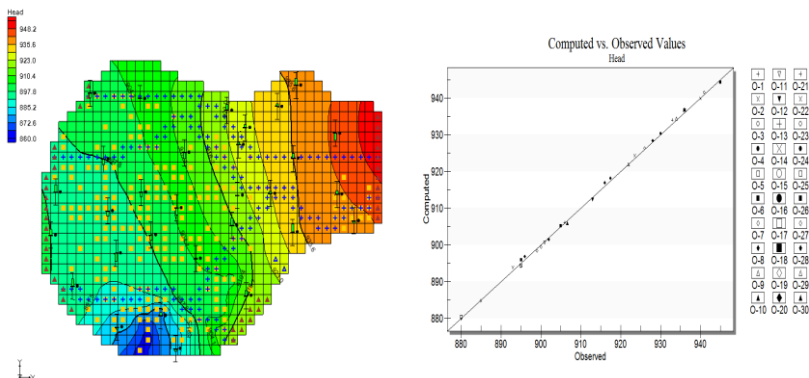


شکل 9- نقشه سطح ایستابی محدوده مورد مطالعه (شهر هرات-افغانستان)

۳.۳ واسنجی مدل در حالت ماندگار

در مدل پایدار شهر هرات، پارامترهای هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال در مرزهای ورودی و خروجی، نفوذ از بارندگی و روش های درونابی مورد استفاده در ارتفاع تراز سنگ کف و سطح آب بصورت دستی مورد واسنجی قرار گرفت. با اولین اجرای مدل خطاهایی در سطح آب مشاهده ای و محاسبه ای وجود دارد. در واسنجی دستی با تغییر مقادیر تغذیه و تخلیه در مناطقی که دارای عدم قطعیت بودند، مدل گام به گام تصحیح گردید. در واسنجی دستی، هر اجرا و مشاهده نتایج آن، پیامی را در بردارد که تفسیر این پیام باعث می شود هیدروژئولوژیست بیشتر با واقعیت منطقه آشنا گردد (Brewer, K. 2003). هر چه تعداد اجراها بیشتر باشد ضرایب بدست آمده بیشتر به مدل مفهومی نزدیک می گردند و در نتیجه میزان خطاها کمتر می گردد. باید توجه داشت که کاهش دادن خطاها بدون توجه به مدل مفهومی نتایج مناسبی را در بر نخواهد داشت و شبیه سازی یک شبیه سازی کاذب خواهد بود. پس از انجام واسنجی در حالت دستی به منظور افزایش دقت محاسبات در مرحله آخر واسنجی، پارامتر هدایت هیدرولیکی با استفاده از کد نرم افزار با استفاده از روش های معکوس هدایت هیدرولیکی بهینه شد. در بهینه سازی هدف رسیدن به نقطه های است که مجموع مربعات خطا کمتر باشد. در نهایت برآورد پارامترها را با توجه به شرایط مشخص شده و به منظور رسیدن به کمترین مجموع مربعات خطا، با اجرای مکرر انجام داده تا بهترین پاسخ بدست آید. در این روش نیز نتیجه تخمین پارامتر، حاصل شدن همبستگی بالا و دقیق موقعیت سطح ایستابی اکيفر را در برداشت. پس از اتمام واسنجی و بدست

آمدن مقدر بهینه برای پارامترها وضعیت سطح آب موجود از لحاظ خطای مشاهداتی و محاسباتی و تراز آب زیرزمینی محاسباتی بعد از واسنجی در شکل (۱۰) درآمد که میزان همبستگی این مقادیر در شکل نمودار (۹) آورده شده است.



شکل ۱۱- نقشه سطح ایستابی
شهر هرات

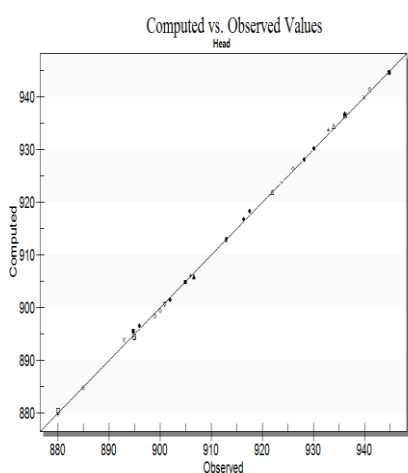
شکل ۱۰- برازش مقادیر تراز آب مشاهداتی و محاسباتی
پس از واسنجی در حالت ماندگار

۱۳،۴ اجرای مدل در حالت غیرماندگار

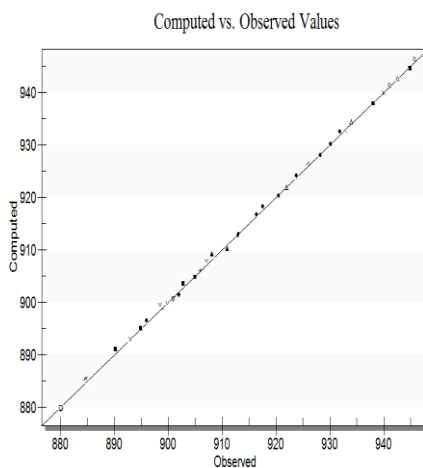
برای ایجاد یک مدل غیرماندگار، معمولاً بایستی حجم عظیمی از اطلاعات و داده‌های ناپایدار از منابع مختلف مثل داده‌های مربوط به پمپاژ، داده‌های تغذیه آکifer، داده‌های مربوط به رودخانه و سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای را مدیریت کرد (طاهری و کمالی، ۱۳۹۵). جمع‌آوری و کار با چنین اطلاعاتی می‌تواند بسیار وقت‌گیر و خسته‌کننده باشد. GMS ابزارهایی را برای واردکردن اطلاعات مربوط به سری-های زمانی و نیز تبدیل این اطلاعات به ورودی‌هایی برای مدل MODFLOW فراهم کرده است. در شرایط غیرماندگار، علاوه بر داده‌های ذکر شده در شرایط ماندگار، اطلاعات مربوط به میزان آبدهی ویژه نیز بایستی به مدل وارد شود (Kresic, N., 1997). بر اساس معلومات به دست آمده و جنس رسوبات تشکیل دهنده آکifer، متوسط ضریب آبدهی شهر هرات در حدود ۵ درصد برآورد شده است. شرایط اولیه آکifer همراه سال ۱۴۰۱ در نظر گرفته شد. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نمودارهای برازش را در گام دوم و انتهایی در اولین اجرای مدل نشان می‌دهند.

واسنجی مدل در حالت غیرماندگار

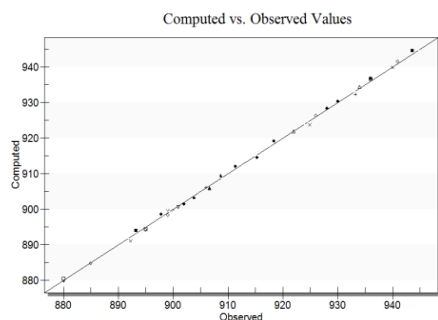
پس از اجرای مدل در شرایط غیرماندگار، واسنجی آن به صورت دستی با آزمون و خطا و با تغییر توام پارامترهای حساس برای ۱۲ دوره تنش انجام گرفت. پارامترهایی که در حالت غیرماندگار واسنجی می شوند شامل تراز مرزهای ورودی و خروجی اکیفر، تغذیه از بارش، تغذیه از جریان های سطحی و ضریب آبدهی ویژه به منظور دستیابی به سطح آب محاسباتی قابل قبول می باشد. زمان اتمام واسنجی در حالت غیرماندگار بستگی به دقت مدل در حالت پایدار و تعداد گام های زمانی دارد.



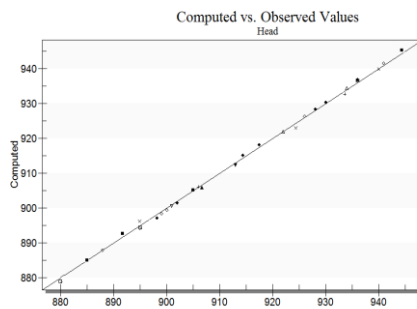
شکل ۱۳- نمودار برازش اولین اجرای مدل در حالت غیر ماندگار در گام انتهایی (میزان ۱۴۰۳)



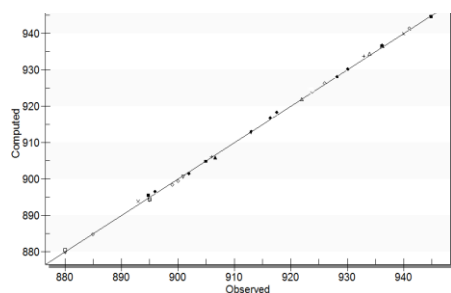
شکل ۱۲- نمودار برازش اولین اجرای مدل در حالت غیر ماندگار در گام اول (میزان ۱۴۰۲)



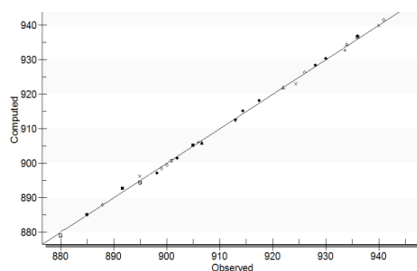
شکل ۱۵- نمودار برازش بار محاسباتی و مشاهداتی
پس از واسنجی در حالت غیر ماندگار درگام سوم
(جدی ۱۴۰۲)



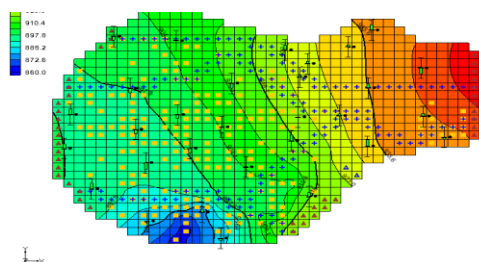
شکل ۱۴- نمودار برازش بار محاسباتی و مشاهداتی
پس از واسنجی در حالت غیر ماندگار درگام اول (میزان
۱۴۰۲)



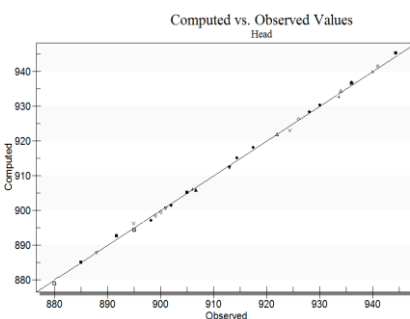
شکل ۱۷- نمودار برازش بار محاسباتی و مشاهداتی
پس از واسنجی در حالت غیر ماندگار درگام نهم (جوزا
۱۴۰۳)



شکل ۱۶- نمودار برازش بار محاسباتی و مشاهداتی
پس از واسنجی در حالت



شکل ۱۹- نقشه سطح ایستابی شهر هرات در
حمل ۱۴۰۲



شکل ۱۸- نمودار برازش بار محاسباتی و مشاهداتی
پس از واسنجی در حالت غیر ماندگار درگام دوازدهم
(میزان ۱۴۰۳)

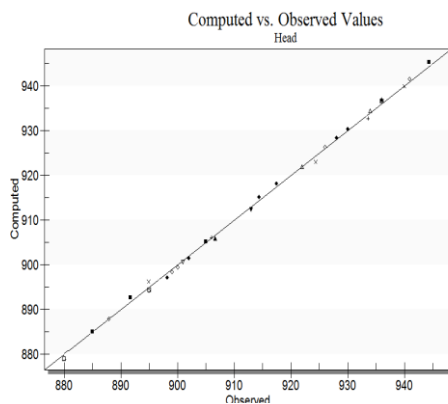
نتایج حاصل از واسنجی را به صورت گام‌های سه ماهه، به منظور نشان دادن دقت واسنجی در طول دوره در مدل را نشان می‌دهند. همان طور که مشاهده می‌کنید پراکندگی نقاط نسبت به خط $y=x$ کم است و ضریب تبیین محاسبه شده دقت زیاد مدل را در شبیه سازی نشان می‌دهد. با این حال در تمامی گام ها مقدار RMSE در محدوده مجاز و حتی بهتر از آن قرار دارد و این مقادیر بیانگر دقت بالای مدل سازی می‌باشند.

Error Summary	
Head	
Mean Error:	0.059
Mean Abs. Error:	0.527
Root Mean Sq. Error:	0.591

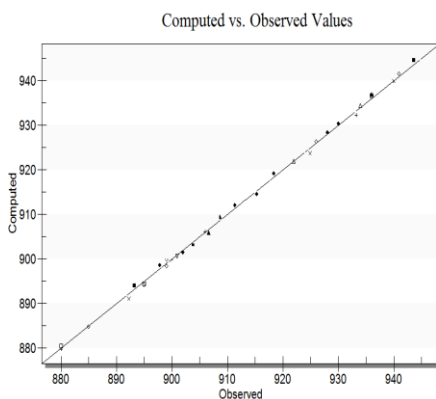
شکل ۲۰- مقادیر خطاهای محاسباتی پس از واسنجی مدل در حالت غیر ماندگار

۳,۶ صحت‌سنجی مدل

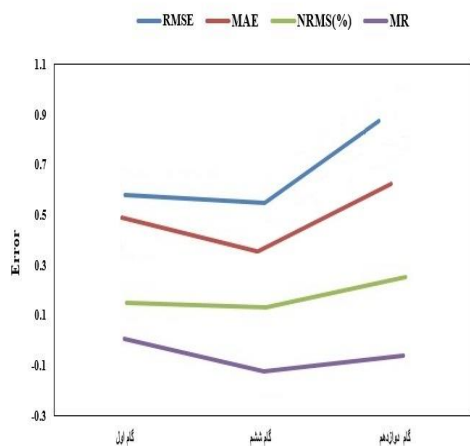
مدلی که با دقت مناسب کالیبره شده باشد، چنانچه تحت استرس‌های مختلفی غیر از استرس‌های دوره کالیبراسیون قرار گرفت بایستی نتایج قابل قبولی را ارائه کند (اصغری، ۱۳۸۸). یعنی بدون تغییر در مقادیر بهینه شده برای پارامترهای هدایت هیدرولیکی آکifer، اطلاعات توپوگرافی و سنگ کف، شبکه بندی مدل و سایر خصوصیات آکifer مدل بتواند شرایط جدید راشیه‌سازی کند (Bear, 1979). با توجه به اینکه مدل آب‌های زیرزمینی شهر هرات با موفقیت مرحله واسنجی را پشت سر گذاشته بود و میزان خطاها در مدل در حد قابل قبول بود، برای سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ مدل مورد صحت‌سنجی قرار گرفت و داده‌های این سال آبی اعم از میزان تخلیه چاه‌های بهره‌برداری، تخلیه از تبخیر، نفوذ از بارش و ... وارد مدل گردیده و مدل اجرا شد. خلاصه آماری مقایسه مقادیر محاسباتی با مشاهداتی تراز آب زیرزمینی آورده شده است با طولانی شدن گام‌های زمانی، میزان خطاها اندکی افزایش یافته است. ولی پایین بودن خطاها، این اطمینان را می‌دهد که ترکیب درستی از پارامترها در مدل به کار رفته است. میزان NRMS در تمامی گام‌های زمانی زیر ۱۰ درصد بوده که نشان دهنده دقت بالای مدل می‌باشد همچنین همبستگی بالای ایجاد شده در بین مقادیر تراز آب محاسباتی و مشاهداتی نشان می‌دهد که می‌توان از مدل در جهت پیش‌بینی وضعیت آکifer پس از اعمال سناریوهای مورد نظر استفاده نمود. نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل در اشکال فوق ارائه شده است.



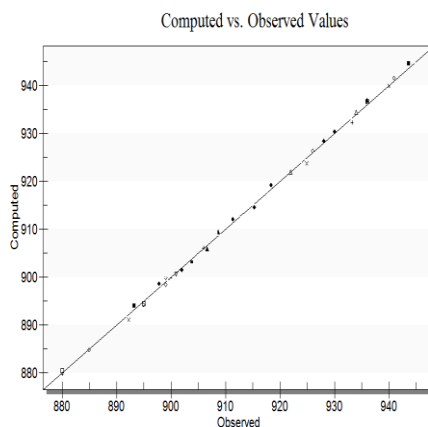
شکل ۲۲- نمودار برازش بار محاسباتی و مشاهداتی پس از واسنجی در حالت غیر ماندگار درگام



شکل ۲۱- نمودار برازش بار محاسباتی و مشاهداتی پس از واسنجی در حالت غیر ماندگار



شکل ۲۴- مقادیر خطاهای محاسباتی صحت سنجی مدل در ۱۲ دوره تنش در حالت غیر ماندگار



شکل ۲۳- نمودار برازش بار محاسباتی و مشاهداتی پس از واسنجی در حالت غیر ماندگار درگام دوازدهم (میزان ۱۴۰۲)

۴. مناقشه

یافته‌های این تحقیق حاکی از آن است که یکی از مهم‌ترین عوامل افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی در دشت شهر هرات، توسعه روزافزون سیستم‌های استخراج آب مبتنی بر انرژی خورشیدی است. در سال‌های اخیر، استفاده از پمپ‌های سولری به دلیل دسترسی آسان به انرژی آفتاب، هزینه پایین بهره‌برداری و قابلیت نصب در مناطق دورافتاده، با استقبال گسترده‌ای در بین کشاورزان مواجه شده است. این سیستم‌ها با توان بالا و بدون نیاز به سوخت‌های فسیلی، امکان برداشت مستمر از منابع زیرزمینی را فراهم کرده‌اند؛ به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند شهر هرات، که منابع سطحی آب بسیار محدود است.

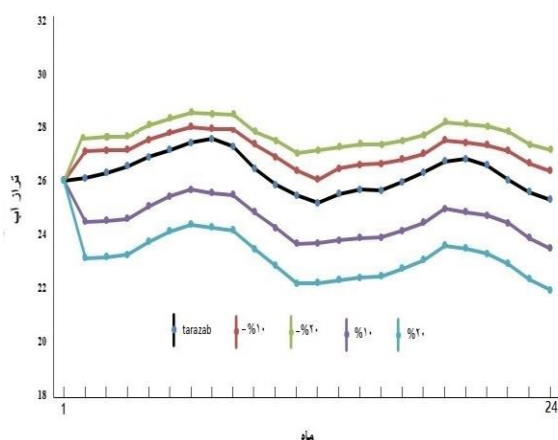
اما این فناوری نوین در غیاب یک چارچوب مدیریتی و نظارتی مناسب، به تهدیدی جدی برای پایداری منابع آبی تبدیل شده است. برخلاف سیستم‌های پمپاژ سنتی که به دلیل هزینه‌های سوخت و محدودیت زمانی، کنترل طبیعی بر برداشت‌ها اعمال می‌کردند، سیستم‌های سولری در تمام طول روزهای آفتابی فعال بوده و حجم بزرگی از آب را استخراج می‌کنند. ادامه این روند، بدون در نظر گرفتن ظرفیت تغذیه سفره‌های زیرزمینی، منجر به کاهش سطح ایستابی، خشک شدن چاه‌ها و حتی نشست زمین در بلندمدت خواهد شد.

افزون بر این، یکی دیگر از موانع جدی در راستای مدیریت علمی منابع آب زیرزمینی، کمبود داده‌های پایه‌ای و دقیق از وضعیت زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه است. در بسیاری از نقاط دشت، اطلاعاتی نظیر عمق و جنس سنگ بستر، شیب و توپوگرافی دقیق منطقه، و مقدار واقعی هدایت هیدرولیکی خاک و لایه‌های آبرفتی یا سنگی، یا وجود ندارند یا با دقت پایین ثبت شده‌اند. این کمبود اطلاعات موجب می‌شود که شبیه‌سازی‌های عددی مانند مدل MODFLOW با عدم قطعیت بالا همراه باشند، و نتایج آن‌ها در تصمیم‌گیری‌های اجرایی کمتر قابل اعتماد باشند.

در نتیجه، دو چالش اساسی در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در دشت استادان شناسایی شد: اول، برداشت بی‌رویه و بی‌برنامه از طریق سیستم‌های خورشیدی که با تشدید فشار بر منابع زیرزمینی، پایداری آن را تهدید می‌کند؛ و دوم، نبود داده‌های دقیق و جامع برای مدلسازی دقیق و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد. برای مقابله با این چالش‌ها، نیاز است که همزمان با ایجاد محدودیت‌ها و دستورالعمل‌های کنترلی بر نصب و بهره‌برداری از سیستم‌های سولری، یک شبکه پایش جامع و مستمر در زمینه داده‌های هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی نیز راه‌اندازی شود. تنها از این طریق می‌توان به سوی یک مدیریت علمی، پایدار و پاسخ‌گو برای منابع آب زیرزمینی این منطقه حرکت کرد.

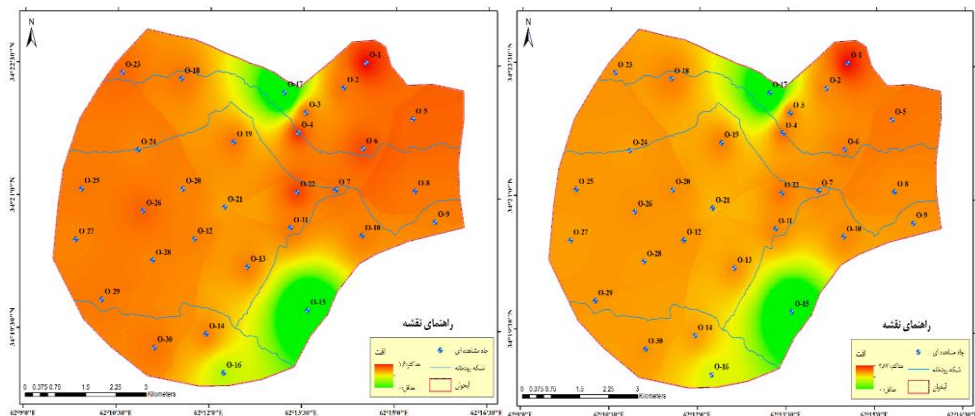
۴,۱ وضعیت کاهش و افزایش برداشت در چاه‌های بهره‌برداری

یکی از راه‌کارهای مناسب برای جلوگیری از افت شدید سطح آب زیرزمینی در منطقه، کاهش میزان برداشت از چاه‌هاست. در این سناریو بعد از اجرای مدل در یک سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲ با کاهش و افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی در نرخ برداشت، هیدروگراف اکیفر برای یک سال با ۲۴ گام زمانی ترسیم گردید. همانطور که در شکل (۲۴) مشاهده می‌شود با کاهش و افزایش در نرخ برداشت چاه‌های بهره‌برداری، تراز آب زیرزمینی شهر هرات-افغانستان قایل تغییرات قابل توجهی از خود نشان داده است. با کاهش ۱۰ درصدی در نرخ برداشت افت تراز آب زیرزمینی از بین رفته و حتی کمی بهتر شده است.



شکل ۲۵- تغییرات وضعیت تراز آب زیرزمینی شهر هرات پس از اعمال سناریو کاهش و

بر این اساس با جلوگیری از چاه‌های سولری می‌توان در بهبود وضعیت اکیفر نقش اساسی ایفا کرد. به عبارت دیگر در صورت اعمال ۲۰ درصد کاهش در مقادیر آب برداشتی اکیفر در شرایط فعلی به تثبیت خواهد رسید ولی برای برگشت اکیفر به شرایط اولیه لازم خواهد بود که میزان کاهش بیش از ۱۰ درصد در نظر گرفته شود.



شکل ۲۶- پیش‌بینی افت آب‌های زیرزمینی
شهر هرات در پنج سال آینده

شکل ۲۷- پیش‌بینی افت آب‌های زیرزمینی
شهر هرات در سه سال آینده

۴,۲ پیش‌بینی

نوسانات سطح آب زیرزمینی در شهر هرات

به منظور ارزیابی تأثیر سیاست فعلی برداشت از آب زیرزمینی بر اکیفر، مدل واسنجی شده برای دوره سه ساله و پنج ساله پس از واسنجی و صحت‌سنجی اجرا شد. نتایج نشان می‌دهد که با شرایط فعلی روند افت اکیفر محدودی مورد مطالعه ادامه خواهد داشت و در پایان دوره پیش‌بینی بین ۱,۵ الی ۲,۵ متر افت خواهد داشت.

نتایج حاصل از بررسی منطقه مورد مطالعه

- نقشه تراز آب زیرزمینی شهر هرات نشان می‌دهد که بیشترین عمق آب زیرزمینی برابر ۸۵ متر، در بخش شمال شرقی اکیفر و کمترین عمق آب زیرزمینی برابر ۸ متر، در بخش جنوب غربی اکیفر می‌باشد.
- نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی نشان می‌دهد که حداقل عمق برخورد به آب در جنوب شهر هرات در قریه نوین واقع شده که دارای عمقی کمتر از ۸ متر بوده و بیشترین عمق برخورد به آب حدود ۸۰ متر در حوالی خواجه عبدالله انصار می‌باشد.
- از آنجاییکه شهر هرات یک شهر زراعتی است و مصرف بی‌جا از آب‌های شیرین و حفر خودسر چاه‌های عمیق از دلایل عمده و اساسی افت آب‌های زیرزمینی در این ولایت می‌باشد. دهاقین هرات

طی سال‌های اخیر برای آبیاری زمین‌های شان اقدام به حفر چاه‌های عمیق نموده و با استفاده از سولرها خورشیدی به گونه افراطی هزاران هکتار زمین را آبیاری می‌کنند که این روند باعث افت چشم‌گیر آب‌های زیرزمینی شهر هرات شده است.

- با اجرای سناریوی کاهش و افزایش در میزان برداشت از چاه‌های بهره‌برداری این نتیجه حاصل شد که با کاهش چاه‌های سولری در شهر هرات درصدی در نرخ برداشت افت تراز آب زیرزمینی از بین رفته و حتی کمی بهبود حاصل می‌شود. لذا برای تثبیت تراز سطح اکيفر در وضعیت فعلی کاهش چاه-های سولری در میزان بهره‌برداری توصیه می‌گردد.

- با اجرای سناریوی دیگر برای جلوگیری از چاه‌های عمیق که خود سرانه در نقاط مختلف شهر هرات حفر می‌شوند می‌توان افزایش ۱۰ درصدی در آب‌های زیرزمینی شهر هرات مشاهده کرد.

- جهت کلی جریان در شهر هرات از نواحی شمال شرق به جنوب غرب می‌باشد با تفاوت ارتفاع ۱۵۵ متر، و در بسیاری از نواحی ورودی آبراهه‌ها جریان آب زیرزمینی به اکيفر وارد می‌گردد. جهت جریان آب زیرزمینی نیز کم و بیش از این وضعیت تبعیت می‌نماید.

- با بررسی نتایج حاصل از صحت‌سنجی مشخص شد که مدل توانسته شرایط طبیعی اکيفر را شبیه‌سازی کند و می‌توان به ترکیب پارامترهای به کار رفته در مرحله واسنجی و مرزهای هیدرولیکی اکيفر اطمینان حاصل کرد.

- عدم تغذیه کافی اکيفر و پمپاژ بیش از حد آب‌های زیرزمینی که برای مصارف گوناگونی از جمله کشاورزی، شرب و صنعت خارج می‌شود سبب بروز این پدیده می‌شود

- شبیه‌سازی مدل برای سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ انجام گرفت که باتوجه به مقایسات انجام شده بین تراز آب محاسباتی توسط مدل GMS و تراز آب مشاهداتی می‌توان استنباط کرد که هم‌پوشانی مناسبی بین نمودارها وجود دارد. اختلاف جزئی در نمودارها می‌تواند به این دلیل باشد که در تراز آب مشاهداتی شرایط مختلف جریان در حالت طبیعی حکم فرما است. و در صورت وجود داده‌های تکمیلی می‌توان برای سال‌های آتی نیز پیش‌بینی‌هایی را ارائه داد.

- در مرحله واسنجی به علت ایجاد سلول خشک در برخی نقاط اکيفر نیاز به تغییرات سنگ کف بود که در نهایت با انجام تغییرات لازم نتایج حاصل از واسنجی مدل حاکی از این بود که مدل توانسته به خوبی سطح آب را شبیه‌سازی کند.

- نتایج بیانگر این است که عمق سنگ بستر شهر هرات در نواحی شمال شرق کمترین ارتفاع را به خود می‌گیرد. از نواحی شمال شرق عمق سنگ بستر زیاد شده، و به قسمت‌های مرکزی شهر هرات به بیشترین عمق خود می‌رسد. سپس عمق سنگ بستر از نواحی مرکزی به طرف جنوب غرب کم شده می‌رود. می‌توان گفت که آب‌های زیرزمینی شهر هرات در داخل یک شکل دره مانند واقع شده است.

- بیشترین تغذیه آب های زیرزمینی شهر هرات از رودخانه هریرود و پشتمان می باشد.
- پیش بینی مدل نشان می دهد که در سه سال آینده افت آب های زیرزمینی شهر هرات ۱,۵ متر و در پنج سال آینده ۲,۵ متر خواهد رسید.
- هدایت هیدرولیکی منطقه براساس داده های ارائه شده از نتایج آزمایش پمپاژ صورت گرفته بر روی این دشت بعد از تصحیح ضخامت اشباع جدید استخراج گردید مقادیر حداقل و حداکثر هدایت هیدرولیکی ۱ و ۲۱ متر بر روز به دست آمد.
- جهت بهبود وضعیت و ادامه تحقیقات بعدی می شود به پیشنهادات ذیل اشاره داشت.
 - ۱- مطالعات ژئوفیزیکی شهر هرات نسبتاً قدیمی بوده و نیز اطلاعات ناقصی از آنها در دسترس است. از این رو پیشنهاد می شود مطالعات ژئوفیزیک جدیدتر با دقت قابل قبول تری در مکان های مناسب شهر هرات صورت گیرد تا با در دست داشتن اطلاعات دقیق تر بتوان با اطمینان بیشتری در تعبیر و تفسیر نتایج حاصله از آنها استفاده کرد.
 - ۲- پیشنهاد می شود مطالعات و کارهای بیشتری جهت تهیه اطلاعات مربوط به آب های سطحی به خصوص عرض رودخانه، قابلیت هدایت هیدرولیکی قائم از بستر رودخانه و ضخامت بستر رودخانه انجام شود.
 - ۳- بخاطر عدم موجودیت پزومترها جدید و کارآمد در شهر هرات پیشنهاد می شود به منظور اندازه گیری دقیق میزان آب زیرزمینی ورودی و خروجی، پزومترهای جدید بر روی مرزهای ورودی و خروجی ایجاد شود.
 - ۴- باتوجه به اینکه افت سطح ایستابی در شهر هرات به دلیل اضافه برداشت چاه های بهره برداری می باشد پیشنهاد می شود از برداشت بی رویه این چاه ها جلوگیری شود.
 - ۵- جهت تکمیل شبکه مشاهده ای به منظور آگاهی دقیق تر از سطح تراز آب اکیفر، افزایش تعداد چاه های مشاهده ای در نقاط مختلف دشت توصیه می گردد.
 - ۶- با توجه به اینکه خطوط ارتفاعی سطح آب های زیرزمینی عمدتاً از توپوگرافی دست تبعیت می کند و با توجه به اهمیت مقادیر مشاهداتی سطح ایستابی توصیه می شود نقشه توپوگرافی دشت و مختصات چاه ها به صورت دقیق تر برداشت شود.
 - ۷- پیشنهاد مکانیابی مناطق مناسب از لحاظ تغذیه و بررسی روش تغذیه ای اکیفر
 - ۸- به کار بستن مدیریت صحیح در منابع و مصرف آب شهر هرات.
 - ۹- گرچه مدل ارائه شده در این تحقیق يك مدل شبیه سازی است اما می توان با تلفیق آن با مدل های بهینه ساز از آن در مدیریت یکپارچه منابع آب شهر هرات استفاده کرد.
 - ۱۰- مطلع نمودن مصرف کنندگان اصلی آب یعنی کشاورزان، ریشه یابی آن در چارچوب برنامه های متعدد اطلاع رسانی به طرق مختلف و با وسایل گوناگون به نحوی که بتوان با يك بسیج عمومی برای

برون رفت از بحران، اقدامات اساسی انجام داد. زیرا در کاری چنین مهم و بزرگ پشتیبانی آگاهانه همه مردم به ویژه مصرف کنندگان اصلی آب الزامی است.

۵.۵. مأخذ

اژدری مقدم، م. و بندان، ا.، (۱۳۸۶)، "شبیه سازی آکifer شور با استفاده از مدل ریاضی آبهای زیرزمینی"، بیست و ششمین گردهمایی علوم زمین.

اکبرپور، ع. عزیزی، م.، آقا حسین، ع.، و شیرازی، م.، (۱۳۸۹) "مدیریت بهره برداری از آبهای زیرزمینی آکifer مختاران با استفاده از مدل ریاضی GMS"، نهمین کنفرانس هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

حسینی، سید علی، "هری رود" انتشارات انستیتوت مطالعات استراتژیک افغانستان، کابل، چاپ اول، ۱۳۹۷.

شمسایی، م؛ و امیریگی، م. ع. (۱۳۸۳). "مدیریت بهره برداری آبهای زیرزمینی یزد با استفاده از مدل ریاضی." اولین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشکده فنی دانشگاه تهران.

شهواری، ع؛ خدایی، ک. (۱۳۸۴). "تهیه مدل جریان آب زیرزمینی آکifer دشت بهبهان با استفاده از GIS." مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم تهران.

صداقت، محمود؛ "زمین و منابع آب"، انتشارات دانشگاه پیام نور، تهران، چاپ اول، ۱۳۸۶. صفوی، حمید؛ "هیدرولوژی مهندسی" انتشارات ارکان، اصفهان، چاپ سوم، (۱۳۸۵). طاهری تیزرو، ع؛ کمالی، م. (۱۳۹۵). "مدل سازی آکifer دشت نويسرکان با مدل MODFLOW و ارزیابی وضعیت هیدرولوژی تحت شرایط موجود و آینده." فصل نامه علمی - پژوهشی مهندسی منابع آب.

علیزاده، امین، "اصول هیدرولوژی کاربردی"، انتشارات شهر قدس رضوی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۹.

مرادی، مریم. (۱۳۹۶). "مدل سازی کمی آب های زیرزمینی دشت خوی با نرم افزار GMS" پایان نامه کارشناسی ارشد کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز.

مقدم، اصغری؛ "اصول شناخت آب های زیرزمینی"، انتشارات دانشگاه تبریز، تبریز، چاپ اول، ۱۳۸۸.

Bear, J. (1979) "Hydraulics of groundwater", Mc Graw Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering

Brewer, K. (2003) Uncertainty Analysis with Site Specific Groundwater Models: Experiences and Observations (No. ERD-EN-2003-0126). Savannah River Site (US).

Kresic, N., 1997. Quantitative Solutions in Hydrogeology and Groundwater Modeling. Lewis Publishers, U.S.

Emace, R., Chodhury, A., Anaya, R., Way, S.C., 2000. A numerical groundwater flowmodel of the upper and middle Trinity aquifer. Hill Country area, Texas Water Development Board, Open _ file Report 00.