سال چهارم، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۶، صفحات ۱۰۳ تا ۱۱۰
نشریه آب و توسعه پایدار

2018, Vol.4, No.2, Pages 103 to 110
Journal of Water and Sustainable Development

معرفی مدل‌های سه‌بعدی زمین‌شناسی و کاربرد آن در لایه‌بندی آبخوان آبرفتی بجنورد

مینا تاج‌آبادی[۱]، علی‌نقی ضیایی[۲*]، عزیزالله ایزدی[۳]، روح‌الامین بهرامی[۴]، جواد مشکینی[۵]

۱ و۲- به ترتیب کارشناسی‌ارشد منابع آب و استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد. ۳- دکتری آبیاری زهکشی، مرکز تحقیقات آب دانشگاه سلطان قابوس عمان. ۴- کارشناسی‌ارشد منابع آب، شرکت مهندسین مشاور آبکاو شرق. ۵- کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران، شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: an_ziaei@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۳/۱۳
تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۲/۱۰

چکیده

هدف از این پژوهش، معرفی روش‌ها و ابزارهای تعریف لایه‌بندی آبخوان‌ها و همچنین کاربرد آن‌ها می‌باشد. در آبخوان‌های آبرفتی که تغییرات شدید رسوبات مشاهده می‌شود، تهیه مدل‌های استراتیگرافی[۱] مناسب نمی‌باشد و بهتر است برای لایه‌بندی این نوع آبخوان‌ها از مدل‌های سه‌بعدی لیتولوژی[۲] نرم‌افزار Rockworks یا ابزار T-Progs در نرم‌افزار GMS استفاده شود. در این پژوهش با استفاده از تکنیک مدل‌سازی سه‌بعدی لیتولوژی در نرم‌افزار Rockworks، مدل سه‌بعدی آبرفتی آبخوان بجنورد واقع در استان خراسان شمالی با اطلاعاتی نظیر لاگ چاه‌های بهره‌برداری و مطالعات ژئوفیزیک بدست آمده است. سیستم رسوب آبخوان در این مطالعه از سه گروه رسوب درشت‌دانه، متوسط‌دانه و ریزدانه تشکیل شده که به منظور حل مشکل تهیه مدل آبرفتی، بافت خیلی ریزدانه به عنوان بافت کف آبخوان در نظر گرفته شده است. نتایج وجود عدسی‌ها و ناهمگنی رسوبات را در سرتاسر آبخوان به خوبی نشان می‌دهد که در صورت مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در تخمین ضرایب هیدرودینامیک تأثیرگذار است. بنابراین استفاده از تکنیک مدل‌سازی سه‌بعدی مواد آبرفتی معرف وجود ناهمگنی و عدسی‌ها در سیستم آبخوان‌ها بوده که سبب ایجاد تغییراتی در مقادیر هدایت هیدرولیکی رسوبات درشت‌دانه تا خیلی ریزدانه می‌شوند. بنابراین استفاده از مدل‌های آبرفتی به منظور مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی به ویژه در آبخوان‌هایی با ناهمگنی شدید منجر به شناخت آبخوان با دقت مناسبی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: لایه‌بندی، مواد آبرفتی، مدل‌سازی سه‌بعدی، Rockworks، آبخوان بجنورد.

Introduction of Three-Dimensional Geology Models and Their Application for Layering of Alluvial Aquifers (Case Study: Bojnourd Aquifer)

M. Tajabadi[1], A.N. Ziaei[2*], A. Izady[3], R. Bahrami[4], J. Meshkiny[5]

1,2-M.Sc., and Assistant Professor, Department of Water Science Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran. 3- Ph.D., Irrigation and Drainage, Water Research Centre, Sultan Qaboos University, Oman. 4- M.Sc. in Water Resources, Abkav Shargh Consulting Engineers Company, Iran. 5- M.Sc. in Civil Engineering, North Khorasan Regional Water Authority, Iran.

*(Corresponding Author Email: an_ziaei@yahoo.com)

Received: 02-06-2016
Accepted: 30-04-2017

Abstract

The purpose of this research is the introduction of methods and tools for determination of aquifer stratigraphy and their application. In alluvial aquifers which have extreme changes in sediments, stratigraphy modeling is not suitable, and it is better to use three-dimensional lithology models found in the Rockworks software or T-Progs tools in the GMS software. In this study, using the three-dimensional modeling techniques in the Rockworks software, the three-dimensional lithology model of the Bojnord aquifer lithology of the Bojnourd aquifer, located in the North Khorasan province, with information including logs and geophysical studies has been obtained. Here, the alluvial aquifer consists of three soil textures: coarse, medium, and fine grain which the very fine texture (very fine grain) is considered as the aquifer floor texture in order to solve the lithology modeling problem. Results show that the existence of lens and heterogeneity of sediment in the aquifer influence the accuracy of the estimated hydrodynamic coefficients. Therefore, using three-dimensional lithology modeling techniques, especially in alluvial aquifers, causes changes in the hydraulic conductivities of fine to very coarse-grained sediments. Additionally, the use of three-dimensional alluvial modeling techniques for groundwater flow modeling, especially in aquifers with severe heterogeneity, leads to the identification of an aquifer with an adequate accuracy.

Keywords: Stratigraphy, Alluvial deposit, Lithology modeling, Rockworks, Bojnourd aquifer.

DOI: 10.22067/jwsd.v4i2.52069

مقدمه

در سال‌های اخیر با افزایش روزافزون جمعیت و رشد فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی، میزان مصرف آب در بخش‌های گوناگون شرب، کشاورزی و صنعت افزایش پیدا کرده است که این افزایش مصرف، هزینه‌های بالایی را به منظور تحقّق تأمین آب به دنبال داشته است. از آنجایی که آب زیرزمینی یکی از منابع حیاتی تأمین‌کننده آب مصرفی در ایران می‌باشد، بهره‌برداری نامناسب آبخوان به دلیل عدم آگاهی از آن منجر به ازبین رفتن کمی و کیفی این منابع آبی ارزشمند در آینده خواهد شد. تخمین ضرایب هیدرودینامیک آبخوان‌ها تنها با استفاده از آزمایش‌های پمپاژ و مطالعات اکتشافی بدست آمده و بعد از پهنه‌بندی در سطح آبخوان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا با توجه به هزینه‌های بالا به نظر می‌رسد آگاهی از نحوه لایه‌بندی مخازن آبخوان‌ها و برآورد مناسب‌تری از ضرایب هیدرودینامیک آن، می‌تواند تصمیمات مناسبی را در مقابله با مشکلات موجود اتخاذ نماید. بنابراین هدف از این پژوهش، معرفی تکنیک‌های مدل‌سازی سه‌بعدی زمین‌شناسی و کاربرد آن در تهیه لایه‌بندی آبخوان می‌باشد. تهیه مدل زمین‌شناسی آبرفتی آبخوان‌ها منجر به شناخت بیشتری می‌شود که خود تأثیر مهمی در برآورد خصوصیات آبخوان و رفتار آن دارد.

امروزه تحقیقات مختلفی در سرتاسر دنیا در رابطه با لایه‌بندی آبخوان‌ها، به منظور آگاهی بیشتر از شرایط پیچیده حاکم بر هیدرولیک آب و اهمیت استراتژیک آن‌ها در حال انجام است. برای مثال در ایران شهسواری و همکاران (۱۳۸۴) با تهیه لایه‌بندی استراتیگرافی، جریان آب زیرزمینی را در دشت بهبهان مدل کردند و پارامترهای هیدرولیکی آبخوان را بدست آوردند. یوسفی‌راد (۲۰۱۲) با استفاده از منطق فازی، رسوبات آب لایه‌شناسی سازند کارستی منطقه قلّه‌ی هفتاد در استان مرکزی را به ۷ طبقه تقسیم‌بندی کرد و بهترین منابع آب کارست را معرفی کرد. بانژاد و همکاران (۱۳۹۱) لایه‌بندی استراتیگرافی دشت نهاوند همدان را با نرم‌افزار GMS انجام دادند و جریان آب زیرزمینی را مدل کردند. قبادیان و همکاران (۱۳۹۲) با تعریف چهار نوع رسوب مدل استراتیگرافی دشت میان‌دربند کرمانشاه را تهیه و جریان آب زیرزمینی را با استفاده از GMS مدل کردند. محمودپور و همکاران (۲۰۱۳) با تهیه استراتیگرافی، واحدهای آبخوان و آکیوتارد[۳] آبخوانی در جنوب غربی تهران را شناسایی کردند. بنابراین می‌توان گفت، مطالعات مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی که در ایران در حال انجام است صرفاً لایه‌بندی استراتیگرافی است که در آبخوان‌های آبرفتی دارای پیچیدگی رسوبات است، این نوع لایه‌بندی گزینه‌ی مناسبی نیست به دلیل اینکه مطالعات در حال انجام لایه‌بندی در سطح بین‌المللی به ویژه در آبخوان‌های آبرفتی از نوع لایه‌بندی رسوبات آبرفتی است. به طور مثال Ahmed (۲۰۰۹) در Sohag مصر با استفاده از تکنیک مدل‌سازی لیتولوژی سه‌بعدی، مدل رسوبات آبرفت منطقه را بدست آورد. او مدل لیتولوژی منطقه را به شش نوع طبقه مختلف تقسیم کرد و به این نتیجه رسید که رسوبات خاک منطقه، ناهمگنی شدید دارند و با استفاده از آن ضرایب هیدرودینامیکی افقی و عمودی را محاسبه کرد. Wang (۲۰۱۲) در حوضه رودخانه Elkhorn آمریکا با لایه‌بندی رسوبات آبرفتی وبا استفاده از لاگ‌های چاه، مدل هفت لایه‌ی رسوبات را با استفاده از نرم‌افزار Rockwork برآورد کرد و به این نتیجه رسید که نتایج مدل‌سازی او با تحلیل داده‌ها سازگار است. Cioco (۲۰۱۲) در آبخوانی در کالیفرنیا با مطالعه آب لایه‌شناسی و با استفاده از ۱۱۰ لاگ چاه، مدل لایه‌بندی آبخوان را با کمک نرم‌افزار Rockwork به دست آورد تا حساسیت منطقه را نسبت به آلودگی ارزیابی کند و به این نتیجه رسید که این آبخوان در سطح حوضه دارای ناپیوستگی است. Biswas و همکاران (۲۰۱۴) آب لایه‌شناسی سفره آب زیرزمینی منطقه‌ای تحت تأثیر آلودگی آرسنیک، منگنز و آهن در بنگال را که دارای اهمیت بالایی از نظر شرب است، به دست آوردند. آن‌ها با استفاده از ۲۹ لاگ زمین‌شناسی در نرم‌افزار Rockwork مدل رسوبات منطقه را هشت لایه برآورد کردند و سپس بر اساس مدل آب لایه‌شناسی، سه آبخوان در منطقه را معرفی کردند. Abdalla و همکاران (۲۰۱۵) مدل استراتیگرافی منطقه Al-Buraimi در کشور عمان را با در نظر گرفتن چهار واحد زمین‌شناسی شامل آبرفت، ترشیری[۴]، آفیولیت[۵] و هواسینا[۶] تهیه نمودند و مقادیر هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره را برای آکیفرهای منطقه برآورد کردند. Ahmed و همکاران (۲۰۱۵) در آبخوان Nubian Sandstone در مصر، روشی را برای مدیریت و ارزیابی آبخوان در این منطقه بیان کردند. آن‌ها از تکنیک مدل‌سازی لیتولوژی سه‌بعدی آبخوان در نرم‌افزار Rockwork استفاده کردند سپس با استفاده از مدل رسوبی، جریان آب زیرزمینی را مدل کردند. در نظر گرفتن لایه‌بندی آبخوان در مدل مفهومی آبخوان امری ضروری می‌باشد که برحسب ساختار زمین‌شناسی منطقه استفاده از لایه‌بندی استراتیگرافی و یا لایه‌بندی لیتولوژی متفاوت است.

این مقاله ضرایب هیدرودینامیکی را در منطقه صرفاً بر حسب جنس مواد تشکیل‌دهنده‌ی زمین‌شناسی تعیین کرده است. بنابراین می‌توان در آبخوان‌ها بدون تحمیل هزینه‌های کلان، پمپاژ ضرایب هیدرودینامیکی را بر حسب جنس مواد تشکیل دهنده آبخوان بدست آورد. به طور کلی نوآوری این مقاله در کاربرد روش می‌باشد.

معرفی مدل‌های سه‌بعدی زمین‌شناسی آبخوان

همان‌طور که ذکر شد امروزه در سطح بین المللی مطالعات لایه‌بندی به منظور شناخت هرچه بیشتر خصوصیات آبخوان‌ها در حال انجام است. بدین منظور محققان با کمك نرم‌افزارهای مختلف سعی

مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار GMS

GMS یا سیستم مدل‌سازی آب زیرزمینی، محیطی جامع و گرافیکی برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی است که توسط Environmental Modeling Research Laboratory از دانشگاه Brigham Young تولید شده است. برای کاربری آسان‌تر نرم‌افزار MODFLOW معمولاً از واسط گرافیکی GMS تهیه شده توسط شرکت AQUAVEO استفاده می‌شود. در GMS انواع مختلف مدل‌ها پشتیبانی می‌گردد و تسهیلات زیادی برای به اشتراک گذاشتن اطلاعات بین مدل‌های گوناگون و انواع داده‌ها در آن فراهم شده است. مدل‌های استراتیگرافی و استوکاستیك[۷] از انواع این مدل‌ها می‌باشند که برای تهیه مدل‌های سه‌بعدی زمین شناسی در نرم‌افزار GMS مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش و ابزار مورد استفاده برای تهیه‌ی مدل‌های سه‌بعدی زمین‌شناسی آبخوان شامل روش Horizen و ابزار T-Progs می‌باشد که در بخش‌های زیر توضیح داده شده است.

• مدل‌سازی سه‌بعدی استراتیگرافی در نرم‌افزار GMS با استفاده از روش Horizen

در این روش با استفاده از اطلاعات لاگ[۸] چاه‌ها، مدل‌های چینه‌شناسی[۹] تهیه می‌شوند. ماژول‌های مورد استفاده برای ساختن مدل‌های سه‌بعدی چینه‌شناسی شامل ماژول Borehole و ماژول Solid، می‌باشد. ماژول Borehole توانایی تصویرسازی لاگ چاه‌ها و همچنین تهیه سه‌بعدی مقاطع عرضی بین لاگ چاه‌ها را دارد. توسط این ماژول مجموعه‌ای از مقاطع عرضی ساخته شده در

مدل‌سازی سه‌بعدی زمین‌شناسی آبخوان در نرم‌افزار Rockworks

شرکت Rockware در سال۱۹۸۳ توسط زمین‌شناسان علاقه‌مند به ایجاد برنامه‌های کاربردی نرم‌افزارهای مقرون به‌صرفه برای رایانه‌های شخصی تأسیس شد. این شرکت نرم‌افزار RockWorks را که به عنوان یکی از قدرتمندترین مجموعه نرم‌افزاری برای تصویرسازی و تحلیل‌های زمین‌شناسی و معدنی می‌باشد، در سال ۱۹۸۴ منتشر کرد (محبوبه‌نیه، ۱۳۸۶). مدیریت گمانه‌های اکتشافی، نقشه‌برداری عمومی و نقشه چاه‌ها، مطالعات رسوبات، آمار، هیدرولوژی، هیدروشیمیایی و ... از توانمندی‌های این

کرده‌اند تا مدل‌های سه‌بعدی زمین‌شناسی را با دقت بالا برآورد کنند. از جمله مدل‌هایی که دارای محیط جامع و گرافیکی بالا بوده، مدل Rockworks و GMS می‌باشد که به طور مکرر به ویژه در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. از این رو در بخش‌های زیر این مدل‌ها به طور خلاصه توضیح داده شده‌اند.

فضای سه‌بعدی نمایش داده می‌شود تا بتواند چینه‌شناسی خاك یك منطقه را به خوبی تصویرسازی کند. به طور کلی تهیه مقاطع عرضی در این نرم‌افزار به دو صورت اتوماتیك و دستی صورت می‌پذیرد. آسان‌ترین روش، روش اتوماتیك است که نرم‌افزار به صورت اتوماتیك مقطع عرضی بین دو لاگ چاه را بدست می‌آورد. زمانی که دو لاگ از لحاظ اطلاعات رسوبات شباهتی با هم نداشته باشند روش دستی برای تهیه مقاطع عرضی مناسب می‌باشد. بعد از تهیه مقاطع عرضی با استفاده از ماژول Borehole، مدل solid با استفاده از روش Horizen تخمین زده می‌شود. Horizen محل اتصال رسوبات در لاگ چاه‌ها می‌باشند. در صورتی که پیچیدگی شدیدی در میان رسوبات آبرفتی موجود باشد، روش Horizen پیشنهاد داده نمی‌شود (Carle، ۱۹۹۹).

• مدل‌سازی سه‌بعدی استوکاستیك در نرم‌افزار GMS با استفاده از ابزار T-Progs

T-Progs مخفف عبارت Transition Probability Geostatistical Software می‌باشد که مجموعه‌ای از برنامه‌های کامپیوتری FORTRAN بوده و ابزاری برای تحلیل زمین‌شناسی آماری است. هدف این ابزار توسعه مدل‌های سیستم‌های زمین‌شناسی ناهمگون و همچنین شبیه‌سازی استوکاستیك یا درهمی از توزیع فضایی متغییرهای قطعی نظیر واحدهای زمین‌شناسی و رخساره‌ها می‌باشد. این ابزار برای تحلیل از زنجیره Markov استفاده می‌کند که مدل تصادفی ساده ولی بسیار قوی از نظر ریاضی و تفسیری می‌باشد. برای مناطقی که پیچیدگی شدید رسوبات آبرفتی دارند، استفاده از این روش پیشنهاد داده می‌شود (Carle، ۱۹۹۹).

نرم‌افزار است. با استفاده از این نرم‌افزار به راحتی می‌توان اطلاعات تحت‌الارضی و سطح‌الارضی شامل سنگ‌شناسی، چینه‌شناسی، برداشت‌های ژئوفیزیکی، آنالیزهای شیمیایی وغیره را به صورت دوبعدی و سه‌بعدی طراحی کرده و نتایج حاصله را به دیگر نرم‌افزارها انتقال داد. نرم‌افزار Rockworks از مجموعه بخش‌هایی شامل نرم‌افزار Strip Log برای ترسیم توالی سنگ‌شناسی، نرم‌افزار Cross Section جهت تطابق ستون چینه‌ای، نرم‌افزار Fence Diagram برای تهیه نمودار نرده‌ای، نرم‌افزار 3D-Modeling برای مدل‌سازی سه‌بعدی تغییرات یک متغیر و نرم‌افزار Stratigraphic Block Model/Diagram جهت تولید نمودار چینه‌ای سه‌بعدی

و نرم‌افزار Lithology Block Model/Diagram جهت تولید نمودارهای لیتولوژی تشکیل شده است. همچنین در حوزه مطالعات آب زیرزمینی نرم‌افزارهای Hydrogeology شامل نرم‌افزار Draw-down/1Well جهت تعیین میزان افت در یک چاه می‌باشد که براساس تئوری Theis کار می‌کند، برنامه‌های هیدروشیمی، برنامه‌های آماری (Statistics Software)، برنامه‌های رسم هیستوگرام و برنامه‌های گوناگون جهت تبدیل مختصات داده‌ها در این نرم‌افزار گنجانده شده است. این نرم‌افزار به طور کلی از دو بخش عمده Borehole Manager و The RockwareUtilitise تشکیل شده است. در Borehole Manager اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، ژئوشیمی و ژئوتکنیک مربوط به گمانه‌ها یا چاه‌های اکتشافی را آنالیز و به صورت نمودار ظاهر می‌کند و در بخش The RockwareUtilitise داده‌ها در صفحه گسترده‌ی data sheet وارد می‌شود و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه این نرم‌افزار قابلیت نمایش گرافیکی بالایی به ویژه در تهیه مدل‌های سه‌بعدی استراتیگرافی و لیتولوژی دارد به طور متمادی در سال‌های اخیر مورد استفاده محققین قرار گرفته است (محبوبه‌نیه، ۱۳۸۶). این مدل‌ها به طور خلاصه در زیر شرح داده شده است.

• مدل‌سازی سه‌بعدی استراتیگرافی

الگوریتم‌های به‌کار برده شده در این نرم‌افزار ستون‌های چینه‌شناسی را به صورت پیوسته‌ای میان‌یابی می‌کنند تا مدل‌های سه‌بعدی چینه‌شناسی را به وجود بیاورند. این الگوریتم‌ها شامل الگوریتم کریجینگ[11]، واریانس معکوس، نزدیکترین نقطه و ... می‌باشد. به طور کلی ابزارهای متعدی به منظور ساخته شدن مدل استراتیگرافی صحیح در این نرم‌افزار گنجانده شده است. برای مثال می‌توان ابزارهای مخفی‌کردن لایه‌های خیلی نازک با تعریف ضریب فیلتر کردن در مدل استراتیگرافی را نام برد.

• تکنیک مدل‌سازی سه‌بعدی لیتولوژی[12]

مدل‌های سه‌بعدی لیتولوژی به عنوان نماینده سه‌بعدی زیرسطحی می‌باشند که قادرند نمایش روابط فضایی رسوبات آبرفتی ببین لاگ‌ها و وجود عدسی‌ها را نشان بدهند. علاوه بر آن، این مدل‌ها پیچیدگی سیستم رسوب را که کنترل‌کننده جریان آب زیرزمینی و انتقال آلودگی هستند، نمایش می‌دهند. میان‌یابی بین لاگ‌های موجود، پرکننده فواصل تعریف نشده بین آن‌ها می‌باشد و افزایش این لاگ‌ها در سطح آبخوان بر صحت این مدل‌ها می‌افزایند. نتایج مدل‌های سه‌بعدی نماینده واقعی سیستم آبخوان در مدل جریان آب زیرزمینی سه‌بعدی می‌باشد (Ahmed، ۲۰۰۹). بنابراین شناخت کافی از رسوبات سیستم آبخوان در برآورد مناسبی از ضرایب هیدرودینامیکی کمک خواهد کرد. مدل‌سازی لیتولوژی تمایل دارد تا پیچیدگی چهارچوب آب لایه‌شناسی منطقه مورد مطالعه و تغییرات ضخامت و روند آن و همچنین ناهمگنی سیستم آبخوان را نشان دهد. تکنیک مدل‌سازی سه‌بعدی لیتولوژی آبخوان کمک شایانی به شناسایی خصوصیات آبخوان و تخمین جریان آب زیرزمینی با دقت بالا می‌کند. این تکنیک بر اساس مفهوم (Solid Modeling) در بسته نرم‌افزاری Rockworks استفاده شده است، به طوری که فرآیند گریدبندی سه‌بعدی صحیحی را مورد استفاده قرار می‌دهد (Ahmed، ۲۰۰۹). مدل‌های solid مدل‌های سه‌بعدی هستند که در نرم‌افزار Rockworks از مجموعه داده‌های X(Elevation), Y(Northing) ,Z(Easting) و G که یک مقدار قابل اندازه‌گیری (نوع رسوبات و یا غیره) می‌باشد، ساخته می‌شوند (محبوبه‌نیه، ۱۳۸۶). از این رو می‌توان گفت مدل‌های رسوبات آبرفتی مدل‌های سه‌بعدی solid هستند و زمانی که منطقه‌ای پراکندگی شدید رسوبات آبرفتی را دارد، از این نوع مدل‌سازی استفاده می‌شود. در نرم‌افزار Rockworks16، از روش Lateral Blending horizontally برای میان‌یابی داده‌های رسوبات لاگ چاه‌ها استفاده می‌شود. این روش مقدار گره هر Voxel (سلول) را بر اساس میان‌یابی تصادفی از یک سوم منطقه مورد مطالعه که به صورت شعاعی در اطراف گره در نظر می‌گیرد، محاسبه می‌کند.

- تهیه مدل‌سازی لیتولوژی:

مراحل تهیه مدل‌های سه‌بعدی لیتولوژی شامل ۱- جمع‌آوری اطلاعات موجود نظیر مطالعات زمین‌شناسی و لاگ چاه‌های بهره‌برداری، مشاهده‌ای و اکتشافی، مطالعات ژئوفیزیک و مقاطع هیدروژئولوژی تهیه شده از مطالعات ژئوفیزیک و استفاده از نظرات کارشناسی حفاران خبره ۲- تهیه برش‌های عرضی ۳- تهیه مدل لیتولوژی می‌باشد (Wang، ۲۰۱۲ و Ahmed، ۲۰۰۹) که در بخش‌های زیر توضیح داده شده است.

- تهیه برش‌های عرضی:

به منظور بررسی و قضاوت مهندسی ساده‌تر برش‌های آبرفتی متفاوتی در طول آبخوان با استفاده از نرم‌افزار Rockworks مدل می‌شود تا دید مناسب‌تری از نحوه لایه‌بندی آبخوان بدست آید که در نهایت منجر به تخمین دقیق‌تر مدل سه‌بعدی رسوبی شود. این بسته نرم‌افزاری به علت کاربر دوست بودن، توانایی‌های زیاد آن در مدیریت داده‌های لاگ چاه و همچنین توانایی در تهیه روش‌های متعدد در ساختن مدل‌های رسوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ahmed، ۲۰۰۹). نرم‌افزار Rockworks، از روش Lateral Blending Horizontally برای میان‌یابی داده‌های رسوبات لاگ چاه‌ها استفاده می‌کند. این روش مقدار هر گره را بر اساس میان‌یابی تصادفی از یک سوم منطقه مورد مطالعه که به صورت شعاعی در اطراف گره در نظر می‌گیرد، محاسبه می‌کند (Rockware، ۲۰۱۶). همانطور که در بخش قبلی ذکر شد، بعد از تهیه مقاطع عرضی در آبخوان با استفاده از تکنیک مدل‌سازی لیتولوژی مدل سه‌بعدی لیتولوژی برآورد می‌شود.

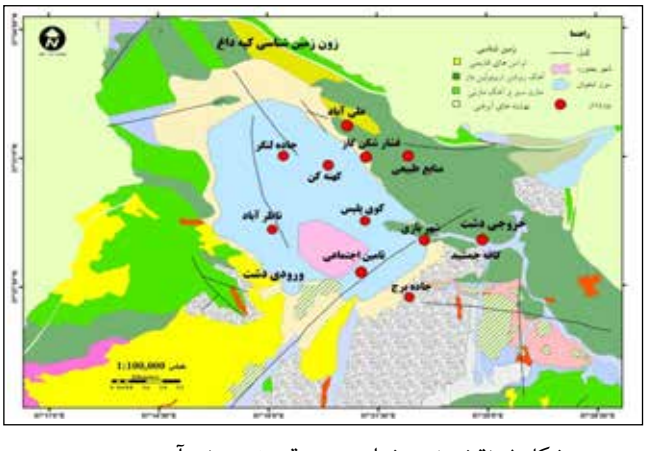
کاربرد مدل‌سازی لیتولوژی

مدل‌های لیتولوژیک برای مدل‌سازی جریان آب بهتر از مدل های یک لایه و دولایه هستند. امروزه مدل‌های رسوبی تولید شده به منظور ساختن مدل Modflow و دوری از فرضیات چند لایه بودن آبخوان، ضخامت، توپوگرافی بالا و پایین لایه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Ahmed، ۲۰۰۹). زمین‌شناسی پیچیده آبخوان‌های آبرفتی نظیر آبخوان بجنورد واقع در استان خراسان شمالی زمینه ایجاد مدل‌های لیتولوژی می‌شود که کمک به توسعه مدل‌های سه‌بعدی موجود می‌کند که بر اساس واحدهای سلولی (Voxel) بوده و از داده‌های لاگ چاه‌های موجود در منطقه استفاده می‌کند. به منظور چگونگی تهیه این مدل‌ها و همچنین کاربرد امروزی این مدل‌ها در مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی نحوه تهیه مدل لیتولوژی آبخوان بجنورد با استفاده تکنیك مدل‌سازی لیتولوژی در بخش‌های زیر شرح داده می‌شود.

• جمع آوری اطلاعات به منظور تهیه مدل لیتولوژی آبخوان بجنورد

- زمین‌شناسی منطقه

به‌طور کلی بخش اعظم محدوده مطالعاتی بجنورد در زون زمین‌شناسی کپه داغ و تنها بخشی از ارتفاعات جنوبی این محدوده در زون بینالود قرار گرفته است. رخساره این واحدهای رسوبی متنوع می‌باشد. بخشی از ارتفاعات جنوبی محدوده مطالعاتی بجنورد (کوه آلاداغ) در زون زمین‌شناسی بینالود قرار دارد. شکل هندسی مخزن آب زیرزمینی به صورت یک ناودیس است که ۶۰ درصد آن را شهر بجنورد دربر می‌گیرد. پستی و بلندی‌ها یا گودی‌های این ناحیه که در این دوره تا اوایل دوران سوم به وجود آمده، توسط کنگلومرای[۱۲] اوایل دوره نئوژن[۱۳] با ضخامت بسیار زیاد پر شده است و سنگ کف لایه‌های آبرفتی را تشکیل داده‌اند. با این وجود گسل‌ها و شکستگی‌ها این منطقه رابط‌های آبی خوبی بین ارتفاعات و آبرفت‌های دشت می‌باشند. آبخوان آبرفتی بجنورد از نهشته‌های کواترنری تشکیل شده است که این نهشته‌ها نیز شامل واحدهای آبرفتی Qt2 و Qal می‌باشد. واحد آبرفتی Qt2 شامل پادگانه‌ها و مخروطه‌افکنه‌های جوان و دشت‌های آبرفتی می‌باشد که بخش اصلی آبخوان را در خود جای داده است و واحد آبرفتی Qal هم شامل آبرفت‌های جوان بستر رودخانه‌ها و مسیل‌ها می‌باشد. شمال دشت بجنورد، ارکان، جنوب زندان و شمال پاسگاه پلیس‌راه ضخامت رسوبات آبرفتی و واریزه‌ای نسبتاً کم بوده و بلافاصله تشکیلات سنگی ظاهر می‌گردند که عمدتاً از سازندهای آهکی ـ آهکی مارنی ـ مارن و کنگلومرا می‌باشد. در این مناطق تعدادی گسل وجود دارد که عملکرد آن‌ها باعث جابجایی و تغییراتی در تشکیلات زمین‌شناسی گردیده و ضمن به وجود آوردن نواحی نسبتاً خرد شده در مجاورتشان، باعث شده‌اند تا رسوبات مارنی و کنگلومرایی در برابر تشکیلات آهکی قرار بگیرند و ظاهراً مناطق نسبتاً مناسبی را به لحاظ آب‌های زیرزمینی به وجود آوردند (مهندسین مشاور هیدروتک توس، ۱۳۹۱) (شکل۱).



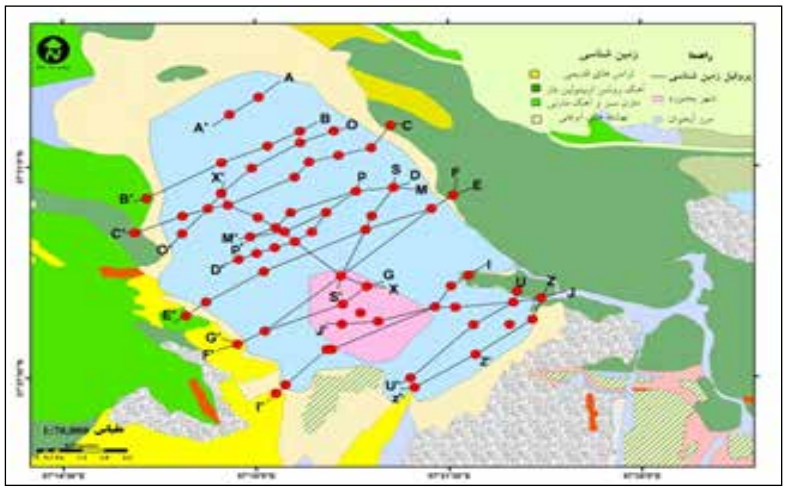
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی و موقعیت حوضه آبریز بجنورد

- ژئوفیزیک آبخوان بجنورد

اکثر روش‌های ژئوفیزیکی، بیانگر توضیح ساختمان زمین و تعیین خصوصیت فیزیکی سنگ‌ها می‌باشد. با استفاده از روش‌های ژئوفیزیک سطحی می‌توان به بررسی اطلاعاتی نظیر عمق، ضخامت، گسترش عمودی آبخوان‌ها در تشکیلات رسوبی، ضخامت مناطق هوازده و شکسته‌شده، عمق سنگ‌کف، عمق سطح آب زیرزمینی، وضعیت ساختمانی، چینه‌شناسی زمین و پتانسیل آبخوان‌ها پرداخت. برای به دست آوردن اطلاعات دقیق‌تر باید نتایج حاصل از بررسی‌های ژئوفیزیک با نتایج حاصل از چاه‌های اکتشافی و زمین‌شناسی تلفیق شود. در این مطالعه از ۱۳ مقطع هیدروژئولوژی تهیه شده و از ۶۶ نقطه آزمایشات ژئوفیزیک در سطح دشت استفاده شده است که بر اساس آن چهار نوع لایه کلی در آبخوان بجنورد بیان شده است. لایه‌های ذکر شده شامل قشر سطحی که رسوبات خشک دانه‌ریز و یا دانه‌بندی متغییر را تشکیل می‌دهد، رسوبات آبرفتی که شامل رسوبات با دانه‌بندی متغییر است که پتانسیل بالایی را برای ذخیره آب دارند و لایه میانی که لایه نشتی نیمه تراوا بیان شده و تشکیلات سنگ کف مقاوم می‌باشد که از سنگ‌هایی با جنس کنگلومرایی، ماسه سنگ، مارن و آهک‌های تیرگان است (مهندسین مشاور آبکاو شرق، ۱۳۹۰).

• تهیه برش‌های عرضی آبخوان بجنورد

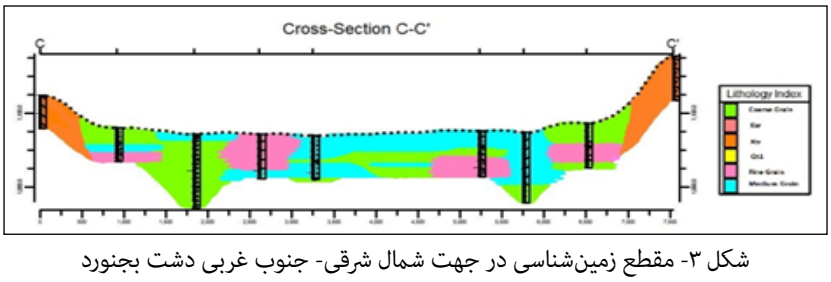
با بررسی مطالعات ژئوفیزیک و لاگ‌های حفاری موجود و نیز با توجه به گزارشات موجود در محدوده مورد مطالعه، آبخوان بجنورد چند لایه می‌باشد که در این شرایط دامنه تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی در سطح گستره آن متناظر با جنس مصالح تشکیل‌دهنده آبخوان قابل ملاحظه می‌باشد (مهندسین مشاور هیدروتک توس، ۱۳۹۱). بنابراین با شناخت لایه‌بندی آبخوان تعبیر فیزیکی مناسبی از هندسه مخزن بدست خواهد آمد که هزینه مطالعات تکمیلی پیشنهاد شده را در بر نخواهد داشت و به تبع آن می‌توان ضرایب هیدرودینامیک را با دقت بالاتری تخمین زد. در این پژوهش به منظور لایه‌بندی آبخوان از تمامی اطلاعات در دسترس که شامل مطالعات ژئوفیزیک، مطالعات زمین‌شناسی، ۵۶ لاگ چاه، میزان آبدهی چاه‌ها و تجربیات زمین شناسان خبره می‌باشد، استفاده شده است. بنابراین با تلفیق اطلاعات مذکور مقاطع متعددی در سطح آبخوان تهیه شده و مطابق با نوع رسوبات لاگ‌ها، سه نوع رسوب درشت‌دانه، متوسط‌دانه و ریزدانه به عنوان طبقه‌بندی بافت آبرفت منطقه در نظر گرفته شد. از این رو در ۱۵ مقطع متفاوت، برش‌های لیتولوژی با استفاده از نرم‌افزار Rockworks بدست آمد. شکل (۲) پراکندگی چاه‌های دارای لاگ و همچنین برش‌های عرضی لیتولوژی را در سطح آبخوان بجنورد نشان می‌دهد.



شکل ۲- پراکندگی چاه‌های دارای لاگ و برش‌های عرضی لیتولوژی در سطح آبخوان بجنورد

با توجه به این نکته که سطح آب زیرزمینی به طور کلی در سطح آبخوان بالا است، عمق اکثر چاه‌های حفر شده تقریباً کمتر از ۱۰۰ متر می‌باشد. بنابراین اطلاعات لاگ چاه‌ها به منظور مدل‌سازی در عمق هندسه آبخوان وارد نرم‌افزار شد و مقاطع لیتولوژی ترسیم شدند. تعداد ۱۰ چاه مجازی در اطراف دشت در سه نوع سازند نفوذناپذیر Ktr، Ksr و Qt1 که بافت‌های خاک نفوذناپذیر اطراف آبخوان هستند، به منظور نشان دادن هرچه بهتر برش‌های لیتولوژی در نظر گرفته شدند که به ترتیب شامل آهک روشن اربیتولین‌دار (Light Orbitolina Limestone)، مارن سبز و آهک مارنی و آهک اربوتولین‌دار (Green Marl, MarlyLimestone and Orbitolina Limestone) و تراس‌های قدیمی (Older terraces) می‌باشند. به طور مثال شکل (۳) نمونه‌ای از مقاطع عرضی زمین‌شناسی تهیه شده از آبخوان بجنورد را نشان می‌دهد.

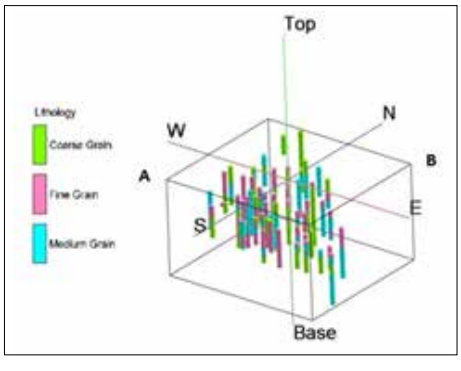
با توجه به این شکل و همچنین بقیه مقاطع به دست آمده، می‌توان گفت آبخوان بجنورد، آبخوانی آزاد است که به طور کلی عمق اولیه سطح خاک را رسوبات ریزدانه تشکیل داده که ضخامت آن در طول آبخوان متغیر است. در عمق‌های میانی بیشتر رسوبات متوسط‌دانه و درشت‌دانه دیده می‌شود که بیانگر پتانسیل بالای آبخوان برای ذخیره آب می‌باشد. همچنین ضخامت آبخوان از موقعیتی به موقعیت دیگر فرق می‌کند، نتایج به دست آمده در این تحقیق نیز گواه این مدعی است.



شکل ۳- مقطع زمین‌شناسی در جهت شمال شرقی- جنوب غربی دشت بجنورد

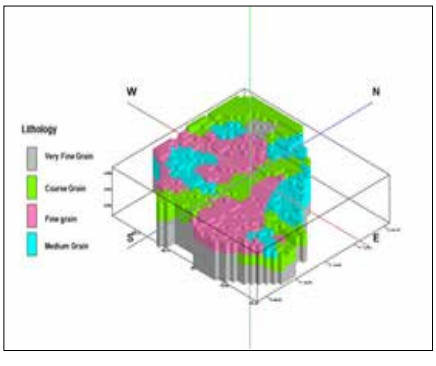
• مدل‌سازی لیتولوژی سیستم آبخوان بجنورد

بررسی رسوبات لاگ چاه‌ها نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه از چهار نوع رسوب درشت‌دانه (Gravel یا Sand)، متوسط‌دانه (Sand یا Gravel)، ریزدانه (Silt یا clay) و خیلی‌ریزدانه (بافت کم‌نفوذپذیر کف آبخوان) تشکیل شده است. بافت کم‌نفوذپذیر کف آبخوان به منظور حل مشکل تهیه مدل رسوبی به عنوان بافت خیلی‌ریزدانه در انتهای لاگ چاه‌ها اضافه شد. رسوباتی که با گذر زمان در این منطقه انباشته شدند سبب پیچیدگی رسوب حوضه شده و سیستم آبخوان بجنورد را ناهمگن کرده است. شکل (۴) نمایی سه‌بعدی از قرار گرفتن بافت‌های خاك متفاوت در آبخوان بجنورد را نشان می‌دهد. نمایش سه‌بعدی لاگ چاه‌ها در شکل (۴) تغییرات شدید بافت خاك را نشان می‌دهد؛ بنابراین این آبخوان نیازمند لایه‌بندی رسوبی است.



شکل ۴- نمایش سه‌بعدی از لاگ‌های چاه در آبخوان بجنورد

در این پژوهش سعی شده است به منظور تدقیق مدل سه‌بعدی لیتولوژی در نرم‌افزار Rockwork از نقشه رقومی ارتفاعی ۹۰متری SRTM-DEM که هم‌خوانی بیشتری با توپوگرافی سطح زمین دارد به عنوان مبنای تراز ارتفاعی زمین، مورد استفاده قرار گیرد (Izady و همکاران، ۲۰۱۴). دقت مدل رسوب ۲۵۰ m(X) × ۲۵۰ m(Y) × ۳۰ m(Z) بوده و نتایج گسسته‌سازی مدل در نرم‌افزار Rockworks شامل ۴۳ گره (Node) در محور X، ۳۷ گره در محور Y و ۴ گره در محور Z می‌باشد. در نتیجه تعداد کل گره مدل solid، ۲۵۴۵۶ بوده است (با در نظر گرفتن این حقیقت که حجم هر سلول، ۱۸۷۵۰۰۰ متر مکعب است). در شکل (۵) برآیند مدل لیتولوژی به اندازه مرز آبخوان به دست آمده نشان داده شده است که ناهمگنی رسوبات در سرتاسر آبخوان را به خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۵- مدل‌سازی سه‌بعدی لیتولوژی سیستم آبخوان بجنورد

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمّیت ضرایب هیدرودینامیکی در شناسایی پتانسیل منابع آب زیرزمینی، مطالعات متعددی در راستای شناخت لایه‌بندی آبخوان‌ها در حال انجام است. تهیه مدل‌های زمین‌شناسی آبخوان‌ها منجر به شناخت بیشتر آن‌ها می‌شود که خود تأثیر مهمی در برآورد خصوصیات آبخوان و رفتار آبخوان دارد. با توجه به معرفی روش‌های مختلف لایه‌بندی آبخوان‌ها می‌توان گفت در آبخوان‌های آبرفتی که تغییرات شدید رسوبات مشاهده می‌شود، تهیه مدل‌های استراتیگرافی مناسب نمی‌باشد و بهتر است برای لایه‌بندی آبخوان‌ها از تکنیك مدل‌سازی سه‌بعدی لیتولوژی یا ابزار T-Progs استفاده شود. با توجه به گستردگی استفاده از تکنیك مدل‌سازی لیتولوژی نرم‌افزار Rockworks در سال‌های اخیر، در این پژوهش نیز از این تکنیك به منظور لایه‌بندی آبخوان آبرفتی بجنورد استفاده شده است. از این رو تهیه مدل سه‌بعدی لیتولوژی آبخوان بجنورد با تلفیق مطالعات ژئوفیزیک، زمین‌شناسی و لاگ چاه‌ها با استفاده از تکنیک مدل‌سازی سه‌بعدی زمین‌شناسی در نرم‌افزار Rockworks16 صورت پذیرفت. نتایج بدست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که چهار طبقه‌بندی (درشت‌دانه، متوسط‌دانه و ریزدانه و خیلی ریزدانه) رسوبات سیستم آبخوان بجنورد، ترتیبی تکراری از چهار نوع رسوب را در مدل‌سازی ارائه داده است که دارای تغییرات فاصله‌ای معنی‌داری در محور عمودی است که عواملی نظیر ضخامت طبقات مختلف و همچنین ترازهای متفاوت در بالا و پایین هر لایه در رخداد آن‌ها تأثیرگذار است. همچنین با توجه به این که وجود ناهمگنی و عدسی‌ها در سیستم آبخوان سبب ایجاد تغییراتی در مقادیر هدایت هیدرولیکی رسوبات درشت‌دانه تا خیلی ریزدانه می‌شود، پیشنهاد می‌شود با استفاده از مدل لیتولوژی، مدل جریان آب زیرزمینی در نرم‌افزار GMS تهیه و ضرایب هیدرودینامیکی با توجه به جنس مصالح تشکیل دهنده آبخوان برآورد شود. همچنین تهیه مدل سه‌بعدی زمین‌شناسی آبخوان با استفاده از ابزار T-Progs تهیه و سپس جریان آب زیرزمینی مدل‌سازی شود و با نتایج تخمین‌های ضرایب هیدرودینامیکی بدست آمده از مدل لیتولوژی مقایسه شود.

پی‌نوشت

1- Stratigraphy
2- Lithology
3- Aqiutard
4- Tertiary
5- Ophiolite
6- Hawasina
7- Stochastic
8- Borehole
9- Stratigraphy
10- Kiriging
11- Lithilogy
12- Congolomarate
13- Neogene

منابع

بانژاد، ح.، محب زاده، ح.، قبادی، م. و حیدری، م. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال آلودگی در آب های زیرزمینی مطالعه موردی: آبخوان دشت نهاوند. نشریه دانش آب و خاک. ۲۳(۲): ۴۳-۵۷.

شهسواری، ا. و خدائی، ک. ۱۳۸۴. تهیه مدل جریان آب زیررزمینی آبخوان دشت بهبهان با استفاده از GIS. مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران. دانشگاه تربیت معلم تهران.

قبادیان، ر.، فتاحی، ع.، مجیدی، ص. و زارع، م. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی سفره آب زیرزمینی دشت میان دربند کرمانشاه با استفاده از مدل GMS. اولین همایش ملی چالش‌های منابع آب و کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان اصفهان.

محبوبه‌نیه، م. ۱۳۸۶. راهنمای جامع و کاربردی نرم‌افزار Rockworks. کتاب آراد. تهران.

مهندسین مشاور آبکاو شرق. ۱۳۹۰. مطالعات ژئوفیزیک دشت بجنورد. شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی.

مهندسین مشاور هیدروتک توس. ۱۳۹۱. گزارش مدل ریاضی آب زیرزمینی دشت بجنورد. شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی.

Abdalla O., Izady A. and Kudoda A. 2015. Conceptual-based assessment of ophiolite hard-rock groundwater recharge in an arid Al-Buraimi region. Sultan Qaboos University Muscat, Oman.

Ahmed A.A. 2009. Using lithologic modeling techniques for aquifer characterization and groundwater flow modeling of the Sohag area, Egypt. Hydrogeology Journal 17(5): 1189-1201.

Biswas A. Bhattacharya P. Mukherjee A M. Nath B. Alexanderson H. Kunda A.K. Chatterjee D. and Jacks G. 2014. Shallow hydrostratigraphy in an arsenic affected region of Bengal Basin: Implication for targeting safe aquifers for drinking water supply. Science of the Total Environment, 485–486.

Carle S. F. 1999. T-PROGS: Transition Probability Geostatistical Software, Hydrologic Sciences Graduate Group. University of California, Davis.

Cioco R.W. 2012. Hydrostratigraphy of the Shallow Aquifer in the Niles Cone Groundwater Basin. M.S dissertation. San Jose State University. USA.

Basic studies Department of Water Resources. 1386. Extension proposed of the ban on plain Bojnourd Report. Regional Water Company in North Khorasan.

Ahmed H A. Elasaeed G. Nagaty M. and Eman A. 2015. Groundwater flow modeling in a Nubian sandstone aquifer, South Western Desert, Egypt. Journal of Scientific Research & Reports, 6(4):243-254. 14.Izady A. Davary K. Alizadeh A. Ziaei A.N. Alipoor. Joodavi A. Brusseau M. 2014. A framework toward developing a groundwater conceptual model. Arab J Geosci, 7: 3611–3631.

Mahmoudpour M. Khamehchiyan M. Nikudel M.R and Ghassemi M.R. 2013. Characterization of regional land subsidence induced by groundwater withdrawals in Tehran, Iran. jGeope 3: 49-62.

Rockware, 2016. Retrieved February 15, 2016, from http://help.rockware.com/rockworks17/WebHelp/solid_model_lithoblend.htm. 18.

Rockware glossary. 2006. Retrieved February 15, 2016, from: http://help.rockware.com/rockworks17/WebHelp/glossary.htm.

Wang Z. 2012. Characterization of the Stream-Aquifer Hydrologic Connection in the Elkhorn River Basin. Dissertations & Theses in Natural Resources. University of Nebraska-Lincoln.

Yousefi Rad M. 2012. Hydrostratigraphy of Haftad Ghole Karst, Markazi province, Iran, optimized by Fuzzy Logic. Geofísica Internacional, 51(4): 365-376.