

مقایسه مدل‌های عددی و تحلیلی در شبیه سازی حوضه آبرگیر سیستم چندچاهی در آبخوانهای محدود

و کاربرد آنها

نوذر سامانی

استاد بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

فائزه کریمی

کارشناس ارشد آبخش‌شناسی، دانش آموخته دانشگاه شیراز

سمیه زارعی دودجی

دانش آموخته دکترای آبخش‌شناسی، دانشگاه شیراز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۳

samanin@shirazu.ac.ir

چکیده

در بسیاری از مناطق ایران و جهان آب مورد نیاز از منابع آب زیرزمینی و توسط چاه‌های پمپاژ تأمین می‌شود. پیامد طبیعی پمپاژ بی‌رویه و دراز مدت، کاهش ذخیره آب زیرزمینی است. عدم شناخت از شرایط مرزی محدود کننده آبخوان ممکن است به برآورد نادرست بیلان منابع آب و تعادل نا پایدار این منابع منجر شود. در این مقاله ابتدا مدل‌های عددی و تحلیلی حوضه آبرگیر (زون گیرش) سیستم چند چاهی در آبخوان‌های محدود شبه جزیره ای و مستطیلی شکل با هم مقایسه و دقت مدل‌های عددی ارزیابی شده است. سپس به ذکر نمونه‌هایی از کاربرد حوضه آبرگیر در به تله انداختن ابر آلودگی با استفاده از مدل‌های فوق پرداخته شده و در نهایت تبادل آب سطحی و زیرزمینی در آبخوان محدود شبه جزیره‌ای با تعیین حوضه آبرگیر چاه با استفاده از مدل‌های تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که مدلسازی حوضه آبرگیر در بازه زمانی طولانی مدت نقش بی‌بدیلی در مدیریت مصرف، محاسبه بیلان آب و حفظ تعادل و توسعه پایدار منابع آب سطحی و زیرزمینی دارد.

کلید واژه‌ها: سفره‌های محدود، حوضه آبرگیر، مدل‌های تحلیلی و عددی، تبادل آب‌های سطحی و زیرزمینی، پاکسازی آب‌های زیرزمینی

مقدمه

بخشی از آبخوان در اطراف چاه پمپاژ که آب پمپاژ شده توسط چاه را تأمین می‌کند حوضه آبرگیر (زون گیرش) چاه می‌نامند (Todd and Mays, 2005). وجود جریان منطقه‌ای و شیب هیدرولیکی عامل مهمی در تعیین هندسه حوضه آبرگیر محسوب می‌شود. وجود جریان منطقه‌ای باعث می‌شود که با شروع پمپاژ حوضه آبرگیر در خلاف جهت شیب هیدرولیکی گسترش یابد.

مطالعه حوضه آبرگیر و داشتن اطلاعات کافی از ابعاد و شکل حوضه آبرگیر در بسیاری از موضوعات و پروژه‌های عملی همچون طراحی حریم چاه، عملیات پمپاژ و تصفیه برای پاکسازی آب زیرزمینی و مهار آلودگی مهم و ضروری است (Javandel and Tesang, 1986). همچنین در مناطقی که منابع آب سطحی وجود دارد هندسه حوضه آبرگیر از اهمیت خاصی برخوردار است، چرا که برخورد حوضه آبرگیر به منابع آب سطحی مانند رودخانه و تالاب باعث می‌شود تا بخشی از آب پمپاژ شده از چاه توسط این منابع تأمین شود. تخلیه رودخانه ناشی از پمپاژ، بطور عمده بیلان آب‌های سطحی را تغییر می‌دهد. در اوایل پمپاژ، دبی چاه از ذخیره آبخوان تأمین می‌شود، اما بعد از سپری شدن زمان کافی از پمپاژ، بخش عمده دبی چاه توسط منابع تغذیه کننده آبخوان (مثل رودخانه یا تالاب) تأمین و سهم ذخیره آبخوان به تدریج کاسته می‌شود. در پمپاژ بی‌رویه

توسط چاه‌های متعدد ممکن است رودخانه خشک و این فرایند معکوس گردد و در دراز مدت موجب کاهش ذخیره استاتیک آبخوان و بحران آب (خشک شدن تالاب‌ها و کم شدن آورد رودخانه‌ها) شود. اتفاقی که در کشور ما رخ داده است. در این مقاله این موضوع با شبیه سازی عددی و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. اولین کار بر روی حوضه آبرگیر به Muskat, 1946 برمی‌گردد. در تحقیقاتی که تاکنون انجام شده است (Javandel and Tsang, 1986; Bair and Lahm, 1996; Christ and Goltz, 2002; Shan, 1999; Schafer, 1996; Cunningham et al, 2004; Intaraprasong and Zhan, 2007) روش تحلیلی برای توصیف حوضه آبرگیر چاه‌ها در سفره‌هایی با گسترش نامحدود بکار برده شده‌اند. Asadi-Aghbolaghi et al, 2011 حوضه آبرگیر یک چاه پمپاژ نزدیک یک مرز رودخانه‌ای با بار ثابت را ارائه و نرخ برداشت بحرانی از چاه را تعیین کردند. همچنین این محققین در سال ۲۰۱۳ پژوهش مشابهی برای رودخانه با بستر نشتی به انجام رساندند. سامانی و زارعی دودجی (۱۳۹۳) حوضه آبرگیر را برای سیستم چند چاهی در سفره‌های گوه‌ای شکل آزاد و محبوس بررسی کرده‌اند. همچنین Zarei-Doudeji and Samani, 2014, 2016 معادلات تحلیلی حوضه آبرگیر برای سیستم چند چاهی در سفره‌های محدود شبه جزیره‌ای شکل و مستطیلی شکل را ارائه دادند.

روش مطالعه

امروزه در اکثر کشورهای جهان به طور گسترده از روش های ریاضی مبتنی بر مدل های عددی و تحلیلی در مطالعه آبهای زیر زمینی و مدیریت بهره برداری از منابع آب استفاده می شود. حوضه آبرگیر نیز از جمله مواردی است که امروزه به وسیله مدل های عددی و تحلیلی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. مدل های تحلیلی به محاسبه تحلیلی معادلات دیفرانسیل جریان آب زیر زمینی می پردازد. مدل های تحلیلی در واقع حل دقیقی برای معادله جریان یا انتقال جرم ارائه می کنند. از آنجایی که شرایط حاکم بر سیستم جریان آب زیر زمینی بسیار پیچیده می باشند، حل معادلات دیفرانسیل سه بعدی به روش تحلیلی را بسیار دشوار و گاهی ناممکن می سازند. به همین دلیل برای حل این دسته از مدل ها، معادلات سه بعدی با فرضیاتی نظیر، همگن و همسانگر بودن، ضخامت یکسان و گسترش جانبی نامحدود آبخوان، عدم وجود جریان عمودی و... ساده تر شده و حل می شوند. گرچه مدل های تحلیلی فرضیاتی را در بر دارند اما به دلیل محاسبات دقیق در بسیاری موارد راهگشا می باشند. در حال حاضر مدل های عددی که جریان آب زیرزمینی و واکنش آن را با محیط اطراف را شبیه سازی می کنند به صورت روزافزونی در شاخه های مختلف علم آب های زیرزمینی توسعه یافته اند. مدل های عددی قادرند با داشتن اطلاعاتی نظیر پارامتر های هیدروژئولوژیکی، مرزهای هیدرولیکی و ابعاد سفره، شبیه سازی آبخوان های زیرزمینی اعم از سفره های آزاد و محبوس را با دقت و سرعت بالایی انجام دهند. مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی های تحلیلی و عددی، به اعتبارسنجی (verification) و تعیین میزان دقت و کارایی مدل های عددی می انجامد.

در این پژوهش در راستای مقایسه مدل های تحلیلی و عددی در شبیه سازی حوضه آبرگیر سیستم چند چاهی در آبخوانهای محدود مستطیلی و شبه جزیره ای شکل از مدل های تحلیلی (Zarei-Doudeji and Samani, 2014; Zarei-Doudeji and Samani, 2014) که در محیط MATLAB نوشته شده و از نرم افزار عددی GMS متشکل از مدل MODFLOW و مدل MODPATH استفاده شده است. مدل MODFLOW (Harbough et al., 2000) برای شبیه سازی جریان آب زیرزمینی در سه بعد و در محیط های هتروژن و آنیزوتروپ به کار می رود. امروزه مدل MODFLOW به عنوان کارآمدترین و قابل دسترس ترین مدل آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می گیرد. به دلیل اینکه مدل عددی MODPATH (Pollock, 1994) می تواند نمای گرافیکی از هندسه حوضه آبرگیر را ارائه دهد، در این پژوهش بررسی ابعاد حوضه آبرگیر و چگونگی توسعه ی آن توسط این نرم افزار صورت گرفته است.

مدل تحلیلی حوضه آبرگیر آبخوان های محدود شبه جزیره ای -

شکل

سفره های شبه جزیره ای در دید پلان مستطیلی شکل اند که از سه طرف محدود شده اند و از طرف چهارم دارای گسترش نامحدودند. مرزهای محدود کننده می توانند مرزهای نفوذناپذیر یا مرزهای با بار ثابت باشند در

نتیجه این نوع آبخوانها در شش نوع آرایش مرزی شکل می گیرند (شکل ۱ الف) (Zarei-Doudeji and Samani, 2014).

مدل تحلیلی حوضه آبرگیر سیستم چند چاهی در سفره های آزاد و محبوس شبه جزیره ای با به کارگیری تئوری چاههای مجازی (Ferris et al., 1962) و حل معادله پتانسیل سرعت و تابع جریان توسط (Zarei-Doudeji and Samani, 2014) تدوین گردیده است. در این مدلها سیستم چاه ها می تواند متشکل از هر تعداد چاه پمپاژ یا تغذیه یا ترکیبی از هر دو نوع، با هر نرخ جریان باشد. مدلها ارائه شده از نظر تعداد چاه، موقعیت و نوع چاهها، نرخ تزریق یا برداشت و نرخ و جهت جریان منطقه ای محدودیت ندارد. در ذیل معادله پتانسیل سرعت و تابع جریان تدوین شده توسط Zarei-Doudeji and Samani, 2014

ارائه شده است که در آن Φ_D پتانسیل سرعت و Ψ_D تابع جریان در حالت بدون بعد است. با ترسیم معادله ۱ خطوط پتانسیل و با رسم معادله ۲ خطوط جریان بدست می آید. خطوط جریان همگرا به سمت چاه حوضه آبرگیر را به تصویر می کشد.

(رابطه ۱)

$$\Phi_D = -(x_D \cos \alpha + y_D \sin \alpha) + \sum_{k=1}^N \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{Q_{Dk} c_k}{2} \{ J_1 \ln[(f_{1Dk})^2 + (f_{2Dk})^2] + J_2 \ln[(f_{3Dk})^2 + (f_{2Dk})^2] + J_3 \{ J_1 \ln[(f_{1Dk})^2 + (f_{4Dk})^2] + J_2 \ln[(f_{3Dk})^2 + (f_{4Dk})^2] \} \}$$

$$\Psi_D = -(y_D \cos \alpha - x_D \sin \alpha) + \sum_{k=1}^N \sum_{n=-\infty}^{+\infty} Q_{Dk} c_k \{ J_1 \tan^{-1} \left(\frac{f_{2Dk}}{f_{1Dk}} \right) + J_2 \tan^{-1} \left(\frac{f_{2Dk}}{f_{3Dk}} \right) + J_3 \{ J_1 \tan^{-1} \left(\frac{f_{4Dk}}{f_{1Dk}} \right) + J_2 \tan^{-1} \left(\frac{f_{4Dk}}{f_{3Dk}} \right) \} \}$$

(رابطه ۲)

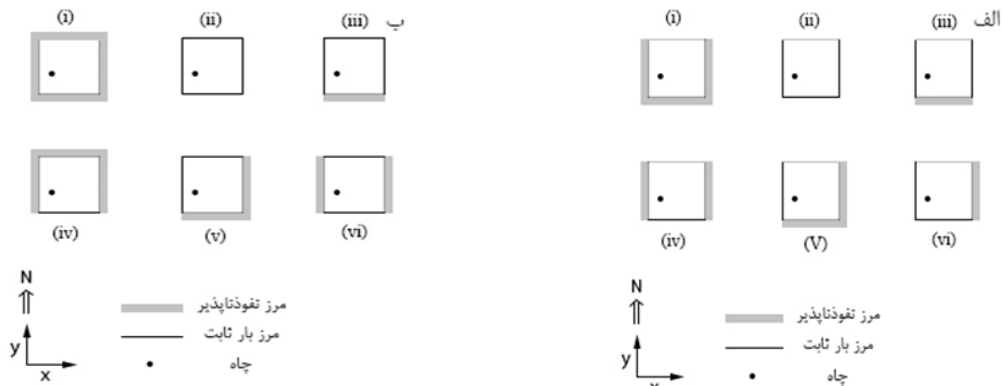
که در این دو معادله:

$$f_{1Dk} = x_D - (a_{Dk} + 2n) \\ f_{2Dk} = y_D - b_{Dk}$$

(رابطه ۳)

$$f_{3Dk} = x_D - (-a_{Dk} + 2n) \quad f_{4Dk} = y_D + b_{Dk}$$

همچنین در معادلات فوق و تمامی معادلات ارائه شده در این مقاله: α زاویه میان جهت جریان منطقه ای با جهت مثبت محور x N تعداد چاهها، n و m و k شاخص جمع، Q نرخ تخلیه (+) یا تغذیه (-)، C_k برای چاه تخلیه + و برای چاه تغذیه - است، (a, b) مختصات چاه و اندیس D نشان دهنده ی بدون بعد بودن پارامتر مترادف است. مقادیر پارامترهای J_1 ، J_2 و J_3 در (جدول ۱) ارائه شده است.



شکل ۱. انواع آرایش های مرزی در آبخوان های محدود الف) شبه جزیره ای و ب) مستطیلی (Zarei-Doudeji and Samani 2014, 2018)

 جدول ۱. مقادیر J_1 ، J_2 و J_3 برای ۸ آرایش مرزی. آرایش های مرزی نوع vii و viii به ترتیب تصویر آینه ای آرایش های مرزی نوع v و vi هستند.

انواع آرایش مرزی	شرایط مرزی			ضریب		
	شرق	غرب	جنوب	J_1	J_2	J_3
I	نفوذ ناپذیر	نفوذ ناپذیر	نفوذ ناپذیر	۱	۱	۱
ii	بار ثابت	بار ثابت	بار ثابت	۱	-۱	-۱
iii	بار ثابت	بار ثابت	نفوذ ناپذیر	۱	-۱	۱
iv	نفوذ ناپذیر	نفوذ ناپذیر	بار ثابت	۱	۱	-۱
v	بار ثابت	نفوذ ناپذیر	نفوذ ناپذیر	$(-1)^n$	$(-1)^{n+1}$	۱
vi	بار ثابت	نفوذ ناپذیر	بار ثابت	$(-1)^n$	$(-1)^{n+1}$	-۱
vii	نفوذ ناپذیر	بار ثابت	نفوذ ناپذیر	$(-1)^n$	$(-1)^n$	۱
viii	نفوذ ناپذیر	بار ثابت	بار ثابت	$(-1)^n$	$(-1)^n$	-۱

مدل تحلیلی حوضه آبخیز محدود مستطیل-شکل

(رابطه ۴)

(Zarei-Doudeji and Samani, 2018)

$$\Phi_D = -(x_D \cos(\alpha) + y_D \sin(\alpha)) +$$

$$\sum_{k=1}^N \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{c_k Q_{Dk}}{2} \{ J_1 J_2 \ln[(f_{1Dk})^2 + (f_{2Dk})^2] +$$

$$J_3 J_4 \ln[(f_{3Dk})^2 + (f_{2Dk})^2] +$$

$$J_5 J_6 \ln[(f_{1Dk})^2 + (f_{4Dk})^2] +$$

$$J_7 J_8 \ln[(f_{3Dk})^2 + (f_{4Dk})^2] \}$$

(رابطه ۵)

$$\Psi_D = -(y_D \cos(\alpha) - x_D \sin(\alpha)) +$$

$$\sum_{k=1}^N \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_k Q_{Dk} \{ J_1 J_2 \tan^{-1} \left[\frac{f_{2Dk}}{f_{1Dk}} \right] +$$

$$J_3 J_4 \tan^{-1} \left[\frac{f_{2Dk}}{f_{3Dk}} \right] + J_5 J_6 \tan^{-1} \left[\frac{f_{4Dk}}{f_{1Dk}} \right] +$$

$$J_7 J_8 \tan^{-1} \left[\frac{f_{4Dk}}{f_{3Dk}} \right] \}$$

که در این دو معادله:

(رابطه ۶)

$$f_{1Dk} = x_D - (a_{Dk} + 2n)$$

$$f_{2Dk} = y_D - (2mp_D - b_{Dk})$$

$$f_{3Dk} = x_D - (-a_{Dk} + 2n)$$

$$f_{4Dk} = y_D - (2mp_D + b_{Dk})$$

در معادلات فوق m شاخص جمع و P فاصله بین مرزهای شرقی و غربی و سایر پارامترها مشابه پارامترهای ارائه شده در معادلات آبخوان شبه-جزیره ای است. مقادیر پارامترهای J_1 - J_8 در جدول ۲ ارائه شده است.

شکل (ب) نمای پلان یک آبخوان را نشان می دهد که توسط چهار مرز متقاطع عمود بر هم از سمت شمال، جنوب، شرق و غرب محدود شده است و توسط یک چاه با نفوذ کامل پمپاژ می شود. چهار مرز محدود کننده ی آبخوان های محدود مستطیلی شکل می تواند نفوذناپذیر، مرز با بار ثابت و یا ترکیبی از هر دو مرز باشد در نتیجه برای این نوع آبخوان ها شش نوع آرایش مرزی وجود دارد. (شکل (ب) آرایش های مرزی مختلف را نشان می دهد.

مدل تحلیلی حوضه آبخیز سیستم چند چاهی در سفره های محدود مستطیلی شکل نیز با حل معادلات پتانسیل سرعت و تابع جریان و با به کارگیری تئوری چاههای مجازی توسط (Zarei-Doudeji and Samani, 2014) تدوین شده است. در این مدلها سیستم چاه ها می تواند متشکل از هر تعداد چاه پمپاژ یا تغذیه یا ترکیبی از هر دو نوع، با هر نرخ جریان باشد. معادلات زیر به ترتیب معادله پتانسیل سرعت Φ_D و

معادله تابع جریان Ψ_D در حالت بدون بعد است. با ترسیم معادله ۴ خطوط پتانسیل و با رسم معادله ۵ خطوط جریان بدست می آید. خطوط جریان همگرا به سمت چاه حوضه آبخیز را نشان می دهند.

(۳۶۰ و ۴۲۰) و یک چاه تغذیه با موقعیت (۲۰۰ و ۲۰۰) می باشند. هر یک از چاههای تخلیه با نرخ ۵ لیتر بر ثانیه پمپاژ می شوند و چاه تزریق نیز آبخوان را با همین نرخ تغذیه می کند. ضخامت آبخوان ۲۰ متر، هدایت هیدرولیکی آن ۰.۲ / سانتیمتر در ثانیه و جهت جریان منطقه ای در این مدل ۴۵ درجه نسبت به جهت مثبت محور X و با شیب هیدرولیکی ۰.۱ / در نظر گرفته شده است. حوضه آبرگیر حاصل از مدل تحلیلی در (شکل ۲ الف) نشان داده شده است. مدل سازی عددی در محیط *GMS* برای این سیستم آبخوان-چاه با شبکه بندی های مختلف انجام گردید. در (شکل ۲) تنها شبکه بندی های ۲۰ * ۲۰ (شکل ۲ ب)، ۴۰ * ۴۰ (شکل ۲ ج) و ۵۶ * ۵۶ (شکل ۲ د) نمایش داده شده است. حوضه آبرگیر شبیه سازی شده توسط مدل عددی با شبکه بندی ۵۶ * ۵۶ که طول هر سلول ۱۱/۸ متر می باشد، بهترین انطباق را با مدل تحلیلی (شکل ۲ الف) نشان می دهد.

در بخشهای زیر حوضه آبرگیر شبیه سازی شده توسط دو مدل تحلیلی فوق و مدل عددی و کاربرد این مدلها در تعیین ارتباط هیدرولیکی آب زیرزمینی و آب سطحی نحوه استفاده آنها در پروژه های پاکسازی آب زیرزمینی آلوده مورد بحث قرار می گیرد.

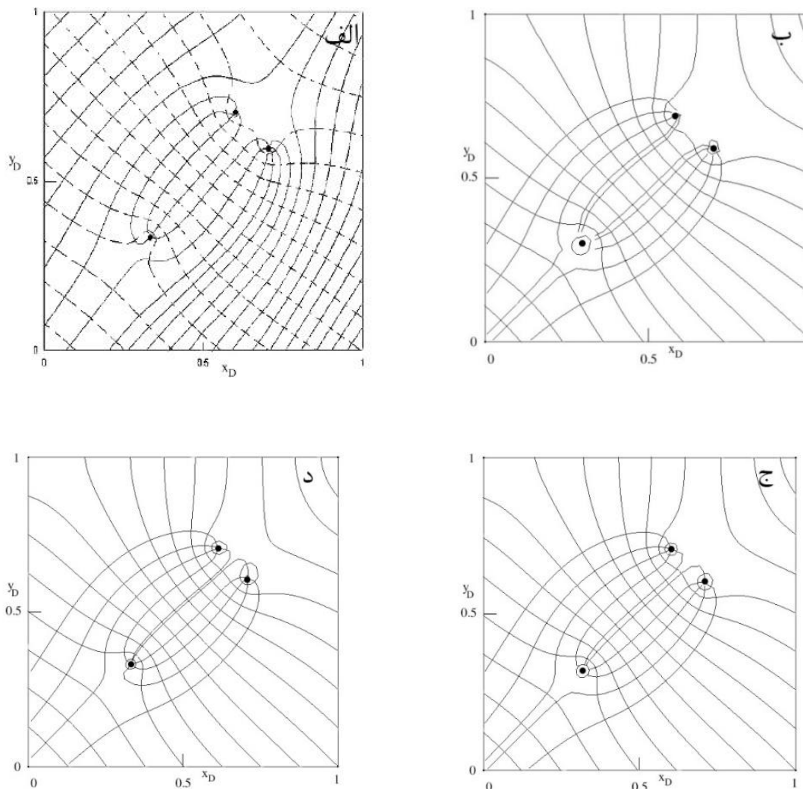
مقایسه مدل های عددی و تحلیلی حوضه آبرگیر سیستم چند

چاهی در آبخوان شبه جزیره ای شکل

به دلیل تعداد زیاد متغیرها (موقعیت چاه، نرخ و جهت جریان منطقه ای، تعداد و نوع چاهها، نرخ برداشت/تزریق و آرایش مرزی) که روی محیط جریان اثر می گذارند، شبیه سازی های زیادی قابل انجام است. برای مقایسه مدل تحلیلی و عددی حوضه آبرگیر سیستم چند چاهی در آبخوان شبه جزیره ای، آرایش مرزی نوع (ii) در (شکل ۱ الف) با سه چاه در نظر گرفته شد. چاهها شامل دو چاه پمپاژ با موقعیت (۴۲۰ و ۳۶۰) و

جدول ۲. مقادیر $J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6, J_7$ و J_8 برای ۶ آرایش مرزی در آبخوان مستطیلی

انواع آرایش مرزی	شرایط مرزی				ضریب							
	شرق	غرب	جنوب	شمال	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8
i	نفوذ ناپذیر	نفوذ ناپذیر	نفوذ ناپذیر	نفوذ ناپذیر	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
ii	بار ثابت	بار ثابت	بار ثابت	بار ثابت	-۱	۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	-۱
iii	بار ثابت	بار ثابت	نفوذ ناپذیر	بار ثابت	$(-1)^m$	۱	$(-1)^m$	-۱	$(-1)^m$	۱	$(-1)^m$	-۱
iv	نفوذ ناپذیر	نفوذ ناپذیر	بار ثابت	نفوذ ناپذیر	$(-1)^{m+1}$	۱	$(-1)^{m+1}$	۱	$(-1)^m$	۱	$(-1)^m$	۱
v	بار ثابت	نفوذ ناپذیر	نفوذ ناپذیر	بار ثابت	$(-1)^m$	$(-1)^n$	$(-1)^m$	$(-1)^{n+1}$	$(-1)^m$	$(-1)^n$	$(-1)^m$	$(-1)^{n+1}$
vi	نفوذ ناپذیر	نفوذ ناپذیر	بار ثابت	بار ثابت	-۱	۱	-۱	۱	۱	۱	۱	۱



شکل ۲. حوضه آبرگیر شبیه سازی شده با مدل تحلیلی (الف) و عددی (ب، ج و د)، چاه نزدیک به مبدا مختصات چاه تغذیه و دو چاه دیگر چاه پمپاژ هستند، ابعاد آبخوان: $x_D=y_D=1 \approx 600m$.

مقایسه مدل های عددی و تحلیلی حوضه آبرگیر سیستم چند چاهی در آبخوان مستطیلی شکل

آرایشی که برای آبخوان مدل شده انتخاب شده است آرایش نوع (ii) می باشد که در (شکل ۱ب) نشان داده شده است. آبخوان مدل شده شامل ۳ چاه پمپاژ با موقعیت (۲۰۰ و ۲۰۰)، (۴۰۰ و ۲۰۰) و (۳۰۰ و ۴۰۰) می باشد. هر یک از چاههای تخلیه با نرخ ۱۵ لیتر در ثانیه پمپاژ می شوند. ضخامت آبخوان ۲۰ متر، هدایت هیدرولیکی آن ۰.۲ سانتیمتر در ثانیه، جهت جریان منطقه ای در این مدل ۲۲۵ درجه نسبت به جهت مثبت محور X با شیب هیدرولیکی ۰.۱ در نظر گرفته شده است. حوضه آبرگیر حاصل از مدل تحلیلی در (شکل ۳ الف) نشان داده شده است. در این مقایسه مدل سازی عددی با شبکه بندی های مختلف صورت گرفته است. در (شکل ۳) تنها شبکه بندی های ۵۰*۵۰ (شکل ۳ ب)، ۶۰*۶۰ (شکل ۳ ج) و ۷۴*۷۴ (شکل ۳ د) نمایش داده شده است. مقایسه حوضه آبرگیر حاصل از دو مدل سازی تحلیلی و عددی، انطباق مدل عددی با شبکه بندی ۷۴*۷۴ (که طول هر سلول ۸/۹ متر می باشد) با حوضه آبرگیر به دست آمده از مدل تحلیلی (شکل ۳ الف) را روشن می سازد. لازم به ذکر است که در شبیه سازی عددی رودخانه و چاه از بسته های well package و stream package استفاده شده است.

محصور و به تله انداختن هاله آلودگی و پاکسازی آن

یکی از کاربردهای حوضه آبرگیر مهار یا محصور کردن هیدرولیکی هاله آلودگی در آبهای زیرزمینی می باشد. در این گونه پروژه ها تعداد چاهها، نرخ پمپاژ یا تزریق چاهها و موقعیت چاهها باید پیش از اجرای پروژه طراحی و بهینه شود. به منظور نشان دادن این کاربرد آبخوان آرایش مرزی نوع iii (شکل ۱ ب) از آبخوان محدود مستطیلی شکل که در آن یک هاله آلودگی در راستای جریان آب منطقه ای (شرق به غرب، $\alpha = 0$) شناسایی و پایش شده است انتخاب شده است. ضخامت آبخوان ۲۰ متر و هدایت هیدرولیکی آن ۰.۲ سانتیمتر در ثانیه فرض شده است. مهار هیدرولیکی هاله آلودگی ابتدا با مدل تحلیلی شبیه سازی و سپس با شبیه سازی آن توسط مدل عددی مقایسه شده است.

شبیه سازی های تحلیلی و عددی مربوط به این نوع آبخوان برای سه سیستم چند چاهی مختلف انجام شده است که در هر سه مورد زاویه جهت جریان منطقه ای در آبخوان مدل شده نسبت به جهت مثبت محور X صفر است یعنی جریان منطقه ای دارای جهت غرب به شرق می باشد. فرض کنید هدف، به تله انداختن هاله آلودگی توسط سه حلقه چاه و تعیین موقعیت و نرخ پمپاژ و تزریق چاهها می باشد. به این منظور یک چاه تزریق در بالا دست هاله آلودگی و دو چاه پمپاژ در پیشانی هاله در نظر گرفته شده است.

حوضه آبرگیر حاصل از مدل تحلیلی در (شکل ۴ الف) نشان داده شده است. در این مقایسه مدل سازی عددی با شبکه بندی های مختلف صورت گرفته است. در (شکل ۴) تنها شبکه بندی های ۷۰*۷۰ (شکل ۴ ب)، ۸۰*۸۰ (شکل ۴ ج) و ۹۴*۹۴ (شکل ۴ د) نمایش داده شده است.

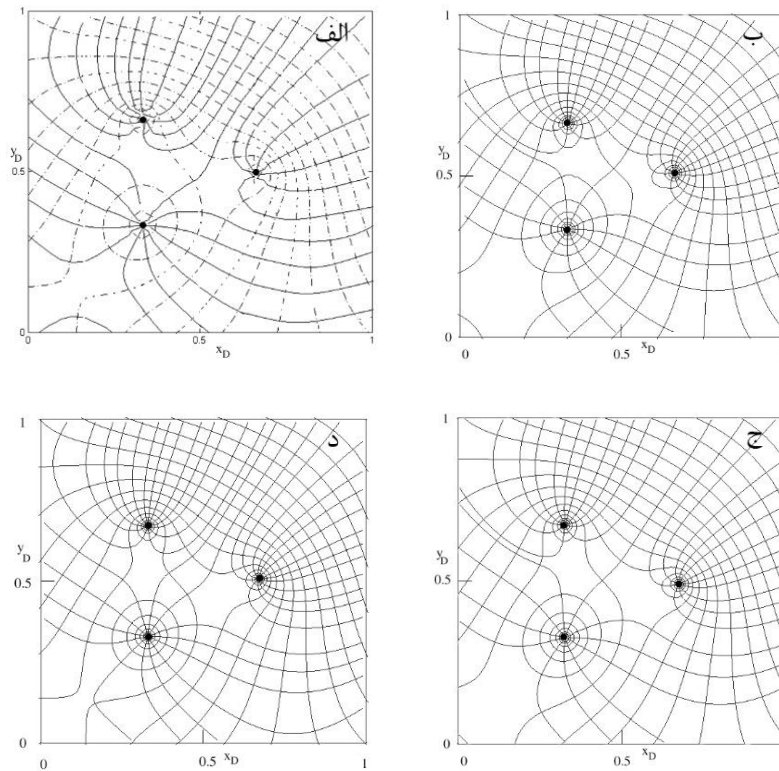
مقایسه حوضه آبرگیر حاصل از دو مدل سازی تحلیلی و عددی، انطباق مدل عددی با شبکه بندی ۹۴*۹۴ (که طول هر سلول ۶/۴ متر می باشد) با حوضه آبرگیر به دست آمده از مدل تحلیلی (شکل ۴ الف) را روشن می سازد.

مدلسازی ها نشان می دهد که تمام آبی که توسط چاه تزریق آبخوان را تغذیه می کند توسط دو چاه پمپاژ تخلیه نشده و بخشی از این آب به سمت مرز شرقی که مرزی با بار ثابت است در حال فرار می باشد در نتیجه این سه چاه برای هدف پاکسازی توده آلاینده به درستی تعیین نرخ و موقعیت نشده اند.

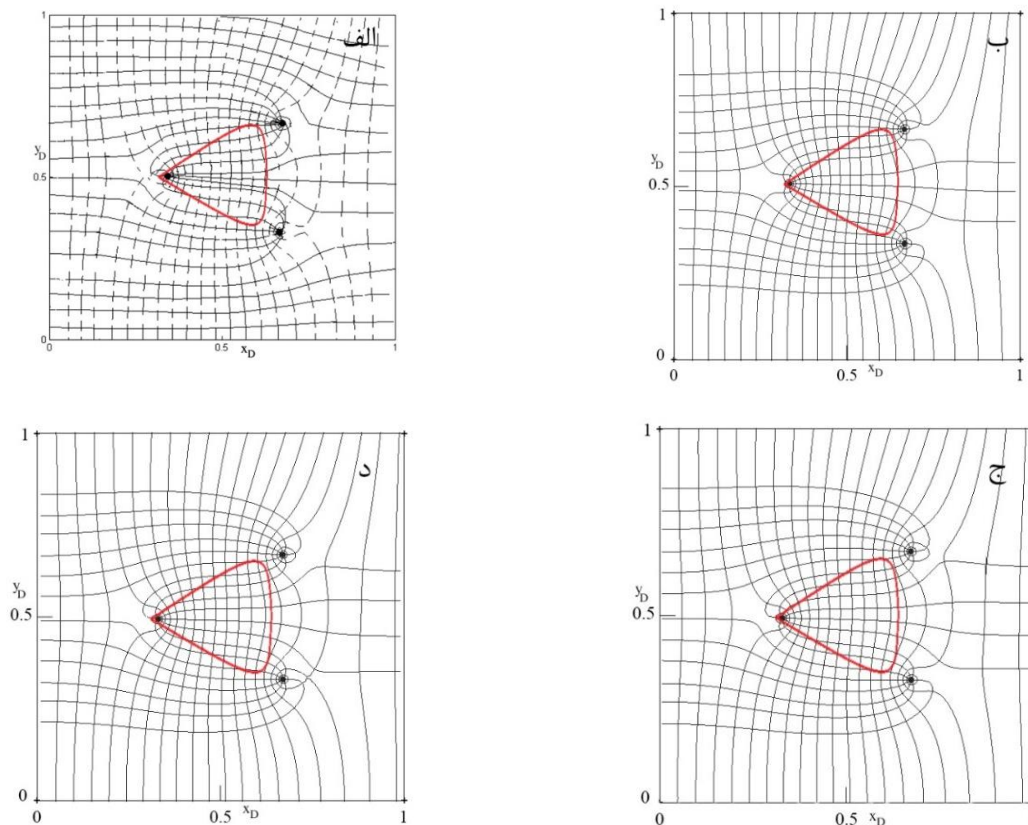
در مرحله دوم موقعیت چاههای پمپاژ به (۳۵۰ و ۴۰۰) و (۲۵۰ و ۴۰۰) و موقعیت چاه تزریق به (۱۰۰ و ۳۰۰) تغییر یافته است. هر یک از چاههای تخلیه همچنان با نرخ ۵ لیتر بر ثانیه پمپاژ می شوند و چاه تزریق نیز آبخوان را با همین نرخ تغذیه می کند.

حوضه آبرگیر حاصل از مدل تحلیلی در (شکل ۵ الف) نشان داده شده است. در شکل ۵ شبکه بندی های ۵۰*۵۰ (شکل ۵ ب)، ۸۰*۸۰ (شکل ۵ ج) و ۱۱۲*۱۱۲ (شکل ۵ د) نمایش داده شده است. مقایسه حوضه آبرگیر حاصل از دو مدل سازی تحلیلی و عددی، نشان می دهد، مدل عددی با شبکه بندی ۱۱۲*۱۱۲ (که طول هر سلول ۹/۵ متر می باشد) با حوضه آبرگیر به دست آمده از مدل تحلیلی (شکل ۵ الف) انطباق مناسبی دارد. با استفاده از این تنظیمات مشاهده می شود که هیچ آبی از بین دو چاه پمپاژ به سمت پایین دست فرار نمی کند اما چاههای پمپاژ بخشی از آب خود را از مرز غربی آبخوان تأمین می کنند. بنابراین نرخ برداشت و یا تزریق چاهها جهت عملکرد مناسب سیستم بهینه نمی باشند. در مرحله سوم تمام پارامتر مشابه مرحله دوم در نظر گرفته شده اند با این تفاوت که چاه تزریق آبخوان را با نرخ ۰.۰۱ متر مکعب بر ثانیه تغذیه می کند.

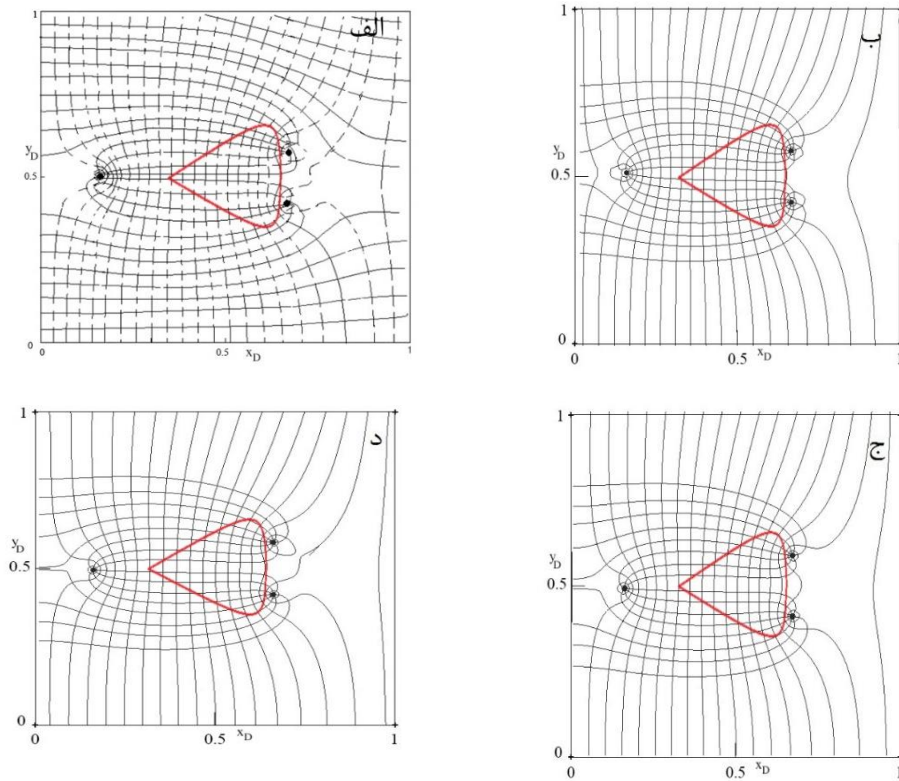
حوضه آبرگیر حاصل از مدل تحلیلی در (شکل ۶ الف) نشان داده شده است. با وجود اینکه شبیه سازی های عددی در شبکه بندی های متعدد صورت گرفته است اما در (شکل ۶ ب، ج و د) تنها حوضه آبرگیر به دست آمده از شبکه بندی های ۲۰*۲۰، ۲۴*۲۴ و ۲۷*۲۷ آمده است. که با توجه به شکل شبکه بندی ۲۷*۲۷ (شکل ۶ د) که در آن طول هر سلول ۴.۲۴ متر است بهترین انطباق را با حوضه آبرگیر ترسیم شده توسط مدل تحلیلی (شکل ۶ الف) نشان می دهد. همانطور که در این شکل ملاحظه می شود یک حلقه گردش آب بسته تشکیل و بدون ایجاد اختلال در شیب هیدرولیکی و رژیم جریان، هاله آلودگی در آبخوان مهار و استخراج می شود. چنانکه ملاحظه می شود مدل عددی با دقت مطلوب سیستم مهار هاله آلودگی را شبیه سازی می کند ولی در مقایسه با مدل تحلیلی انرژی و زمان بیشتری را طلب می کند. همانگونه که ملاحظه می شود در کلیه شبیه سازی های فوق شبکه بندی ریزتر به نتیجه مطلوب و دقیق تری منجر می گردد (برای اطلاعات بیشتر خواننده را به Barrash and Douherly (1997) و Samani et al. (2004) ارجاع داده می شود).



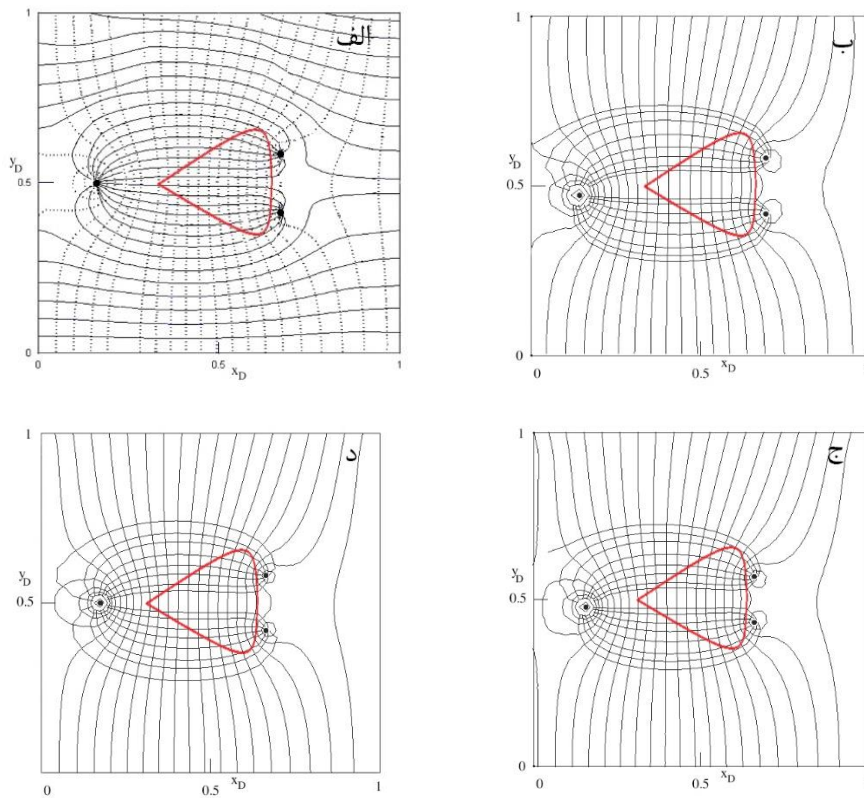
شکل ۳. حوضه آبخیز شبیه سازی شده با مدل های تحلیلی (الف) و عددی (ب، ج و د)، ابعاد آبخوان: $x_D=y_D=1 \approx 600m$.



شکل ۴. حوضه آبخیز شبیه سازی شده با مدل های تحلیلی (الف) و عددی (ب، ج و د)، چاه شرقی چاه تغذیه و دو چاه دیگر چاه پمپاژ هستند، ابعاد آبخوان: $x_D = y_D = 1 \approx 600m$.



شکل ۵. حوضه آبیگر شبیه سازی شده در مرحله دوم با مدل های تحلیلی (الف) و عددی (ب، ج و د)، چاه شرقی چاه تغذیه و دو چاه دیگر چاه پمپاژ هستند، ابعاد آبخوان: $x_D = y_D = 1 \approx 600m$



شکل ۶. حوضه آبیگر شبیه سازی شده در مرحله سوم با مدل های تحلیلی (الف) و عددی (ب، ج و د)، چاه شرقی چاه تغذیه و دو چاه دیگر چاه پمپاژ هستند، ابعاد آبخوان: $x_D = y_D = 1 \approx 600m$

تفکیک مولفه های تخلیه و تغذیه منابع آب سطحی و
زیرزمینی

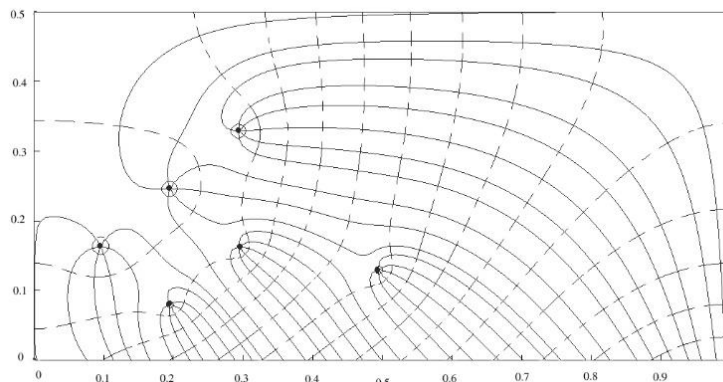
سفره های آب غالباً توسط آبهای سطحی از قبیل رودخانه ها یا دریاچه ها محدود می شوند که این امر موجب تبادل آب بین این نوع مرزهای محدود کننده و آبخوان می شود. در صورتیکه مرز محدود کننده ای که از نوع رودخانه یا دریاچه است موجب تغذیه آبخوان شود به طبع منبعی برای آب پمپاژ شده از چاههای حفر شده در آبخوان به شمار می رود. به منظور بررسی تاثیر رودخانه محدود کننده آبخوان بر پمپاژ صورت گرفته توسط چاه و تفکیک سهم رودخانه و ذخیره آبخوان در تامین آب استخراج شده از چاهها، یک آبخوان محدود شبه جزیره ای فرضی با آرایش مرزی نوع iv (شکل ۱ الف) شبیه سازی شده است. به این ترتیب مرز جنوبی آبخوان با یک رودخانه و مرزهای شرقی و غربی با مرزهای نفوذ ناپذیر محدود می باشد. نظر به اینکه این شبیه سازی در بعد زمان یا در شرایط ناپایدار انجام می شود امکان انجام آن با مدل‌های تحلیلی نمی باشد. در این شبیه سازی حوضه آبرگیر چاههای پمپاژ با استفاده از مدل عددی انجام و (شکل ۷) تهیه گردید که نقش رودخانه (مرز جنوبی آبخوان) را به عنوان منبعی برای تامین آب چاه روشن می سازد.

در این شبیه سازی، آبخوان مدل شده دارای ابعاد ۳ و ۶ کیلومتر است. و آبخوان شامل ۶ حلقه چاه پمپاژ است که نرخ پمپاژ برای هر یک از چاهها ۲/۳ لیتر بر ثانیه فرض شده است. برای شبیه سازی فرض بر این است که دبی رودخانه در بالادست ۲۰۰۰ متر مکعب بر روز است. هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره به ترتیب ۰.۲ و ۰.۵ سانتیمتر در ثانیه و ۰.۵ در نظر گرفته شد. شبیه سازی ابتدا برای حالت پایدار قبل از شروع پمپاژ آب از چاه اجرا شد، سپس یک شبیه سازی ناپایدار ۳۵ ساله با استفاده از مراحل زمانی ماهانه و نرخ پمپاژ ثابت از چاهها انجام گردید.

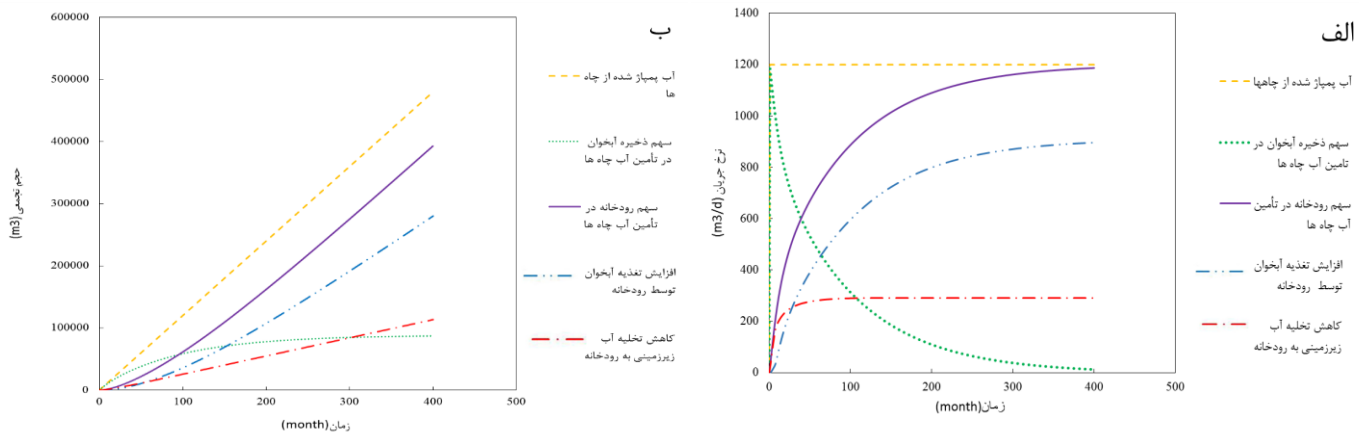
ارتباط هیدرولیکی بین آب زیرزمینی و آبهای سطحی در این آبخوان شبیه سازی شده به صورتی است که قبل از حفر چاه یعنی مرحله پایدار قبل از پمپاژ، رودخانه در نیمه شرقی آبخوان را تغذیه می کند و در نیمه غربی در نقش زهکش آبخوان ظاهر می شود. (جدول ۳) بیلان هیدرولوژیکی مدل را برای سه زمان مختلف به عنوان نمونه نشان می دهد. با در نظر گرفتن چاههای پمپاژ در آبخوان و گذشت زمان، آب ورودی به آبخوان از طریق رودخانه نسبت به حالت پایدار اولیه یعنی زمانی که هیچ پمپاژی از چاه صورت نگرفته است، رفته رفته افزایش یافته و تخلیه آب زیرزمینی به رودخانه به مراتب کاهش پیدا می کند که هر دو مورد روند افزایشی را نشان می دهند. افزایش تغذیه آبخوان از طریق رودخانه نسبت

به حالت پایدار اولیه و کاهش تخلیه آب زیرزمینی به رودخانه نسبت به حالت پایدار اولیه روی هم رفته بعنوان سهم رودخانه در تامین آب پمپاژ شده از چاهها به شمار می روند، که این مطالب در نمودارهای رسم شده در (شکل ۸) قابل مشاهده است. همانطور که در جدول بیلان هیدرولوژیکی مدل دیده می شود (جدول ۳)، مجموع سه سطر آخر جدول یعنی فرآیندهای تغییرات ذخیره آبخوان، افزایش تغذیه آبخوان توسط رودخانه و کاهش تخلیه آب زیرزمینی به رودخانه برابر ۱۲۰۰ مترمکعب بر روز است که همان نرخ آب پمپاژ شده از چاهها می باشد. مشاهده بیلان آبخوان و جداسازی سهم رودخانه در آب پمپاژ شده نشان می دهد تا زمانیکه نرخ پمپاژ در طول زمان ثابت باشد، سهم رودخانه به صورت تصاعدی افزایش یافته و سهم ذخیره آبخوان به صورت تصاعدی کاهش می یابد (شکل ۸ الف). به منظور بررسی تاثیر پمپاژ چاه بر جریان رودخانه، مدلسازی آبخوان سه مرتبه با دبی های مختلف برای بالادست رودخانه صورت گرفت. دبی های بالادست ۲۳/۱۵ لیتر بر ثانیه (۲۰۰۰ مترمکعب در روز)، ۱۱/۵۷ لیتر بر ثانیه (۱۰۰۰ مترمکعب در روز) و ۳/۵ لیتر بر ثانیه (۳۰۰ مترمکعب در روز) در نظر گرفته شده است. پروفایل جریان رودخانه بر اساس فاصله از بالادست برای سه جریان مختلف فوق الذکر مشخص شد، نتیجه این سه مدلسازی نشان داد در حالتی که دبی بالادست ۱۰۰۰ یا ۳۰۰ متر مکعب در روز باشد رودخانه به ترتیب در فاصله ۴۸۵۰ متری و ۱۲۰۰ متری از بالادست خشک می شود (شکل ۹). نمودار های فوق نشان می دهند که چگونه با افزایش آب استخراج شده از چاهها رودخانه نقش بیشتری در تامین آب چاهها ایفا می کند چرا که با توجه به حوضه آبرگیر رسم شده تقریباً کل رودخانه در حوضه آبرگیر چاه دخیل می شود و در نتیجه آن نسبت به حالتی که هیچ چاهی در آبخوان وجود نداشته باشد (حالت پایدار) حجم زیادی از آب رودخانه به آبخوان منتقل شده و از طریق چاههای پمپاژ تخلیه می شود و نیز حجم آب زیرزمینی ورودی به رودخانه، در قسمت‌هایی که رودخانه نقش زهکش آب زیرزمینی را داشته (نیمه غربی رودخانه) کاهش می یابد که این دو فرآیند با توجه به بیلان هیدرولوژیکی مدل روند تصاعدی را نشان می دهند.

با گذشت زمان از آغاز پمپاژ حجم آب زیرزمینی ورودی به رودخانه نسبت به حالتی که هیچ چاهی نداشته باشیم (حالت پایدار)، کاهش می یابد تا جاییکه به صفر برسد و (شکل ۸ الف) نیز نشان می دهد که با گذشت زمان نمودار مربوط به کاهش تخلیه آب زیرزمینی به رودخانه روند ثابتی را نشان می دهد.



شکل ۷. حوضه آبرگیر رسم شده توسط مدل، ابعاد آبخوان: $x_D = 1 \approx 6\text{km}$ و $y_D = 0.5 \approx 3\text{km}$.



شکل ۸. تفکیک منابع آب استخراج شده از چاه‌ها بر اساس بیلان هیدرولوژیکی مدل، بر اساس نرخ جریان ماهانه (الف) و حجم تجمع (ب).

جدول ۳. بیلان هیدرولوژیکی آبخوان مدل شده (نرخ جریان بر حسب m^3/d می‌باشد).

	حالت پایدار (شرایط قبل از شروع پمپاژ)	سال پنجم	سال پانزدهم	سال سی و پنجم
تغذیه آبخوان توسط مرز شمالی	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
تغذیه آبخوان توسط رودخانه	۲۴۱.۲	۶۸۱.۰	۱۰۱۳.۰	۱۱۳۹.۰
تخلیه آب زیرزمینی به رودخانه	۲۹۱.۲	۹.۲	۰	۰
آب پمپاژ شده از چاه	۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰
تغییرات در ذخیره آبخوان	۰	۴۷۸.۲	۱۳۶.۳	۱۰.۷
افزایش تغذیه آبخوان توسط رودخانه (نسبت به حالت پایدار اولیه)	۰	۴۳۹.۸	۷۷۲.۵	۸۹۸.۱
کاهش تخلیه آب زیرزمینی به رودخانه (نسبت به حالت پایدار اولیه)	۰	۲۸۲.۰	۲۹۱.۲	۲۹۱.۲

نتیجه گیری

مقایسه حوضه آبریز سیستم چند چاهی حاصل از مدل های عددی و تحلیلی در آبخوان های محدود شبه جزیره ای و مستطیلی شکل بررسی شده تطابق مناسبی را نشان می دهند که از این راه می توان به دقت و کارایی مدل های عددی پی برد و به شبکه بندی های مناسبی برای شبیه سازی حالت ناپایدار در مدل عددی دست یافت. مدل های تحلیلی ابزار ساده تری در شبیه سازی حوضه آبریز چاه می باشند.

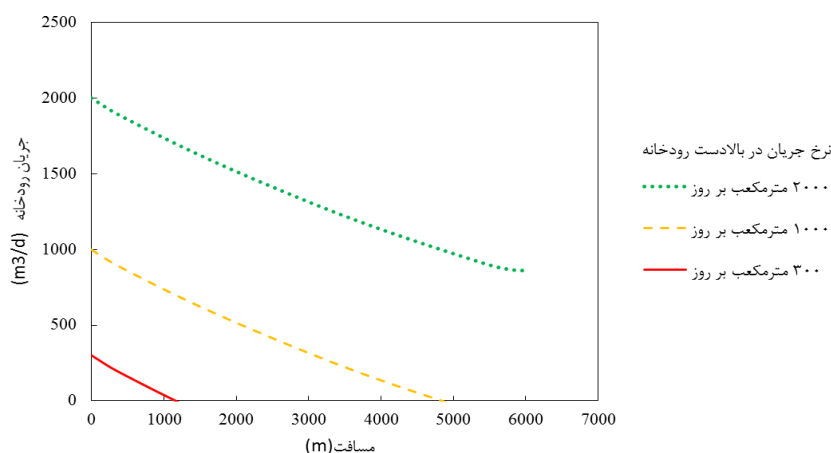
در آبخوان های محدودی که حداقل یک مرز محدود کننده آن ها را، منابع آب سطحی نظیر رودخانه تشکیل می دهد آب چاه های پمپاژ از ذخیره ی آبخوان یا ترکیبی از ذخیره آبخوان و مرزهای تغذیه کننده ی آبخوان (منابع آب سطحی) تامین می شود. تفکیک مولفه های آب پمپاژ شده نشان می دهد که با گذشت زمان از آغاز پمپاژ سهم رودخانه در تامین آب چاه افزایش و سهم ذخیره آبخوان کاهش می یابد.

فرآیند افزایش سهم رودخانه به این ترتیب است که با افزایش حجم آب استخراج شده از چاه یا چاه های حفر شده در آبخوان، سطح آب

زیرزمینی دچار افت شده و در نتیجه حجم آب بیشتری از رودخانه وارد آبخوان و پس از آن وارد چاه می شود. در اثنای کاهش سطح آب زیرزمینی، در قسمت هایی که رودخانه در نقش زهکش آبخوان ظاهر می شود (نسبت به زمان قبل از شروع پمپاژ، حجم آب کمتری از جانب آبخوان وارد رودخانه می شود که این کاهش روندی صعودی خواهد داشت، چه بسا با افزایش تعداد چاه های پمپاژ این حجم ورودی به رودخانه صفر گردد و رودخانه فقط عامل تغذیه کننده ای برای آبخوان به شمار برود.

البته اگر دبی رودخانه محدود باشد با گذشت زمان، پمپاژ های مکرر و پیوسته موجب خشک شدن رودخانه خواهد شد. خشک شدن رودخانه های نظیر زاینده رود و همچنین خشک شدن تالاب های کشور نظیر پیریشان توسط مدل های مطالعه شده قابل بررسی و قابل توجیه می باشد.

استفاده مشترک مدل های تحلیلی و عددی حوضه آبریز می تواند راه گشای تعیین ارتباط آب های سطحی و زیرزمینی و بهره برداری تلفیقی این دو منبع آب با مدیریت صحیح باشد.



شکل ۹. پروفایل جریان رودخانه بر اساس فاصله از بالادست برای سه نوع جریان مختلف ورودی به رودخانه.

منابع

سامانی نوذر، زارعی دودجی سمیه (۱۳۹۳) تعیین زون گیرش سیستم چند چاهی در آبخوان های محبوس گوه ای به روش تحلیلی و کاربرد های آن، زمین شناسی کاربردی پیشرفته، ۵۵-۵۱: ۱۳

- Asadi-Aghbolaghi. M., Rakhshandehroo. G.R., and Kompani-Zare. M., 2013, Ananalytical approach to capture zone delineation for a well near a stream with a leaky layer, *Hydrol. Sci. J.* 58 (8), 1813–1823.
- Asadi-Aghbolaghi. M., Rakhshandehroo. G.R., and Kompani-Zare. M., 2011, Analytical solutions for the capture zone of a pumping well near a stream, *Hydrogeology J.* DOI 10.1007/s10040-011-0741-2.
- Bair. E.S., and Lahm. T.D., 1996, Variation in capture zone geometry of a partially penetrating pumping well in an unconfined aquifer, *Ground Water*, 34 (5), 842–852.
- Barrash, W. and Dougherth. M. E. (1997), Modeling axially symmetric and nonsymmetric flow to a well with MODFLOW and an application to Goggar2 well test, Boise, Idaho, <https://doi.org/101111/j.1745-6584.1977.Tb00125x>
- Christ. J.A., and Goltz. M.N., 2002, Hydraulic containment: analytical and semianalytical models for capture zone curve delineation, *J. Hydrol.*, 262, 224–244.
- Faybishenko. B., Javandel. A.I., and Witherspoon. P.A., 1992, Hydrodynamics of the capture zone of a partially penetrating pumping well in an unconfined aquifer. *Water Resour. Res.* 1995, 31, 859–866.
- Fielen. M.N., Lou. J., and Kitanidis. P.K., 2005, Semi-analytical homogeneous anisotropic capture, *J. Hydrol.*, 312, 39–50.
- Harbaugh. A.W., Banta. E.R., Hill. M.C., and McDonald. M.G., *MODFLOW-2000*. The US Geological Survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the ground water flow process. US Geol. Survey: Open File Report 00-92-2000.
- Intaraprasong. T., and Zhan. H., 2007, Capture zone between two streams, *J Hydrol.*, 338:297–307.
- Javandel. I., and Tsang. CF., 1986, Capture zone type curves: a tool for aquifer cleanup, *Ground Water*, 24 (5):616–625.
- Konikow. L.F., and Leake. S.A., 2014, Depletion and Capture: Revisiting the Source of Water Derived from Wells, *Groundwater*, 52, 100-111.
- Pollock. D.W. 1994, User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT. Version 3: a particle tracking post-processing package for MODFLOW, the US Geol. Survey, Open- File Report 94-464.
- Rock. G., and Kupfersberger. H., 2002, Numerical delineation of transient capture zones, *Journal of Hydrology*, 269, 134–149.
- Samani, N. Kompani-zare, M and Barry DA., MODFLOW equipped with a new method for the accurate simulation of axisymmetric flow, *Advances in Water Resources* 27 (2004) 31–45
- Samani. N., and Zarei-Doudeji. S., 2012, Capture zone of a multi-well system in confined and unconfined wedge-shaped aquifers, *Adv. Water Resour.* 39 (2012), 71–84.
- Shan. C., 1999, Analytical solution for the capture zone of two arbitrarily located wells, *J. Hydrol.*, 222 (1–4), 123–128.
- Todd. DK., and Mays. L.W., 2005, *Groundwater Hydrology*. Third Edition, John Wiley & Sons Inc.
- Zarei-Doudeji. S., and Samani. N., 2014, Capture zone of a multi-well system in bounded peninsula-shaped aquifers, *J. Contam. Hydrol.*, 164, 114–124.
- Zarei-Doudeji. S., and Samani. N. 2018, Capture zone of a multi-well system in bounded rectangular-shaped aquifers: Modeling and application, *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Sci.* DOI 10.1007/s40995-016-0046-3.