Geochemistry
Vol.3, No.1 (Spring 2014)

مدل‌سازی انتقال آلاینده نیترات در آبخوان شاهرود

هادی جعفری[۱]، محدثه ولی‌زاده*[۲]

۱- استادیار آب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

۲- کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

* عهده‌دار مکاتبات: mohadesseh.valizadeh@yahoo.com

دریافت مقاله: ۹۱/۱۱/۱۴ پذیرش مقاله: ۹۲/۲/۲۷

چکیده

آبخوان شاهرود در استان سمنان تحت تاثیر منابع آلاینده نیترات همچون فاضلاب شهری ناشی از چاه‌های جذبی، آب برگشتی کشاورزی و صنایع قرار دارد. این عوامل سبب افزایش غلظت نیترات از حدود ۵/۵ تا ۱۴۰ میلی‌گرم بر لیتر شده است. هدف این تحقیق، بررسی سرنوشت و انتقال نیترات در آبخوان شاهرود است، ابتدا مدل جریان آب زیرزمینی با استفاده از برنامه رایانه‌ای MODFLOW تهیه شده و مدل در یک دوره سه ساله در شرایط پایدار و ناپایدار واسنجی و صحت‌سنجی شده است. در مرحله بعد انتقال آلاینده نیترات از طریق برنامه MT3DMS شبیه‌سازی شده است. اطلاعات مورد نیاز مدل انتقال نیترات شامل شرایط اولیه، شرایط مرزی و سازوکارهای انتقال آلاینده نیترات (همرفت، پراکندگی، انتشار و واکنش‌های شیمیایی) لحاظ شده و مدل بر اساس تغییرات غلظت نیترات در محدوده شهری در یک دوره دو ساله واسنجی شده است. نتایج نشان می‌دهد که جهت جریان آب زیرزمینی و رسانایی هیدرولیکی منطقه، بیشترین تاثیر را در انتقال آلاینده نیترات دارند. وجود منطقه با رسانایی هیدرولیکی کمتر در غرب و مخروط افت ناشی از تمرکز بالای چاه‌ها در جنوب منطقه شهری مانع از گسترش آلودگی نیترات در این جهات و به عبارت دیگر از سمت منطقه شهری به سمت پایین‌دست می‌شود. با توجه به نزدیکی منطقه شهری به منطقه تغذیه آبخوان و نبود شرایط کاهیدگی، کاهش نیترات از طریق فرایند نیترات‌زدایی، محتمل به نظر نمی‌رسد. بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی انتقال آلاینده نیترات، غلظت نیترات در فاضلاب ورودی به آبخوان در مناطق مختلف شهر از ۷۰ تا ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. بر این اساس، محدوده خطر آلودگی نیترات در محدوده شهری، رسم و بررسی شده است. غلظت نیترات در آب برگشتی زمین‌های کشاورزی در طی فرایند واسنجی مدل انتقال آلاینده نیترات حدود ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر محاسبه شده است. با توجه به حجم آب برگشتی کشاورزی، هر ساله حدود ۱۵۲ کیلوگرم نیترات در هر هکتار از زمین‌های کشاورزی دشت شاهرود فروشویی می‌شود. بر اساس نتایج مدل‌سازی، فاضلاب ورودی از منطقه شهری شاهرود بیشترین تاثیر را در افزایش میزان غلظت نیترات در منابع آب زیرزمینی دارد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی، MT3DMS، نیترات، شاهرود

۱- مقدمه

نیاز روزافزون جامعه به منابع آب سالم، محدود بودن منابع آب آشامیدنی و اقلیم نیمه‌خشک کشور، ما را به داشتن اطلاعات کافی در مورد منابع آلاینده آب‌های زیرزمینی و راهکارهای جلوگیری از آلوده‌شدن و گسترش آلودگی در آب‌های زیرزمینی نیازمند می‌کند (محمدی و سامانی، ۱۳۷۰).

آنیون نیترات، رایج‌ترین یون در فاضلاب‌ها بوده و برای سلامتی انسان بسیار خطرناک است (Walter, 2008). همچنین این یون رایج‌ترین آلاینده آب‌های زیرزمینی در جهان شناخته شده است (Erwin and Tesoriero, 1997) و به عنوان یک شاخص در ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی به کار می‌رود (Gorres and Gold, 1996; Burton, 2007). نیترات انحلال‌پذیری زیادی در آب دارد و جذب آن توسط رسوبات، اندک است. به همین دلیل به راحتی به وسیله آب‌های زیرزمینی منتقل می‌شود (احتشامی و شریفی، ۱۳۸۵؛Burton, 2007).

آب زیرزمینی مهم‌ترین منبع تامین‌کننده آب برای مصارف کشاورزی، صنعتی، شرب و بهداشت در دشت شاهرود است. عوامل آلاینده مانند فاضلاب شهر شاهرود و فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی از مهم‌ترین منابع واردکننده نیترات و تخریب کیفیت آب در آبخوان شاهرود معرفی شده است افزایش غلظت نیترات در منابع آب زیرزمینی در محدوده شهر شاهرود (حدود ۵۳/۲ میلی‌گرم بر لیتر) ناشی از ورود نیترات از طریق چاه‌های جذبی فاضلاب دانسته شده است. به نظر Kazemi, (2011) روند کاهشی غلظت نیترات ضمن دورشدن از منطقه شهری، به خوبی تاثیر نشت فاضلاب‌های شهری در افزایش نیترات آب زیرزمینی را تایید کرده است. علاوه بر فاضلاب‌های شهری، فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی نیز تا حدودی باعث افزایش غلظت نیترات در منابع آب زیرزمینی این دشت شده است (زارع، ۱۳۹۰). به نظر می‌رسد عدم توجه کافی به منابع آب زیرزمینی در سال‌های گذشته منجر به تشدید آلودگی آب زیرزمینی در آبخوان دشت شاهرود شده که این موضوع لزوم بررسی سازوکار انتقال آلاینده نیترات را ایجاب می‌کند.

مدل‌های ریاضی، ابزاری سودمند در تشریح وضعیت و تحرک آلاینده‌ها در آب زیرزمینی و نیز ارزیابی تاثیر مواد شیمیایی خطرناک هستند. در این تحقیق انتقال آلاینده نیترات در آبخوان شاهرود به روش عددی و با استفاده از برنامه

Archive of SID
www.SID.ir

رایانه‌ای MT3DMS در نرم‌افزار PMWIN شبیه‌سازی و تحلیل شده است.

مهم‌ترین اهداف تحقیق حاضر، شبیه‌سازی انتقال آلاینده نیترات در آبخوان شاهرود به‌منظور شناخت سازوکار و عوامل موثر بر انتقال آن، تعیین محدوده خطر استفاده از آب‌های زیرزمینی در دشت شاهرود، محاسبه مقدار نیترات واردشده به آبخوان در اثر نشت از فاضلاب مناطق شهری و محاسبه مقدار نیترات فروشویی‌شده از مناطق کشاورزی است.

۲- معرفی منطقه مورد مطالعه

شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی شاهرود، سازندهای زمین‌شناسی و راه‌های ارتباطی آن را نشان می‌دهد. دشت شاهرود با وسعت حدود ۵۴۰ کیلومتر مربع در مسیر جاده اصلی تهران- مشهد در استان سمنان و در جنوب ارتفاعات البرز قرار دارد. از نظر جغرافیایی این دشت در محدوده ´۱۲ °۳۶ و تا ´۲۶ °۳۶ عرض شمالی و ´۴۰ °۵۴ تا ´۱۰ °۵۵ طول شرقی قرار دارد. ارتفاعات تپال در شمال و غرب، تپه ماهورهای مارنی- گچی میوسن در جنوب، دشت دامغان در جنوب غرب و مرز حوضه آبریز میامی در شرق، دشت شاهرود را محدود کرده است.

از نظر زمین‌شناسی ارتفاعات شمالی دشت از سازندهای لار (J_L)، سازند دلیچای (J_D)، سازند شمشک (J_S)، سازند میلا (C_M) و آهک‌های کرتاسه و ارتفاعات جنوبی از سازندهای مارنی و گچی (Mur^2 و E_M) و رسوبات ماسه‌سنگی و شیلی ائوسن (E_S) تشکیل شده است. رسوبات کواترنری در محدوده دشت شاهرود شامل سه واحد اصلی Q^{t1} (پادگانه‌های آبرفتی و مارن‌های گراولی)، Q^{t2} (پادگانه‌های آبرفتی جوان و رسوبات آبرفتی) و Q^{al} (آبرفت‌های عهد حاضر و رسوبات رودخانه‌ها) هستند. واحد Q^{t1} که در بخش‌های زیادی از حاشیه‌های آبخوان رخنمون دارد، به‌دلیل قدیمی و متراکم‌بودن مواد آبرفتی، در برگیرنده بخش آبدار آبخوان نیست. آبخوان شاهرود عمدتاً در واحدهای Q^{t2} و Q^{al} توسعه یافته است. واحد Q_{sc} نیز در بخش‌های مرکزی دشت دیده می‌شود که از جنس رس ماسه‌ای و سیلت‌دار است.

آبخوان دشت شاهرود، آبخوانی آزاد و تک‌لایه است. مهم‌ترین ورودی‌های آن نفوذ آب بارندگی، پساب شهر شاهرود، آب برگشتی کشاورزی و جریان آب زیرزمینی از سازندهای مجاور است. همچنین جریان خروجی زیرزمینی و برداشت از چاه‌ها مهم‌ترین خروجی‌های آن است (ولی‌زاده، ۱۳۹۲). جهت غالب جریان آب زیرزمینی از سمت شمال شرق به سمت جنوب غرب آبخوان است (ولی‌زاده، ۱۳۹۲). در دشت شاهرود، ۴۰ حلقه پیزومتر وجود دارد که ۲۵ حلقه آن دارای آمار کامل‌تری است. آبخوان شاهرود از طریق ۳۱۵ حلقه چاه جهت مصارف شرب، صنعتی و کشاورزی بهره‌برداری می‌شود. شکل ۲ موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و پیزومترها به همراه ورودی‌ها و خروجی‌های زیرزمینی آبخوان را نشان می‌دهد.

۳- مواد و روش‌ها

در راستای اهداف این تحقیق در ابتدا مدل جریان آب زیرزمینی، در یک دوره سه ساله واسنجی و صحت‌سنجی شد. سپس انتقال نیترات به وسیله برنامه MT3DMS شبیه‌سازی و بررسی شد. شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی بر پایه مدل مفهومی دشت و با استفاده از نرم افزار PMWIN انجام شده است.

در مدل مفهومی، داده‌های مشاهده‌ای، واحدهای چینه‌نگاری و مرزهای سامانه تعیین می‌شود. داده‌های مشاهده‌ای شامل اطلاعات بیلان آب زیرزمینی و داده‌های مورد نیاز برای لحاظ‌کردن پارامترهای سفره و تنش‌های آب‌شناختی است (Anderson and Woessner, 1992). در مرحله ساخت مدل مفهومی، در ابتدا مطالعات و گزارش‌های موجود از دشت شاهرود بررسی شد. سپس موقعیت مکانی و آمار سطح آب در پیزومترهای حفرشده در سطح دشت و موقعیت مکانی و مقدار آبدهی پمپاژ چاه‌ها در آبخوان جمع‌آوری شد. مرزهای آبخوان با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی موجود و به‌وسیله نرم‌افزار ArcGIS، ارتفاع سنگ بستر سفره با استفاده از اطلاعات مربوط به نمودارهای حفاری چاه‌های عمیق و با کمک نرم‌افزار Surfer، نقشه توپوگرافی دشت شاهرود با استفاده از نرم‌افزار mapper Global و نقشه سطح آب زیرزمینی به‌صورت دستی رسم شد. سپس با استفاده از نقشه سطح آب زیرزمینی نوع مرزهای سفره و محل‌های ورودی و خروجی آب زیرزمینی مشخص شد.

۴- نتایج و بحث

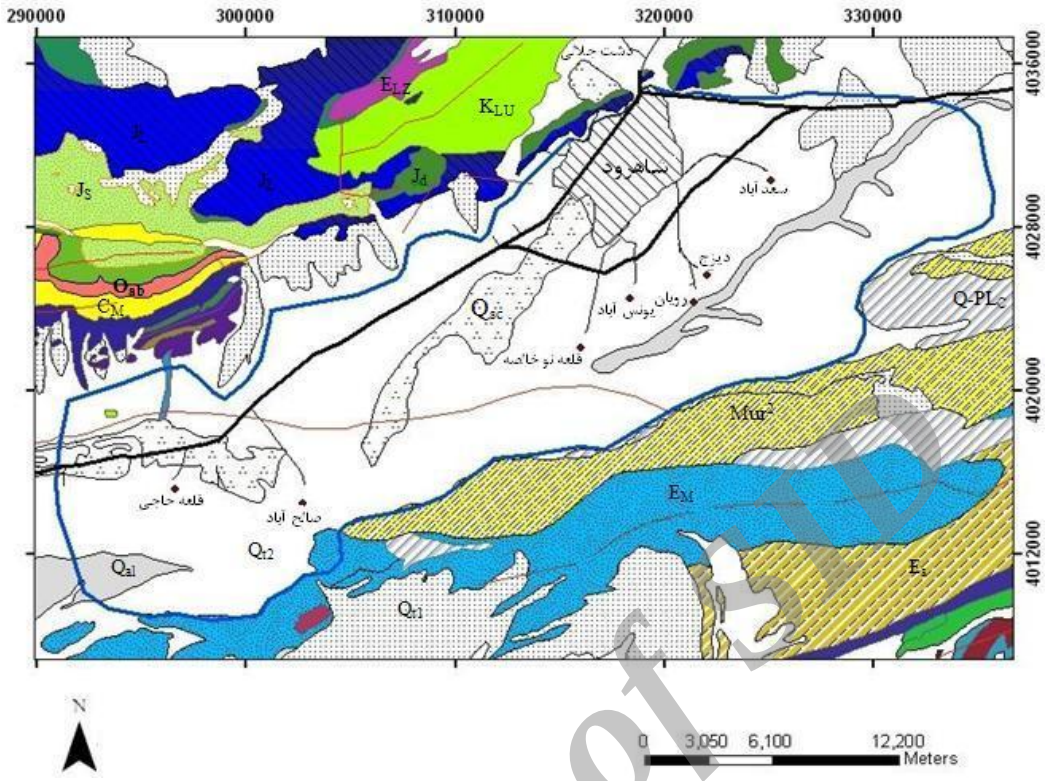
۴-۱- شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی

به‌منظور ساخت مدل جریان آب زیرزمینی، محدوده مورد بررسی به شبکه‌ای متشکل از ۳۰ ردیف و ۸۶ ستون با ابعاد ۱۰۰۰×۵۰۰ متر و ۵۰۰ ×۵۰۰ متر تقسیم‌بندی شد. به منظور کم‌کردن تعداد سلول‌های قرار گرفته در خارج از محدوده مورد مطالعه (سلول‌های غیرفعال) و با فرض همسان‌بودن آبخوان، شبکه ساخته‌شده در مدل به مقدار ۲۸ درجه در جهت پادساعتگرد چرخانده شد (Anderson and Woessner, 1992). سپس اطلاعات جمع‌آوری شده از مدل مفهومی دشت شامل ارتفاع سنگ کف، سطح آب زیرزمینی، ارتفاع توپوگرافی، تغذیه (آب برگشتی کشاورزی، فاضلاب و بارندگی) و مقدار دبی برداشت چاه‌ها وارد مدل شد. به‌دلیل نبود اطلاعات کافی در زمینه اطلاعات لاگ حفاری چاه‌های اکتشافی و نتایج حاصل از آزمایش‌های پمپاژ در محدوده دشت شاهرود، برای واردکردن مقادیر اولیه رسانایی هیدرولیکی از نتایج مطالعات پیشین (ملکی، ۱۳۹۰) استفاده شد.

مدل پایدار جریان آب زیرزمینی بر اساس میانگین ارقام مربوط به تغذیه بارندگی، تخلیه چاه‌ها و اعداد تراز آب زیرزمینی پیزومترها در چهار ماه آخر سال ۸۶ ساخته شد. مدل ناپایدار جریان آب زیرزمینی نیز از اسفند سال ۸۶ تا اسفند سال ۸۸ به‌مدت ۲۵ ماه واسنجی شد. مقادیر و منطقه‌بندی رسانایی هیدرولیکی و آبدهی ویژه در طی واسنجی حالت پایدار و ناپایدار تعیین شد. پس از اتمام واسنجی در شرایط ناپایدار، مدل از فروردین تا اسفند ۸۹ به مدت ۱۲ ماه صحت‌سنجی شد. نتایج حاصل از واسنجی بیانگر تغییرات رسانایی هیدرولیکی از ۱ تا ۱۴ متر بر روز و آبدهی ویژه از ۰/۰۰۷ تا ۰/۲ بوده است. شکل ۳ زون‌بندی مقادیر رسانایی هیدرولیکی و آبدهی ویژه آبخوان شاهرود بعد از واسنجی حالت ناپایدار و صحت‌سنجی را نمایش می‌دهد.

Archive of SID

www.SID.ir



Legend

	Q_{AL}	Recent alluvium, river beds (Quaternary)
	Q_{t2}	Young terraces and alluvial fan (Quaternary)
	Q_{t1}	Old terraces and gravel fan (Quaternary)
	Q_{SC}	Sandy- silt clay, clay (Quaternary)
	$Q\text{-}PL_C$	Conglomerate, sandstone (Quaternary)
	Mur^2	Marl, gypsiferous marl, red (Upper Red F. , Neogene)
	k_{lu}	Inoceramus bering limestone and marly, nodular limestone (Cretaceous)
	J_L	Dolomitic - Limestone, dolomite, chert nodules (Lar F. Jurassic)
	J_D	Marly limestone, marl, ammonite bearing
	J_S	Shale, sandstone, siltstone with coal lenses (Shemshak F. Jurassic)
	O_{ab}	Micaceous shale, quartzitice sandstone (Abarseg F. Ordovician)
	ϵ_M	Dolomite, limestone, shale, trilobite beaing (Mila F. Memb 1-4, Upper Camberian)
	E_S	Sandstone, shale (Eocene)
	E_M	Gypsiferous marl, Sandstone, Conglomerate, Limestone (Eocene)
	E_{LZ}	Numulitic limestone (Ziarat F. Eocene)

مرز آبخوان (Aquifer)

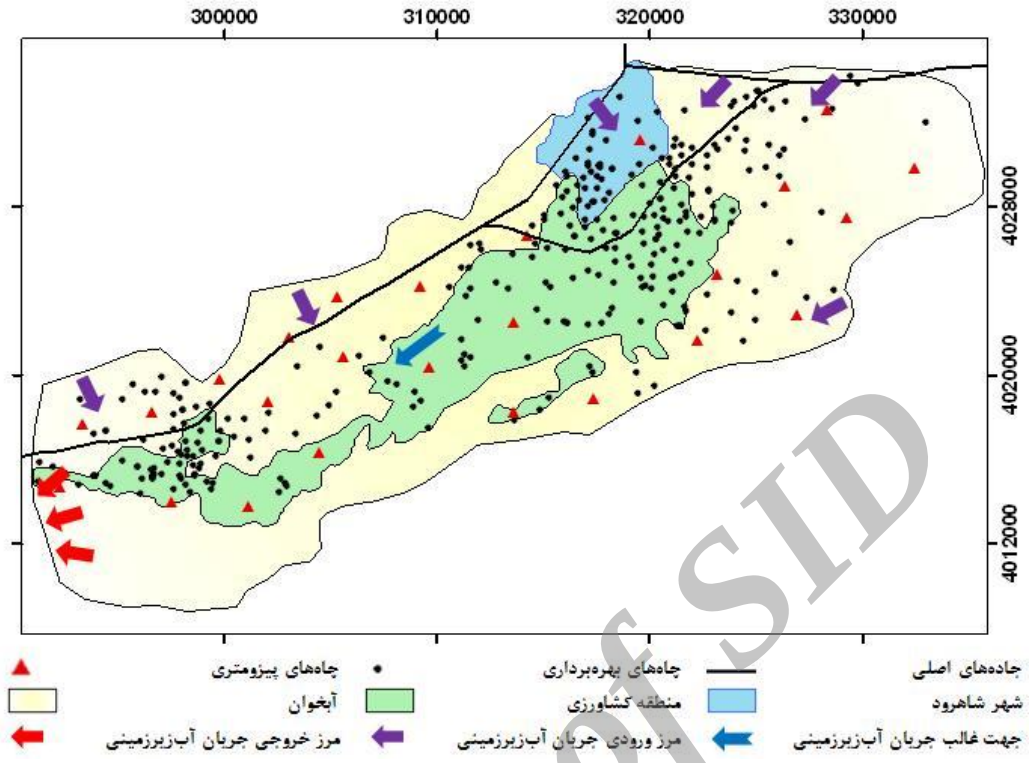
گسل (Fault)

جاده‌های اصلی (Main roads)

شکل ۱- موقعیت آبخوان شاهرود در نقشه زمین‌شناسی برگرفته از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ شاهرود (وزیری، ۱۳۸۰) و بسطام (حاجی‌حسینی و قاسمی، ۱۳۸۲)

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲- موقعیت مکانی چاه‌های پیزومتری و چاه‌های بهره‌برداری و مرزهای ورودی و خروجی آب زیرزمینی در دشت شاهرود

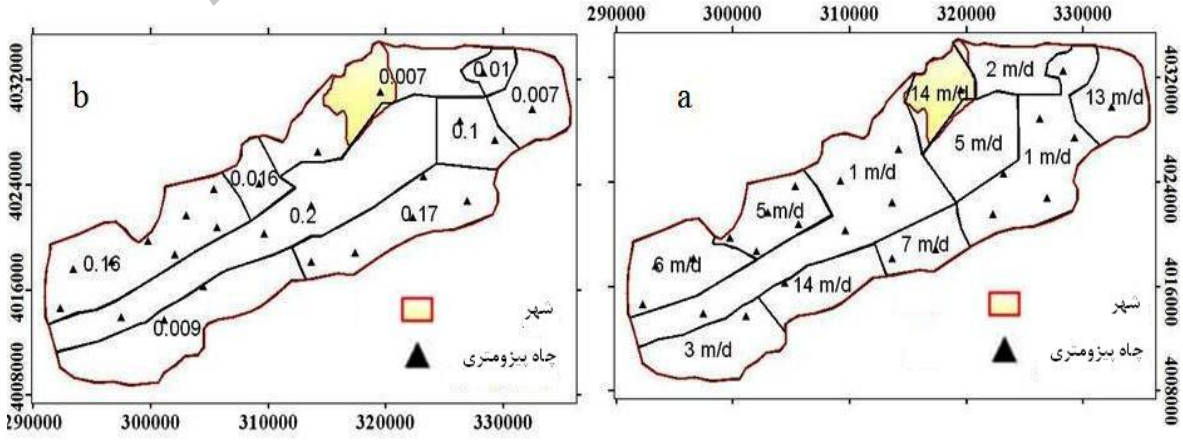
۴-۲- شبیه‌سازی انتقال آلاینده نیترات

۴-۲-۱- مدل مفهومی انتقال آلاینده نیترات

ساخت مدل مفهومی آلودگی یک دشت شامل تعیین نوع منبع آلودگی است. آلودگی‌ها در سه دسته آلودگی با منبع نقطه‌ای، منبع خطی و پراکنده قرار می‌گیرند (Todd, 2005). رایج‌ترین منبع آلودگی نقطه‌ای سامانه دفع فاضلاب خانگی توسط چاه‌های جذبی و اصلی‌ترین منابع آلودگی پراکنده، شهرها و مناطق کشاورزی هستند.

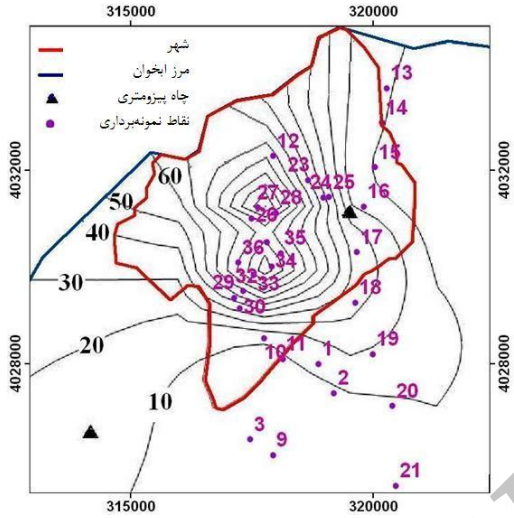
غلظت نیترات در محدوده شهر شاهرود در سال‌های ۸۲ و ۸۴ اندازه‌گیری شده است (Kazemi, 2011). شکل ۴ توزیع مکانی نقاط نمونه‌برداری‌شده در دشت شاهرود و خطوط هم‌غلظت نیترات را نشان می‌دهد. غلظت نیترات به سمت مرکز شهر افزایش نشان داده و از ۵/۵ تا ۱۴۰میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. مرزهای ورودی در مدل انتقال بر اساس اطلاعات موجود از نوع غلظت مشخص یا دیریکله (Dirichlet) است.

سازوکارهای انتقال آلاینده نیترات شامل همرفت، پراکندگی، انتشار و واکنش‌های شیمیایی هستند. استفاده از حل‌کننده ذره مبنای HMOC در حل معادله انتقال آلاینده باعث کاهش پخشیدگی عددی و افزایش دقت محاسبات در حل عبارت همرفت معادله انتقال جرم در مدل انتقال آلاینده می‌شود (کی‌همایون و همکاران، ۱۳۹۰). به همین دلیل از این روش محاسباتی برای محاسبه مقدار همرفت در دشت شاهرود استفاده شده است.



شکل ۳- زون‌بندی مقادیر رسانایی هیدرولیکی a) و آبدهی ویژه b) در آبخوان شاهرود بعد از واسنجی و صحت‌سنجی مدل

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۴- توزیع مکانی نقاط نمونه‌برداری‌شده در دشت شاهرود و خطوط هم‌غلظت نیترات (غلظت‌ها بر حسب میلی‌گرم بر لیتر است)

۴-۲-۲- مدل عددی انتقال نیترات

به‌منظور ساخت مدل انتقال آلاینده نیترات در محدوده شهری، ابتدا مدل جریان آب زیرزمینی از تیر ۸۲ تا مهر ۸۴ به‌مدت ۲۵ ماه اجرا شد. مقادیر غلظت نیترات در نمونه‌های سال ۸۲ به‌عنوان غلظت اولیه نیترات در منطقه شهری شاهرود لحاظ شد. مقدار نیترات زمینه در دیگر بخش‌های آبخوان برابر با ۵/۵ میلی‌گرم بر لیتر و بر اساس کمترین مقادیر اندازه‌گیری‌شده نیترات در دشت منظور شد.

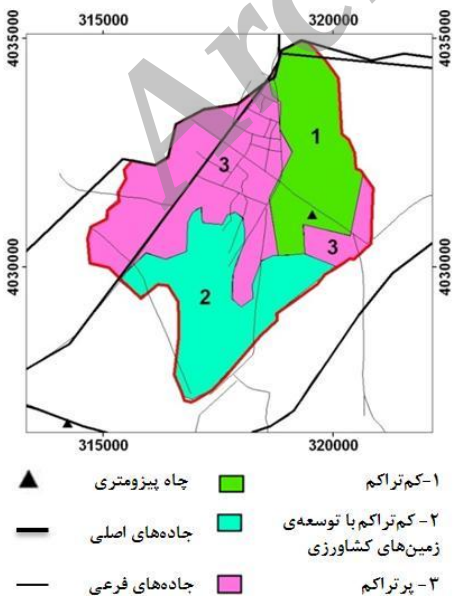
مقادیر غلظت نیترات در مرز ورودی مجاور شهر بر اساس غلظت نیترات در دشت جلالی شاهرود (شکل ۱) در سال ۸۲ برابر ۷/۶ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شد. در سایر مرزها غلظت نیترات ورودی برابر با حداقل غلظت نیترات در نمونه‌ها و حدود ۵/۵ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است.

قابلیت پراکندگی طولی برای مدل انتقال آلاینده نیترات دشت شاهرود با توجه به محاسبات انجام‌شده بر مبنای فرمول‌های موجود (مانند Fetter, 1999) تعیین و در نهایت طی فرایند واسنجی مدل انتقال حدود ۳۰ متر برآورد شد. نسبت مقدار پراکندگی افقی به طولی و نسبت مقدار پراکندگی عمودی به طولی به‌دلیل نبود اطلاعات کافی در محدوده آبخوان، با توجه به اطلاعات حاصل از مطالعات پیشین به‌ترتیب ۱ و ۰/۱ در نظر گرفته شد. ضریب انتشار در یون‌های اصلی آب زیرزمینی، بین ۱×۱۰^{-۹} تا ۲×۱۰^{-۹} متر مربع بر ثانیه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد متغیر است (Todd, 2005). میانگین این دو عدد که برابر $۱/۵\times۱۰^{-۹}$ متر مربع بر ثانیه است، به‌عنوان ضریب انتشار در مدل انتقال آلاینده نیترات استفاده شد.

اگر شرایطی مانند محیط کاهیدگی، وجود الکترون‌دهنده‌های مناسب و باکتری‌های خارج کننده نیترات از آب زیرزمینی وجود داشته باشد، فرایند نیترات‌زدایی مهم‌ترین عامل خروج نیترات از آب زیرزمینی است. در کد MT3DMS این فرایند از طریق واکنش آهنگ برگشت‌ناپذیر مرتبه اول (First-order irreversible rate reaction) برای هر سلول شبیه‌سازی می‌شود (Zheng and Wang, 1999 به نقل از کی‌همایون و همکاران، ۱۳۹۰). به منظور تاثیردادن واکنش‌های شیمیایی در منطقه مورد مطالعه از بسته واکنش‌های شیمیایی استفاده شد. با در نظر گرفتن عوامل تجزیه و تلاشی، روش استفاده شده در مدل حاضر هم‌دمای تعادل خطی (First-order irreversible rate reaction) است (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۱ و لاله‌زاری، ۱۳۸۷). مقدار ضریب توزیع در این بخش ۰/۰۰۰۵ قرار داده شد.

۴-۲-۳- واسنجی مدل انتقال آلاینده نیترات

واسنجی مدل انتقال با استفاده از داده‌های نیترات در مهرماه ۸۴ انجام شده است. باتوجه به این‌که نقاط موردنظر برای واسنجی در محدوده شهری قرار گرفته‌اند، واسنجی مدل برای محدوده شهری شاهرود انجام شده است. در ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، شهر به دو منطقه، با بافت پرتراکم و کم‌تراکم تقسیم و سپس این مناطق به زون‌های کوچک‌تری تفکیک شد (شکل ۵). در هر دو منطقه شماره ۱ و ۲ بافت شهری کم‌تراکم بوده بنابراین در منطقه شماره ۲ زمین‌های غیرمسکونی اغلب فضای سبز و زمین کشاورزی هستند. منطقه شماره ۳ دارای بافت پرتراکم است.



شکل ۵- منطقه‌بندی شهر شاهرود بر اساس جمعیت

طی واسنجی مدل انتقال نیترات، غلظت و نیم‌عمر نیترات در آب تغذیه‌شده

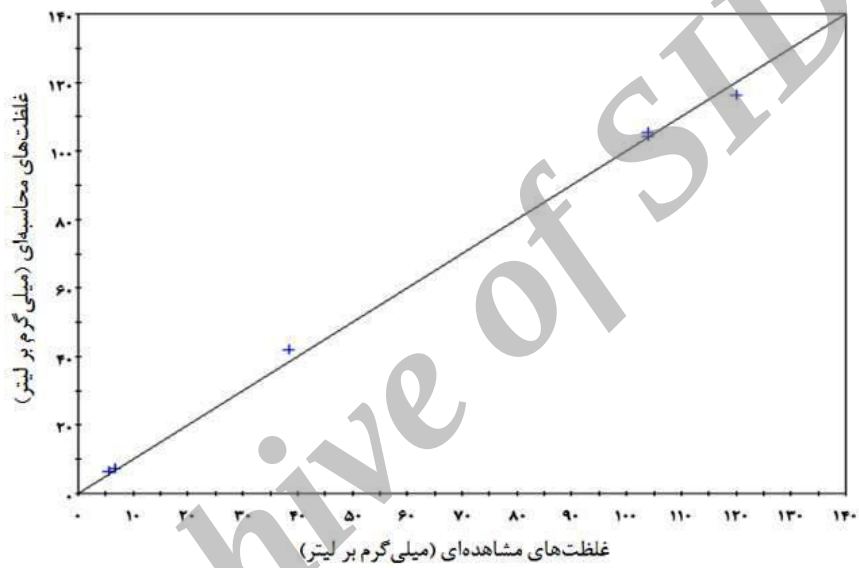
Archive of SID

www.SID.ir

از طریق چاه‌های جذبی شهری تا زمانی که اختلاف غلظت نیترات مشاهده‌ای و محاسبه‌ای به کمترین مقدار خود برسد، تغییر داده شد. شکل ۶ انطباق مقادیر محاسبه‌شده غلظت نیترات توسط مدل و مشاهده‌شده در چاه‌های انتخابی طی دوره واسنجی را نشان می‌دهد. مقدار خطای به‌دست‌آمده حاصل از جذر واریانس در این مرحله حدود ۳ میلی‌گرم بر لیتر است.

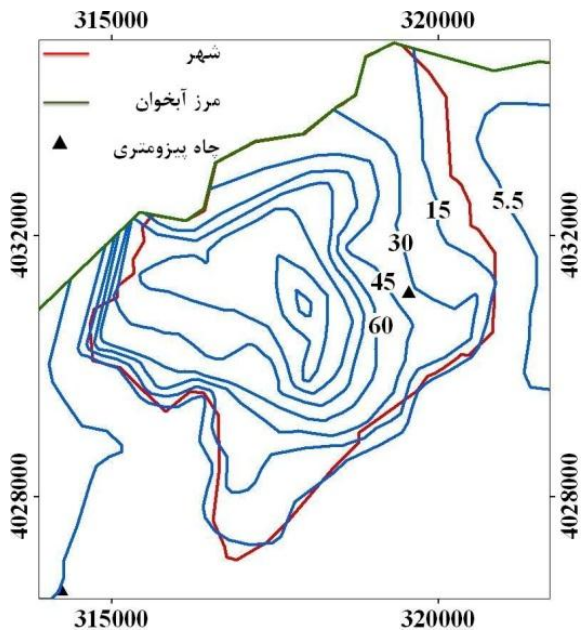
۴-۳- نتایج حاصل از واسنجی مدل انتقال آلاینده نیترات

شکل ۷ خطوط هم‌غلظت نیترات حاصل از اجرا و واسنجی مدل در مهر ماه ۸۴ را نشان می‌دهد. مقدار غلظت نیترات در منطقه شهری از ۵/۵ میلی‌گرم بر لیتر (غلظت زمینه) تا ۱۴۰ میلی‌گرم بر لیتر تغییر می‌کند. نتایج نشان می‌دهد انتقال آلاینده نیترات تا حد زیادی تحت تاثیر جهت جریان آب زیرزمینی قرار دارد و در جهت جریان آب زیرزمینی مقدار نیترات افزایش بیشتری نشان می‌دهد. این موضوع تاثیر غالب پدیده‌های همرفت و پراکندگی مکانیکی را در انتقال آلاینده نیترات نشان می‌دهد. وجود منطقه با رسانایی هیدرولیکی کم (حدود ۱ متر بر روز) در سمت غرب شهر باعث جلوگیری از گسترش بیشتر هاله آلودگی نیترات ناشی از شهر در این جهت شده است. همچنین تمرکز بالای چاه‌ها در منطقه شماره ۲ شهری و گسترش مخروط افت ناشی از آنها مانع از گسترش بیشتر آلودگی نیترات به سمت پایین‌دست شهر شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده گسترش خطوط هم‌غلظت نیترات در خلاف جهت جریان آب زیرزمینی به سمت حاشیه شرقی شهر شاهرود نشان‌دهنده تاثیر فرایند پراکندگی مولکولی (انتشار) است.



شکل ۶- انطباق مقادیر محاسبه‌شده و مشاهده‌ای غلظت نیترات

به‌منظور تعیین نیمه‌عمر نیترات در محدوده شهر شاهرود مقدار نیمه‌عمر ثابت فرض‌شده و مقدار غلظت نیترات در آب تغذیه‌ای ناشی از شهر تا زمان رسیدن به کمترین مقدار خطا در مدل تغییر داده شد و این مرحله برای نیم‌عمرهای مختلف تکرار شد. نتایج نشان می‌دهد در نیم‌عمرهای کمتر از ده سال مقدار بهینه غلظت نیترات تغذیه شهری (فاضلاب) بیشتر از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده، در حالی که خطای مدل نیز بیشتر از ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر است. با افزایش نیم‌عمر نیترات، مقدار بهینه غلظت نیترات تغذیه‌ای و خطای مدل کمتر شده تا جایی‌که در نیم‌عمر بی‌نهایت کمترین مقدار غلظت (کمتر از ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار خطای مدل حاصل می‌شود. به عبارت دیگر به نظر می‌رسد عملاً نیازی به اعمال نیم‌عمر (معرف فرایند نیتراتزدایی به‌عنوان سازوکار حذف نیترات) در مدل انتقال نبوده و همرفت، پراکندگی و انتشار تنها فرایندهایی هستند که باعث خارج شدن نیترات از آب زیرزمینی در دشت شاهرود می‌شوند.



شکل ۷- خطوط هم‌غلظت نیترات حاصل از اجرای مدل در مهر ۸۴

Archive of SID
www.SID.ir

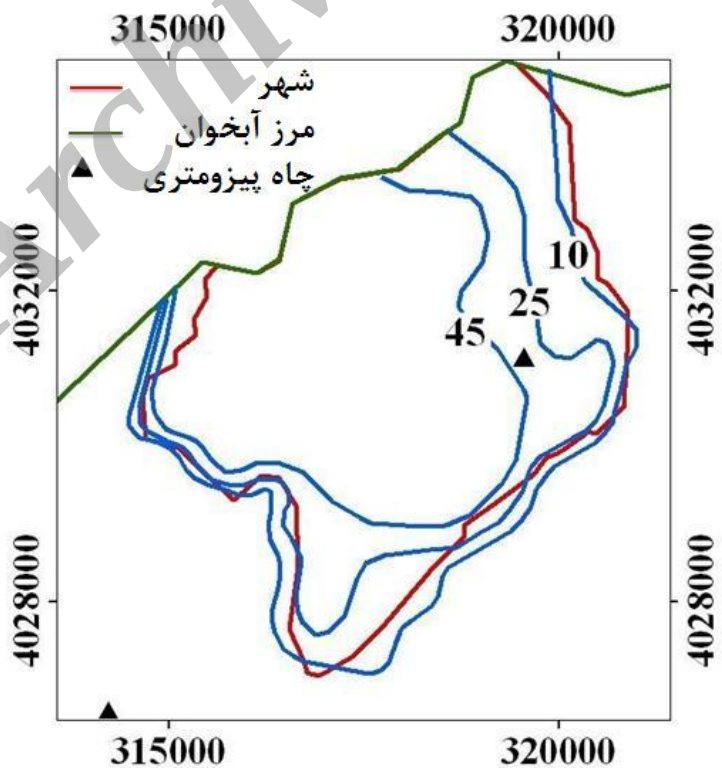
فرایند نیترات‌زدایی به شرایط خاصی مانند وجود مواد آلی و شرایط کاهیدگی (بدون اکسیژن) نیاز دارد. شهر شاهرود در حاشیه آبخوان و در منطقه با رسانایی هیدرولیکی ۱۴ متر بر روز قرار گرفته است. نزدیکی به منطقه تغذیه (ارتفاعات شمالی آبخوان) شرایط ورود آب‌های با اکسیژن بالا را به محدوده شهری فراهم کرده و احتمالاً مانع شرایط کاهیدگی می‌شود. این پدیده دلیل احتمالی عدم انجام فرایند نیترات‌زدایی در محدوده شهر شاهرود است. بدیهی است تایید این فرضیه نیازمند اندازه‌گیری اکسیژن محلول و مواد آلی بوده که خارج از اهداف تحقیق حاضر است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از واسنجی مدل انتقال آلاینده نیترات، غلظت نیترات تغذیه‌ای در مناطق مختلف شهر تغییراتی از ۷۰ تا ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نشان می‌دهد.

۴-۴- تعیین محدوده خطر ناشی از نیترات در دشت شاهرود

حد آستانه آلودگی احتمالی نیترات در اثر کودهای شیمیایی، فاضلاب‌ها و محل‌های نگهداری حیوانات (عوامل انسان‌زاد) برابر ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر (Hounslow, 1995) و حد مجاز غلظت آن در آب‌های آشامیدنی بر اساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2011) حدود ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر تعیین شده است. همچنین در کشورهای اروپایی غلظت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر به‌عنوان حد آلودگی نیترات تعیین شده است (Kazemi, 2004).

با توجه به ثابت‌بودن تقریبی گسترش مکانی آلودگی ناشی از شهر می‌توان محدوده خطر ناشی از نیترات را برای شهر شاهرود رسم کرد. در شکل ۸ خط هم‌ارزش غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر محدوده آلودگی بر اساس نظر هانسلو (Hounslow, 1995) را نشان می‌دهد. محدوده داخلی این خط بیانگر این موضوع بوده که آلودگی در آبخوان رخ داده است. به این معنی که عوامل انسان‌زاد سبب تغییر در کیفیت طبیعی منابع آب زیرزمینی شده است. خط هم‌غلظت ۲۵ و ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر به‌ترتیب محدوده آلودگی بر اساس حد آلودگی کشورهای اروپایی و حد مجاز غلظت نیترات در آب آشامیدنی سازمان جهانی بهداشت (WHO) در محدوده شهر شاهرود را نشان می‌دهد.

محدوده گسترش مکانی آلودگی انسان‌زاد در شمال شرقی منطقه منطبق بر محدوده مرزی شهر و در سایر مرزها در فاصله ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متری منطقه قرار دارد. تمامی چاه‌هایی که داخل مرز خط هم‌غلظت ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر قرارگرفته‌اند، فاقد شرایط استاندارد تعیین‌شده توسط سازمان جهانی بهداشت برای آب آشامیدنی هستند.



شکل ۸- محدوده خطر آلودگی نیترات در دشت شاهرود

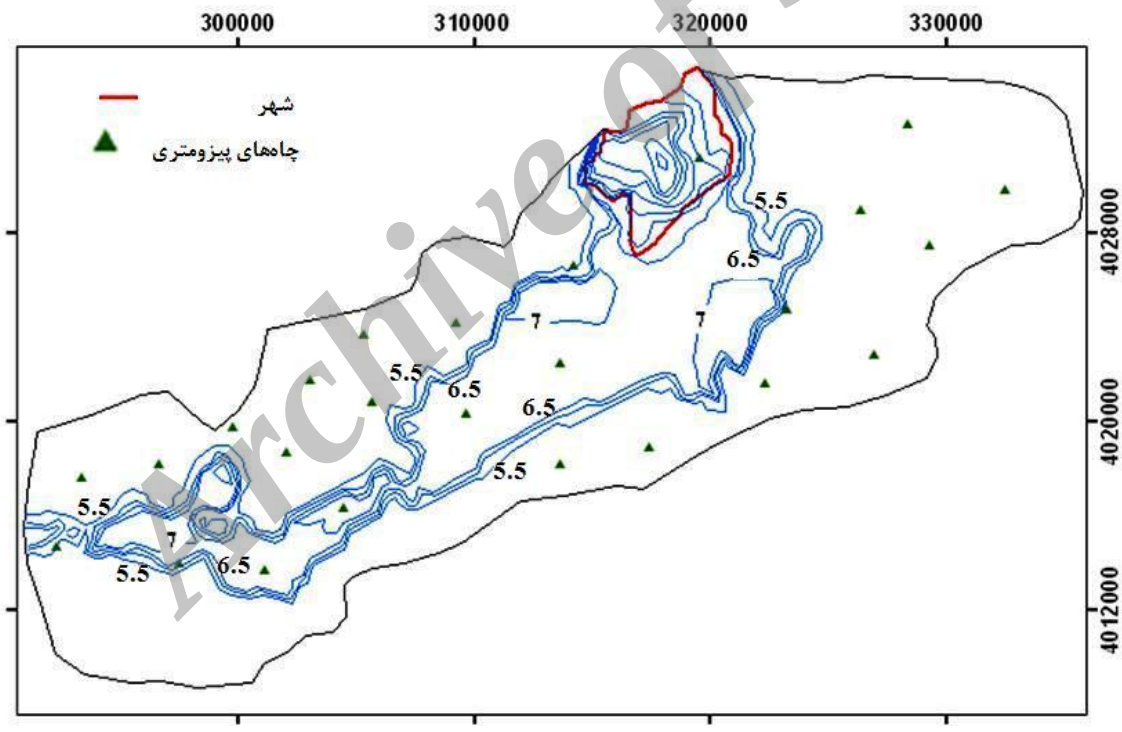
Archive of SID

www.SID.ir

۴-۵- شبیه‌سازی مقدار نیترات فروشویی‌شده در منطقه کشاورزی

ضمن استفاده از کودهای شیمیایی در زمین‌های کشاورزی، بخشی از آن از خاک شسته شده و به آب زیرزمینی می‌رسد. کودها معمولاً ترکیباتی از نیتروژن، فسفر و پتاسیم هستند. کودهای فسفاتی و پتاسیم‌دار به‌آسانی روی ذرات خاک جذب شده و بندرت مشکل آلودگی ایجاد می‌نمایند، اما فقط بخشی از نیتروژن به‌وسیله گیاه یا خاک جذب شده و بنابراین یکی از آلاینده‌های اصلی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی است (Todd, 2005).

غلظت نیترات بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در بخش‌هایی از منطقه کشاورزی که تحت تاثیر آلودگی نیترات شهری نیستند (زارع، ۱۳۹۰) در مدل‌سازی انتقال آلاینده نیترات استفاده شده است. تغییرات غلظت نیترات، در محدوده شهری تقریباً اندک بوده و در فواصل زمانی کوتاه تاثیری بر غلظت نیترات در محدوده کشاورزی ندارد. به همین دلیل غلظت‌های نیترات در محدوده شهری به‌صورت غلظت ثابت در هر سلول به مدل انتقال آلاینده وارد شده و مدل از سال ۸۶ تا ۹۱ اجرا شد. به‌منظور بررسی مقدار نیترات فروشویی‌شده از زمین‌های کشاورزی، تغذیه نیترات از طریق آب برگشتی ناشی از زمین‌های کشاورزی لحاظ شد. میانگین غلظت نیترات (۶/۹۳ میلی‌گرم بر لیتر) به‌عنوان معرف آلودگی منطقه کشاورزی مورد استفاده قرار گرفت. سپس مقدار نیترات تغذیه‌شده ناشی از کشاورزی تا جایی که مقدار میانگین غلظت نیترات در زمین‌های کشاورزی به این مقدار میانگین برسد، تغییر داده شد. شکل ۹ محدوده گسترش مکانی نیترات در محدوده شهری و کشاورزی را در شهریور ۹۱ نشان می‌دهد. محدوده تغییرات غلظت نیترات در محدوده کشاورزی از ۵/۵ تا ۷ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است.



شکل ۹- محدوده‌ی گسترش آلودگی نیترات در محدوده‌ی شهری و کشاورزی

مقدار مجاز استفاده از کودهای شیمیایی در زمین‌های کشاورزی سالانه حدود ۲۲۵ کیلوگرم در هر هکتار است. استفاده بیشتر از کودهای شیمیایی، که در اغلب مناطق کشور رایج است، می‌تواند ضمن فروشویی به آب‌های زیرزمینی، تخریب کیفیت این منابع آبی را به‌دنبال داشته باشد. برای مثال در مناطق کشاورزی بالادست منطقه مورد مطالعه (خارج از محدوده آبخوان شاهرود) سالانه ۵۰۰ و ۷۵۰ کیلوگرم در هکتار (حدود دو تا سه برابر حد مجاز) کود شیمیایی استفاده می‌شود (Kazemi, 2004)، که می‌تواند سبب آلودگی منابع آب زیرزمینی شود.

غلظت نیترات در تغذیه ناشی از زمین‌های کشاورزی در طی فرایند واسنجی مدل انتقال حدود، ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر محاسبه شد. با در نظر گرفتن حجم آب برگشتی کشاورزی سالانه حدود ۱۵۲ کیلوگرم نیترات در هر هکتار از منطقه کشاورزی دشت شاهرود فروشویی می‌شود (جدول ۱).

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱- محاسبه مقدار نیترات فروشویی‌شده از زمین‌های کشاورزی دشت شاهرود

مساحت منطقه کشاورزی (متر مربع)	۱۲۷۵۵۷۹۸۹
حجم آب مصرفی کشاورزی (متر مکعب در سال)	۴۸۴۶۳۸۲۵
حجم آب برگشتی ناشی از مصارف کشاورزی کشاورزی (متر مکعب در سال)	۹۶۹۲۷۶۵
جرم نیترات فروشویی‌شده از طریق آب برگشتی (کیلوگرم در سال)	۱۹۳۸۵۵۳
جرم نیترات فروشویی‌شده از طریق آب برگشتی کشاورزی در هر هکتار (کیلوگرم در سال)	۱۵۲

نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق شامل موارد زیر است:

- غلظت نیترات در منطقه شهری از ۵/۵ تا ۱۴۰ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. جهت جریان آب زیرزمینی و رسانایی هیدرولیکی منطقه، بیشترین تاثیر را در انتقال آلاینده نیترات دارند.
- وجود منطقه با رسانایی هیدرولیکی کم (حدود ۱ متر بر روز) در سمت غرب شهر و تمرکز بالای چاه‌ها در بخش‌های جنوبی شهر و گسترش مخروط افت ناشی از آنها مانع از گسترش بیشتر آلودگی نیترات در این جهت‌ها شده است. به‌عبارت دیگر این عوامل انتقال نیترات به سمت پایین‌دست جریان را محدود نموده است.
- بر اساس نتایج حاصل از واسنجی مدل انتقال آلاینده نیترات، نزدیکی به منطقه تغذیه آبخوان و ورود آب‌های حاوی اکسیژن بالا به محدوده، شهری مانع از انجام فرایند نیترات‌زدایی در محدوده شهری می‌شود. درنتیجه فرایندهای همرفت، انتشار و پراکندگی مکانیکی تنها فرایندهایی هستند که باعث رقیق‌شدگی و کاهش غلظت نیترات ضمن دورشدن از منطقه شهری می‌شوند.
- بر اساس نتایج حاصل از واسنجی در منطقه شهری، تغییرات غلظت نیترات در فاضلاب واردشده به آبخوان در مناطق مختلف شهر از ۷۰ تا ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است.
- محدوده گسترش مکانی آلودگی انسان‌زاد در شمال شرقی منطقه منطبق بر محدوده مرزی شهر و در سایر مرزها در فاصله ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متری منطقه شهری قرار دارد.
- غلظت نیترات در آب برگشتی زمین‌های کشاورزی در طی فرایند واسنجی مدل انتقال آلاینده نیترات حدود ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر محاسبه شد. با توجه به حجم آب برگشتی کشاورزی هر ساله حدود ۱۵۲ کیلوگرم نیترات در هر هکتار از منطقه کشاورزی دشت شاهرود فروشویی می‌شود.
- نتایج بیانگر تاثیر بسیار زیاد منطقه شهری در آلودگی آبخوان شاهرود به نیترات است.

تقدیر و تشکر

از راهنمایی‌های آقایان دکتر غلامحسین کرمی و دکتر غلامعباس کاظمی، اساتید دانشکده علوم زمین دانشگاه شاهرود و همکاری کارکنان امور آب شاهرود قدردانی می‌گردد.

مراجع

احتشامی م.، و شریفی ع.، ۱۳۸۵، "ارزیابی مدل کیفی آبخوان شهر ری" مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره هشتم، شماره‌ی ۴، صفحه ۱۷-۹.

حاجی‌حسینی آ.، قاسمی آ.، ۱۳۸۲، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بسطام" سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی.

زارع م. ر.، ۱۳۹۰، "بررسی آلودگی فلزات سنگین در منابع آب زیرزمینی و خاک دشت شاهرود" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۸۸ صفحه.

کی‌همایون ز.، ناصری ح. ر.، و نخعی م.، ۱۳۹۰، "متغیرهای کنترل‌کننده انتقال نیترات در آبخوان لنجانات" سی‌امین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات کشور، صفحه ۷-۱.

گودرزی م.، سامانی ن.، و شاکری، ع.، ۱۳۹۱، "شبیه‌سازی انتقال عناصر سنگین در شهرک صنعتی بزرگ شیراز" مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۴، جلد۱، صفحه ۹-۱.

لاله‌زاری ر.، ۱۳۸۷، "بررسی تأثیر تغذیه آبخوان شهرکرد با فاضلاب بر انتشار نیترات با استفاده از مدل MT3D" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهرکرد، ۱۲۹ صفحه.

محمدی ض.، و سامانی، ن.، ۱۳۷۹، "بررسی گسترش آلاینده‌ی محلول در آبخوان آبرفتی به کمک مدل‌های ریاضی" سومین همایش بهداشت محیط، صفحه ۸۵- ۸۱.

ملکی ر.، ۱۳۹۰، "تهیه‌ی مدل ریاضی دشت شاهرود برای بررسی اثر اجرای طرح فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۰۸ صفحه.

وزیری ح.، ۱۳۸۰، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شاهرود" سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی.

ولی‌زاده م.، ۱۳۹۲، "مدل‌سازی انتقال آلاینده‌ی نیترات در آب‌های زیرزمینی دشت شاهرود" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۸۹ صفحه.

Anderson, M. p., & Woessner, W. w., 1992, "Applied groundwater modeling simulation of flow and advective transport", *San diego, CA: Academic press, P.380.*

Burton, M., 2007, "Application of a nitrate fate and transport model to the Abbotsford-Sumas aquifer", *PhD. Thesis: Whacom, Western Washington University, P. 88.*

Archive of SID

www.SID.ir

Erwin, M.L., & Tesoriero, A.J., 1997, "Predicting groundwater vulnerability to nitrate in the Puget Sound Basin". *U.S. Geological Survey Fact Sheet 061-97, P.4.*

Fetter, C. W., 1999, "Contaminant hydrologeoy", *New Jersey, upper Saddle River. P.500.*

Gorres, J. & Gold, A., 1996, "Incorporating spatial variability into GIS to estimate nitrate leaching at the aquifer scale". *Journal of Environmental Quality, 25: P.491-498.*

Hounslow, A. W., 1995, "Water Quality Data: Analysis and Interpretation", *Taylor and Francis. P.397*

Kazemi, G. A., 2011, "Impacts of urbanization on the groundwater resources in Shahrood, Northeastern Iran: Comparision with other Iranian and Asian cities", *Physics and Chemistry of the Earth, P.150-159.*

Kazemi, G. A., 2004, "Temporal changes in the physical properties and chemical composition of the municipal water supply of Shahrood, northeastern Iran", *Hydrogeology Journal, 12: P.723-734.*

Todd, D. K., & Larry, W. M., 2005, "Groundwater Hydrology", *John Wiley & sons, inc. New york U.S.A., P. 636.*

Walter, D. A., 2008, "Use of Numerical Models to Simulate Transport of Sewage-Derived Nitrate in a Coastal Aquifer", *Central and Western Cape Cod, Massachusetts, Virginia: U.S. Geological Survey. P. 41*

World Health Organization, 2011, "Nitrate and Nitrite in Drinking-water", *WHO Guidelines for Drinking-water Quality.*

Zheng, C., & Wang, P.P., 1999, "MT3DMS: A modular three-dimensional multi-species transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; Documentation and user's guide", *Contract report SERDP-99-1: U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, P.169.*

Archive of SID

■

www.SID.ir