

## مدل سازی کمی آبخوان بجنورد با تأکید بر لایه بندی آن

مینا تاج آبادی<sup>۱</sup>، علی نقی ضیایی<sup>۲</sup>، کامران داوری<sup>۳\*</sup> و عزیزالله ایزدی<sup>۴</sup>

### چکیده

هدف از این پژوهش، مدل سازی کمی آبخوان بجنورد با تأکید بر لایه بندی آن است. در این مطالعه، مدل سه بعدی لیتولوژی آبخوان با استفاده از تکنیک های مدل سازی سه بعدی در نرم افزار Rockworks، با اطلاعاتی مانند لاگ چاه های بهره برداری و مطالعات ژئوفیزیک به دست آمده است. مدل لیتولوژی به دست آمده آبخوان که شامل چهار گروه بافت خاک درشت دانه، متوسط دانه، ریزدانه و خیلی ریزدانه است؛ به صورت چهار لایه با ضخامت ۳۰ متر به نرم افزار GMS وارد و در شرایط ماندگار اجرا شد و مجذور میانگین مربعات خطا بعد از کالیبراسیون به مقدار ۰/۷۹۴ متر رسید؛ به گونه ای که مجذور میانگین مربعات خطا، نسبت به مدل تک لایه که دارای مقدار ۰/۸۵۲ است، بهبود یافت. مقاطع عرضی به دست آمده بیانگر وجود عدسی ها و ناهمگنی شدید رسوبات آبرفتی آبخوان بجنورد می باشد که در صحت تخمین مقادیر هدایت هیدرولیکی بسیار تأثیرگذار است. مقادیر هدایت هیدرولیکی در شرایط ناهمگنی آبخوان به صورت موضعی و با توجه به جنس های مختلف موجود با مقادیر ۸/۱، ۶/۷، ۱/۹ و ۰/۴ متر بر روز به ترتیب برای بافت خاک درشت دانه، متوسط دانه، ریزدانه و خیلی ریزدانه برآورد شد.

**واژه های کلیدی:** بجنورد، هدایت هیدرولیکی، مدل لیتولوژی، Rockworks، GMS.

ارجاع: تاج آبادی م. ضیایی ع. ن. داوری ک. و ایزدی ع. ۱۳۹۸. مدل سازی کمی آبخوان بجنورد با تأکید بر لایه بندی آن. مجله پژوهش آب ایران. ۳۴: ۵۰-۳۹.

۱- کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه فردوسی مشهد.  
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.  
۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.  
۴- دکتری آبیاری زهکشی، مرکز تحقیقات آب، دانشگاه سلطان قابوس عمان.

\* نویسنده مسئول: [davary.stu@gmail.com](mailto:davary.stu@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۳۰

## مقدمه

آبخوان بجنورد، از منابع حیاتی تأمین‌کننده آب در شهرستان بجنورد واقع در استان خراسان شمالی است. عمق ناچیز سطح آب زیرزمینی این آبخوان و نقص شبکه فاضلاب شهری سبب افزایش ارتفاع مطلق سطح آب زیرزمینی شده و این امر، مشکلاتی را برای ساکنان این شهر به وجود آورده است (بی‌نام، ۱۳۸۸). ضروری است که تا حد امکان، وضعیت کنونی و آینده آبخوان آبرفتی بجنورد شناسایی و راهکارهای مدیریتی برای رفع مشکلات احتمالی در نظر گرفته شود. مدل عددی آب زیرزمینی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای آزمون اثر تصمیمات مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد؛ ولی معمولاً کمبود و یا نقص اطلاعات در خصوص مشخصات هیدرولیکی آبخوان، باعث محدودیت استفاده این مدل‌ها می‌شود. به نظر می‌رسد آگاهی از شیوه لایه‌بندی مخزن دشت بجنورد و برآورد مناسب‌تری از ضرایب هیدرودینامیک آن می‌تواند به اتخاذ تصمیمات مناسب‌تر در مقابله با مشکلات موجود کمک کند. از این‌رو هدف از انجام این پژوهش، مدل‌سازی کمی آبخوان بجنورد با در نظر گرفتن لایه‌بندی آن است. بی‌نام (۱۳۹۲) و الطافی دادگر (۱۳۹۱) مدل آب زیرزمینی دشت بجنورد را با استفاده از نرم‌افزار GIS به‌صورت تک‌لایه مدل کردند؛ اما بر طبق گزارش‌های موجود آبخوان دشت بجنورد چندلایه است (بی‌نام، ۱۳۹۲). امروزه تحقیقات مختلفی در سرتاسر دنیا در رابطه با لایه‌بندی آبخوان‌ها، به‌منظور آگاهی بیشتر از شرایط پیچیده حاکم بر هیدرولیک آب در حال انجام است. در ایران، شهسواری و خدائی (۱۳۸۴) با تهیه لایه‌بندی استراتیگرافی، جریان آب زیرزمینی را در دشت بهبهان مدل کردند و پارامترهای هیدرولیکی آبخوان را به‌دست آوردند. یوسفی راد (۲۰۱۲) با استفاده از منطق فازی، لیتولوژی<sup>۱</sup> منطقه آب لایه‌شناسی کارست قله‌ی هفتاد در استان مرکزی را به هفت طبقه تقسیم‌بندی کرد و بهترین منابع آب کارست را معرفی کرد. بانزاد و همکاران (۱۳۹۱) لایه‌بندی استراتیگرافی دشت نهاوند همدان را با نرم‌افزار GIS انجام دادند و جریان آب زیرزمینی را مدل کردند. قبادیان و همکاران (۱۳۹۲) با تعریف چهار نوع بافت خاک مدل استراتیگرافی دشت میان‌دربند کرمانشاه را تهیه و جریان آب زیرزمینی را با

استفاده از GIS مدل کردند. محمودپور و همکاران (۲۰۱۳) با تهیه استراتیگرافی، واحدهای آبخوان و آکیوتارد آبخوانی در جنوب غربی تهران را شناسایی کردند. بنابراین می‌توان گفت مطالعات مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در حال انجام در ایران فقط لایه‌بندی استراتیگرافی است که در آبخوان‌های آبرفتی که دارای پیچیدگی رسوبات است، این نوع لایه‌بندی گزینه مناسبی نیست؛ چرا که به دلیل ناهمگنی شدید رسوبات در این آبخوان‌ها با اطلاعات لاگ‌ها نمی‌توان تصویری مناسب از لایه‌بندی آبخوان به‌دست آورد. موکهرجی و همکاران (۲۰۰۷) مدل لیتولوژی بنگال غربی را با استفاده از نرم‌افزار Rockwork به‌دست آوردند، سپس با استفاده از آن جریان آب زیرزمینی را در نرم‌افزار Modflow مدل کردند. وانگ (۲۰۱۲) مدل لیتولوژی هفت لایه حوضه رودخانه Elkhorn آمریکا را با استفاده از نرم‌افزار Rockwork برآورد کرد و سپس نتایج را به نرم‌افزار Modflow فراخوانی و میزان تخلیه آب زیرزمینی را محاسبه کرد. کیوکو (۲۰۱۲) در آبخوانی در ایالت کالیفرنیا لایه‌بندی آبخوان را با کمک نرم‌افزار Rockwork به‌دست آورد و نشان داد که این آبخوان در سطح حوضه دارای ناپیوستگی است. بیسواز و همکاران (۲۰۱۴) مدل لیتولوژی هشت لایه منطقه‌ای در بنگال را با استفاده از نرم‌افزار Rockwork برآورد کردند و سپس براساس مدل آب لایه‌شناسی، سه آبخوان در منطقه را معرفی کردند. حسن و همکاران (۲۰۱۵) در آبخوانی در مصر از تکنیک مدل‌سازی لیتولوژی سه‌بعدی آبخوان در نرم‌افزار Rockwork استفاده کردند و با استفاده از آن، جریان آب زیرزمینی را در نرم‌افزار Modflow مدل و مدل را برای تغییرات کیفیت شبیه‌سازی کردند. براساس مطالعات صورت گرفته در کشورهای دیگر می‌توان چنین گفت که در آبخوان‌های آبرفتی استفاده از ابزارهای تهیه مدل‌های لیتولوژی به‌منظور تخمین دقیق‌تری از ضرایب هیدرودینامیکی امری ضروری است.

## مدل مفهومی

یک مدل مفهومی مطلوب، تأثیر و نقش به‌سزایی در عملکرد مدل ریاضی دارد. همچنین توسعه یک مدل مفهومی صحیح، مهم‌ترین گام در فرایند مدل‌سازی عددی آب زیرزمینی است (ایزدی و همکاران، ۲۰۱۴). با توجه به

چاه‌های اکتشافی و زمین‌شناسی تلفیق شوند. در این مطالعه از سیزده مقطع هیدروژئولوژی تهیه شده از ۶۶ نقطه آزمایش ژئوفیزیک در سطح دشت استفاده شده است که براساس آن چهار نوع لایه کلی در آبخوان بجنورد بیان شده است. لایه‌های ذکر شده شامل ۱- قشر سطحی، ۲- رسوبات آبرفتی، ۳- لایه میانی که لایه نشستی نیمه‌تراوا بیان شده و ۴- تشکیلات سنگ کف مقاوم است (بی‌نام، ۱۳۹۰).

### مرز مدل‌سازی و چاه‌های مشاهده‌ای

با توجه به این که ورودی‌های آب سطحی در جنوب و خروجی دشت در قسمت جنوب شرقی آبخوان وجود داشت، قسمت‌هایی از مرز که در این مکان‌ها واقع شده بود، برای مدل عددی مرز با هد مشخص (دریغله) در نظر گرفته شد. از آنجا که در شمال آبخوان اطلاعات مربوط به چگونگی جریان‌های سطحی و زیرزمینی و تأثیرگذاری آن‌ها بر آبخوان اندک بود، مرز تا محل پیرومترهای علی‌آباد و لنگر پیش آورده به‌عنوان مرز مدل‌سازی بدون جریان (نیومن) در مدل عددی به کار گرفته شد (شکل ۱). همچنین به‌منظور اندازه‌گیری تغییرات سطح آب زیرزمینی از داده‌های یازده چاه مشاهده‌ای در سطح دشت استفاده شده که مقادیر سطح آب آن‌ها به‌عنوان بار آبی اولیه مدل در نظر گرفته شده است (جعفری، ۱۳۹۱).

### میزان تخلیه و تغذیه

براساس نتایج آخرین آماربرداری انجام شده در سال ۱۳۸۹، ۳۳۰ حلقه چاه داخل محدوده آبخوان آبرفتی مطالعه شد که عمق‌های متفاوتی داشتند؛ لذا در این پژوهش بر حسب عمق چاه‌ها، نوع لایه‌ای که چاه در آن قرار دارد، تعیین شد و مشخصات چاه‌ها به‌منظور مدل‌سازی لایه‌بندی بافت خاک به مدل معرفی شده است. همچنین با توجه به اینکه میزان تغذیه مورد استفاده در مدل مفهومی مدل‌سازی تک‌لایه با استفاده از بیلان توزیعی به‌دست آمده، این مقدار برآورد شده در این پژوهش هم استفاده شده است (جعفری، ۱۳۹۱).

### مدل‌سازی سه‌بعدی زمین‌شناسی آبخوان

مدل‌های سه‌بعدی زمین‌شناسی به‌عنوان نماینده سه‌بعدی زیرسطحی هستند که قادرند روابط فضایی لیتولوژی بین

اینکه بیشترین عدم قطعیت موجود در مدل‌سازی آب زیرزمینی متأثر از عدم قطعیت ناشی از تعریف و تفسیر مدل مفهومی آب زیرزمینی است و همچنین با توجه به تنوع رسوبات آبخوان بجنورد به نظر می‌آید نمی‌توان این آبخوان را تک‌لایه فرض کرد؛ بنابراین به‌منظور کاهش عدم قطعیت‌ها و همچنین توسعه و بهبود مدل مفهومی، سعی شده است تا عوارض طبیعی تأثیرگذار بر سیستم آب زیرزمینی به ویژه لایه‌بندی بافت خاک آبخوان شناسایی و به مدل معرفی شود. این عوامل تأثیرگذار شامل مطالعات زمین‌شناسی، مقاطع ژئوفیزیک، مرز مدل‌سازی، استفاده از داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای، تعیین میزان تغذیه و تخلیه بوده که به طور کامل در ذیل شرح داده شده است.

### موقعیت و زمین‌شناسی منطقه

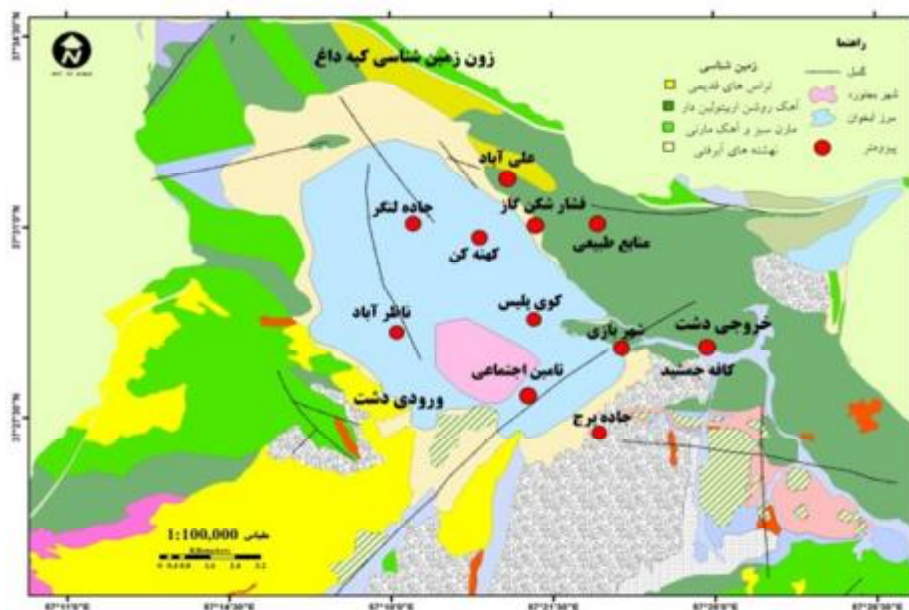
منطقه مورد مطالعه در این پژوهش آبخوان بجنورد با مساحت ۶۵/۲ کیلومتر مربع یکی از کوچک‌ترین آبخوان‌های آبرفتی در استان خراسان شمالی است. خروجی این دشت در بخش شرقی آن و در محل روستای بابامان می‌باشد (جعفری، ۱۳۹۱). زمین‌شناسی و موقعیت حوضه آبریز بجنورد در شکل ۱ ارائه شده است. در این پژوهش به مطالعه آبخوان بجنورد با استفاده از مدل‌سازی لیتولوژی آبخوان پرداخته می‌شود تا سطح دقت مدل آب زیرزمینی این منطقه بهبود یابد. از لحاظ زمین‌شناسی بخش اعظم محدوده مطالعاتی بجنورد در زون زمین‌شناسی کپه داغ و تنها بخشی از ارتفاعات جنوبی این محدوده در زون بینالود قرار گرفته است. دشت بجنورد به شکل یک ناودیس است که افتادگی وسط آن به علت وجود گسل‌های بزرگ لایه‌های کرتاسه است. گسل‌ها و شکستگی‌ها این منطقه، رابط‌های آبی خوبی بین ارتفاعات و آبرفت‌های دشت هستند. در شمال دشت بجنورد، مانند محدوده‌های ارکان، جنوب زندان و شمال پاسگاه پلیس‌راه ضخامت رسوبات آبرفتی و واریزه‌های نسبتاً کم است و بلافاصله تشکیلات سنگی ظاهر می‌شوند که عمدتاً از سازندهای آهکی- آهکی مارنی- مارن و کنگلومرا است (بی‌نام، ۱۳۹۲).

### ژئوفیزیک آبخوان

برای به‌دست آوردن اطلاعات دقیق‌تری از آبخوان باید نتایج حاصل از بررسی‌های ژئوفیزیک با نتایج حاصل از

هیدرودینامیکی کمک خواهد کرد. مراحل تهیه مدل‌های سه‌بعدی شامل ۱- جمع‌آوری اطلاعات موجود (مطالعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و لاگ چاه‌ها)، ۲- تهیه برش‌های عرضی و ۳- تهیه مدل لیتولوژی است (وانگ، ۲۰۱۲؛ احمد، ۲۰۰۹) که در بخش‌های زیر توضیح داده شده است.

لاگ‌ها و وجود عدسی‌ها را نشان دهند. میان‌یابی بین لاگ‌های موجود، پرکننده فواصل تعریف نشده بین آن‌ها است و افزایش این لاگ‌ها در سطح آبخوان بر صحت این مدل‌ها می‌افزاید. نتایج مدل‌های سه‌بعدی نماینده واقعی سیستم آبخوان در مدل جریان آب زیرزمینی سه‌بعدی است (احمد، ۲۰۰۹)؛ بنابراین شناخت کافی از لیتولوژی سیستم آبخوان در برآورد مناسبی از ضرایب



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی و موقعیت حوضه آبریز بجنورد

زمین‌شناسی را در آبخوان بجنورد نشان می‌دهد که با نرم‌افزار Rockworks در جهت شمال شرقی - جنوب غربی مدل شده است.

### تکنیک مدل‌سازی لیتولوژی

در مدل‌سازی لیتولوژی<sup>۱</sup> پیچیدگی چهارچوب آب لایه‌شناسی منطقه مورد مطالعه و تغییرات ضخامت و روند آن و همچنین ناهمگنی سیستم آبخوان نشان داده می‌شود. تکنیک مدل‌سازی سه‌بعدی لیتولوژی آبخوان کمک شایانی به شناسایی خصوصیات آبخوان و تخمین جریان آب زیرزمینی با دقت بالا می‌کند. این روش براساس مفهوم (solid modeling) بسته نرم‌افزاری Rockworks است به گونه‌ای که فرایند شبکه‌بندی

### تهیه برش‌های عرضی

به‌منظور بررسی و قضاوت مهندسی ساده‌تر برش‌های لیتولوژی متفاوتی در طول آبخوان با استفاده از نرم‌افزار Rockworks مدل می‌شود تا دید مناسب‌تری از نحوه لایه‌بندی آبخوان به‌دست آید که در نهایت منجر به تخمین دقیق‌تر مدل سه‌بعدی لیتولوژی 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 لیتولوژی مورد استفاده قرار می‌گیرد (احمد، ۲۰۰۹). نرم‌افزار Rockworks، از روش Lateral Blending Horizontally برای میان‌یابی داده‌های لیتولوژی لاگ چاه‌ها استفاده می‌کند. در این روش، مقدار هر گره براساس میان‌یابی تصادفی از یک سوم منطقه مورد مطالعه که به‌صورت شعاعی در اطراف گره در نظر گرفته، محاسبه می‌شود (راک ویر، ۲۰۱۶)؛ برای مثال شکل ۲ یکی از مقاطع

1- Lithology Model

۲- یک مدل شبکه‌ای سه‌بعدی است که در آن فرض می‌شود جنس رسوب در هر گره از شبکه صرفاً از یک نوع رسوب بوده و نوع رسوب در هر گره براساس اطلاعات لاگ‌های موجود برآورد (میان‌یابی و یا برون‌یابی) می‌گردد.

بود و در نهایت در شبیه‌سازی آبخوان بجنورد، اندازه سلول‌ها در کل محدوده مورد مطالعه ۲۵۰ در ۲۵۰ متر و با عمق ۳۰ متر در نظر گرفته شد. با توجه به اطلاعات به‌دست آمده از مطالعات زمین‌شناسی آبخوان دشت بجنورد از نوع آزاد است (بی‌نام، ۱۳۹۲) که لایه‌بندی آن در این مطالعه، چهار لایه با در نظر گرفتن چهار جنس متفاوت خیلی‌ریزدانه، ریزدانه، متوسط‌دانه و درشت‌دانه در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مدل جریان آب زیرزمینی در این پژوهش، مطابق با مرز فیزیکی آبخوان در نظر گرفته و مدل در شرایط ماندگار و برای سال ۱۳۸۰ اجرا شده است. همچنین وجود عدم قطعیت در مقدار پارامترهایی که در نتیجه برخی از فرضیات و ساده‌انگاری‌ها در مدل مفهومی و ریاضی در نظر گرفته می‌شود، نیاز به واسنجی مدل را اجتناب‌ناپذیر کرده است (کری و همکاران، ۲۰۰۱).

#### نتایج و بحث

##### تهیه برش‌های عرضی آبخوان بجنورد

در این پژوهش به‌منظور لایه‌بندی آبخوان از تمامی اطلاعات در دسترس که شامل مطالعات ژئوفیزیک، مطالعات زمین‌شناسی، ۵۶ لاگ چاه، میزان آبدی چاه‌ها و تجربیات زمین‌شناسان خبره، استفاده شده است. با تلفیق اطلاعات مذکور، مقاطع متعددی در سطح آبخوان تهیه شد. در پانزده مقطع متفاوت برش‌های لیتولوژی با استفاده از نرم‌افزار Rockworks به‌دست آمد (شکل ۴ الف). با توجه به این نکته که سطح آب زیرزمینی به طور کلی در سطح آبخوان بالاست (بی‌نام، ۱۳۹۲)، عمق اکثر چاه‌های حفر شده تقریباً کمتر از ۱۰۰ متر است. شکل ۳ خطور کانتور سنگ بستر را نشان می‌دهد که در نرم‌افزار GIS 10.2 میان‌یابی و برآورد شده که براساس آن تغییرات ضخامت آبخوان بین ۲۸ تا ۱۰۳ متر است. اطلاعات لاگ چاه‌ها، برای مدل‌سازی در عمق هندسه آبخوان، براساس مطالعات موجود مقایسه و موقعیت سنگ کف در آن‌ها تعیین و سپس تمام چاه‌ها تا عمق سنگ کف وارد نرم‌افزار شد و مقاطع لیتولوژی تا عمق سنگ کف ترسیم شدند. تعداد ده چاه مجازی در اطراف دشت در سه نوع سازند نفوذناپذیر Ktr، Ksr و Qt1 که بافت‌های خاک نفوذناپذیر اطراف آبخوان هستند، برای نشان دادن هرچه بهتر برش‌های لیتولوژی در نظر گرفته شدند که به‌ترتیب

سه‌بعدی صحیحی را مورد استفاده قرار می‌دهد (احمد، ۲۰۰۹). به‌طور کلی مدل لیتولوژی یک تصویر سه‌بعدی است که فقط یک نوع رسوب را براساس مفهوم solid modeling استخراج می‌کند و نمایش می‌دهد که در واقع بیانگر مدل لیتولوژی آن رسوب است (راک ویر، ۲۰۰۶).

##### ساختن مدل جریان آب زیرزمینی

همانند مدل‌سازی تک‌لایه آبخوان بجنورد، در این پژوهش نیز برای مدل‌سازی کمی آبخوان از نرم‌افزار GMS نسخه 7.1.10 استفاده شده است. GMS یا سیستم مدل‌سازی آب زیرزمینی محیطی جامع و گرافیکی برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی و همچنین واسط کاربر گرافیکی قوی در تهیه مدل‌های لایه‌بندی آبخوان است (ادهیکاری و همکاران، ۲۰۱۱).

##### تعیین ضرایب هیدرودینامیک

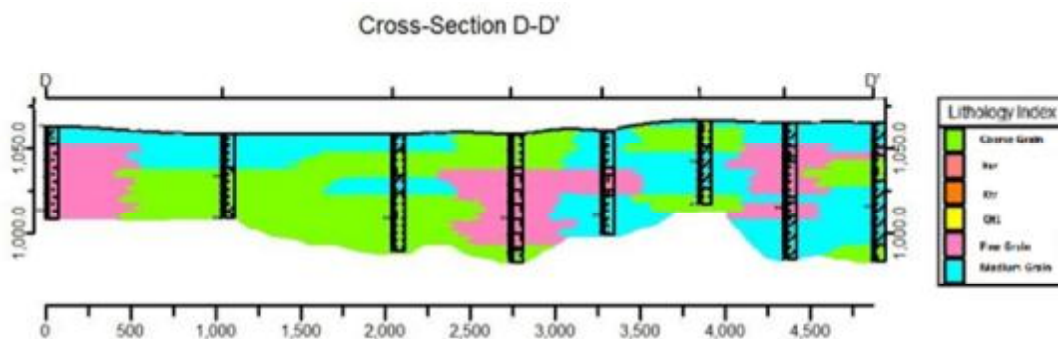
در شرایط وقوع ناهمگنی موضعی در مصالح آبخوان، تغییرات مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌صورت موضعی (در جهت افقی یا عمودی) اتفاق می‌افتد. در این مطالعه با توجه به در نظر گرفتن مدل سه‌بعدی لیتولوژی و ناهمگنی بافت خاک، شرایط ناهمگنی موضعی بافت خاک در نظر گرفته شد و بر این اساس، مقادیر ضرایب هیدرودینامیک براساس جنس بافت خاک در نظر گرفته و به مدل معرفی شده است (اندرسون و وسنر، ۱۹۹۲).

##### تهیه مدل ریاضی دشت بجنورد

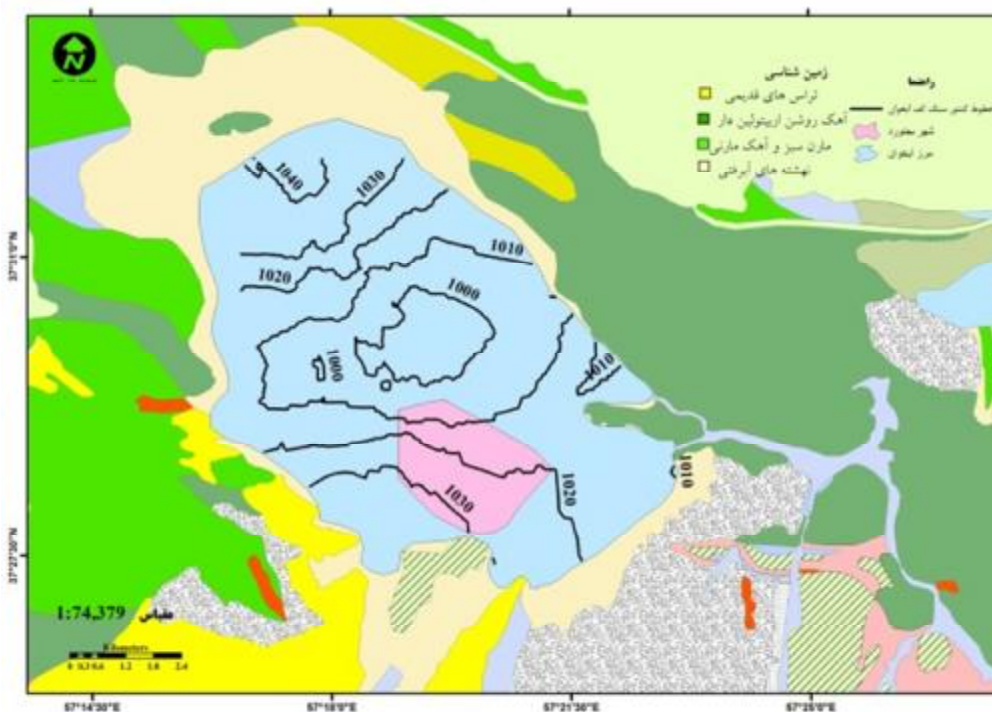
در این پژوهش، برای بررسی جریان آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه از کد Modflow2000 استفاده شده است (هاربوگ و همکاران، ۲۰۰۰). در مدل‌سازی تک‌لایه آبخوان بجنورد، معادله جریان دو بعدی سطحی در محیط اشباع در شرایط غیرهمگن و همروند در نظر گرفته شده است؛ اما معادلات جریان سه‌بعدی و در محیط اشباع همچنین در شرایط غیرهمگن و غیرهمروند در نظر گرفته شده است. طراحی شبکه مدل با توجه به کیفیت و کمیت اطلاعات موجود، دقت مورد نیاز، وسعت و هیدروژئولوژی منطقه مورد مطالعه صورت می‌گیرد (اسپیتز و مرنو، ۱۹۹۶)؛ بنابراین در مرحله اول سعی شد تا اندازه سلول‌ها ۵۰ در ۵۰ متر در نظر گرفته شود؛ اما به‌دلیل کافی نبودن سایر داده‌های مدل مفهومی مدل‌سازی غیر ممکن

است. در عمق‌های میانی بیشتر رسوبات متوسط‌دانه و درشت‌دانه دیده می‌شود که بیانگر پتانسیل بالای آبخوان برای ذخیره آب است؛ بنابراین تغییر ضخامت آبخوان از موقعیتی به موقعیت دیگر فرق می‌کند. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نیز گواه این مدعی است.

شامل آهک روشن اربیتولین‌دار، مارن سبز و آهک مارنی و آهک اربوتولین‌دار و تراس‌های قدیمی می‌باشند (شکل ۲). با توجه به شکل ۲ و همچنین دیگر مقاطع به‌دست آمده می‌توان گفت آبخوان بجنورد، آبخوانی آزاد است که به طور کلی، عمق اولیه سطح خاک را رسوبات ریزدانه تشکیل می‌دهد که ضخامت آن در طول آبخوان متغیر



شکل ۲- مقطع زمین‌شناسی در جهت شمال شرقی - جنوب غربی دشت بجنورد



شکل ۳- تغییرات ضخامت آبخوان

تشکیل شده است. بافت کم نفوذپذیر کف آبخوان به‌منظور حل مشکل تهیه مدل لیتولوژی به‌عنوان 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

### مدل‌سازی لیتولوژی سیستم آبخوان بجنورد

بررسی لیتولوژی لاگ چاه‌ها نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه از چهار نوع بافت خاک درشت‌دانه (Gravel یا Sand)، متوسط‌دانه (Gravel یا Sand)، ریزدانه (Silt یا clay) و خیلی‌ریزدانه (بافت کم‌نفوذپذیر کف آبخوان)

### واسنجی مدل و جریان آب زیرزمینی

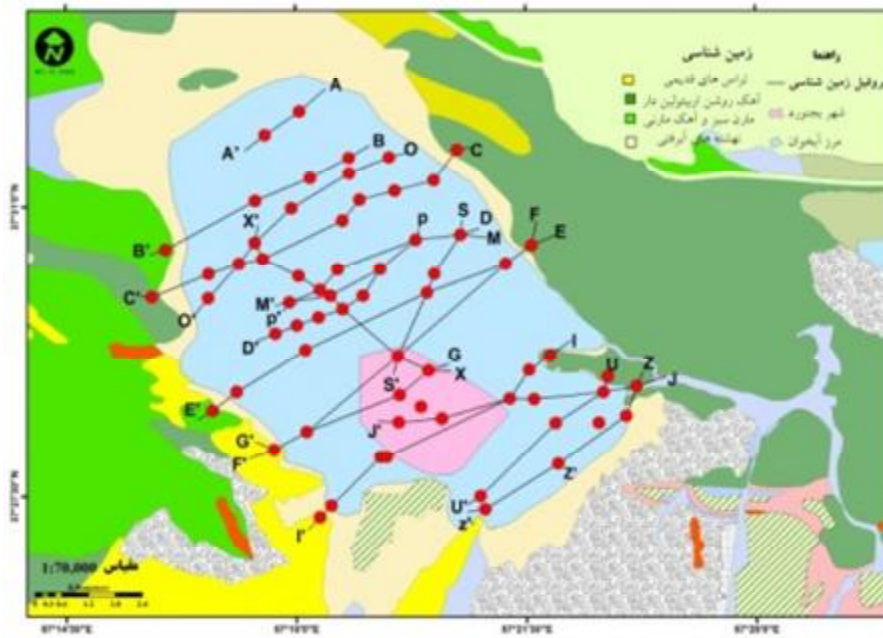
در این مدل‌سازی مقادیر تغذیه که در مدل تک‌لایه واسنجی شده بود، به‌عنوان مقادیر مبنای تغذیه در مدل چندلایه هم در نظر گرفته و مدل در مرحله اول با ضرایب اولیه تعیین شده محاسبه و سپس واسنجی شد. بعد از اجرای مدل در مرحله اول میانگین مربعات خطا برابر با مقدار  $2/77$  m شد. در طی این مرحله هدایت هیدرولیکی بافت خاک‌های تعریف شده تغییر داده شد و واسنجی مدل تا رسیدن به خطای قابل قبول ادامه یافت؛ به گونه‌ای که مقدار آن پس از واسنجی به مقدار  $0/794$  m رسید. جدول ۱ مقدار سطح آب مشاهده‌ای پیزومترها را در مدل چهار لایه برای دوره واسنجی نشان می‌دهد. همچنین مقادیر خطا نیز برای مدل چهارلایه و تک‌لایه بیانگر افزایش دقت مدل چهار لایه است.

مقادیر هدایت هیدرولیکی با توجه به جنس‌های مختلف موجود در آبخوان با مقادیر  $1/8$ ،  $6/7$ ،  $1/9$  و  $0/4$  به ترتیب برای بافت خاک درشت‌دانه، متوسط‌دانه، ریزدانه و خیلی ریزدانه به‌دست آمد. در شکل ۶ جریان آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه در چهار لایه خاک نشان داده شده است. مطابق شکل ۶ جریان آب زیرزمینی از سمت جنوب و جنوب غربی به سمت شرق آبخوان است؛ به گونه‌ای که مقادیر بار آبی در قسمت‌های شمالی و شرق آبخوان حتی بدون در نظر گرفتن میزان برداشت از چاه‌ها تقریباً زیر تراز  $1050$  متر بوده؛ بنابراین قسمت‌های شمالی و شرقی آبخوان در لایه اول خشک است و از طرفی بیشترین تراز بار آبی مربوط به قسمت‌های جنوبی دشت است. مطابق شکل ۶- الف منطقه وسیعی از لایه اول خشک است و مقادیر بار آبی در این لایه زیر تراز  $1050$  متر است. شکل‌های (۶- ب، ج و د) به ترتیب مربوط به لایه‌های دوم، سوم و چهارم مدل که به طور کلی تغییرات مقادیر بار آبی آن‌ها بین  $1020$  تا  $1070$  است. همچنین عمق تمامی چاه‌ها در کل منطقه تا محل سنگ کف تعریف شده که گستردگی آن‌ها در تمامی لایه‌ها به خوبی نشان داده شده است. وجود بار آبی  $1035$  در لایه‌های دوم، سوم و چهارم نشان‌دهنده وجود مخروط افت شدید در اثر برداشت آب از چاه‌هایی با دبی بالا است.

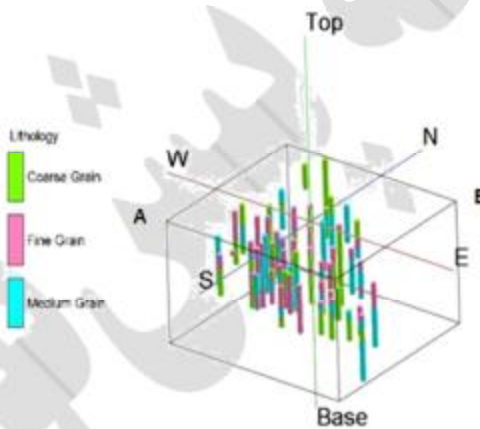
کرده است و آبخوان نیازمند مدل‌سازی لیتولوژی است (شکل ۴- ب). در آبخوان‌های آبرفتی نظیر آبخوان بجنورد لایه‌بندی Stratigraphy مناسب نیست؛ چرا که اطلاعات رسوب لاگ‌های موجود نشان‌دهنده تفاوت شدید قرارگیری رسوبات مختلف روی یکدیگر و عدم وجود لایه‌های سراسری<sup>۱</sup> است مناطقی که دارای آب لایه‌شناسی پیچیده هستند، مدل‌سازی لیتولوژی گزینه مناسب‌تری است (موکهرچی و همکاران، ۲۰۰۷) در این پژوهش سعی شده است تا با تهیه مدل لیتولوژی لایه‌بندی صحیحی برآورد شود. همچنین به‌منظور تدقیق مدل سه‌بعدی لیتولوژی در نرم‌افزار Rockwork از نقشه رقومی ارتفاعی SRTM-DEM 90 متری که هم‌خوانی بیشتری با توپوگرافی سطح زمین دارد، به‌عنوان مبنای تراز ارتفاعی زمین، استفاده شد (ایزدی و همکاران، ۲۰۱۴). دقت مدل لیتولوژی  $(X) 250 \text{ m} \times (Y) 250 \text{ m} \times (Z) 30 \text{ m}$  بوده و نتایج گسسته‌سازی مدل در نرم‌افزار GIS شامل ۴۳ گره در محور X، ۳۷ گره در محور Y و ۴ گره در محور Z است. در شکل (۴ الف) برآیند مدل لیتولوژی که به اندازه مرز آبخوان در نظر گرفته شده، ناهمگنی بافت خاک در سرتاسر آبخوان به خوبی نشان داده شده است.

### ساختن مدل جریان آب زیرزمینی

نتایج مدل لیتولوژی آبخوان بجنورد برای ساختن مدل جریان آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه در نرم‌افزار Rockwork 16 ابزاری برای ارسال مدل سه‌بعدی لیتولوژی تعریف نشده بود، مدل سه‌بعدی به صورت دو بعدی و در صفحاتی جداگانه به نرم‌افزار GIS فراخوانی شد. از آنجایی که در فرایند مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی لایه‌های بالایی سطح زمین خشک هستند از وارد کردن لایه‌های بالایی سطح زمین صرف‌نظر کرده و مدل لیتولوژی آبخوان بجنورد به صورت ۴ لایه برآورد شده است. با توجه به اینکه محدوده مدل‌سازی مبنای مرز مدل‌سازی مدل مفهومی است مدل لیتولوژی ساخته شده به اندازه مرز مدل‌سازی برش خورده به طوری که مدل شبکه GIS دارای ۴۱ ردیف و ۳۳ ستون با فضای  $250 \times 250$  مترمربع است (شکل ۵- ب).

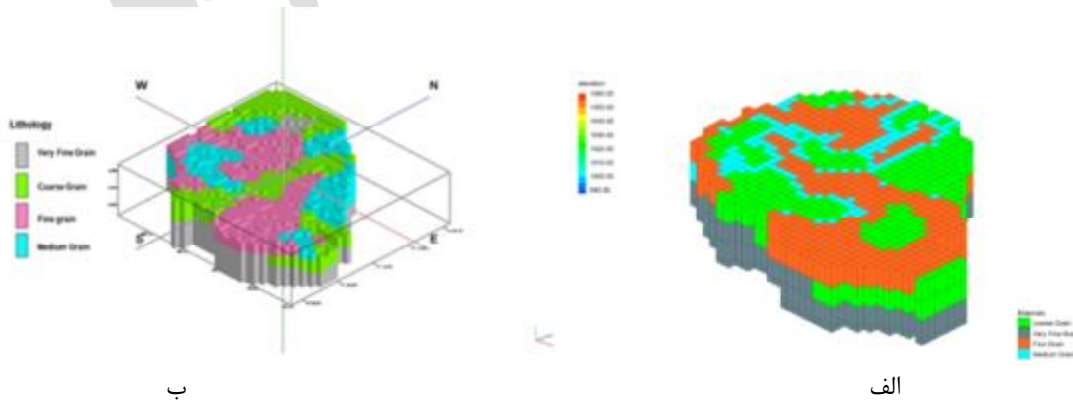


(الف)



(ب)

شکل ۴- الف) پراکندگی چاه های دارای لاگ، ب) نمایش سه بعدی لاگ های چاه



شکل ۵- استفاده از مدل لیتولوژی برای ساختن مدل سه بعدی جریان آب زیرزمینی در نرم افزار GMS الف) مدل سه بعدی لیتولوژی در نرم افزار Rockworks، ب) مدل سه بعدی جریان آب زیرزمینی در نرم افزار GMS



جدول ۱- مقایسه مقدار سطح آب مشاهده‌ای و محاسبه شده در مدل چهار لایه برای هر پیرومتر

نام پیرومتر	مقدار سطح آب مشاهده‌ای	مقدار سطح آب مشاهده‌ای در مدل چهار لایه بعد از واسنجی	مقدار خطا (برای دوره واسنجی مدل چهار لایه)	مقدار خطا (برای دوره واسنجی مدل تک لایه)
کوی پلیس	۱۰۵۲/۴	۱۰۵۱/۹۲۶	۰/۴۷۴	-۰/۷۹۷
شهریازی	۱۰۵۶/۰۹	۱۰۵۶/۹۲۶	-۰/۸۳۶	-۰/۵۹
منابع طبیعی	۱۰۴۰/۸۸	۱۰۴۱/۴۳۹	-۰/۵۵۹	۰/۸۶۴
علی آباد	۱۰۳۸/۹۶	۱۰۳۸/۵۹۷	۰/۳۶۳	۰/۰۶
تأمین اجتماعی	۱۰۶۳/۴۷	۱۰۶۲/۵۴	۰/۹۳	۰/۳۹۷
ناظرآباد	۱۰۶۳/۸	۱۰۶۳/۲۸۵	-۰/۵۱۵	-۱/۴۶۸
کافه جمشید	۱۰۲۴/۴۳	۱۰۲۵/۶۳	-۱/۲	-۱/۱۰۸
جاده برج	۱۰۷۲/۸۸	۱۰۷۱/۸۸	۱	۱/۰۱
فشار شکن	۱۰۴۰/۶۱	۱۰۳۹/۳۹۲	۱/۲۱۸	۱/۲۶۸
لنگر	۱۰۴۲/۳۷	۱۰۴۲/۵۵	-۰/۱۸	-۰/۲۶۶
کهنه کن	۱۰۳۸/۲۴	۱۰۳۸/۹۳۲	-۰/۶۹۲	۰/۰۱۱

## تحلیل مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی

مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی شامل تغذیه، ورودی، خروجی آب زیرزمینی و برداشت از آن است. مطابق جدول ۲ مؤلفه ورودی کل و خروجی کل به آبخوان در مدل تک لایه ۲۳۰۵۶۳۲۰ مترمکعب در سال و در مدل چندلایه این مقادیر به ۲۳۱۴۹۳۹۵ مترمکعب در سال رسیده است. همچنین مقدار برداشت ۲۰۴۱۹۵۶۰ مترمکعب در سال بوده که توسط ۲۸۴ چاه از کل آبخوان با مقادیر دبی بین ۰/۰۶ تا ۳۱۴۰ مترمکعب در روز برداشت می‌شود که با مقدار تغذیه در هر دو مدل تقریباً هماهنگ است. وجود اختلاف در ورودی و خروجی کل آبخوان در دو مدل مربوط به مؤلفه‌های ورودی و خروجی به آبخوان است که علت ایجاد این اختلاف وجود بافت‌های

متفاوت خاک با ضرایب هیدرولیکی متفاوت در مرزهای آبخوان می‌باشد. به طور کلی، بیلان محاسبه شده با مدل چندلایه نشان می‌دهد که آبخوان تقریباً در وضعیت متعادلی قرار دارد و مقدار ورودی‌ها با خروجی‌ها تقریباً با هم برابر است.

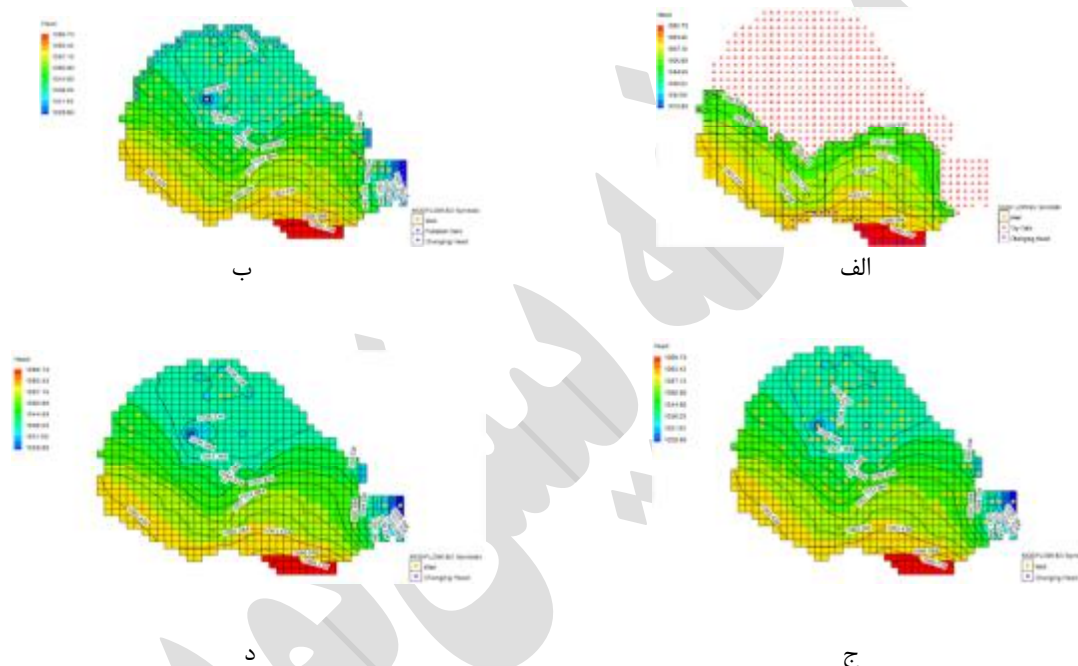
در سطح آبخوان بجنورد پنج آزمایش پمپاژ صورت گرفته است که مقادیر هدایت هیدرولیکی به دست آمده توسط این آزمایش‌ها در جدول ۳ گزارش شده است. مطابق این جدول مقادیر هدایت هیدرولیکی به دست آمده توسط مدل سه بعدی چهار لایه نسبت به مدل تک لایه دقیق‌تر است؛ چرا که دارای مقدار نزدیک‌تری به هدایت هیدرولیکی به دست آمده توسط آزمایش‌های پمپاژ آبخوان می‌باشد.

جدول ۲- مقایسه مؤلفه‌های بیلان مدل چهار لایه و تک لایه

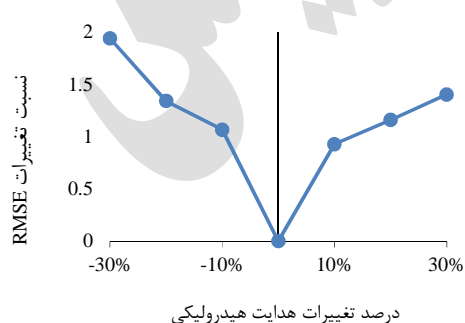
مؤلفه‌های بیلان	مدل تک لایه (مترمکعب در سال)	مدل چهار لایه (مترمکعب در سال)
مرز بار ثابت ورودی	۲۲۷۶۱۴۰	۲۴۴۱۸۵۰
تغذیه	۲۰۷۸۰۵۴۵	۲۰۷۰۷۱۸۰
ورودی کل	۲۳۰۵۶۳۲۰	۲۳۱۴۹۳۹۵
مرز بار ثابت خروجی	۲۶۳۸۲۲۰	۲۷۳۲۷۵۵
چاه‌ها	۲۰۴۱۹۵۶۰	۲۰۴۱۶۶۴۰
خروجی کل	۲۳۰۵۶۳۲۰	۲۳۱۴۹۳۹۵

جدول ۳- مقایسه مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست آمده با آزمایش پمپاژ با مدل چندلایه و تک‌لایه بعد از واسنجی

چاه پمپاژ	طول جغرافیایی (X)	عرض جغرافیایی (Y)	مقادیر هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده توسط آزمایش پمپاژ	مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده بعد از واسنجی (m/day)	
				مدل تک‌لایه	مدل چهارلایه
کهنه کهن	۵۲۷۷۰۷	۴۱۵۳۳۳۲	۰/۱	۲۰	۰/۴
فرهنگیان	۵۳۲۴۰۹	۴۱۴۶۴۸۴	۲۴	۳	۵
علی آباد	۵۲۹۶۲۶	۴۱۵۰۷۳۲	۳/۳	۲/۵	۴
شهر بازی	۵۳۱۲۱۰	۴۱۴۷۸۳۸	۵/۴	۲۴	۳
جنوب فرودگاه	۵۲۶۵۴۸	۴۱۴۹۵۸۱	۲/۳	۸/۵	۴



شکل ۶- الف) تغییرات مقادیر بار آبی در لایه اول، ب) تغییرات مقادیر بار آبی در لایه دوم، ج) تغییرات مقادیر بار آبی در لایه سوم و د) تغییرات مقادیر بار آبی در لایه چهارم



شکل ۷- نسبت تغییرات RMSE مدل در برابر درصد تغییرات هدایت هیدرولیکی

### حساسیت‌سنجی مدل

پس از مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی و تخمین هدایت هیدرولیکی، مدل نسبت به هدایت هیدرولیکی حساسیت‌سنجی شد. به این شکل که در مراحل جداگانه‌ای مقادیر این پارامتر افزایش و کاهش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی داده شدند و مدل با این مقادیر، هم اجرا و خطای مدل در هر مرحله محاسبه شد. مطابق شکل ۷ محاسبات نشان می‌دهد که مدل به مقادیر هدایت هیدرولیکی واکنش نشان می‌دهد و دقت هرچه بیشتر در محاسبات مربوط به آن می‌تواند ضریب اطمینان نتایج اجرای مدل را افزایش دهد.

## نتیجه‌گیری

مدل سه‌بعدی لیتولوژی، چهار طبقه‌بندی لیتولوژی سیستم آبخوان بجنورد را نشان می‌دهد که دارای ترتیبی تکراری از چهار نوع بافت خاک است. نوع بافت خاک در محور عمودی دارای تغییرات فاصله‌ای معنی‌داری است که عواملی مانند ضخامت طبقات مختلف و همچنین ترازهای متفاوت در بالا و پایین هر لایه در رخداد آن‌ها تأثیرگذار است. با توجه به این که مصالح آبخوان ناهمگن در نظر گرفته شده است مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی هم به صورت موضعی و با توجه به جنس‌های مختلف موجود در آبخوان با مقادیر ۸/۱، ۶/۷، ۱/۹ و ۰/۴ به ترتیب برای بافت خاک درشت‌دانه، متوسط‌دانه، ریزدانه و خیلی ریزدانه به دست آمد. مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی که توسط مدل سه‌بعدی لیتولوژی به دست آمد، نسبت به مدل تک‌لایه دقیق‌تر است چرا که دارای مقدار نزدیک‌تری به ضرایب هیدرودینامیک به دست آمده با آزمایش‌های پمپاژ آبخوان است. استفاده از مدل‌های چندلایه لیتولوژی معرف وجود ناهمگنی و عدسی‌ها در سیستم آبخوان‌ها می‌باشد که آن‌ها سبب ایجاد تغییراتی در مقادیر هدایت هیدرولیکی رسوبات درشت‌دانه تا خیلی ریزدانه می‌شوند؛ بنابراین استفاده از مدل‌های لیتولوژی برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی به ویژه در آبخوان‌هایی با ناهمگنی شدید که آزمایش پمپاژ در آن‌ها صورت نگرفته، منجر به شناخت آبخوان با دقت مناسبی می‌شود.

## منابع

۵. جعفری ز. ۱۳۹۱. شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی در یک منطقه شهری و بررسی عوامل مؤثر بر آن (مطالعه موردی: آبخوان بجنورد). پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد. ۱۰۶ ص.
۶. شهسواری ا. و خدائی ک. ۱۳۸۴. تهیه مدل جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت بهبهان با استفاده از GIS. مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران. دانشگاه تربیت معلم تهران. ۶۱-۷۰.
۷. الطافی دادگر م. محمدزاده ح و ناصری ح. ۱۳۹۱. پیش‌بینی و تأثیر توسعه بهره‌برداری از آبخوان دشت بجنورد با استفاده از کد GIS. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد. ۱۴۵ ص.
۸. قبادیان ر. فتاحی ع. مجیدی ص. و زارع م. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی سفره آب زیرزمینی دشت میان دربند کرمانشاه با استفاده از مدل GIS. اولین همایش ملی چالش‌های منابع آب و کشاورزی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان اصفهان. ۱۳۹۲.
9. Adhichary S. Gupta A. and Bubel M. 2011. Modeling Groundwater Flow and salinity intrusion by Advective Transport In The Regional Unconfined Aquifer of Southwest Bangladesh. The 3<sup>rd</sup> international Conference of EACEF. Universitas Atma Jama Yogyakarta, Indonesia
10. 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.
11. Anderson M. and Woessner W. 1992. Applied groundwater modeling flow and advective transport. Academic Press, San Diego. USA. 396 p.
12. 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). 12-22
13. Carey M. Erskine A. Heatcote J. and Bmakmaham A. 2001. Guide of good practice for the development of conceptual model of contaminant transport processes in the subsurface, National Groundwater
۱. بانژاد ح. محب‌زاده ح. قبادی م. و حیدری م. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال آلودگی در آب‌های زیرزمینی مطالعه موردی: آبخوان دشت نهاوند. مجله دانش آب و خاک. ۲۳(۲): ۴۳-۵۷.
۲. بی‌نام. ۱۳۸۸. گزارش تمدید ممنوعیت بهره‌برداری دشت بجنورد. سازمان مدیریت منابع آب ایران. ۱۳۶ ص.
۳. بی‌نام. ۱۳۹۰. گزارش مطالعات ژئوفیزیک دشت بجنورد. مهندسین مشاور آب‌کاو شرق. ۳۲ ص.
۴. بی‌نام. ۱۳۹۲. گزارش مدل ریاضی آب زیرزمینی دشت بجنورد. مهندسین مشاور هیدروتک توس. ۶۵ ص.

- Contaminated Center Report. Environmental Agency, Bristol.
14. Cioco R. W. 2012. Hydrostratigraphy of the Shallow Aquifer in the Niles Cone Groundwater Basin. M.S dissertation. San Jose State University. USA. 63 p.
  15. Harbaugh A. W. Banta E. R. and Hill M. G. 2000. Modflow 2000. The U.S. Geological Survey. 127 p.
  16. Hassan A. Elasaheed 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.
  17. Izady A. Davary K. Alizadeh A. Ziaei A. N. Alipoor Joodavi A. and Brusseau M. 2014. A framework toward developing a groundwater conceptual model. *Arabian Journal of Geosciences*. 7(9): 3611-3631.
  18. Jackson J. M. 2007. Hydrogeology and groundwater flow model, central catchment of Bribie island, Southeast Queensland. M.S dissertation. Queensland Island of Technology. 134 p.
  19. Mahmoudpour M. and Khamehchiyan M. Nikudel M.R and Ghassemi M.R. 2013. Characterization of regional land subsidence induced by groundwater withdrawals in Tehran, Iran. *journal of Geopersia*. 3: 49-62.
  20. Mukherjee M. Fryar A. E. and Howell P. D. 2007. Regional hydrostratigraphy and groundwater flow modeling in the arsenic-affected areas of the westerBengal basin, West Bengal, India. *Hydrogeology Journal*.
  21. Rockware glossary. 2006. Retrieved February 15, 2016, from <http://help.rockware.com/rockworks17/WebHelp/glossary.htm>
  22. Spitz K and Mereno J. 1996. A practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling New Yourk, NY: Wiley and sons, INS. 480 p.
  23. Wang Z. 2012. Characterization of the Stream-Aquifer Hydrologic Connection in the Elkhorn River Basin. *Dissertations & Theses in Natural Resources*. University of Nebraska- Lincoln. 181 p.
  24. Yousefi Rad M. 2012. Hydrostratigraphy of Haftad Gholle Karst, Markazi province, Iran, optimized by Fuzzy Logic. *Geofísica Internacional*. 51-4: 365-376.