

مقاله پژوهشی

ترسیم حریم کمی چاه‌های برداشت به کمک الگوریتم گام تصادفی و مدل شبیه‌ساز FeFlow

ناهید مجیدی خلیل آباد^۱، علی محتشمی^۲، ابوالفضل اکبرپور^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۴

چکیده

ترسیم و تعیین حریم کمی چاه‌ها از جمله اقداماتی است که باید در هر آبخوان صورت بگیرد. روش‌های مورد استفاده به منظور رسم این محدوده در دو بخش ساده و پیچیده قرار می‌گیرند. در بخش ساده از چندین رابطه ریاضی و در بخش پیچیده از مدل‌های عددی استفاده می‌شود. در این پژوهش برای اولین بار با استفاده از الگوریتم گام تصادفی و مدل عددی اجزاء محدود، حریم کمی چاه‌های موجود در یک آبخوان استاندارد محصور و آبخوان آزاد بیرجند تعیین و ترسیم شدند. پس از مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی در دوره ۱۲ ماهه ۱۳۹۰-۱۳۹۱ به کمک شبیه‌ساز FeFlow، حریم کمی برای چاه‌ها ترسیم شدند. در آبخوان استاندارد حریم کمی برای هر سه چاه بهره‌برداری به صورت جداگانه در دو دوره ۵۰ و ۱۸۰ روزه ترسیم شدند. نتایج نشان دادند که کشیدگی حریم برای هر سه چاه به سمت قسمتی از آبخوان می‌باشد که سطح آب زیرزمینی بالاتری نسبت به بقیه مناطق دارد. همچنین در مناطقی از آبخوان که قابلیت انتقال بیشتری دارند، حریم عریض‌تر بوده و با ورود به مناطقی با قابلیت انتقال کمتر، از عرض آن کاسته و باریک‌تر می‌شود به طوری که در چاه شماره دو عرض حریم در منطقه ۳، ۳۰۲/۸۶ متر بوده و این در حالی است که در منطقه ۲ که قابلیت انتقال کمتری دارد، ۲۶۷/۴۶ متر می‌باشد. در آبخوان بیرجند که شامل ۱۹۰ حلقه چاه است، ۵ چاه به طور دلخواه انتخاب شدند و حریم کمی برای آن‌ها در دو دوره پنج و سی ساله ترسیم شدند. نتایج نشان دادند که کشیدگی حریم به سمت مرزهای هد ثابت مطابق با الگوی جریان بوده و دو پارامتر دبی و هدایت هیدرولیکی نقش بسزایی در شکل آن دارد. به طوری که در چاه شماره ۵، که کمترین دبی برداشت را دارد، طول حریم در دوره ۵ ساله حداقل مقدار یعنی ۳۶۴/۶۲ متر داشته است.

واژه‌های کلیدی: آبخوان محصور و آزاد، الگوریتم گام تصادفی، ترسیم حریم کمی، مدل عددی اجزاء محدود (FeFlow)

مقدمه

هستند. پارامترهایی مانند هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال و ضریب ذخیره نقش مهمی در تعیین این محدوده دارند که باید مورد توجه کارشناسان آب قرار گیرد.

همانطور که بیان شد، تعیین ناحیه دقیق حریم کمی و کیفی چاه‌ها بسیار حائز اهمیت است، زیرا که کوچک محاسبه شدن این ناحیه و در نظر گرفتن آن برای سناریوهای مدیریتی احتمال افزایش ریسک کار را بالا برده، همچنین بزرگ محاسبه شدن این محدوده مشکلات و معایب مربوط به خود را دارد (Ferreira et al., 2004; Sabetraftar, 2013). بنابراین نیاز است حالت بهینه آن تعیین گردد. روش‌های متنوع و مختلفی جهت محاسبه این ناحیه پیشنهاد و استفاده شده است، در دو قسمت روش‌های ساده و روش‌های پیچیده قرار می‌گیرند (Goodarzi and Eslamian, 2019). روش‌های ساده شامل چندین رابطه ریاضی هستند که می‌توان به روش‌های زیشارد، کمفورت، شولتز، کوساکین و شنیلی اشاره کرد که اکثراً وابسته به پارامترهای شعاع چاه و هدایت هیدرولیکی منطقه چاه هستند و روش‌های پیچیده منظور همان روش‌های عددی مورد استفاده در این حوضه می‌باشند. امروزه محققین از مدل‌های عددی، جهت تعیین و

در مناطقی که منابع آب سطحی وجود ندارد و یا محدود هستند، منابع آب زیرزمینی به عنوان تنها منبع قابل دسترس و تامین کننده نیازهای بشر مورد استفاده قرار می‌گیرد. استحصال آب زیرزمینی امروزه تنها از طریق حفر چاه در آبخوان‌ها صورت می‌پذیرد. نکته اصلی در حفر چاه‌های جدید، توجه به عدم تجاوز چاه‌های جدید به حریم چاه‌های قبلی هستند، این امر ضرورت تعیین و ترسیم حریم کمی چاه‌ها را در آبخوان‌ها نشان می‌دهد. مهمترین عوامل موثر در شکل و گسترش حریم کمی چاه‌ها مولفه‌های هیدرودینامیکی آبخوان

۱- کارشناسی ارشد منابع آب، مرکز پژوهشی آب و محیط زیست شرق، مشهد، ایران

۲- دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۳- استاد تمام دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

* نویسنده مسئول: (Email: akbarpour@birjand.ac.ir)

(2013). زارعی دودجی و سامانی یک راه حل تحلیلی جهت تعیین ناحیه حریم در دو آبخوان محصور و آزاد جزیره‌ای شکل که حاوی چهار چاه بهره‌برداری بود ارائه کردند و در پژوهش خود در مورد قابلیت و کارایی این روش بحث کردند و نهایتاً نتایج را مناسب و رضایت‌بخش توصیف کردند (Zarei-Doudeji and Samani, 2014). سامانی و کامرانی (۱۳۹۵) به کمک مدل مادفلو در نرم‌افزار GMS سطح آب زیرزمینی را در بازه زمانی ۸۹-۸۰ در آبخوان آسپاس استان فارسی، مدل‌سازی کرد. پس از اجرای مدل و بهینه‌سازی پارامترهای ورودی آن به کمک ModPath، حریم کمی تمامی چاه‌های آب شرب موجود در محدوده مورد مطالعه را تعیین کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که گسترش حریم تابع دو عامل شیب هیدرولیکی و مرزهای تغذیه‌ای است و با توجه به این دو عامل الگوی گسترش زون گیرش تغییر می‌کند. زارعی دودجی و سامانی در مطالعه‌ای دیگر یک راه حل تحلیلی ارائه کردند که به کمک آن می‌توانستند ناحیه حفاظتی چاه را برای هر نوع آبخوانی که هندسه مستطیل دارد ترسیم کند و آن را به صورت گرافیکی نمایش دهد. فرمولی که ارائه کردند با افزایش تعداد چاه‌ها، تغییر مکان آن‌ها، تغییر شرایط مرزی و حتی تغییر نوع چاه (از بهره‌برداری به تزریق و بالعکس) منعطف عمل می‌کرد (Zarei-Doudeji and Samani, 2016).

فتو و همکاران بر اساس یک برنامه نوشته شده در زبان برنامه نویسی پایتون و نرم افزار GMS ناحیه حفاظتی چاه را برای یک آبخوان شرایط ماندگار ترسیم کردند. آن‌ها برای صحت سنجی کارشان ناحیه حفاظتی را برای ۴ مثال ساده محاسبه کردند و با حل تحلیلی مقایسه کردند. یک آبخوان همگن با یک چاه، یک آبخوان ناهمگن با یک چاه، دو آبخوان دیگر با چهار چاه یکی در جهت جریان و دیگری در خلاف جهت جریان، ۴ مثال ساده‌ای بودند که از آن در جهت اعتبارسنجی کارشان استفاده کردند. نتایج آن‌ها انطباق خوبی را با نتایج حل تحلیلی نشان می‌داد (Feo et al., 2017). استابولتیزیدیس و دوکو حریم کمی چاه‌ها را در یک آبخوان واقعی در کشور چین ترسیم کردند، آن‌ها از نرم افزار WHaEM استفاده کردند، این نرم افزار از روش تحلیلی و شعاع ثابت حریم کمی و کیفی چاه را محاسبه می‌کند. آن‌ها با استفاده از نتایج گرفته شده از مدل، موفق به برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری جهت کاهش ورود آلودگی به آبخوان شدند (Staboulzidis and Dokou, 2017).

گودرزی و اسلامیان عملکرد مدل‌های مادفلو و وَم (WhaEM) را در تعیین ناحیه حفاظتی چاه‌های شرب دشت نجف آباد مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها این محدوده را برای بازه‌های زمانی دو، پنج و ده ساله ترسیم و مشخص نمودند. آن‌ها سطح آب زیرزمینی

ترسیم حریم کمی و کیفی چاه‌ها استفاده می‌کنند. این مدل‌ها، معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی را بسته به نوع مدل عددی به گره‌ها و یا المان‌ها اعمال می‌کند و سپس با استفاده از روش‌های حل ماتریسی، ماتریس مجهول که همان سطح آب زیرزمینی است را محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های موجود دیگر، حریم کمی چاه مربوطه، تعیین و مشخص می‌گردد. قابل ذکر است مدل‌های عددی به دلیل در نظر گرفتن گرادیان هیدرولیکی، انواع شرایط مرزی و پارامترهای هیدرولیکی دارای تطابق بیشتری با شرایط واقعی هیدروژئولوژیکی دارد و بهترین روش جهت تعیین حریم کمی هستند (سامانی و کامرانی ۱۳۹۵).

مطالعات متعددی جهت ترسیم حریم کمی صورت گرفته است. میلر ناحیه حفاظتی چاه را به کمک دو روش شعاع ثابت^۱ و حل تحلیلی ترسیم نمود؛ و نتایج بدست آمده را برای دوره‌های کوتاه مدت و بلند مدت مقایسه کرد. نتایج نشان دادند که روش شعاع ثابت (حالت ماندگار) برای دوره‌های طولانی مدت خطای زیادی را به همراه دارد و مناسب برای این امر نمی‌باشد (Miller, 2003). موناتته و فرییرا از روش‌های مختلفی جهت ترسیم ناحیه حفاظتی چاه در آبخوان ماتیمور نووو در کشور پرتغال بهره بردند. روش‌های مورد استفاده آن‌ها به ترتیب روش شعاع ثابت، دو روش حل تحلیلی به نام‌های ویزلینگ^۲ و کریجمن-لوبوفیرا^۳ و یک روش عددی به نام آسموین (ASMWIN)^۴ بودند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش عددی نتایج بهتری در ترسیم ناحیه حفاظتی از خود نشان می‌دهد (Moinante and Lobo-Ferreira, 2005). پوچالسکی نشان داد که حریم تعیین شده به کمک مدل‌های عددی انطباق خوبی با حریم واقعی چاه دارند بنابراین ترسیم حریم به کمک این مدل‌ها را قابل اعتمادترین روش جهت تعیین این محدوده معرفی کرد (Puchalski, 2009). سیراکاس و لاشنوپولوس به کمک مدل عددی مادفلو ناحیه زون گیرش چاه‌های شرب آبخوان موندانیان در یونان را تعیین و ترسیم کردند و سپس به کمک آن مناطق مستعد آلودگی را مشخص نمودند (Siarkos and Lationopoulos, 2012). دانگ و همکاران ناحیه حفاظتی را تنها برای یک چاه از منطقه بیجین در چین رسم نمودند. آن‌ها روش‌های متفاوتی را بدین منظور مورد استفاده قرار دادند. روش اصلاح شده شعاع ثابت، روش ترکیبی^۵، روش حل تحلیلی و دو روش عددی، یکی به صورت قطعی و دیگری به صورت تصادفی، روش‌های مورد استفاده آن‌ها در این امر بود. نتایج حاکی از برتری روش‌های عددی در ترسیم ناحیه حفاظتی چاه بود (Dong et al., 2017).

- 1- Fixed Radius
- 2- Wyssling method
- 3- Krijgsman and Lobo-Ferreira method
- 4- Aquifer Simulation Model for Windows (ASMWIN)
- 5- Hybrid method

حریم کمی چاه‌ها برای آن‌ها ترسیم و تعیین می‌شوند. همچنین به منظور بررسی توانایی و دقت شبیه‌ساز استفاده شده، سطح آب مدل‌سازی شده به کمک آن با نتایج شبیه‌سازهای قبلی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. از مزایای دیگر این شبیه‌ساز نسبت به شبیه‌سازهای قبلی می‌توان به قابلیت آن جهت ترسیم حریم کمی هر نوع آبخوان، در هر نوع شرایط، ماندگار و غیرماندگار و در هر بازه زمانی اشاره کرد، زیرا که شبیه‌سازهای پرکاربرد قدیمی همچون GMS حریم را در شرایط ماندگار ترسیم می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی آبخوان، در قسمت شمالی با مختصات تقریبی 32° و 34° تا 33° و 8° عرض شمالی، 58° تا 41° و 44° شرقی قرار گرفته است (فرپور و همکاران، ۱۳۹۷). آبخوان آزاد دشت بیرجند با مساحت ۲۶۵ کیلومتر مربع در استان خراسان جنوبی واقع گردیده است (شکل ۱). دشت بیرجند طبق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن جزو مناطق خشک محسوب می‌شود. گفتنی است بیشترین ارتفاع در گوشه جنوب شرقی محدوده و کمترین آن در جنوب غربی است. به عبارتی شیب عمومی زمین از سمت شرق به سمت غرب می‌باشد (Mohtashami et al., 2017).

این آبخوان شامل ۱۹۰ چاه بهره‌برداری و ۱۰ چاه مشاهده‌ای است که موقعیت هر کدام از این چاه‌ها در آبخوان در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است. در این شکل چاه‌های بهره‌برداری مربع و به رنگ آبی هستند و چاه‌های مشاهده‌ای دایره‌ای و به رنگ قرمز دارند. همچنین در این شکل فلش‌هایی ترسیم شده‌اند که مرزهای هد ثابت را مشخص می‌کنند. در این آبخوان ۱۰ منطقه وجود دارد که شرایط مرزی در آن‌ها از نوع هد ثابت هستند. نه منطقه جبهه ورودی به آبخوان بوده و یک منطقه که در سمت جنوبی غربی واقع شده است جبهه خروجی آبخوان می‌باشد.

شبیه‌ساز FeFlow^۱

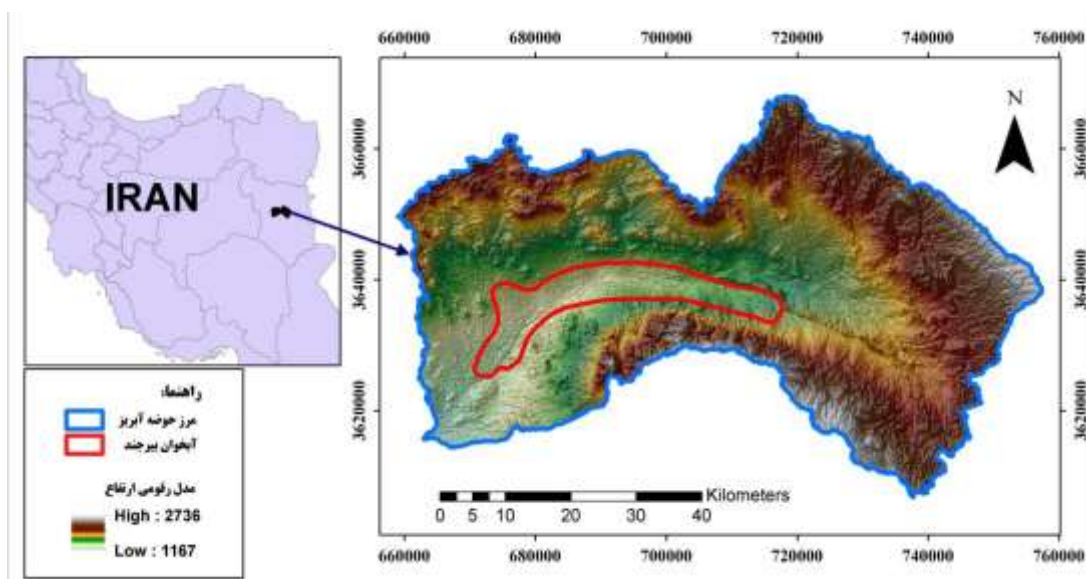
شبیه‌ساز FeFlow، یک سامانه تعاملی برای مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی به روش المان محدود می‌باشد که قادر است جریان زیرسطحی و انتقال آلودگی را در شرایط سه بعدی و دو بعدی در حالت اشباع یا غیراشباع، شرایط ماندگار یا غیرماندگار، انتقال جرم و عناصر واکنشی^۲ را در محیط متخلخل مدل‌سازی کند.

را به کمک هر دو مدل مادفلو و وم شبیه‌سازی کردند و سپس ناحیه حفاظتی را به صورت مجزا به کمک هر دو روش ترسیم کردند. نتایج آن‌ها نشان داد هر دو روش و مدل استفاده شده موثر در تعیین این ناحیه هستند (Goodarzi and Eslamian, 2019). محتشمی و همکاران (۲۰۱۹) به کمک مدل عددی بدون شبکه، حریم کمی دو آبخوان را در شرایط غیرماندگار بررسی کردند. یک آبخوان، محصور استاندارد بوده و دیگری آزاد واقعی بود. نتایج آن‌ها نشان داد که گسترش حریم کمی بیشتر تابع هدایت هیدرولیکی نسبت به آبدهی ویژه است.

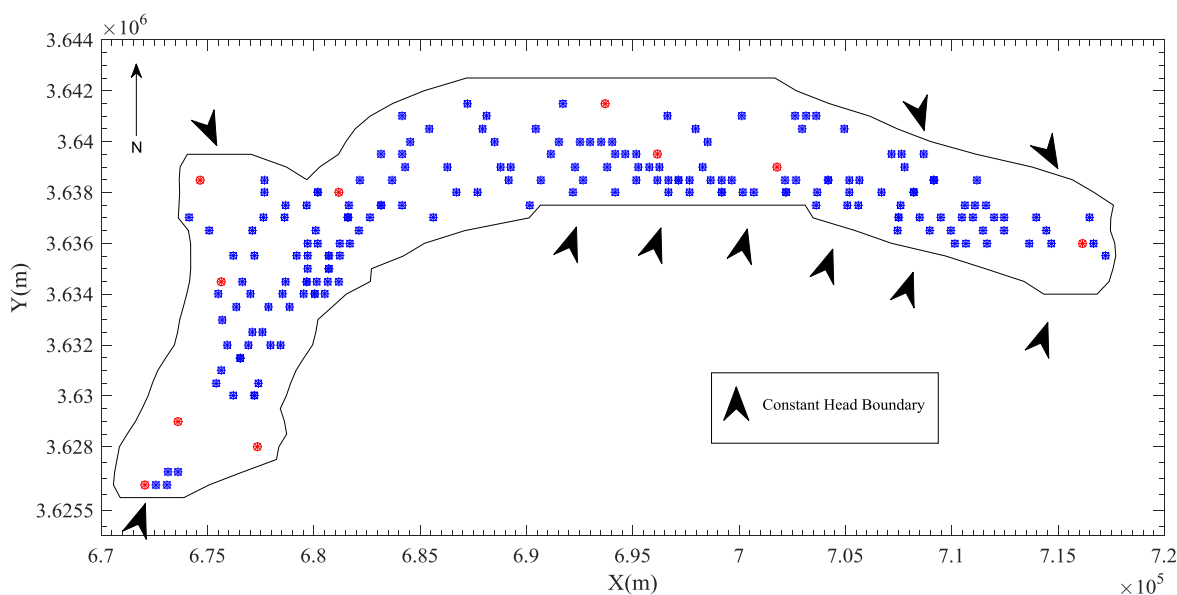
در رابطه با مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از روش عددی المان محدود در نرم‌افزار FeFlow مطالعات اندکی انجام شده است. ژاوو و همکاران الگوی تغییرات پوشش گیاهی را با توجه به شرایط آب و هوایی در عمق‌های متفاوت آب زیرزمینی در مناطق بیابانی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند مهمترین فاکتور که بر روی سطح آب و متعاقباً بر روی پوشش گیاهی موثر است، حجم آب‌های زیرزمینی پمپاژ شده می‌باشد. در این تحقیق روش GIS با مدل FeFlow آب زیرزمینی ترکیب شده و تاثیرات تغییر پوشش گیاهی و آب‌های زیرزمینی به طور همزمان بررسی شده است. نتایج نشان دادند که سطح آب‌های زیرزمینی در حاشیه و قسمت‌های بالای سطح آبخوان روند کاهشی دارد و این کاهش باعث شوری زمین‌های آبرفتی و از بین رفتن پوشش گیاهی منطقه شده است (Zhao et al., 2005). سرور و اگر شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی را با استفاده از FeFlow در حوضه سند پاکستان انجام دادند و یک مدل پیش‌بینی به کمک آن ارائه کردند. این مطالعه نشان داد که میزان پمپاژ بیش از مقدار حال حاضر می‌تواند منابع را به خطر بیندازد. همچنین اصلاح الگوی کشت می‌تواند بهترین روش برای مدیریت بهتر منابع آب مورد استفاده در این منطقه باشد (Sarwar and Eggers, 2006). ترفری و مافل به این نتیجه رسیدند که مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی نیاز به طیف وسیعی از داده‌ها دارد و FeFlow یک سیستم پیشرفته مدل آب زیرزمینی بر مبنای المان محدود است که بسته‌های گسترده و وسیعی از ویژگی‌ها را دارد، از جمله مدل‌سازی جریان‌ها در مناطق اشباع و غیر اشباع و انتقال آلودگی‌ها که با بکارگیری این طیف وسیع مدل پیش‌بینی مناسبی ارائه می‌کند. این برنامه از سال ۱۹۷۹ توسط موسسه برنامه‌ریزی و تحقیقات سیستم‌های منابع آب برلین در آلمان که بخشی از DHI می‌باشد در حال توسعه می‌باشد (Trefry and Muffel, 2007). اشرف و احمد در منطقه دوابین پاکستان سناریوهای مختلفی برای مطالعه تاثیر شرایط بد اقلیمی و آب و هوایی بر آب‌های زیرزمینی در نظر گرفتند. نتایج مطالعات آن‌ها اطلاعات مفیدی در مورد رفتار آبخوان جهت ساماندهی طرح‌های مدیریتی ارائه می‌کرد (Ashraf and Ahmad, 2008).

در این مطالعه برای اولین بار به کمک شبیه‌ساز FeFlow (بر اساس روش عددی اجزاء محدود) و الگوریتم گام تصادفی، جریان آب زیرزمینی در دو آبخوان استاندارد و واقعی مدل‌سازی می‌شود و سپس

1- Finite Element Subsurface Flow and Transport System
2- Reaction Element



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخوان بیرجند (Sadeghi Tabas et al., 2016)



شکل ۲- موقعیت چاه‌های بهره برداری (نقاط آبی) و چاه‌های مشاهده‌ای (نقاط قرمز) (محتشمی و همکاران، ۱۳۹۹)

تفسیر داده‌های به هنگام^۱ از مولفه‌های اصلی FeFlow است. اولین نسخه نرم افزار در سال ۱۹۷۹ میلادی توسعه پیدا کرد و در سال ۲۰۱۳ کتابی با نام این نرم افزار در انتشارات اشپرینگر منتشر شد که محدوده وسیعی از مسائل فیزیکی و مفهومی محیط متخلخل را شامل می‌شود (Diersch, 2013). روش عددی استفاده شده در این شبیه‌ساز، اجزاء محدود بوده که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

این شبیه‌ساز رفتار آب زیرزمینی و حرکت آلاینده‌های این محیط را در توزیع زمانی و مکانی دلخواه توصیف می‌کند که کمک شایانی در برنامه‌های پایش آبخوان‌ها دارد. رابط کاربری پیشرفته این نرم‌افزار با داده‌های GIS و CAD از مزایای آن است. همچنین وجود ابزارهای گرافیکی جهت ایجاد شبکه‌های المان محدود، اعمال ویژگی‌های متفاوت زون‌ها و ایجاد شرایط مختلف مرزی، ورودی و درون‌یابی داده‌ها و متصل شدن به GIS، استفاده از الگوریتم‌های عددی مختلف و تکنیک‌های قوی تحلیل شبیه‌سازی و تحلیل و

روش اجزای محدود^۱

$$[K] = k \left[\iint_{\Omega} \frac{\partial W_i}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} d\Omega + \iint_{\Omega} \frac{\partial W_i}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y} d\Omega \right] - \iint_{\Omega} W_i S_y \left(\frac{1}{\Delta t} \right) d\Omega \quad (2)$$

$$[U] = H^{n+1} \quad (3)$$

$$[F] = \iint_{\Omega} W_i S_y \left(\frac{H^n}{\Delta t} \right) d\Omega + Q \times \delta(x - x_w)(y - y_w) \quad (4)$$

ماتریس K ماتریس سختی، F ماتریس بار و U ماتریس مجهول (سطح آب زیرزمینی در دوره بعدی) است.

معادله حاکم بر آب زیرزمینی در آبخوان آزاد

بر اساس فرض دوپوئی و معادلات پیوستگی زمانی که آبخوان آزاد باشد، معادله حاکم رابطه ۵ خواهد بود (Bear, 1979; Dupouit, 1863).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x H \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y H \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \frac{S_y \partial H}{\partial t} + R \quad (5)$$

که در آن S_y ، آبدهی ویژه می‌باشد.

نهایتاً پس از گسسته‌سازی به روش باقی‌مانده‌وزنی به همان دستگاه معادلات خطی $KU = F$ رسیده که هر کدام از پارامترها در روابط ۶ تا ۸ تعریف می‌شوند:

$$[K] = -2k \left[\iint_{\Omega} \frac{\partial W_i}{\partial x} H^n \frac{\partial \phi}{\partial x} d\Omega + \iint_{\Omega} \frac{\partial W_i}{\partial y} H^n \frac{\partial \phi}{\partial y} d\Omega \right] - 2 \iint_{\Omega} W_i S_y \left(\frac{1}{\Delta t} \right) d\Omega \quad (6)$$

$$[U] = H^{n+1} \quad (7)$$

$$[F] = -2 \iint_{\Omega} W_i S_y \left(\frac{H^n}{\Delta t} \right) d\Omega + 2 \iint_{\Omega} W_i R d\Omega \quad (8)$$

الگوریتم گام تصادفی^۳

روش گام تصادفی الگوریتمی است که مسیر را به صورت تصادفی ارائه می‌کند؛ به این معنی که با شروع مسیر از یک نقطه به عنوان مبدأ، نقطه‌ای دیگر در همسایگی آن به صورت تصادفی و یا بر اساس یک تابع توزیع احتمال انتخاب شده و این روند تا نقطه مقصد ادامه می‌یابد. گام تصادفی برای اولین بار توسط کارل پیرون در سال ۱۹۰۵ ارائه شد (Pearson, 1905). این الگوریتم توسط پژوهشگران در دو دهه گذشته به دلیل کارایی بالای آن بسیار مورد استفاده قرار

روش اجزاء محدود یا روش المان محدود روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و حل معادله‌های انتگرالی است. اساس کار این روش حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آن‌ها به معادلات دیفرانسیل معمولی که با روش‌های عددی مانند اویلر حل می‌شوند، می‌باشد. در حل معادلات دیفرانسیل جزئی مسئله مهم رسیدن به معادله ساده‌ای است که از نظر عددی پایدار باشد. روش‌هایی با مزایا و معایب مختلف برای این امر وجود دارد، که روش اجزاء محدود یکی از بهترین آن‌هاست. این روش در مورد مسائلی که مرزها نامنظم است یا در مسائلی که در محیط جریان ناهمگن و ناهمسانگرد می‌باشد انعطاف پذیری بالایی دارد. همچنین روش‌های اجزای محدود امکان حل مسائل دوگان^۲، مثل انتقال آلاینده یا مرزهای متحرک مانند تحرک سطح ایستابی را نیز فراهم می‌آورد. در نهایت انتخاب روش حل مسائل، بستگی به عواملی مثل پیچیدگی مسئله و کاربر پسند بودن هر کدام از روش‌ها دارد (Diersch, 2013).

معادله حاکم بر آب زیرزمینی در آبخوان محصور

معادله حاکم بر آب زیرزمینی در حالت دو بعدی برای یک آبخوان محصور در حالت غیرماندگار به شکل رابطه ۱ است (Bear, 1979; Dupouit, 1863).

$$k_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + k_y \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) = S \frac{\partial H}{\partial t} + Q \times \delta(x - x_w)(y - y_w) + q \quad (1)$$

که در آن شرایط اولیه از حالت ماندگار بدست می‌آید و در رابطه قرار می‌گیرد. شرایط مرزی برای معادله ۱ می‌تواند تنها از نوع هد ثابت (دیریشلت)، جریان ثابت (نیومن) و یا ترکیبی از این دو باشد. در این معادله، H سطح آب زیرزمینی وابسته به x و y است؛ k ضریب هدایت هیدرولیکی، k_x در جهت افقی و k_y در جهت عمودی؛ S ضریب ذخیره، Q دبی متمرکز (با علامت منفی در صورت چاه بهره‌برداری و با علامت مثبت در صورت چاه تزریق) و q دبی گسترده مانند باران یا تبخیر است.

پس از گسسته‌سازی کامل معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی به یک دسته معین معادله خطی به شکل $KU = F$ رسیده (Doulabi et al., 2019) که فرم گسسته شده هر پارامتر در روابط ۲ تا ۴ نشان داده شده است:

دبی $0/00024$ و $0/00012$ متر بر روز بارندگی، تغذیه می‌شود. سه چاه بهره‌برداری در مختصات‌های $(800, 800)$ ، $(800, 200)$ و $(1400, 600)$ وجود دارند که به ترتیب با دبی 500 ، 200 و 700 متر مکعب بر روز آب پمپاژ می‌کنند و در شکل ۴ با رنگ مشکی مشخص شده‌اند. همچنین یک چاه تغذیه به رنگ سبز در شکلی ۴ در موقعیت $(400, 800)$ قرار دارد و آبخوان را به نرخ 800 مترمکعب بر روز تغذیه می‌کند. شرایط در آبخوان به صورت ناهمسانگرد و غیرهمگن بوده، به طوریکه آبخوان به سه منطقه با ضرایب انتقال مختلف تقسیم شده است؛ همچنین ضرایب انتقال در جهات افقی و عمودی در هر منطقه با هم متفاوت می‌باشد. شرایط مرزی برای مرزهای چپ و راست از نوع هد ثابت با مقادیر به ترتیب 100 و 95 متر می‌باشد. همچنین مرزهای شمالی و جنوبی از نوع بدون جریان و یا نفوذناپذیر هستند. قابل ذکر است این آبخوان سه چاه مشاهداتی در موقعیت‌های $(600, 400)$ ، $(1000, 600)$ و $(1600, 400)$ دارد.

جدول ۱ مقادیر ضریب انتقال را برای سه منطقه آبخوان نشان می‌دهد:

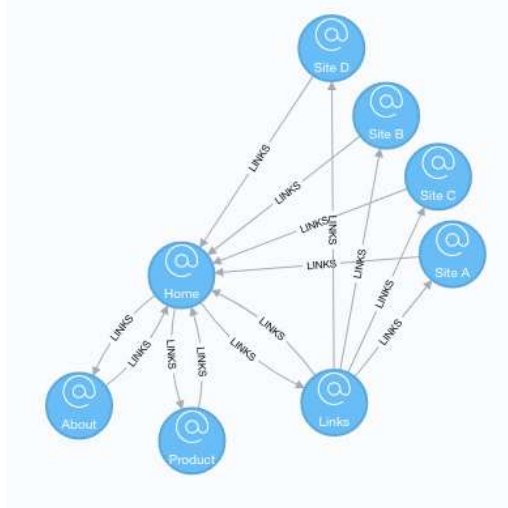
نتایج و بحث

به منظور مدل‌سازی به کمک روش عددی المان محدود در شبیه‌ساز FeFlow، در مرحله اول آبخوان شبکه‌بندی می‌شود، انتخاب نوع شبکه مورد استفاده در آبخوان‌هایی با هندسه پیچیده تاثیر بسزایی در نتایج دارد. در این پژوهش شبکه‌بندی آبخوان به کمک مثلث بندی نامنظم صورت گرفت. شکل ۵ شبکه‌بندی دامنه آبخوان محصور را نشان می‌دهد.

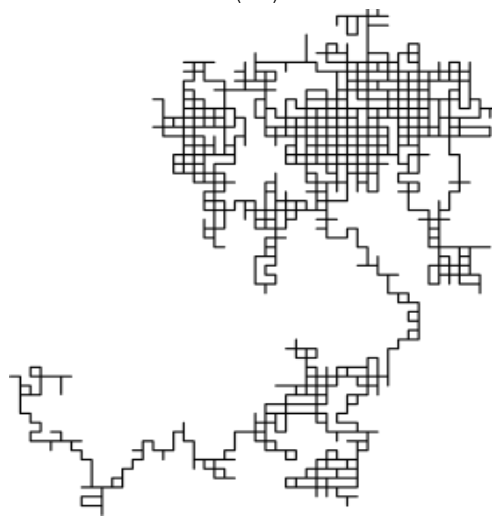
همانطور که از شکل پیداست با فاصله گرفتن از مرزها تراکم المان‌ها بیشتر شده و شبکه‌ها ریزتر می‌شوند. اطلاعات ورودی از قبیل مکان و دبی چاه‌های برداشت و چاه تزریق، تعیین مرزهای آبخوان، قابلیت انتقال، ضریب ذخیره و شرایط اولیه با توجه به اطلاعات مساله وارد می‌شوند. لازم به ذکر است منطقه مورد بررسی غیرایزوتوپیک یا انیزتروپیک بوده و مقادیر ضریب انتقال در دو جهت افقی و عمودی متفاوت می‌باشند.

شکل ۶-الف شرایط مرزی هد ثابت (دیریشلت) را در آبخوان با نماد دایره آبی مشخص کرده است که با توجه به اطلاعات مساله در مرزهای شرقی و غربی اعمال شده‌اند. لازم به ذکر است، مرزهای غربی هد 100 متر و مرزهای شرقی هد 95 متر دارند. همچنین مرزهای جریان صفر (نیومان) را که با نماد ضربدر قرمز متمایز شده‌اند نشان داده شده است. در این مرزها هیچ گونه ورود و خروج جریانی صورت نمی‌گیرد. اعمال دبی برداشت چاه‌های بهره‌برداری و دبی تزریق چاه تزریق نیز مشخص شده است. نقاط قرمز که قسمت بالایی آن فلهی دارد، چاه‌ها را نشان می‌دهد. تفاوت چاه‌های برداشت

گرفته است. از این الگوریتم در عملیات مسیریابی استفاده می‌شود، به عنوان مثال در علم بیولوژی به منظور شبیه‌سازی و یافتن مسیر حرکت حیوانات، از این روش بهره می‌برند. الگوریتم این روش در شکل ۳ نشان داده شده است. شبیه‌ساز FeFlow به کمک این الگوریتم حریم کمی چاه‌های بهره‌برداری را تعیین و ترسیم می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل ۳- نمایش نحوه مسیریابی توسط گام تصادفی (Pearson, 1905)

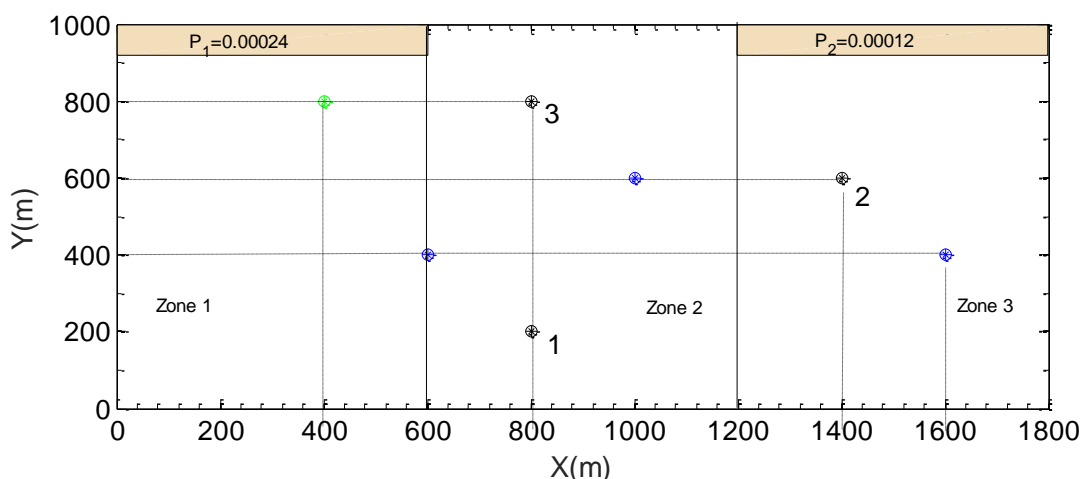
آبخوان استاندارد

آبخوان محصور استاندارد برگرفته از مطالعه شریف و همکاران در شکل ۴ به نمایش گذاشته شده است. ابعاد این آبخوان و ضخامت آن به ترتیب 1000×1800 مترمربع و 10 متر می‌باشد. همچنین ضریب ذخیره برای آبخوان $0/0004$ است (Sharief et al., 2008). آبخوان از دو آکی تارد که در شکل ۴ با رنگ کرمی متمایز شده‌اند با

متفاوت می‌باشند، قسمت الف شکل ۶ نسبت انیزتروپی (حاصل کسر ضریب انتقال ماکزیمم به ضریب انتقال مینیمم) سه منطقه آبخوان را نشان می‌دهد.

سطح آب زیرزمینی به کمک FeFlow در یک دوره ۱۰۰۰۰ روزه (سی ساله) مدل‌سازی و محاسبه شد و بر اساس آن درونیایی سطح آب صورت گرفت. شکل ۷ نتایج این درونیایی به همراه کانتورهای هم سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.

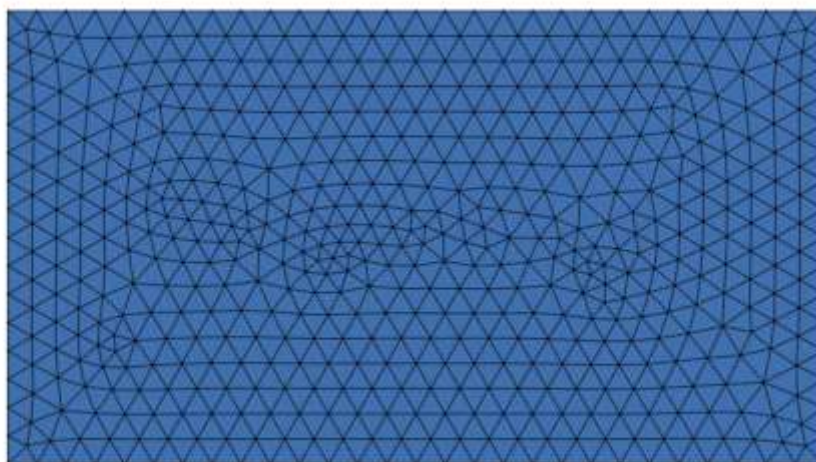
و تزریق در اعمال علامت آن است. علامت دبی برای چاه‌های برداشت، منفی و برای چاه تزریق مثبت می‌باشد. در قسمت ب شکل ۶ مناطقی از آبخوان که در آن‌ها بارندگی صورت گرفته را نشان می‌دهد که با رنگ‌های قرمز و سبز از هم متمایز شده‌اند. رنگ قرمز و سبز تزریق به آبخوان از طریق بارندگی به اندازه ۰/۰۰۰۲۴ و ۰/۰۰۰۱۲ متر بر روز را نشان می‌دهد و رنگ بنفش، شبکه‌بندی و المان‌های آبخوان را مشخص می‌کند. از آن‌جایی که آبخوان انیزتروپیک بوده، ضرایب انتقال آبخوان در جهات افقی و عمودی



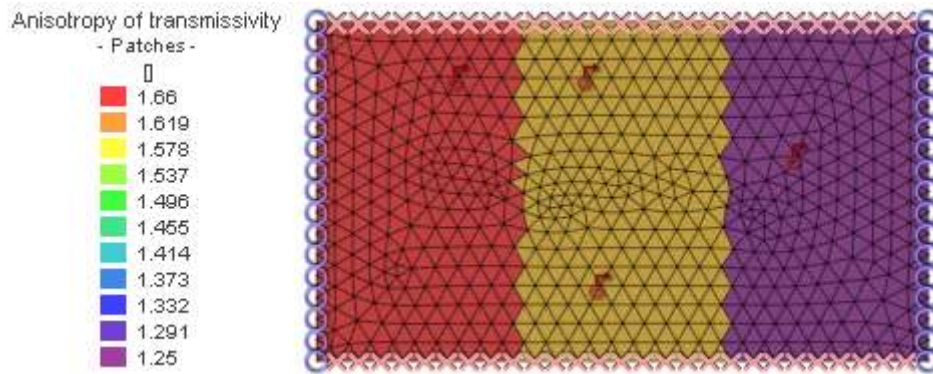
شکل ۴- نمایش آبخوان محصور استاندارد

جدول ۱- مشخصات پارامترهای موجود در آبخوان

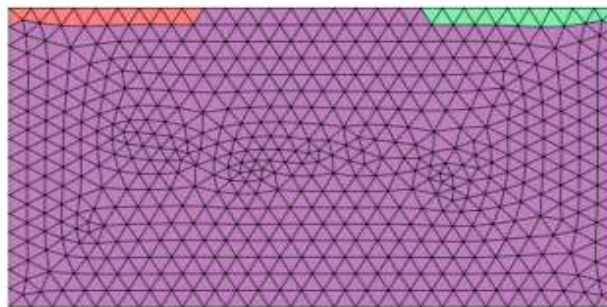
منطقه ۳	منطقه ۲	منطقه ۱	مشخصات آبخوان
۲۵۰	۴۰۰	۵۰۰	ضریب انتقال افقی (متر مربع بر روز)
۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	ضریب انتقال عمودی (متر مربع بر روز)
۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۲	تخلخل



شکل ۵- شبکه‌بندی آبخوان به کمک مدل اجزاء محدود

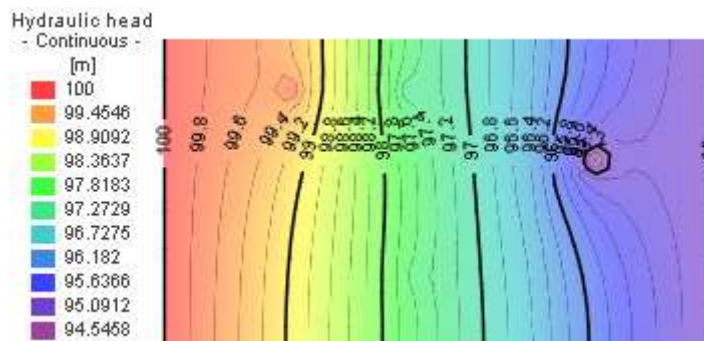


(الف)



(ب)

شکل ۶- ورود اطلاعات ورودی به مدل اجزاء محدود



شکل ۷- محاسبه سطح آب زیرزمینی به کمک مدل FeFlow

شده به آبخوان از طریق چاه تزریق است. به منظور بررسی دقت مدل از سه معیار خطای مطلق، خطای میانگین مطلق و خطای جذر میانگین مربعات استفاده شد و سطح آب زیرزمینی مدل‌سازی شده با سطح آب زیرزمینی مشاهده شده مورد مقایسه قرار گرفت. این سه معیار از اصلی‌ترین شاخص‌های بررسی دقت آب زیرزمینی هستند و از روابط ۹ تا ۱۱ بدست می‌آیند (Sadeghi tabas et al., 2016).

$$ME = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (h_o - h_s)}{m \times n} \quad (9)$$

همانطور که از شکل پیداست سطح آب زیرزمینی در مرزهای هد ثابت پس از گذشت دوره ۱۰۰۰۰ روزه، بدون تغییر بوده به طوری که مرزهای غربی سطح آب زیرزمینی آن‌ها ۱۰۰ متر و مرزهای شرقی ۹۵ متر هستند. با عبور از غرب آبخوان به شرق آن از تراز سطح آب زیرزمینی کاسته شده به طوری که کمترین مقدار آن در چاه سوم واقع در موقعیت (۶۰۰، ۱۴۰۰) است و مقدار آن ۹۴/۵۴ متر می‌باشد و بیشترین سطح آب مربوط به قسمت چاه تزریق است که مقداری برابر با سطح آب مرزهای غربی دارد. یکی از علل چشمگیر نبودن افت سطح آب در این دوره ۱۰۰۰۰ روزه، مقدار بالای حجم آب تزریق

که در آن h_o و h_s به ترتیب سطح آب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است و m و n به ترتیب تعداد گام‌های زمانی و تعداد پیزومترهاست. با توجه به روابط ۹ تا ۱۱ این خطاها محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۲ ذکر شده است.

$$MAE = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |h_o - h_s|}{m \times n} \quad (10)$$

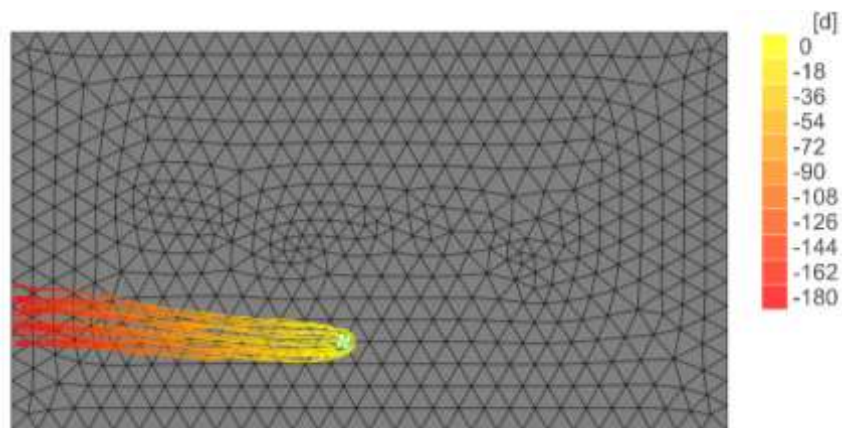
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (h_o - h_s)^2}{m \times n}} \quad (11)$$

جدول ۲- محاسبه معیارهای خطا

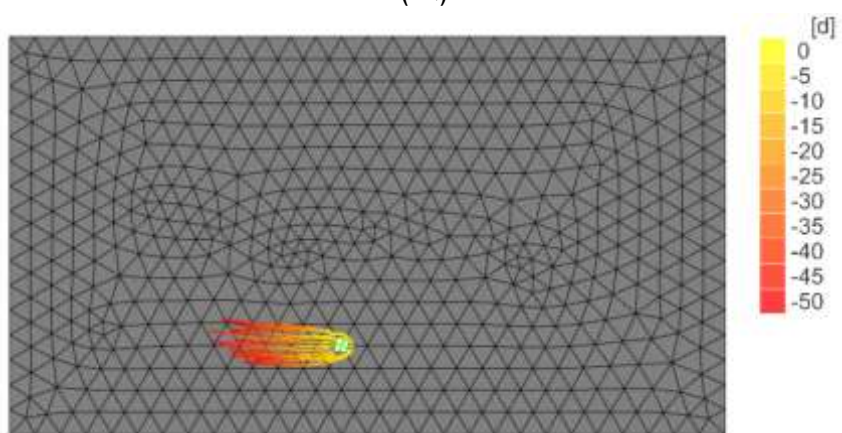
روش تفاضل محدود GMS (Sharief et al., 2008)	روش اجزاء محدود FeFlow	معیار خطا
۰/۰۲۱	۰/۰۰۱۶	خطای میانگین (متر)
۰/۰۴۵	۰/۰۰۲۸	خطای مطلق میانگین (متر)
۰/۲۴۹	۰/۱۴۱	خطای جذر میانگین مربعات (متر)

چاه‌های ۱، ۲ و ۳ برای دو دوره ۱۸۰ و ۵۰ روزه نشان می‌دهد.

پس از مدل‌سازی سطح آب، حریم کمی چاه‌ها به تفکیک هر چاه رسم می‌شود. شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ حریم کمی را به ترتیب برای



(الف)

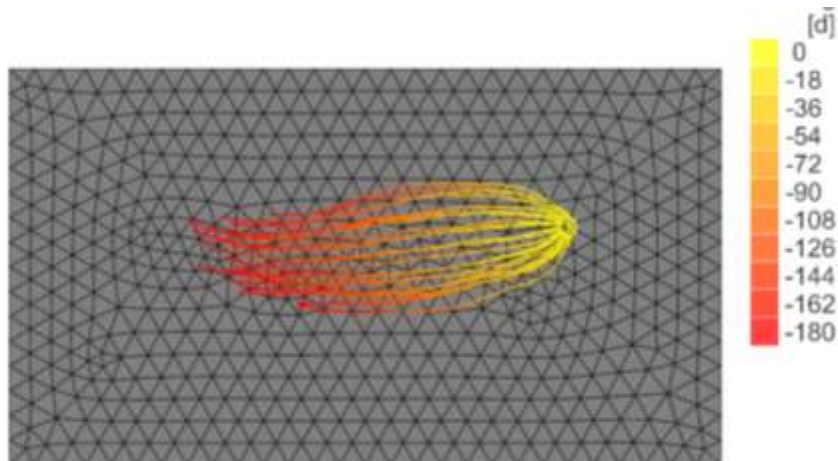


(ب)

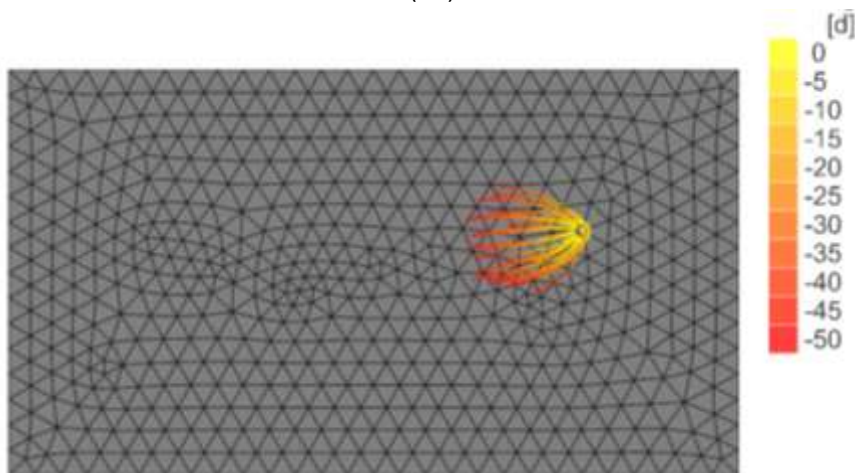
شکل ۸- ترسیم حریم کمی چاه یک. الف) دوره ۱۸۰ روزه. ب) دوره ۵۰ روزه.

شده ولی عرض آن بدون تغییر باقی مانده است. همانطور که مشخص است گسترش عرضی حریم چاه شماره یک در منطقه یک به علت ضرایب انتقال بالاتر آن نسبت به منطقه دو بیشتر می‌باشد. در ادامه شکل ۹ حریم کمی چاه شماره دو را که در منطقه سه قرار گرفته است نشان می‌دهد.

شکل ۸ حریم کمی چاه شماره یک را در دو دوره ۵۰ و ۱۸۰ روزه نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، کشیدگی حریم به سمت قسمتی از آبخوان است که تراز آب زیرزمینی در آن جا بالاترین مقادیر را دارد. طول و عرض اولیه حریم در حالت ۱۸۰ روزه به ترتیب ۸۶۷/۴۴ و ۱۱۰/۰۱ متر می‌باشد و این در حالی است که در دوره ۵۰ روزه این مقادیر، ۳۱۲/۸۳ و ۱۱۰/۰۱ متر می‌باشند. طول حریم کمتر



(الف)

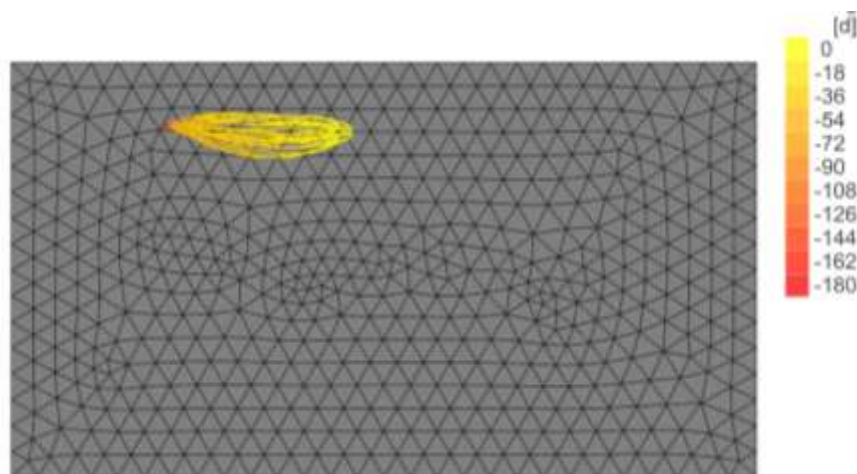


(ب)

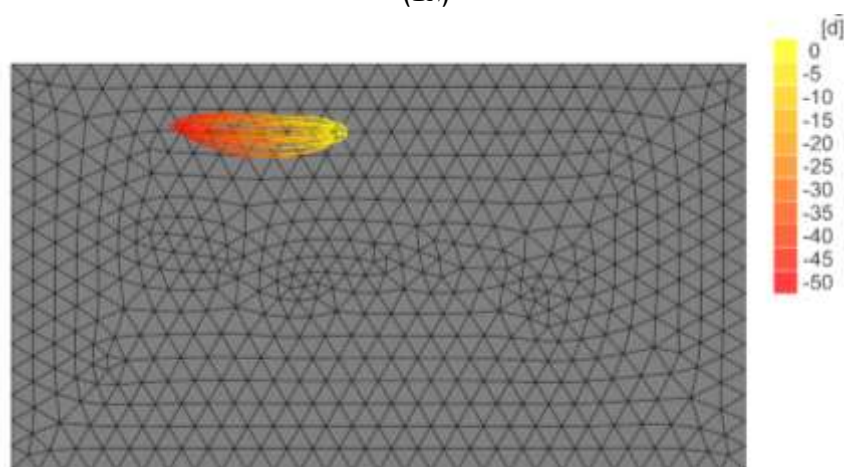
شکل ۹- ترسیم حریم کمی چاه دو. (الف) دوره ۱۸۰ روزه. (ب) دوره ۵۰ روزه

مرز غربی آبخوان است. عرض اولیه و طول حریم در دو حالت الف و ب به ترتیب ۳۲۹/۲۳، ۹۸۱/۵۹ متر و ۳۰۲/۸۶، ۲۹۰/۴۱ می‌باشد. در ادامه، حریم برای چاه شماره سه که در منطقه دو واقع شده است رسم می‌گردد.

عرض حریم تشکیل شده برای این چاه نسبت به دو چاه دیگر بیشتر بوده و این ناحیه با ورود به منطقه دو آبخوان باریک شده و این مهم در شکل ۹-الف کاملاً آشکار است. علت این امر، افزایش قابلیت انتقال پذیری در منطقه دو نسبت به منطقه سه می‌باشد. کشیدگی محدوده حریم به سمت سطح بالاتر آب زیرزمینی به عبارتی



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- ترسیم حریم کمی چاه سه. الف) دوره ۱۸۰ روزه. ب) دوره ۵۰ روزه

با سطح آب زیرزمینی بالاتر است. چاه‌های یک و دو به سمت غرب آبخوان (هد ثابت ۱۰۰ متر) و چاه سه به سمت چاه تزریق است. عرض حریم همچنین علاوه بر اینکه به مقدار دبی پمپاژ چاه‌ها بستگی دارد، عامل اصلی موثر در آن قابلیت انتقال و به تبع آن هدایت هیدرولیکی است؛ چرا که ضخامت آبخوان ثابت است. همچنین طول و عرض حریم بدست آمده از مدل FeFlow برای چاه‌های آبخوان در جدول ۳ ذکر شده است.

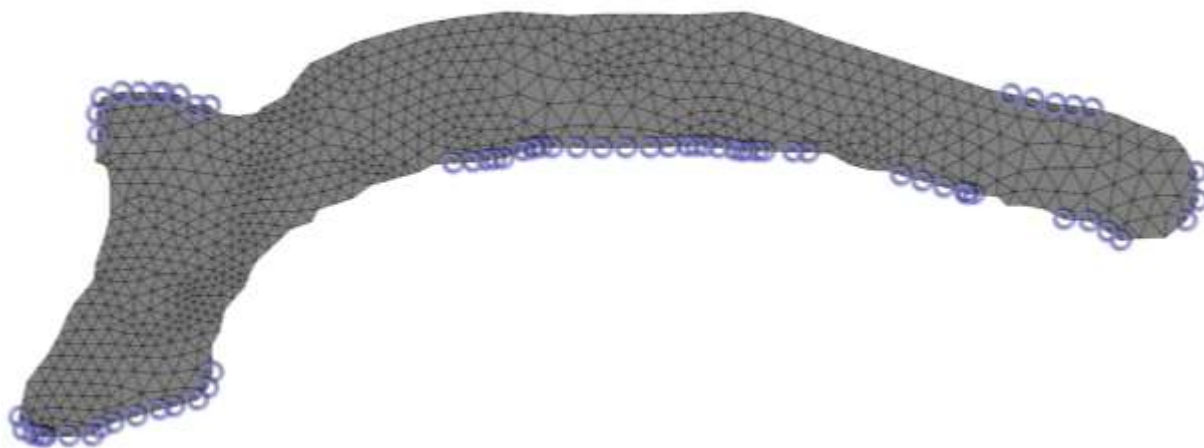
همانطور که از شکل پیداست، عرض اولیه و طول حریم در دو حالت الف و ب تغییری نکرده است، دلیل این امر سطح بالای آب زیرزمینی در این منطقه می باشد؛ که آن هم به سبب وجود چاه تزریق در نزدیکی این منطقه است که با تزریق آب به آبخوان موجب عدم کاهش سطح آب در این قسمت شده و نتیجتاً شکل حریم بعد از گذشت ۱۸۰ روز هیچ تغییری نسبت به دوره ۵۰ روزه ندارد. بنابراین در یک نتیجه‌گیری کلی کشیدگی حریم به سمت مناطق

جدول ۳- عرض و طول حریم در دو دوره ۵۰ و ۱۸۰ روزه به تفکیک چاه‌ها

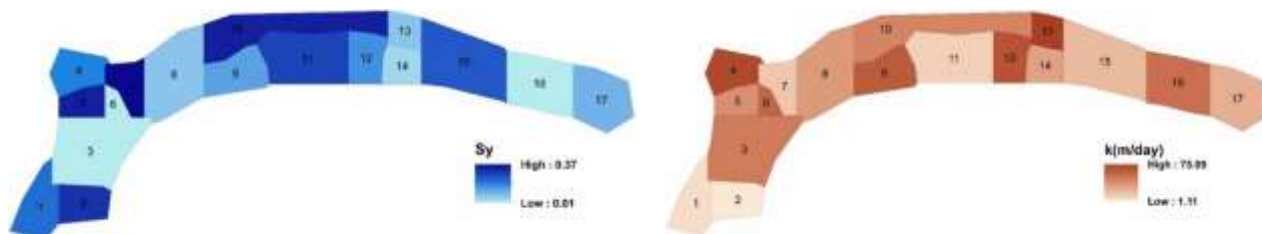
شماره چاه	دبی برداشت (متر مکعب بر روز)	دوره ۵۰ روزه		دوره ۱۸۰ روز	
		عرض اولیه حریم (متر)	طول حریم (متر)	عرض اولیه حریم (متر)	طول حریم (متر)
۱	۲۰۰	۳۱۲/۸۳	۸۶۷/۴۴	۱۱۰/۰۱	۱۱۰/۰۱
۲	۵۰۰	۲۹۰/۴۱	۹۸۱/۵۹	۳۰۲/۸۶	۳۲۹/۲۳
۳	۷۰۰	۳۴۱/۴۶	۳۴۱/۴۶	۱۰۱/۳۲	۱۰۱/۳۲

آبدهی ویژه مطابق با پژوهش صادقی طیس و همکاران که این مقادیر را واسنجی نمودند وارد مدل شد. شکل ۱۲ نقشه هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه را به ترتیب برای آبخوان نشان می‌دهد. مقادیر واسنجی شده هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه بین ۷۵/۰۹ و ۱/۱۱ متر بر روز تغییر می‌کند. بیشترین آن مربوط به زون ۱۳ و کمترین آن مربوط به زون ۲ می‌باشد. همچنین در مورد آبدهی ویژه، بیشترین این مقدار برای زون ۷ و کمترین آن برای زون ۳ می‌باشد.

تمامی گام‌های مدل‌سازی برای آبخوان واقعی، آبخوان آزاد بیرجند، نیز انجام گرفت. محدوده مطالعاتی به شبیه‌ساز معرفی شد، سپس شرایط مرزی برای مساله تعریف شدند. شکل ۱۱ محدوده‌های هدایت آبخوان را نمایش می‌دهد که برگرفته از اطلاعات ذکر شده در قسمت مواد و روش‌هاست. اطلاعات ورودی همچون هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه، مقادیر دبی چاه‌ها و بارندگی به مدل شبیه‌ساز وارد شدند. قابل ذکر است داده‌های هدایت هیدرولیکی و



شکل ۱۱- شرایط مرزی هدایت تعریف شده در مدل FeFlow



شکل ۱۲- مقادیر واسنجی شده (الف) هدایت هیدرولیکی (ب) آبدهی ویژه

مقایسه شدند و خط‌های اشاره شده در روابط ۹-۱۱ در جدول ۴ محاسبه شدند.

حال به کمک الگوریتم گام تصادفی، حریم کمی برای ۵ چاه دلخواه از آبخوان ترسیم شدند. انتخاب چاه‌ها به صورت دلخواه بوده و سعی شده است کل مناطق آبخوان را پوشش دهد. ترسیم این ناحیه برای یک دوره پنج ساله و سی ساله در نظر گرفته شده و در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. جدول ۵ مشخصات چاه‌های انتخابی را نشان می‌دهد.

مدلسازی در یک دوره یک ساله (۹۱-۹۲) با گام زمانی ماهانه صورت گرفت و سطح آب زیرزمینی برای کل منطقه محاسبه شد. نتایج این شبیه‌سازی در شکل ۱۳ به تصویر کشده شده است.

شکل ۱۳ سطح آب زیرزمینی مدل‌سازی شده در آبخوان بیرجند را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست، بیشترین سطح آب مربوط به نواحی شرقی بوده و با حرکت از شرق به غرب از مقدار سطح آب زیرزمینی کاسته شده و در نواحی جنوب غربی کمترین مقدار سطح آب زیرزمینی مشاهده می‌شود.

نتایج بدست آمده از شبیه‌ساز FeFlow با داده‌های مشاهداتی



شکل ۱۳- سطح آب مدل سازی شده به کمک شبیه ساز FeFlow

جدول ۴- محاسبه معیارهای خطا

معیار خطا	روش اجزاء محدود FeFlow	روش تفاضل محدود GMS (Mohtashami et al., 2017)
خطای میانگین (متر)	۰/۱۱۲	۰/۱۵۹
خطای مطلق میانگین (متر)	۱/۰۲	۱/۴۳۴
خطای جذر میانگین مربعات (متر)	۰/۹۵۱	۱/۱۹۷

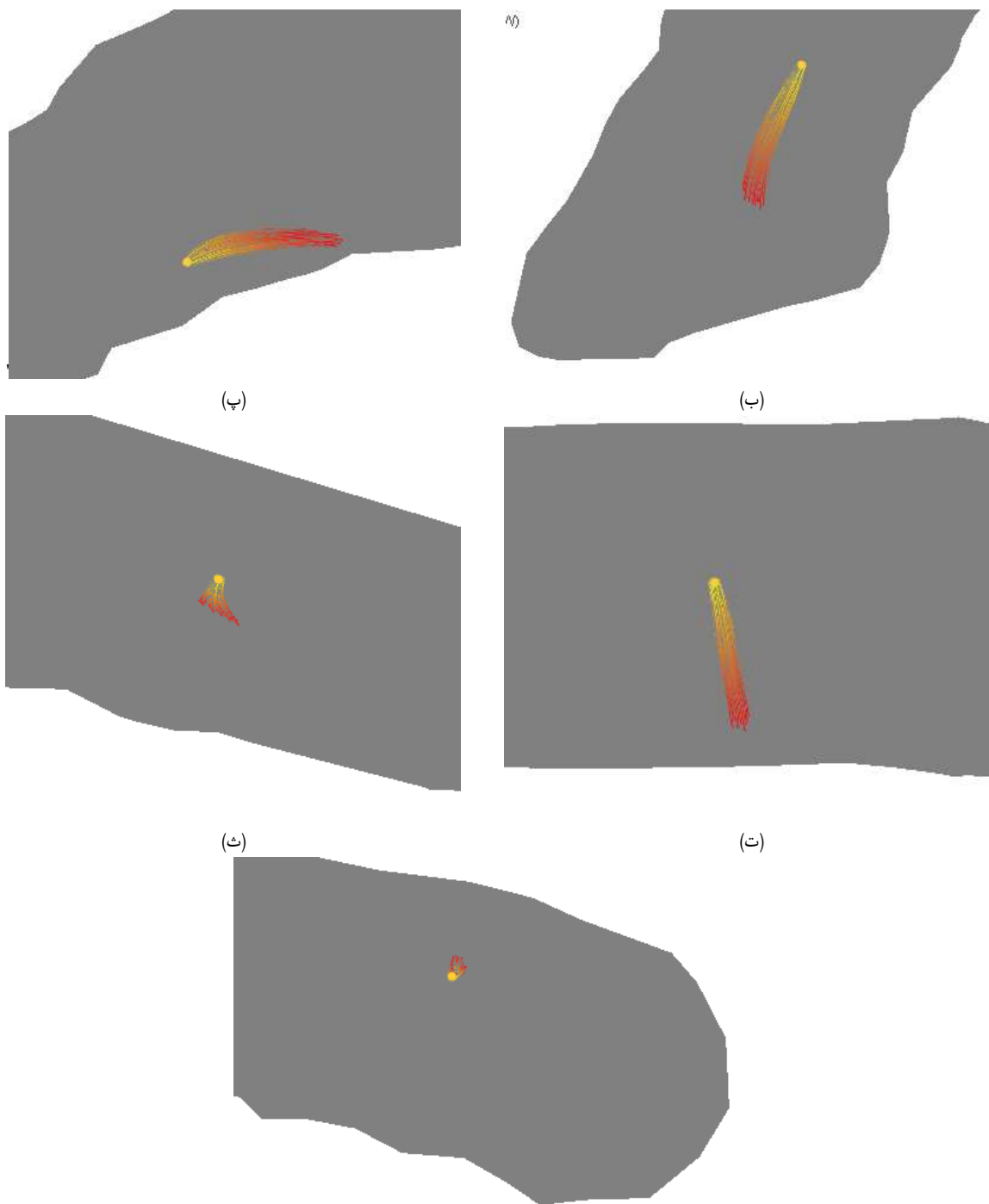
جدول ۵- مشخصات چاه های انتخابی

شماره چاه	دبی در هر ماه (مترمکعب در روز)	هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)	آبدهی ویژه	گرادینان هیدرولیکی
۱	۷۵۶	۳۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۰۵
۲	۳۵۲/۸	۲۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۰۳
۳	۱۲۹/۶	۴/۹۸	۰/۳۳	۰/۰۰۲
۴	۷۶/۸	۱۴/۰۳	۰/۳۱	۰/۰۰۲
۵	۴۶/۸	۱۲/۴۳	۰/۰۳	۰/۰۰۲

Travel time, Backward Streamlines (RW) seeded @Node Selection #1



(الف)

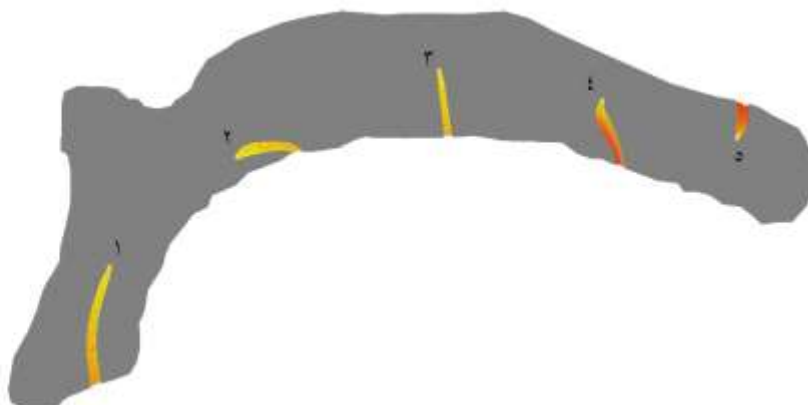
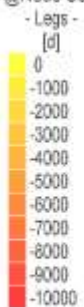


شکل ۱۴- حریم کمی ۵ چاه انتخابی در دوره ۵ ساله (ج)

همانطور که از شکل پیداست کشیدگی این ناحیه، برای سه چاه یک، دو و سه نسبت به بقیه چاه‌ها بیشتر است. علت آن دبی بیشتر و هدایت هیدرولیکی بالاتر در آن قسمت می‌باشد که موجب شده افت سطح آب زیرزمینی در آن منطقه و به تبع ناحیه حریم کشیده‌تر شود. طول حریم برای سه چاه یک، دو و سه به ترتیب ۲۹۹۸/۱۴، ۲۶۵۵/۱۷ و ۲۳۰۰/۴۹ متر است و این در حالی است که این اندازه برای چاه‌های ۴ و ۵، ۶۹۴/۳۲ و ۳۶۴/۶۲ متر می‌باشد. روند گسترش حریم به سمت مناطقی است که شرایط مرزی هد ثابت دارند. در ادامه حریم برای یک دوره سی ساله ترسیم شده است.

همانطور که از شکل پیداست کشیدگی این ناحیه، برای سه چاه یک، دو و سه نسبت به بقیه چاه‌ها بیشتر است. علت آن دبی بیشتر و هدایت هیدرولیکی بالاتر در آن قسمت می‌باشد که موجب شده افت سطح آب زیرزمینی در آن منطقه و به تبع ناحیه حریم کشیده‌تر شود. طول حریم برای سه چاه یک، دو و سه به ترتیب ۲۹۹۸/۱۴، ۲۶۵۵/۱۷ و ۲۳۰۰/۴۹ متر است و این اندازه برای چاه‌های ۴ و ۵، ۶۹۴/۳۲ و ۳۶۴/۶۲ متر می‌باشد. روند گسترش حریم به سمت مناطقی است که شرایط مرزی هد ثابت دارند. در ادامه حریم برای یک دوره سی ساله ترسیم شده است.

Travel time, Backward Streamlines (RW)
seeded @Node Selection #1



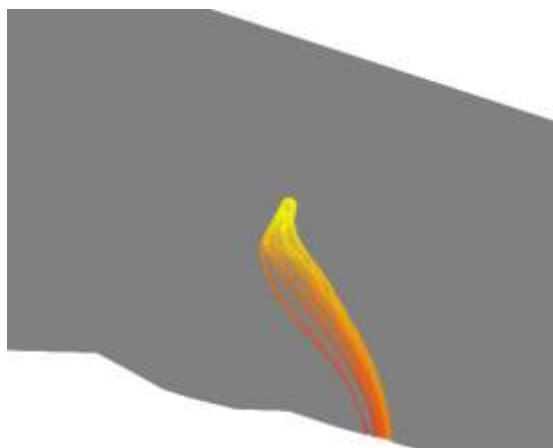
(الف)



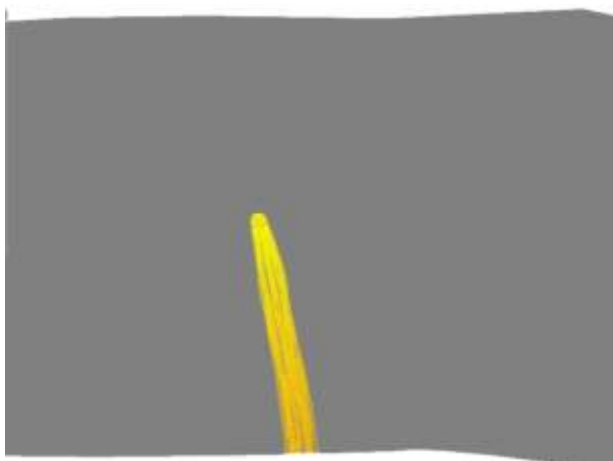
(ب)



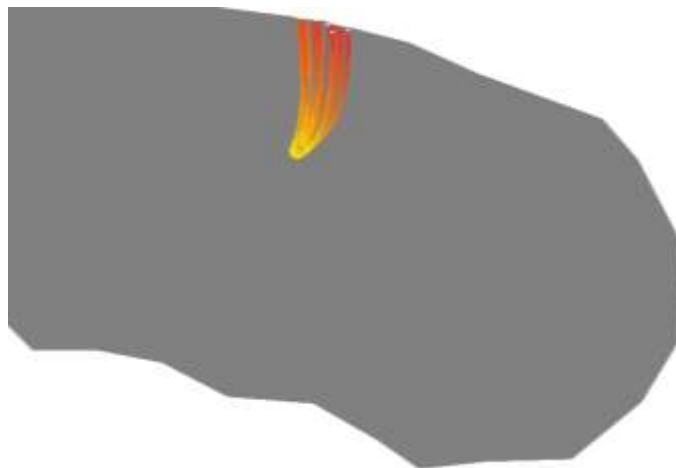
(ب)



(ث)



(ت)



(ج)

شکل ۱۵- الف) ترسیم حریم کمی برای ۵ چاه دلخواه. ب) حریم کمی چاه ۱. پ) حریم کمی چاه ۲. ت) حریم کمی چاه ۳. ث) حریم کمی چاه ۴. ج) حریم کمی چاه ۵

ترسیم حریم در آبخوان استاندارد نشان دادند که: ۱- با گذشت زمان طول حریم چاه‌های یک و دو افزایش می‌یابد به طوری‌که برای چاه یک، این مقدار از ۳۱۲/۸۳ متر به ۸۶۷/۴۴ متر و برای چاه دوم از ۲۹۰/۴۱ متر به ۹۸۱/۵۹ متر می‌رسد. از آنجایی که کشیدگی حریم به سمت مرز غربیست، نشان‌دهنده تمایل کشیده شدن حریم به سمت مناطقی است که سطح آب بالاتری دارند. ۲- عرض حریم وابسته به قابلیت انتقال پذیری منطقه است به طوری‌که با افزایش قابلیت انتقال یک منطقه عرض حریم بیشتر شده و این درحالی است که با ورود حریم به منطقه با قابلیت انتقال کمتر، از میزان عرض حریم کاسته می‌شود. به طوری‌که در چاه شماره ۱، که در منطقه دو واقع است حریم عرض ۱۱۰/۰۱ متر را داشته و این درحال است که در منطقه سه عرض آن به ۱۲۴/۵۲ متر می‌رسد. افزایش ۱۴/۵۱ متری عرض حریم گواه این قضیه می‌باشد، زیرا که قابلیت انتقال در منطقه ۲ بیشتر از منطقه ۱ است. همچنین نتایج در ترسیم حریم در آبخوان بیرجند نشان دادند شکل حریم به مقدار زیادی وابسته به قابلیت انتقال پذیری و یا هدایت هیدرولیکی آبخوان است. با توجه به بررسی شکل گسترش حریم در دو دوره ۵ و سی ساله برای ۵ چاه انتخابی در آبخوان آزاد بیرجند، مشخص شد که کشیدگی این محدوده به سمت مناطقی از مرز هد ثابت بوده و مطابق با الگوی جریان می‌باشد. به طوری‌که در دوره ۵ ساله، جهت کشیدگی حریم به سمت مناطق هد ثابت است، و در دوره سی ساله با افت بیشتر سطح آب، حریم دیگر به این مناطق رسیده است. نکته دیگر تاثیر دبی چاه بر شکل حریم است. به طوری‌که در چاه شماره ۵، که دبی برداشت آن نسبت به بقیه چاه‌ها کمترین است، طول حریم آن در دوره ۵ ساله ۳۶۴/۶۲ متر می‌باشد.

شکل ۱۵ حریم پنج چاه دلخواه را در آبخوان بیرجند برای یک دوره سی ساله نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۵، هندسه حریم کمی چاه‌ها تابع مرزهای تغذیه می‌باشد. در شرایط عادی، حریم کمی در جهت خلاف شیب جریان آب زیرزمینی ناحیه‌ای گسترش می‌یابد ولی تحت تاثیر مرزهای تغذیه‌ای می‌تواند منحرف و با الگوی جریان محلی منطبق شود. این اتفاق برای هر پنج چاه آبخوان بیرجند رخ داده و مطابق با الگوی جریان و تحت تاثیر مرزهای هد ثابت قرار گرفته‌اند. به طوری‌که حریم هر پنج چاه به سمت این مرزها کشیده شده است. چاه اول به محدوده هد ثابت شماره ۱۰، چاه دوم به محدوده ۱، چاه سوم به محدوده ۲، چاه چهارم به محدوده ۴ و چاه پنجم به محدوده ۷ هد ثابت منحرف شده است. نکته دیگر چاه‌های شماره ۴ و ۵ هستند، که با توجه به رنگ حریمشان در مدت زمان بیشتری به محدوده هد ثابت می‌رسند و دلیل آن دبی کمتر به همراه هدایت هیدرولیکی کمتر آن منطقه و محدوده است. رنگ نارنجی متمایل به قرمز حریم در این دو چاه گواه این قضیه است.

نتیجه‌گیری

ترسیم حریم کمی به کمک مدل‌های عددی همواره انطباق مناسبی با واقعیت آن دارد. در این مطالعه به کمک روش اجزاء محدود در شبیه‌ساز FeFlow و الگوریتم گام تصادفی، حریم کمی چاه‌های موجود در یک آبخوان محصور استاندارد و آبخوان آزاد بیرجند ترسیم شدند. در آبخوان استاندارد از آنجایی که به صورت غیرایزوتروپیک بوده از سه منطقه با ضرایب انتقال متفاوت تشکیل شده است. چاه یک و سه در منطقه دو و چاه دو در منطقه سه قرار گرفته‌اند. نتایج

- systems in Whatcom County. *Washington Journal Environ Health* 66(2):17-23.
- Mohtashami, A., Akbarpour, A., and Mollazadeh, M. 2017. Development of two dimensional groundwater flow simulation model using meshless method based on MLS approximation function in unconfined aquifer in transient state. *Journal of Hydroinformatics* 19(5):640-652.
- Mohtashami, A., Akbarpour, A., and Mollazadeh, M. 2017. Modeling of groundwater flow in unconfined aquifer in steady state with meshless local Petrov-Galerkin. *Modares Mechanical Engineering* 17(2):393-403.
- Mohtashami, A., Hashemi Monfared, S.A., Azizyan, G., and Akbarpour, A. 2019. Determination the capture zone of wells by using meshless local Petrov-Galerkin numerical model in confined aquifer in unsteady state (Case study: Birjand Aquifer). *Iranian Journal of Ecohydrology* 6(1):239-255.
- Moinante, M., and Lobo-Ferreira, J. 2005. On wellhead protection assessment methods and a case-study application in Montemor-o-Novo, Portugal. In: *The fourth inter-celtic colloquium on hydrology and management of water resources*. 21-34.
- Pearson, K. 1905. The problem of the random walk. *Nature* 72(1867):342.
- Puchalski, G. 2009. Wellhead protection plan for the city of Barrett, s.l.: Minnesota Department of Health.
- Sabetraftar, A. 2013. Guidelines for determining the protection zone of groundwater. Iran's Ministry of Energy. 621.
- Sadeghi Tabas, S., Samadi, S.Z., Akbarpour, A., and Pourreza Bilondi, M. 2016. Sustainable groundwater modeling using single-and multi-objective optimization algorithms. *Journal of Hydroinformatics* 18(5):1-18.
- Sharief, S.M., Eldho, T.I., and Rastgoi, A.K. 2008. Optimal Pumping Policy for Aquifer Decontamination by Pump and Treat Method. *ISH Journal of Civil Engineering* 14(2):1-17.
- Siarkos, I., and Iationopoulos, P. 2012. Delineation of wellhead protection zones for the control of point pollution sources in the aquifer of N. Greece. *European Water* 40:3-17.
- Staboulzidis, A.G., and Dokou, Z. 2017. Capture Zone Delineation and Protection Area Mapping in the Aquifer of Aia, Crete, Greece. *Environmental process*. 4(1):95-112.
- Sarwar, A., and Eggers, H. 2006. Development of a conjunctive use model to evaluate alternative management options for surface and groundwater resources. *Hydrogeological Journal* 14(8):1676-1687.
- سامانی، ن.، و کامرانی، ص. ۱۳۹۵. ارزیابی حریم کمی و کیفی چاه های آب شرب نسبت به نیترات مطالعه موردی: دشت آسپاس شهرستان اقلید، استان فارس. *زمین شناسی کاربردی پیشرفته*. ۲۹: ۴۰-۲۹.
- فریور، ا.، رضانی، ی. و اکبرپور، ا. ۱۳۹۷. شبیه سازی عددی روند تغییرات کروم در آبخوان دشت بیرجند. *نشریه علمی پژوهشی آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۲(۵): ۱۲۰۳-۱۲۱۶.
- محتشمی، ع.، هاشمی منفرد، س.آ.، عزیزیان، غ.ز. و اکبرپور، ا. ۱۳۹۸. محاسبه بیلان آب زیرزمینی به کمک روش عددی (MLPG مطالعه موردی: آبخوان آزاد بیرجند). *نشریه علمی- پژوهشی آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۴(۴): ۱۴۶۰-۱۴۷۴.
- Ashraf, A., and Ahmad, Z. 2008. Regional groundwater flow modelling of Upper Chaj Doab of Indus Basin, Pakistan using finite element model (Feflow) and geoinformatics. *Geophys. J. Int.* 173(1):17-24.
- Bear, J. 1979. *Hydraulics of groundwater*. the University of Michigan: McGraw-Hill International Book Co.
- Diersch, H.J.G. 2013. *FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media*. Springer Science & Business Media.
- Dong, Y., Xu, H., and Li, G. 2013. Wellhead protection area delineation using multiple methods: a case study in Beijing. *Environ Earth Science* 70:481-488.
- Doulabi, F., Akbarpour, A., Akbari, M., and Mohtashami, M. 2019. Numerical Simulation of Groundwater Recharge by Injection Wells with Using Meshless Local Petrov-Galerkin. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 13(5):1246-1256.
- Dupouit, J., 1863. *Estudes Theoriques et Pratiques sur le Mouvement desEaux*. Paris: Dunod.
- Feo, A., Zanini, A., Petrella, E., and Celico, F. 2017. A Python Script to Compute Isochrones for MODFLOW. *Groundwater* 10:1-7.
- Ferreira, J.P., Krijgsman, B., and Feseker, T. 2004. Models for wellhead protection in regional unconfined aquifers and stratified aquifers. *Geofísica Internacional* 43(4):651-665.
- Goodarzi, M., and Eslamian, S.S. 2019. Evaluation of WhAEM and MODFLOW models to determine the protection zone of drinking wells. *Environmental Earth Sciences* 78:195-203.
- Miller C. 2003. A comparison of wellhead protection area delineation methods for public drinking water

- Shaped Aquifers: Modeling and Application. International Journal of Science Technology and Society. 3.
- Zhao, C., Wang, Y., Chen, X.I., and Li, B. 2005. Simulation of the effects of groundwater level on vegetation change by combining FEFLOW software, Ecological Modelling 187(2-3):341-351.
- Trefry, M.G., and Muffels, C. 2007. FEFLOW: A finite-element groundwater flow and transport modeling tool. Groundwater 45(5):525-528.
- Zarei-Doudeji, S., and Samani, N. 2014. Capture zone of a multi-well system in bounded peninsula-shaped aquifers. Journal of Contamination Hydrology 164:114-124.
- Zarei-Doudeji, S., and Samani, N. 2016. Capture Zone of a Multi-Well System in Bounded Rectangular-

Determination of Well's Capture Zones Using Random Walk Algorithm and FeFlow Simulation Model

N. Majidi Khalilabad¹, A. Mohtashami², A. Akbarpour^{3*}

Received: Sep.19, 2020

Accepted: Nov.24, 2020

Abstract

Determination of wells' capture zones are one of the important issues which must be considered in every aquifers. Methods used for depicting this area divides into two simple and complex methods. Through the simple one several mathematical equations utilized and in the complex method, numerical models are applied. In this study, for the first time, the capture zone of the extraction wells in a standard confined aquifer and Birjand unconfined aquifer was determined using Feflow simulation model. After the simulation procedure in the period of 1390-1391 with monthly time step, the groundwater head is obtained, then the capture zone for each well was depicted. In confined aquifer this area individually determined for 3 extraction wells in two periods of 50 and 180 days. The results showed that the extension of the capture zone for all three wells is toward the part of the aquifer with higher groundwater level. Also, the results revealed that, in areas of the aquifer with higher transmissivity coefficient, the zone is more extended and for the areas with lower transmissivity coefficient, its width decreases and becomes narrower. For instance in second well the width of capture zone in the third zone is 302.86 m, however, it is 267.46 m in the second zone. In Birjand aquifer which consists of 190 extraction wells, 5 wells were chosen randomly to depict capture zone for them in five years and thirty years period. The results revealed that the extension of the capture zones were corresponded to the flow direction. Also, extraction rate of wells and hydraulic conductivity coefficient were two effective parameters in the shape of these zones. As the fifth well in Birjand aquifer with the least value of discharge rate had the smallest length of capture zones among all the wells.

Keywords: Confined and Unconfined Aquifer, Depiction of the Capture Zone, Finite Element Numerical Model, Random Walk Algorithm

1- Research Assistant in East Water & Environment Research Institute (EWERI)

2- Ph.D. Student of Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan

3- Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand

(*- Corresponding Author Email: akbarpour@birjand.ac.ir)