# شبیه‌سازی انتقال نیترات در آب زیرزمینی: دشت لنجانات اصفهان

حمیدرضا ناصری؛ دانشگاه شهیدبهشتی، دانشکدهٔ علوم زمین
زهرا کی‌همایون*؛ دانشگاه پیام نور، گروه زمین شناسی، تهران، ایران
محمد نخعی؛ دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ علوم زمین

دریافت ۹۱/۲/۵ پذیرش ۹۳/۹/۳

## چکیده

با هدف شناخت خصوصیات انتقالی آبخوان و نحوهٔ انتقال نیترات با سیستم جریان آب زیرزمینی در محدودهٔ تمرکز فعالیت‌های کشاورزی دشت لنجانات، پس از تعیین غلظت این آنیون به‌صورت فصلی، جریان آب زیرزمینی در آبخوان مدل‌سازی شده و سپس انتقال نیترات با آن شبیه‌سازی شده است. سنجش فصلی غلظت نیترات در نمونه‌های آب زیرزمینی محدودهٔ بررسی شده و مقایسهٔ آن با استانداردهای آب شرب انسان و دام و آبیاری حاکی از غلظت بیش از حد استاندارد این آنیون در آب زیرزمینی دشت است. نتایج مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از کد MODFLOW نشان می‌دهد که سیستم جریان آب زیرزمینی دشت لنجانات متأثر از خصوصیات ثابت هیدروژئولوژی آبخوان است. تنش‌های غیرطبیعی وارد بر سیستم جریان از طریق میزان زیاد پمپاژ از چاه‌های استفاده شده، سبب افت سطح ایستابی و کاهش ذخیرهٔ آبخوان شده است. نتایج حاصل از واسنجی و تحلیل حساسیت مدل انتقال نیترات با استفاده از کد MT3DMS نشان می‌دهد که تغذیهٔ نیترات از سطح، میزان تجزیهٔ مرتبهٔ اول، تخلخل مؤثر و بارش، بیش‌ترین تأثیر را در ورود و ماندگاری این آنیون در آب زیرزمینی محدودهٔ بررسی شده دارد. شرایط اکسیدی حاکم بر آبخوان لنجانات و وجود غلظت‌های زیاد اکسیژن در آب زیرزمینی به همراه مقادیر اندک مواد آلی سبب کاهش میزان نیترات‌زدایی در آبخوان شده است. نیمه‌عمر آنیون نیترات در آبخوان بررسی شده بیش از ۲/۵ سال است و حرکت آن عمدتاً از طریق انتقال همرفت انجام می‌شود. بر اساس نوع و میزان حاصل‌خیز کننده‌های نیتراته مصرفی در محدودهٔ بررسی شده و کارایی جهانی جذب نیتروژن و با توجه به جرم محاسبه شده برای نیترات ورودی به آبخوان با مدل انتقال، میزان نیتروژن فروشویی شده به آب زیرزمینی محدودهٔ بررسی شده $۱۰۸\ kgNha^{-۱}yr^{-۱}$ است.

**واژه‌های کلیدی:** مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی، شبیه‌سازی انتقال نیترات، کد MT3DMS، آبخوان لنجانات

***نویسنده مسئول** zkayhomayoon@pnu.ac.ir

## مقدمه

آلودگی آب زیرزمینی به یون نیترات مشکلی جهانی رو به رشدی است که فعالیت‌های کشاورزی مهم‌ترین منبع آن است. تخمین زده می‌شود که بیش از دو سوم نیترات در آب زیرزمینی حاصل از ورودی‌های گذشته و حال کشاورزی است به‌طوری که تقریباً ۳۰ تا ۵۰ درصد حاصل‌خیز کننده‌های شیمیایی ازته و آلی استفاده شده در فرم نیترات به آب زیرزمینی فروشویی می‌شود [۱]. نیترات حل‌شونده‌ای متحرک و پایدار در بسیاری از سیستم‌های جریان آب زیرزمینی هوازی و کم عمق است که انتقال آن در آبخوان از طریق فرایندهای هم‌رفت و پخشیدگی انجام می‌شود.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

در تشریح وضعیت و تحرک آلاینده‌ها در آب زیرزمینی و نیز ارزیابی تأثیر مواد شیمیایی خطرناک، از مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود. امروزه کاربرد مدل‌های جریان و انتقال آب زیرزمینی با استفاده از کدهای با مقبولیت زیاد، جامع و عمومی همانند MODFLOW و MT3DMS همراه با استفاده از نرم‌افزارهای پیش و پس‌پردازنده[1]، گسترش یافته است. کد MT3DMS مجموعه‌ای جامع از گزینه‌ها و قابلیت‌ها برای شبیه‌سازی هم‌رفت، پخشیدگی/انتشار و واکنش‌های شیمیایی آلاینده‌ها در سیستم جریان آب زیرزمینی در شرایط معمول هیدروژئولوژی فراهم می‌کند [۲].

کد MODFLOW برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی و کد MT3DMS (MT3) برای شبیه‌سازی تغییرات غلظت نیترات و انتقال آن در منطقه اشباع، در مناطق مختلف جهان از جمله آبخوان‌های درهٔ نیل در منطقهٔ تحتا[2] و دلتای میانی در مصر [۳]، [۴]، آبخوان‌های حوضهٔ آب‌ریز کرویدی[3] (از مهم ترین مناطق تولید محصولات کشاورزی در اروپا) و منطقهٔ کامبریا[4] در فرانسه [۵]، [۶]، آبخوان سوماس بلین[5] در ایالت واشنگتن آمریکا [۷]، حوضهٔ رودخانهٔ ویلموت[6] در جزیرهٔ ادموند[7] کانادا [۸]، آبخوان شروود[8] در غرب ناتینگام شایر[9] انگلستان [۹]، منطقهٔ تسالی[10] در یونان [۱۰] و آبخوان آبرفتی زاگرب[11] در کرواسی [۱۱] استفاده شده است. شبیه‌سازی انتقال یون نیترات با کدهای ذکر شده در ایران برای دشت‌های شهرکرد [۱۲]، همدان- بهار [۱۳]، ایذه [۱۴]، آبخوان ش‌هرک صنعتی شیراز [۱۵] و آبخوان شهرری [۱۶] انجام شده است. انتقال یون نیترات در آبخوان لنجانات تاکنون شبیه‌سازی نشده است. براین اساس تحقیق حاضر با هدف شناخت خصوصیات انتقالی آبخوان و نحوهٔ انتقال نیترات با سیستم جریان آب زیرزمینی دشت لنجانات انجام شده است. بدین منظور، جریان آب زیرزمینی در کل محدودهٔ آبخوان به مساحت ۱۷۶۰ کیلومترمربع مدل‌سازی شده و سپس انتقال آلایندهٔ نیترات با آن در محدودهٔ تمرکز فعالیت‌های کشاورزی به‌وسعت ۱۲۳۰ کیلومترمربع شبیه‌سازی شده است. مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی از طریق کد MODFLOW-2000 نسخهٔ ۰۰-۱۵-۱ و شبیه‌سازی انتقال نیترات با استفاده از کد MT3DMS نسخهٔ ۵/۱ در نرم‌افزار Visual MODFLOW نسخهٔ ۴/۲/۰/۱۵۱ انجام شده است.

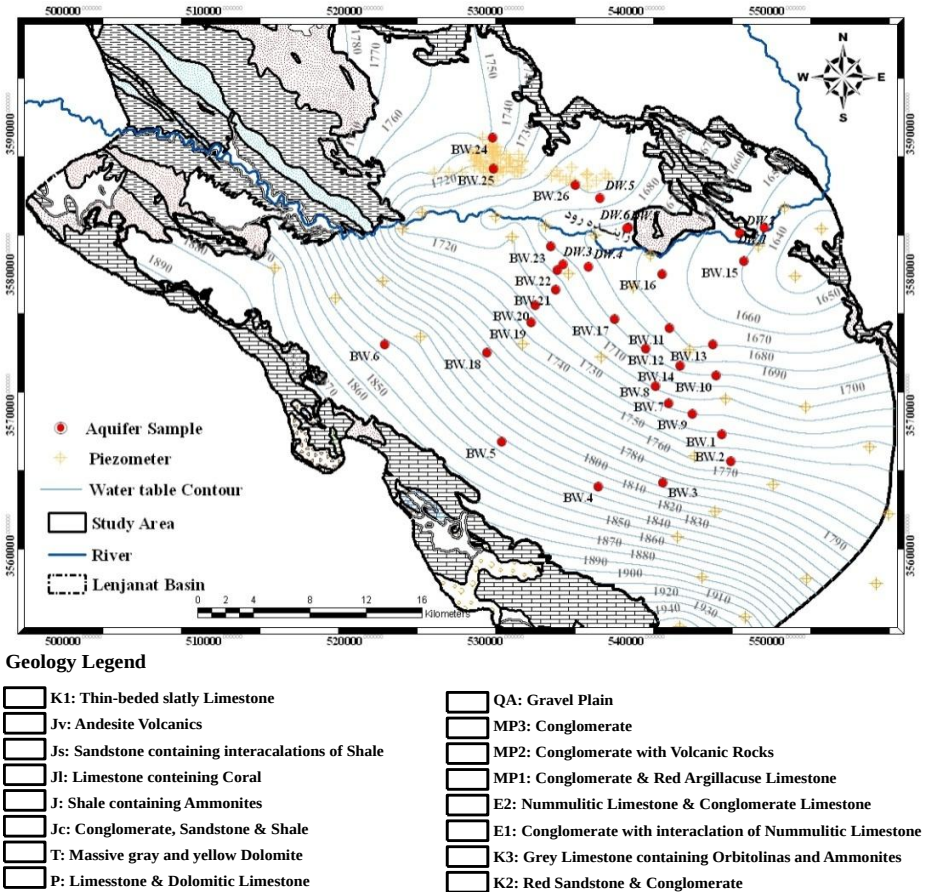
دشت لنجانات با مساحت تقریبی ۱۷۶۰ کیلومترمربع در جنوب غرب استان اصفهان واقع است. حوضهٔ آب‌ریز لنجانات از زیرحوضه‌های گاوخونی و اولین دشت هموار در مسیر زاینده‌رود است. بر اساس طبقه‌بندی‌های اقلیمی زیرحوضهٔ لنجانات اقلیم نیمه‌خشک (مناطق با ارتفاع بیش از ۲۰۰۰ متر) و خشک دارد. تمرکز بارش‌ها در ارتفاعات غرب تا جنوب منطقه است و به‌سمت شرق از مقدار بارش‌ها کاسته می‌شود [۱۷]، [۱۸]. حداکثر میزان بارش در سال ۸۷ در ارتفاعات جنوبی و به‌میزان ۱۸۰ میلی‌متر بوده است.

1. Graphical User Interface or GUIs
2. Tahta
3. Kervidy
4. Cambrai
5. Sumas–Blaine
6. Wilmot
7. Edmond
8. Sherwood
9. Nottinghamshire
10 . Thessaly
11. Zagreb

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

برخلاف بارش، درجه حرارت هوای منطقه از غرب به شرق افزایش می‌یابد. گرم‌ترین ماه سال مرداد با دمای میانگین ماهانه ۲۷ درجهٔ سانتی‌گراد و سردترین ماه دی با میانگین دمای ماهانه ۴ درجهٔ سانتی‌گراد است.

دشت لنجانات به‌وسیلهٔ ارتفاعات آهکی محصور شده (شکل ۱) و آبخوان آن دارای مرزهای هیدروژئولوژی طبیعی در حد بین کوه و دشت است [۱۹]، [۲۰]، [۲۱].




**شکل ۱. منحنی‌های تراز سطح ایستابی و موقعیت نقاط نمونه‌برداری آب زیرزمینی روی نقشهٔ زمین‌شناسی [۲۲]، [۲۳] حوضهٔ آب‌ریز دشت لنجانات**

براساس مقاطع زمین‌شناسی چاه‌های حفاری شده در دشت، سنگ کف آبخوان از نهشته‌های آهکی و شیستی است که عمق آن از ۱۸ تا بیش از ۱۵۰ متر متغیر است [۲۴]، [۲۵]. در برخی مناطق روی سنگ کف آبخوان لایه‌ای از رس و یا ترکیب رس و مارن قرار گرفته است [۲۶]، [۲۷]. نهشته‌های آبرفتی دشت از لایه‌های متناوبی از ترکیب رسوبات رسی-ماسه‌ای-شنی تشکیل شده که در تمام لایه‌ها مقدار رس بیش از ۵۰ درصد است. براساس نقشهٔ تراز سطح ایستابی در سال ۸۷، آبخوان جنوب زاینده‌رود از طریق ارتفاعات جنوب غربی دشت تغذیه می‌شود و ارتفاعات شمال‌غربی دشت تغذیه‌کنندهٔ آبخوان بخش شمالی رودخانه است برای جریان‌های سطحی و زیرزمینی دشت لنجانات به‌سمت زاینده‌رود است. فعالیت‌های کشاورزی در دشت لنجانات از طریق حفر و پمپاژ زیاد چاه‌های بهره‌برداری، سبب تغییر جهت جریان آب زیرزمینی به سمت بخش شرقی آبخوان شده است.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

## مواد و روش‌ها

به‌منظور تعیین غلظت نیترات در آب زیرزمینی محدودهٔ بررسی شده، از ۳۳ چاه (کشاورزی، خانگی و دامداری) در انتهای دورهٔ بارش (اردیبهشت)، فصل خشک (مرداد و آبان) و فصل بارش (بهمن) در سال ۱۳۸۷، نمونه‌برداری شده است. شبکهٔ نقاط نمونه‌برداری، به‌منظور پوشش فعالیت‌های کشاورزی، با توجه به جهت جریان آب زیرزمینی دشت و موقعیت مزارع کشاورزی انتخاب شده است (شکل ۱، جدول ۱).

**جدول ۱. مشخصات چاه‌های نمونه‌برداری و غلظت نیترات سنجش شده درآن‌ها در فصول مختلف (میلی‌گرم در لیتر)**

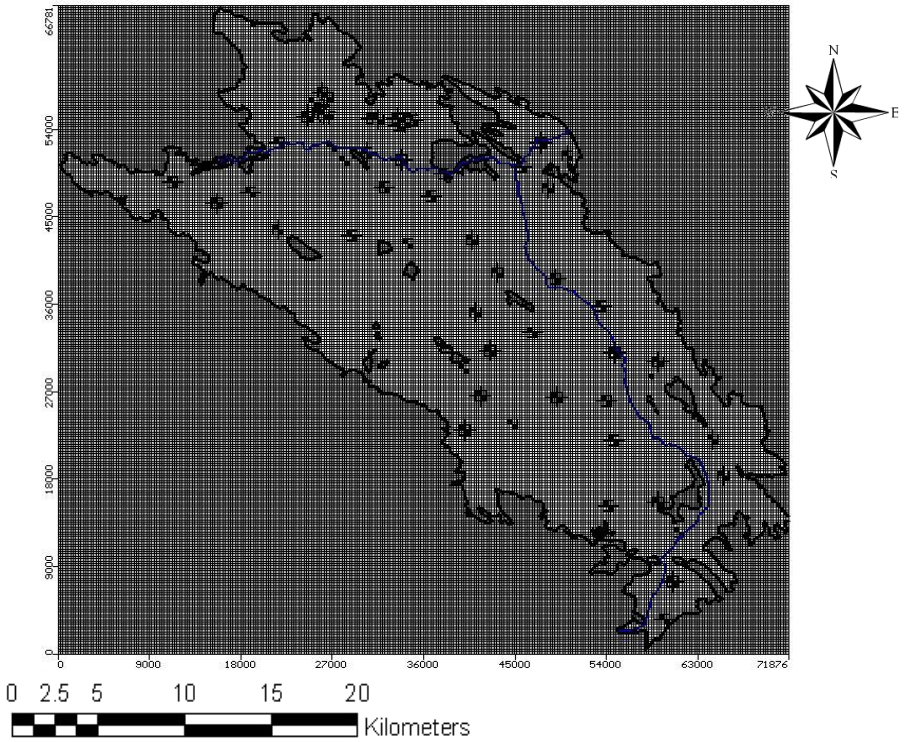
| چاه | X | Y | عمق چاه (m) | ارتفاع سطح ایستابی (m) | بهار | تابستان | پاییز | زمستان |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BW.۱ | ٥٤٦٠٣٠ | ٣٥٦٧٩٠٢ | ١٢٠ | ١٧٤٠ | ٤٠,٤ | ٣٦,٩ | ٢٦,٦ | ٣٥ |
| BW.۲ | ٥٤٦٦٦٢ | ٣٥٦٥٩٨٩ | ٧٥ | ١٧٦٠ | ٣٨,٩ | ٤٣ | ٤٦,٣ | ٤٧ |
| BW.۳ | ٥٤١٨٥٨ | ٣٥٦٤٤٩٣ | ٦٠ | ١٧٩٠ | ٣٢ | ١٠٠,٣ | ٢٦,٥ | ٢٣ |
| BW.٤ | ٥٣٧٢٨٤ | ٣٥٦٤٢٣٦ | ٧٠ | ١٨٢٠ | ٤٦,٦ | ٢٦,٦ | ٨٧,٤ | ٤٣ |
| BW.٥ | ٥٣٠٤٠٧ | ٣٥٦٧٤١٥ | ٥٠ | ١٨٢٠ | ٢٦,٦ | ٢٦,٦ | ٢٤,٦ | ٢٨ |
| BW.٦ | ٥٢٢١٢٢ | ٣٥٧٤٢٨٨ | ٢٥ | ١٨٣٠ | ١١,٢ | ١٧,٣ | ٢٥,٣ | ٢٦ |
| BW.٧ | ٥٤٢٢٩٠ | ٣٥٧٠١٥٤ | ٩٠ | ١٧٣٠ | ١٠,٣ | ١٠,١ | ٧,٤٤ | ٣ |
| BW.٨ | ٥٤١٣٢٢ | ٣٥٧١٣٣٠ | ١٠٠ | ١٧٢٠ | ١٣٥,٩ | ١٥٢,٤ | ١٤٩,٧٥ | ١٥٦ |
| BW.٩ | ٥٤٣٩٧٢ | ٣٥٦٩٤٠٠ | ٦٠ | ١٧٣٠ | ١٠٠ | ١١٠,٥ | ٩٣,٩٨ | ٤٢ |
| BW.١٠ | ٥٤٥٦١٩ | ٣٥٧٢١٠٦ | ١٠٠ | ١٧٠٠ | ٤٣,٢ | ٤٩,٦ | ٤٦,٣٤ | ٤٦ |
| BW.١١ | ٥٤٢٣٣٨ | ٣٥٧٥٤٧٧ | ٩٠ | ١٦٨٠ | ٧٩ | ٩٢,٧ | ٩١,٧ | ٨٦ |
| BW.١٢ | ٥٤٠٦٦٢ | ٣٥٧٤٠٢٧ | ٧٧ | ١٦٩٠ | ٧٥/٥ | ٨٧/٢ | ٩٥/٤ | ٧٤/٧ |
| BW.١٣ | ٥٤٥٤٠٧ | ٣٥٧٤٣٠٢ | ١٠٠ | ١٦٨٠ | ٧١,٩ | ٨٠,٥ | ٧١,٥ | ٨٠ |
| BW.١٤ | ٥٤٣٠٨٥ | ٣٥٧٢٨٢٨ | ٧٠ | ١٦٩٥ | ١٣٧,٥ | ١٦٤,٤ | ١٥١,٦٨ | ١٥٨ |
| BW.١٥ | ٥٤٧٥٩٦ | ٣٥٨٠٢٢٨ | ٥٠ | ١٦٥٠ | ٤٤,٢ | ٣٦,٨ | ٣٥,٥ | ٦١ |
| BW.١٦ | ٥٤١٧٧٣ | ٣٥٧٩٣٢٦ | ٢٤ | ١٦٦٥ | ١٨,٣ | ٢٤,٦ | ٢٤,٦ | ٢٥ |
| BW.١٧ | ٥٣٨٤٠٩ | ٣٥٧٦١٢٧ | ٩٠ | ١٧٠٠ | ٤٨,٤ | ٥٥,٩ | ٥٥,٣ | ٥٠ |
| BW.١٨ | ٥٢٩٣٥٢ | ٣٥٧٣٧٣١ | ٦٠ | ١٧٧٥ | ٤٧,٦٥ | ٥٠,٨ | ٦١,١ | ٥٩ |
| BW.١٩ | ٥٣٢٥٣٧ | ٣٥٧٥٨٧٤ | ١٥٠ | ١٧٣٥ | ٣٠,٤ | ٣٣,٦ | ٤١,٨ | ٧ |
| BW.٢٠ | ٥٣٢٧٧٦ | ٣٥٧٧١٢٧ | ٢٨ | ١٧٢٥ | ٧٥,٩٨ | ٨٠,١ | ٨٧,٤ | ٨٥,٤٣ |
| BW.٢١ | ٥٣٤٢٧١ | ٣٥٧٨٢٢٨ | ١٢٠ | ١٧١٥ | ١٠٣,٣ | ١١١,١ | ١٠٥,١ | ١٠٨ |
| BW.٢٢ | ٥٣٤٣٥٣ | ٣٥٧٩٦٢٩ | ٧٠ | ١٧١٠ | ٦١,٧ | ٦٧,٦ | ٦٢,٢ | ٦١ |
| BW.٢٣ | ٥٣٣٩٠٩ | ٣٥٨١٢٨٢ | ٧٠ | ١٧٠٠ | ١٠٧,٩ | ١٢١,٨ | ١٢٩,٥ | ١١٥ |
| BW.٢٤ | ٥٢٩٨٠٦ | ٣٥٨٩٠٠٥ | ٣٤٦ | ١٧٥٠ | ٢٠,٣٤ | ٢٣,١٨ | ١٧,٤٢٤ | ١٩,٨١ |
| BW.٢٥ | ٥٢٩٨٢٨ | ٣٥٨٦٧٩١ | ٦٤ | ١٧٢٥ | ٢١,٤٥ | ٢٠,٧٣ | ١٩,٥٤ | ٢٠,٢١ |
| BW.٢٦ | ٥٣٥٦٢٠ | ٣٥٨٥٦٦٢ | ٦٤ | ١٧١٠ | ٦٥,٦ | ٧٦,٢ | ٧٤,٦ | ٧٥,٦ |
| DW.١ | ٥٤٩٠٧٣ | ٣٥٨٢٦١٨ | ٤ | ١٦٥٥ | ٢٤,٦ | ٥,٦ | ١٠,٣ | ١٢,٦٥ |
| DW.٢ | ٥٤٧٣٤٤ | ٣٥٨٢٢٣٦ | ٧ | ١٦٤٠ | ٥١,٣ | ٦٥,٤ | ٥٢,٥ | ٧٠ |
| DW.٣ | ٥٣٤٧٩٧ | ٣٥٨٠٠٢١ | ٤ | ١٦٩٠ | ١٤٨,٣ | ٦١,٦ | ١٧٢,٢ | ١٢٢ |
| DW.٤ | ٥٣٦٥٦٢ | ٣٥٧٩٨٦١ | ١٢ | ١٦٨٥ | ٧٤,٥ | ٨٣,٤ | ٨٨,٨ | ٨٣ |
| DW.٥ | ٥٣٧٣٨٥ | ٣٥٨٤٧٢٧ | ٨ | ١٦٩٥ | ٢١,١ | ٤٠,٥ | ٣٢,٩ | ٢٥ |
| DW.٦ | ٥٣٩٤٤٥ | ٣٥٨٢٦٠٠ | ٩ | ١٦٧٥ | ١٠٤,٦ | ١٢٥,٨ | ١٦٧,٤ | ٩٢ |
| DW.٧ | ٥٣٩٣٠٦ | ٣٥٨٢٥٤٧ | ٧ | ١٦٧٥ | ٧٢,٤ | ٨٩,٢ | ٤٦,٧ | ٥٠ |

نمونه‌برداری بر اساس راهنماهای سازمان حفاظت محیط‌زیست و سازمان زمین‌شناسی آمریکا انجام شده است [۲۸]، [۲۹]. نمونه‌ها در دمای کم‌تر از ۴ درجهٔ سانتی‌گراد نگه‌داری شده و در کم‌تر از ۲۴ ساعت از زمان نمونه‌برداری، در آزمایشگاه مرکزی شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان و بر اساس روش‌های انجمن بهداشت عمومی آمریکا آزمایش شده است [۳۰]. برای شناخت شرایط اکسیدی حاکم بر آبخوان و غلظت مواد آلی موجود در آب زیرزمینی، غلظت اکسیژن محلول[12] و کل کربن آلی[13] نیز در نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در کل محدودهٔ دشت لنجانات به مساحت ۱۷۶۰ کیلومترمربع انجام شده است.

12. Dissolved Oxygen-DO
13. Total Organic Carbon-TOC

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

مرزهای مدل جریان آب زیرزمینی به‌صورت فیزیکی و منطبق بر مرز آبخوان با ارتفاعات در نظر گرفته شده است. محدودهٔ مدل به ۲۸۸ ستون و ۲۶۶ ردیف با فاصلهٔ ثابت ۲۵۰ متر تقسیم‌بندی شده و با در نظر داشتن شرایط هیدروژئولوژی آبخوان، به‌صورت یک لایه طراحی شده است (شکل ۲).



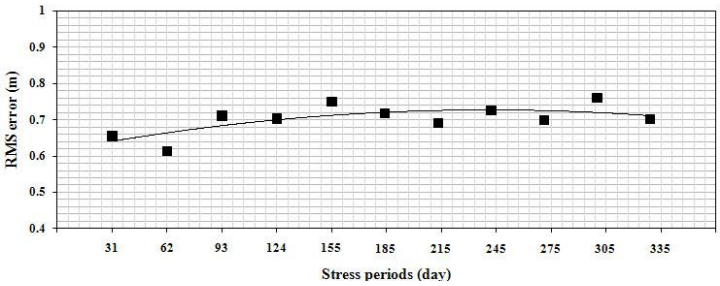

**شکل ۲. گسسته‌سازی مکانی مدل جریان آب زیرزمینی دشت لنجانات و موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای**

تراز سطح لایه با استفاده از داده‌های ترازیابی دهانهٔ چاه‌های مشاهده‌ای و تراز کف لایه از طریق تراز سنگ کف و یا لایهٔ رسی مارنی روی آن در مقاطع زمین‌شناسی چاه‌ها مشخص شده است. چاه‌های بهره‌برداری ثبت شده در دشت شامل ۱۴۱۴ حلقه چاه آماربرداری شده به‌وسیلهٔ شرکت سهامی آب منطقه‌ای اصفهان (طی سال‌های ۸۴-۸۲)، ۲۳ حلقه چاه در محدودهٔ کارخانهٔ ذوب‌آهن اصفهان و ۱۰ حلقه چاه واقع در مجتمع فولاد مبارکه، همراه با ۱۳۷ رشته قنات و ۱۲۹ دهنه چشمه وارد نرم‌افزار شده است. تراز سطح ایستابی گزارش شده در ۴۲ حلقه چاه مشاهده‌ای شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان و ۶۴ حلقه چاه مشاهده‌ای شرکت سهامی ذوب‌آهن اصفهان به‌صورت ماهیانه وارد مدل شده است (شکل ۲). براساس نوع رسوبات آبخوان لنجانات میزان آب برگشتی حاصل از آبیاری ۲۰ درصد منظور شده و از نرخ پمپاژ چاه‌ها کسر شده است. میزان نفوذ مستقیم رواناب و یا آب برگشتی آبیاری حاصل از تخلیه قنوات و چشمه‌ها نیز ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. به‌منظور کاهش تأثیر نقاط تخلیه (چاه، چشمه، قنات) بر چاه‌های مشاهده‌ای، در صورت وجود توام آن‌ها در یک سلول، نقاط تخلیه به سلول‌های مجاور منتقل شده است. مقادیر خصوصیات جریان (هدایت هیدرولیکی، ذخیره و بارهای اولیه) در محدودهٔ مدل از طریق اعمال روش محدوده‌های با مقدار خصوصیت توزیع شده و درون‌یابی به‌روش کریجینگ محاسبه شده است. با توجه به‌وسعت آبخوان لنجانات و کافی نبودن اطلاعات حاصل از آزمون‌های پمپاژ انجام شده در محدوده، از پارامتر محیط آبخوان برای محاسبهٔ ضرایب هیدرودینامیک استفاده شده است [۳۱]. شرایط مرزی در مدل جریان آب زیرزمینی دشت بررسی شده از طریق بستهٔ

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

مرزبار عمومی و بستهٔ تغذیه اعمال شده است. در نهایت، مدل جریان آب زیرزمینی دشت لنجانات به‌صورت لایه‌ای، ناهم‌سان‌گرد، غیرمحبوس (قابلیت انتقال متغیر و ضریب ذخیره ثابت) و ناپایدار در یازده دورهٔ تنش با گام زمانی ۱۰ و مضرب ۱/۲ با موتور عددی MODFLOW2000 اجرا شده است. نظر به اهداف متفاوت مدل‌ها و ضرورت واسنجی آن‌ها در شرایط متفاوت، مقبولیت واسنجی یک مدل معمولاً برآوردی فردی است. هم‌چنین با توجه به این‌که سیستم‌های زیرزمینی معمولاً با تأخیری مشخص به تنش‌های سطحی پاسخ می‌دهد، واسنجی ناپایدار بر مبنای مقادیر ماهانه ترجیح داده می‌شود [۳۲]. در مدل جریان آب زیرزمینی دشت لنجانات پس از تعدیل بارهای باقی‌مانده در چاه‌های مشاهده‌ای در طی اجراهای متوالی و متعدد مدل و با توجه به شرایط هیدروژئولوژیک آبخوان، میزان خطای RMS به کم‌تر از یک‌متر کاهش یافته و به‌عنوان آستانهٔ قابل قبول خطا برای هر دورهٔ تنش در نظر گرفته شده است (شکل‌های ۳ و ۴). به‌عبارت دیگر، آستانهٔ مورد نظر پیشنهاد می‌کند که تغییر پارامترها، تغییرات چشم‌گیری در نتایج مدل برای حصول به شرایط بهینه ایجاد نخواهد کرد. براساس محدوده تغییرات تراز ایستابی مشاهده‌ای در آبخوان لنجانات (۱ تا ۵۰ متر) مقدار RMS هنجار شده حاصل (جدول۲) نمایان‌گر واسنجی مناسب مدل و تطابق خوب بین مقادیر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای بار هیدرولیکی است.

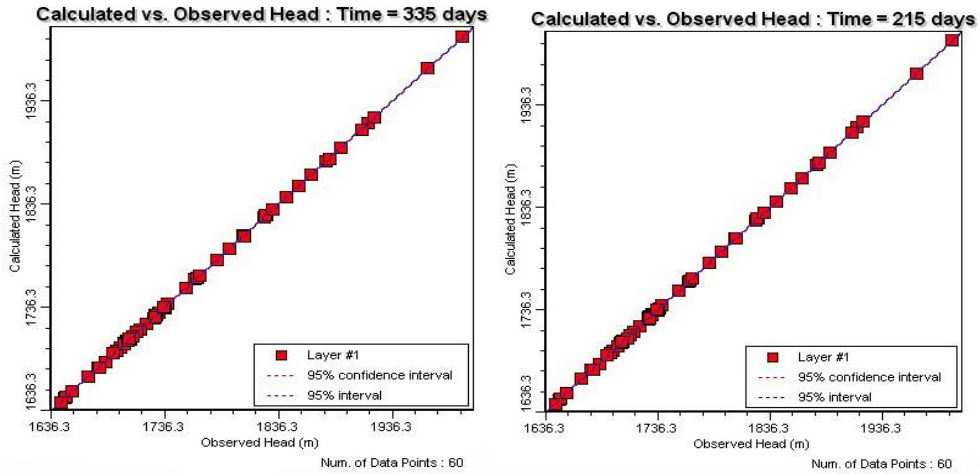
شبیه‌سازی انتقال نیترات در محدودهٔ تمرکز فعالیت‌های کشاورزی دشت به مساحت ۱۲۳۰ کیلومترمربع انجام شده است (شکل ۵). به‌جز مرز جنوب شرقی، سایر مرزهای محدودهٔ مدل انتقال منطبق بر مرز آبخوان با ارتفاعات دشت است. مرز جنوب‌شرقی مدل براساس خطوط جریان آب زیرزمینی در آبخوان و به‌صورت مرز هیدرولیکی با جریان معلوم در نظر گرفته شده است. محدودهٔ مدل به ۳۴۷ ستون و ۳۲۰ ردیف با فاصلهٔ ثابت ۱۲۵ متر تقسیم‌بندی شده است. مدل به‌صورت یک لایه طراحی شده و ترازهای سطح و کف لایه مطابق با مدل جریان دشت است. مدل‌سازی ناپایدار انتقال نیترات در آب زیرزمینی محدودهٔ بررسی شده به‌منظور شناخت خصوصیات انتقال حل شونده و شبیه‌سازی پاسخ فصلی آبخوان در ۱۱ دوره تنش با گام انتقال یک روز اجرا شده است. تطابق غلظت‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای در دوره‌های تنش چهارم (مرداد)، هفتم (آبان) و دهم (بهمن) بررسی شده است. ویژگی‌های مدل انتقال نیترات در آب زیرزمینی دشت لنجانات از طریق خصوصیات انتقال، شامل غلظت اولیه، ذخیره و پخشیدگی[14] وارد نرم‌افزار Visual MODFLOW شده است. غلظت‌های سنجش شده نیترات در اردیبهشت سال ۸۷ در چاه‌های مشاهده‌ای به‌عنوان غلظت‌های اولیه در مدل‌سازی منظور شده است.




**شکل ۳. خطای RMS حاصل از اجرای مدل جریان آب زیرزمینی واسنجی شده آبخوان لنجانات**

14. Dispersion

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]



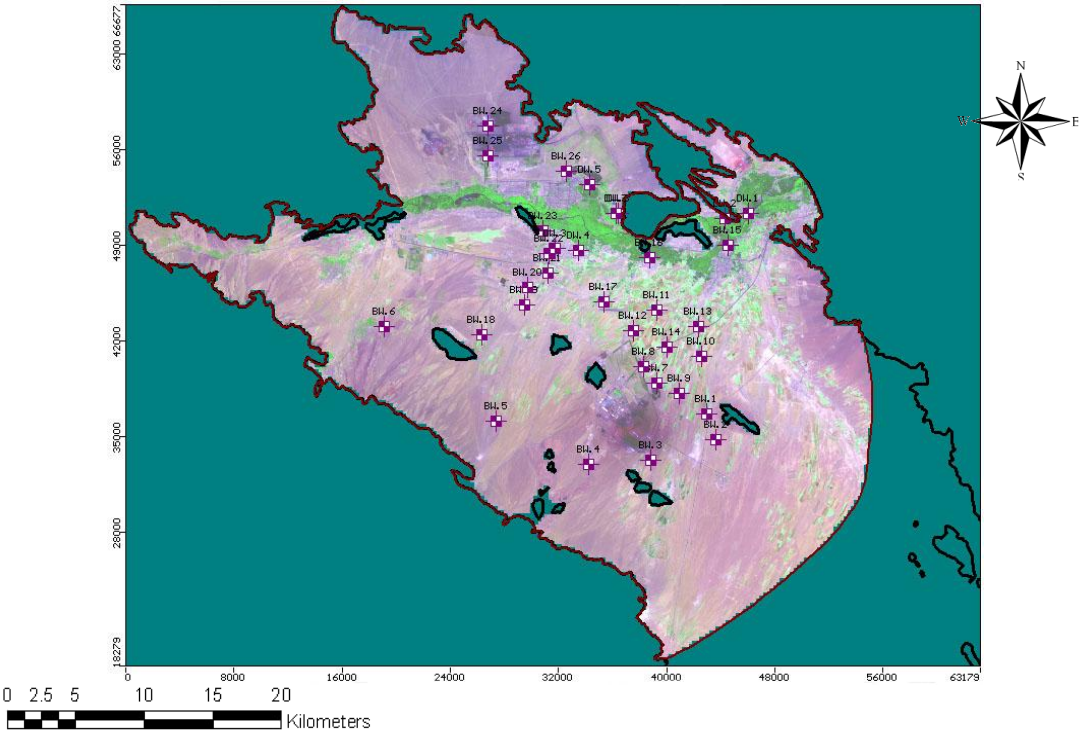

**شکل۴. نمودار پراکندگی بار مشاهداتی در مقابل بار محاسباتی در اجرای مدل واسنجی شده (دوره‌های تنش هفتم و یازدهم)**

**جدول ۲. مشخصات آماری مدل جریان آب زیرزمینی واسنجی شده آبخوان لنجانات**

| Stress Periods (day) | RMS Error (m) | Normalized RMS (%) | SEE (m) | Residual Mean (m) | Abs. Residual Mean (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| ۳۱ | ۰/٦٥٥ | ۰/۲۳۸ | ۰/۱۱٤ | -۰/۱۲٤ | ۰/٥۳۲ |
| ٦۲ | ۰/٦۱٤ | ۰/۲۲۳ | ۰/۱۰۸ | ۰/۰٤٦ | ۰/٥٤۲ |
| ۹۳ | ۰/۷۱۱ | ۰/۲٥۹ | ۰/۱۲٤ | ۰/۱۳۱ | ۰/٦۰٥ |
| ۱۲٤ | ۰/۷۰۳ | ۰/۲٥٦ | ۰/۱۲۳ | ۰/۰۹۹ | ۰/٥٦۰ |
| ۱٥٥ | ۰/۷٥۰ | ۰/۲۷٤ | ۰/۱۳۲ | ۰/۰۹۰ | ۰/٦٤۳ |
| ۱۸٥ | ۰/۷۱۷ | ۰/۲٦۲ | ۰/۱۲۷ | ۰/۰٤۱ | ۰/٦۳۸ |
| ۲۱٥ | ۰/٦۹۱ | ۰/۲٥۲ | ۰/۱۲۰ | ۰/۱۱٦ | ۰/٥۹۰ |
| ۲٤٥ | ۰/۷۲٦ | ۰/۲٦٤ | ۰/۱۲٦ | ۰/۱۳۸ | ۰/٦۲۲ |
| ۲۷٥ | ۰/٦۹۸ | ۰/۲٥٤ | ۰/۱۲۳ | ۰/۰۲۲ | ۰/٥۸٦ |
| ۳۰٥ | ۰/۷٦۰ | ۰/۲۷۷ | ۰/۱۳۳ | ۰/۰۹۳ | ۰/٦٦۰ |
| ۳۳٥ | ۰/۷۰۲ | ۰/۲٥٥ | ۰/۱۲۳ | ۰/۰۸۸ | ۰/٦۱۰ |

خطاهای حاصل از درون‌یابی غلظت‌های اولیه، از طریق تغییر در مقدار نقاط مشاهده‌ای غلظت و درون‌یابی‌های متعدد، کمینه شده است. عبارت ذخیره در مدل انتقال نیترات در آب زیرزمینی محدودهٔ بررسی شده به‌صورت تخلخل مؤثر و از طریق محدوده‌های با مقادیر خصوصیت توزیع شده اعمال شده است. قابلیت پخشیدگی طولی برای مدل انتقال جرم دشت با استفاده از مقادیر گزارش شده این پارامتر در پژوهش‌های مختلف، تخمین زده شده است [۳۳]، [۳۴]. با توجه به‌وسعت محدودهٔ بررسی‌شده و فاصله‌های شبکه‌ای مدل، قابلیت پخشیدگی طولی اولیه برای مدل انتقال بین ۵۰۰ تا ۹۰۰ متر در نظر گرفته شده و از طریق درون‌یابی و مقادیر خصوصیت توزیع‌شده پهنه‌بندی شده است. نسبت قابلیت پخشیدگی افقی به طولی برابر ۰/۱، نسبت قابلیت پخشیدگی

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]




**شکل۵. موقعیت زمین‌های زراعی و چاه‌های مشاهده‌ای غلظت نیترات در مدل انتقال محدودهٔ بررسی شده**

عمودی به طولی برابر۰/۰۱ و ضریب انتشار مولکول برای نیترات $۵*۱۰^{-۵}m^{۲}d^{-۱}$ منظور شده است [۳۵]. نیترات گونه‌ای بسیار متحرک است که به‌دلیل تشکیل نشدن رسوب و کانی‌های غیرقابل حل و جذب اندک با ماتریس جامد آبخوان، در آب زیرزمینی باقی می‌ماند. بر این اساس، این آنیون به‌عنوان گونه‌ای غیرواکنشی با ضریب تأخیر یک در نظر گرفته می‌شود. فرایند نیترات زدایی[۱۵] تنها واکنش شیمیایی است که به‌طور گسترده سبب حذف یا کاهش نیترات در آب زیرزمینی می‌شود. شرایط لازم برای این فرایند، کمبود اکسیژن (محیط احیایی)، حضور باکتری‌های نیترات‌زدا و الکترون دهنده‌های مناسب است. در کد انتقال جرم MT3DMS، فرایند نیترات‌زدایی به‌صورت کلی از طریق واکنش نرخی برگشت‌ناپذیر مرتبهٔ اول[۱۶] برای لایه یا هر یک از سلول‌ها شبیه‌سازی می‌شود [۳۶]. شرایط اکسیدی حاکم بر آبخوان لنجانات و وجود غلظت‌های زیاد اکسیژن محلول (میانه: $۷/۶mgL^{-۱}$) در آب زیرزمینی همراه با مقادیر اندک مواد آلی ($TOC<۵mgL^{-۱}$)، به‌عنوان مهم‌ترین الکترون دهنده‌های محرک واکنش‌های نیترات‌زدایی هتروتروپیک[۱۷] و مناسب نبودن شرایط برای فرایند نیترات‌زدایی آتوتروپیک[۱۸]، سبب کاهش میزان نیترات‌زدایی در آبخوان شده است. بر این اساس در مدل انتقال محدودهٔ بررسی شده، به‌صورت اولیه زمان نیمه‌عمر نیترات در مناطق مختلف دشت با غلظت اولیهٔ $۵mgL^{-۱}$، بین $۷/۵۹۶×۱۰^{-۴}$ تا $۵/۵۸×۱۰^{-۴}$ $day^{-۱}$ در نظر گرفته شده است. ورود نیترات به آبخوان از طریق شرایط مرزی غلظت ثابت و غلظت تغذیه‌ای در مدل اعمال شده است. با در نظر داشتن تغییرات غلظت نیترات در بخش‌های مختلف محدودهٔ بررسی شده، فروشویی این یون همراه با نفوذ بارش از سطح دشت به آب زیرزمینی از طریق

15. Denitrification
16. First–order irreversible rate reaction
17. Heterotrophic
18. Autotrophic

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

شرایط مرزی غلظت تغذیه‌ای در دوره‌های تنش به مدل اعمال شده است. ورود نیترات به آبخوان از طریق آب‌های برگشتی آبیاری در فصول مختلف با اعمال شار تغذیه از سطح زمین‌های کشاورزی در مدل جریان انجام شده است. جریان ورودی از سطح مزارع به آبخوان با استفاده از افزایش میزان پمپاژ در چاه‌های بهره‌برداری تعدیل شده است. به‌منظور حصول حداکثر کارایی محاسباتی و کاهش پخشیدگی عددی در حل عبارت همرفت معادلهٔ انتقال جرم در مدل انتقال دشت لنجانات از حل کنندهٔ ذره مبنای HMOC استفاده شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل انتقال نیترات در آبخوان بررسی شده از طریق غلظت‌های نیترات سنجش شده در چاه‌های نمونه‌برداری در سه دورهٔ تنش (منطبق با فصول نمونه‌برداری) بررسی شده است. ارزیابی دقیق نتایج شبیه‌سازی انتقال نیترات در آبخوان لنجانات از طریق کمی کردن خطاها (تفاوت بین غلظت‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای) با استفاده از پارامترهای آماری انجام شده است.

## نتایج و بحث

نتایج حاصل از سنجش غلظت نیترات در نمونه‌های آب زیرزمینی محدودهٔ بررسی شده و مقایسهٔ آن‌ها با استانداردهای آب شرب سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا [۳۷]، سازمان بهداشت جهانی [۳۸]، استاندارد آب شرب ایران [۳۹] و نیز استانداردهای آب کشاورزی و شرب دام سازمان خواروبار جهانی [۴۰] نشان می‌دهد که غلظت نیترات در آب زیرزمینی مناطق میانی دشت (محل تمرکز فعالیت‌های کشاورزی) بیش‌تر از حد استاندارد است (شکل ۶). بیش‌ترین حاصل‌خیزکننده‌های مصرفی در اراضی کشاورزی دشت لنجانات از نوع ازته و فسفاته است. حاصل‌خیزکننده‌های نیتراته مصرفی در محدودهٔ بررسی شده (شهرستان‌های لنجان و مبارکه) مقدار ۵۵۶۹۵۲۰ کیلوگرم اوره، ۱۰۳۴۵۰۰ کیلوگرم نیترات فسفات‌آمونیوم و ۲۵۶۳۵۰ کیلوگرم فسفات آمونیوم در سال ۸۷ بوده است [۴۱] با درنظر داشتن درصد نیتروژن در این حاصل‌خیزکننده‌ها (۱۸ تا ۴۶ درصد)، با توجه به سطح کاشت در سال پژوهش (۱۷۳۸۱/۴ha)، میزان نیتروژن مصرفی[۱۹] $kg\ N\ ha\ yr^{-}$ ۱۶۰/۷۶۵ بوده است. کارایی جهانی جذب نیتروژن[۱] برای تولید غلات حدود ۳۳ درصد در نظر گرفته می‌شود [۴۲]. این مقدار با توجه به‌گونهٔ محصول، نوع خاک، درجهٔ حرارت، نرخ کاربرد حاصل‌خیزکنندهٔ N، شرایط رطوبتی خاک و تعویض محصول در کشت‌های چندگانه، متغیر است [۴۳].

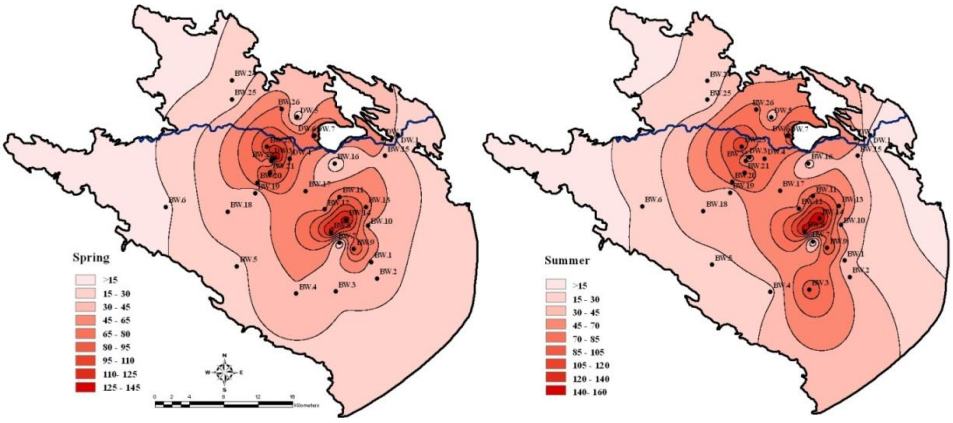
بیش‌ترین تمرکز غلظت نیترات در دشت، در اراضی کشاورزی و در محدودهٔ چاه‌هایی است که به‌دلیل پمپاژ مداوم، افت سطح ایستابی در آن‌ها بیش‌تر است (چاه‌های $B.W_{21}$، $B.W_{23}$، $B.W_{14}$). غلظت نیترات در چاه‌های بالادست جریان آب زیرزمینی (حاشیه‌های دشت) و چاه‌های $B.W_1$ و $B.W_6$ در پایین‌دست روستاهای قلعه‌سفید و کچوییه، کم‌تر از حد استاندارد است. براین اساس غلظت بیش از حد استاندارد نیترات در آب زیرزمینی دشت، به‌دلیل استفاده گسترده از حاصل‌خیزکننده‌های نیتراته در اراضی کشاورزی دشت است.

به‌منظور ارزیابی تأثیر تغییرات پارامترهای ورودی به مدل، صحت‌سنجی مدل واسنجی شده و بررسی عدم‌قطعیت پارامتری تخمینی، حساسیت مدل واسنجی شده جریان آب زیرزمینی دشت لنجانات نسبت به پارامترهای ورودی مختلف تحلیل شده است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل جریان نسبت به پارامترهای ورودی نشان می‌دهد که آبخوان بررسی شده بیش‌ترین حساسیت را به‌ترتیب نسبت به تغییرات آب‌دهی ویژه (شکل ۷)، ضخامت آبرفت (تراز

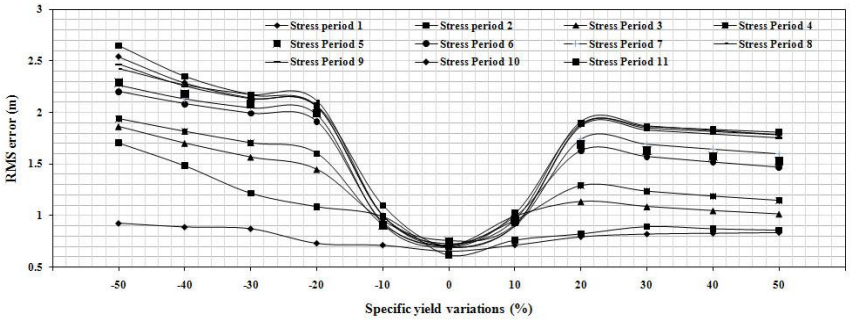
19. Nitrogen Uptake Efficiency-NUE

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

سطح و کف آبخوان)، هدایت هیدرولیکی و تخلیهٔ از طریق پمپاژ دارد. تنش‌های غیرطبیعی وارد بر سیستم جریان از طریق میزان زیاد پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری سبب افت سطح ایستابی و کاهش ذخیرهٔ آبخوان شده است.



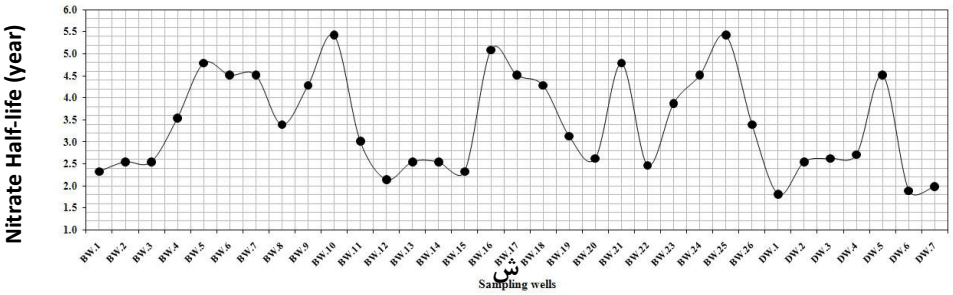

**شکل ۶. محدودهٔ تغییرات غلظت نیترات (میلی‌گرم در لیتر) در نمونه‌های آب زیرزمینی محدودهٔ بررسی شده**




**شکل ۷. حساسیت مدل جریان آب زیرزمینی دشت لنجانات به تغییرات مقدار آب‌دهی ویژه**

نتایج حاصل از اولین اجرای مدل انتقال در محدودهٔ بررسی شده خطای RMS کم‌تر از ۳۰ $mgL^{-1}$ را در دوره‌های تنش نشان می‌دهد. مقدار این خطا در فصل تابستان ۲۵/۸۳، پاییز ۲۱/۹۲۹ و زمستان ۲۲/۶۴۱ $mgL^{-1}$ حاصل شده است. واسنجی مدل انتقال به‌طور عمده از طریق تصحیح میزان تغذیه نیترات از سطح زمین‌های زراعی انجام شده است. تغییر مقادیر میزان تجزیه نیز در تطابق غلظت‌ها مؤثر بوده است. با توجه به شرایط هیدروژئوشیمی دشت و میزان ناچیز نیترات‌زدایی در آن نیمه‌عمر بهینه برای آنیون نیترات در آبخوان بیش از ۲/۵ سال است (شکل ۸). نفوذ نیترات از طریق بارش به‌ویژه در چاه‌های حاشیهٔ ارتفاعات جنوب‌غربی تأثیر اندکی در تصحیح غلظت‌های محاسبه‌ای داشته است. پس از تعدیل غلظت‌های باقی‌مانده در چاه‌های نمونه‌برداری در فصول مختلف و با در نظر داشتن غلظت پایه طبیعی نیترات در آب‌های زیرزمینی و آبخوان بررسی شده (کم‌تر از ۵ $mgL^{-1}$) و شرایط هیدروژئوشیمی دشت، میزان خطای RMS به کم‌تر از ۶ $mgL^{-1}$ کاهش داده شده است. مقدار این خطا برای دورهٔ تنش چهارم ۵/۰۴۸، دورهٔ تنش هفتم ۵/۳۹۹ و دورهٔ تنش دهم (فصل غیرکشت) ۳/۱۶۸ $mgL^{-1}$ حاصل شده است. ضریب هم‌بستگی در سه دورهٔ تنش بیش‌تر از ۰/۸ است (جدول ۳).

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]




**شکل ۸. مقادیر نیمه‌عمر آنیون نیترات در آبخوان بررسی شده**

**جدول ۳. مشخصات آماری مدل واسنجی شده انتقال نیترات در آبخوان لنجانات**

| Strees Period | RMS Error | Normalized | Corr.Coefficie | Residual | Abs. Residual | SEE |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۲۴ | ۵/۰۴۸ | ۴/۲۶۷ | ۰/۹۹۱ | -۱/۴۰۷ | ۴/۱۹۳ | ۰/۸۵ |
| ۲۱۵ | ۵/۳۹۹ | ۴/۴۲۹ | ۰/۹۹ | -۲/۱۳۱ | ۴/۲۵۸ | ۰/۸۷ |
| ۳۰۵ | ۳/۵۴۱ | ۳/۱۶۲ | ۰/۹۹۴ | -۰/۶۵۳ | ۲/۷۸۶ | ۰/۶۱ |

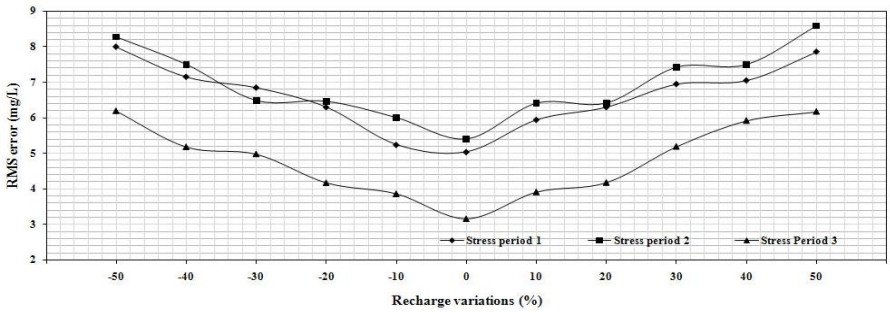
حساسیت مدل واسنجی شده انتقال نیترات در آبخوان لنجانات به‌منظور ارزیابی تأثیر تغییرات پارامترهای ورودی به مدل، صحت سنجی مدل واسنجی‌شده و بررسی عدم قطعیت پارامترهای تخمینی، تحلیل شده است. مدل انتقال نیترات محدودهٔ بررسی شده بیش‌ترین حساسیت را به‌ترتیب نسبت به تغذیهٔ نیترات از سطح (شکل ۹)، میزان تجزیهٔ مرتبه اول (شکل ۱۰)، تخلخل مؤثر (شکل ۱۱)، بارش (شکل ۱۲) و پخشیدگی طولی (شکل ۱۳) دارد و به تغذیه از مرزهای آبخوان حساسیتی نشان نمی‌دهد. غلظت نیترات فروشویی شده از سطح مزارع کشاورزی بیش‌ترین تأثیر را بر تطابق غلظت‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در مدل انتقال این آلاینده در دشت دارد به‌طوری که نوسانات میزان تغذیهٔ نیترات از سطح در دوره‌های تنش بررسی شده سبب افزایش خطای RMS به‌ویژه در فصول زراعی شده است. علاوه بر تأثیر میزان و زمان مصرف حاصل‌خیزکننده‌های ازته بر تغییرات غلظت نیترات، شرایط اکسیدی حاکم بر آبخوان و میزان کم فرایند نیترات‌زدایی سبب تسهیل ورود و ماندگاری این آنیون در آب زیرزمینی شده است. تغییرات خطای RMS در بازه تغییرات میزان تجزیهٔ نیترات، حاکی از تأثیر این پارامتر بر حصول نتایج بهینه در شبیه‌سازی انتقال است (شکل ۱۰).

حساسیت مدل انتقال نیترات بررسی شده به تخلخل مؤثر بیش از پخشیدگی طولی است. تخلخل از دو طریق محاسبات انتقال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تخلخل عاملی در تعیین سرعت نشت کنترل‌کننده انتقال همرفت است و از سوی دیگر حجم منافذ قابل دسترس برای ذخیره جرم حل شونده در یک سلول مدل (تغییرات جرم با زمان) را تعیین می‌کند. پهنه‌بندی تخلخل مؤثر در آبخوان لنجانات در شکل ۱۴ ارائه شده است. حساس نبودن مدل انتقال بررسی شده به پخشیدگی طولی حاکی از عدم تأثیر فرایند پخشیدگی در انتقال نیترات در آبخوان است. لازم به ذکر است که توزیع‌های سرعت استفاده شده در محاسبه انتقال همرفت-پخشیدگی از طریق حل عددی معادلهٔ جریان با استفاده از روش‌های تفاضل یا عناصر محدود حاصل می‌شود. از این‌رو، محاسبات انتقال به دقت تعیین ناهمگنی‌های ماکروسکوپیک در مقیاس صحرایی بستگی دارد که از طریق مقادیر هدایت هیدرولیکی و تخلخل وارد مدل جریان می‌شود. در مفهوم کلی، تأثیر ناهمگنی ماکروسکوپیک برای حرکت حل‌شونده و کاربرد تئوری انتقال پخشیدگی فیکین[۲۰] در محاسبات همرفت و پخشیدگی با یک‌دیگر مرتبط است. اثراتی که از طریق محاسبات همرفت در یک

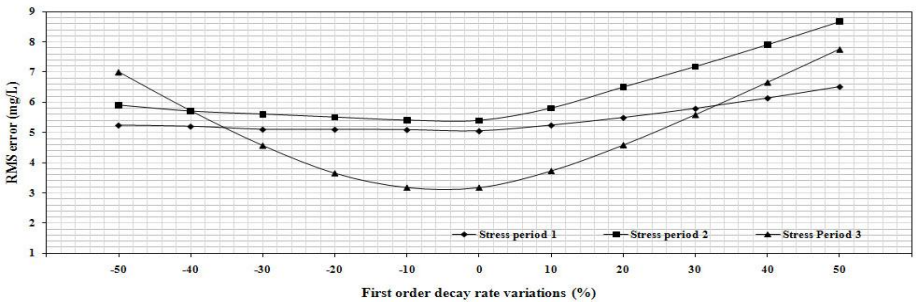
20. Fickian

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

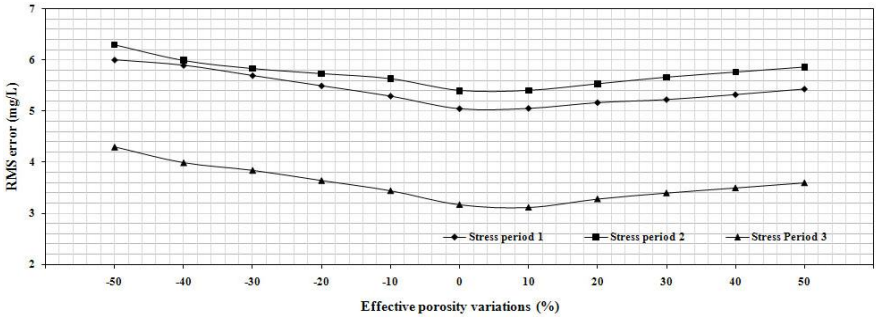
مقیاس معین تشریح می‌شود، در محاسبات پخشیدگی مورد نیاز نیست و برعکس، اثراتی که در محاسبات همرفت به‌کار نمی‌رود، در محاسبات پخشیدگی استفاده می‌شود. با در نظر داشتن اقلیم خشک دشت و فصول بارش در منطقه (پاییز و زمستان)، نفوذ نیترات به آبخوان از طریق بارندگی تنها در دوره‌های تنش هفتم و دهم تغییرات اندکی نشان می‌دهد. با توجه به غلظت اندک نیترات در چاه‌های نمونه‌برداری واقع در حاشیهٔ ارتفاعات دشت و عدم حساسیت مدل انتقال به تغذیه نیترات از مرزها، غلظت‌های اعمال شده در مرحلهٔ واسنجی مدل به‌عنوان غلظت‌های بهینه منظور شده است. به‌دلیل عدم حساسیت مدل انتقال بررسی شده به تغییر گام زمانی انتقال و نیز افزایش خطای RMS با افزایش فواصل گره‌ای در شبکه مدل، مقادیر اولیه به‌عنوان مقادیر بهینه در نظر گرفته شده است.




**شکل ۹. حساسیت مدل انتقال محدودهٔ برسی شده به تغییرات تغذیهٔ نیترات از سطح مزارع کشاورزی**

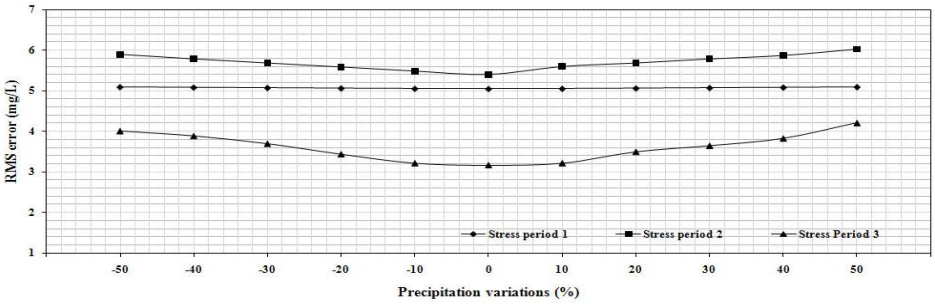



**شکل ۱۰. حساسیت مدل انتقال نیترات محدودهٔ برسی شده به تغییرات میزان تجزیهٔ مرتبه اول**

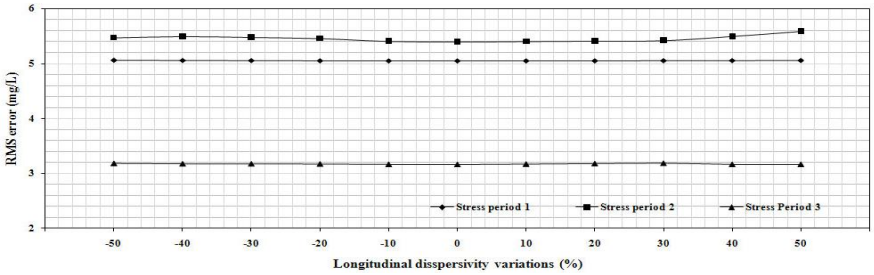



**شکل ۱۱. حساسیت مدل انتقال نیترات محدودهٔ برسی شده به تغییرات تخلخل مؤثر**

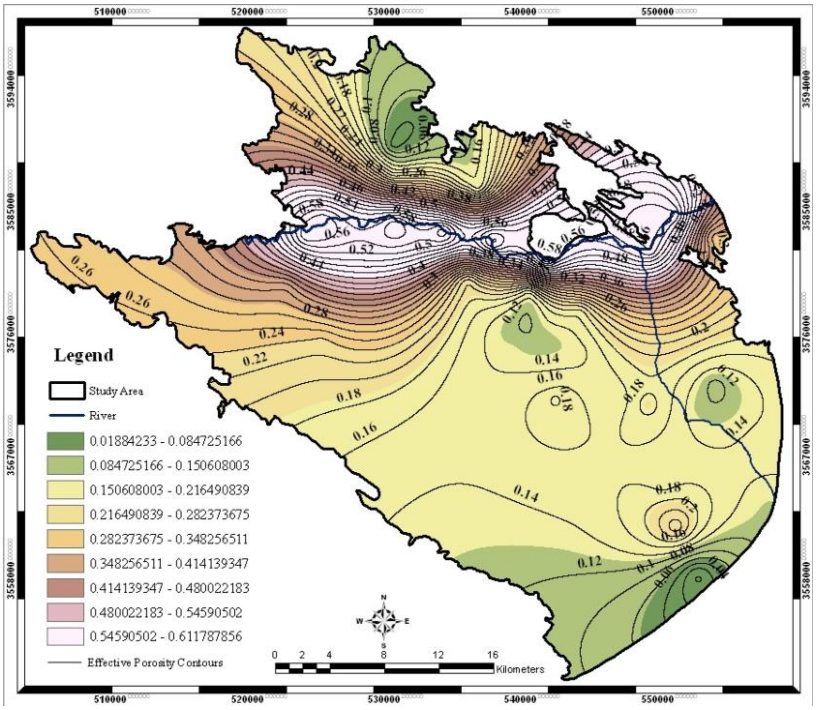
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]




**شکل ۱۲. حساسیت مدل انتقال محدودهٔ برسی شدهبه تغییرات میزان نفوذ نیترات از طریق بارش**




**شکل ۱۳. حساسیت مدل انتقال نیترات محدودهٔ برسی شده به تغییرات پخشیدگی طولی**



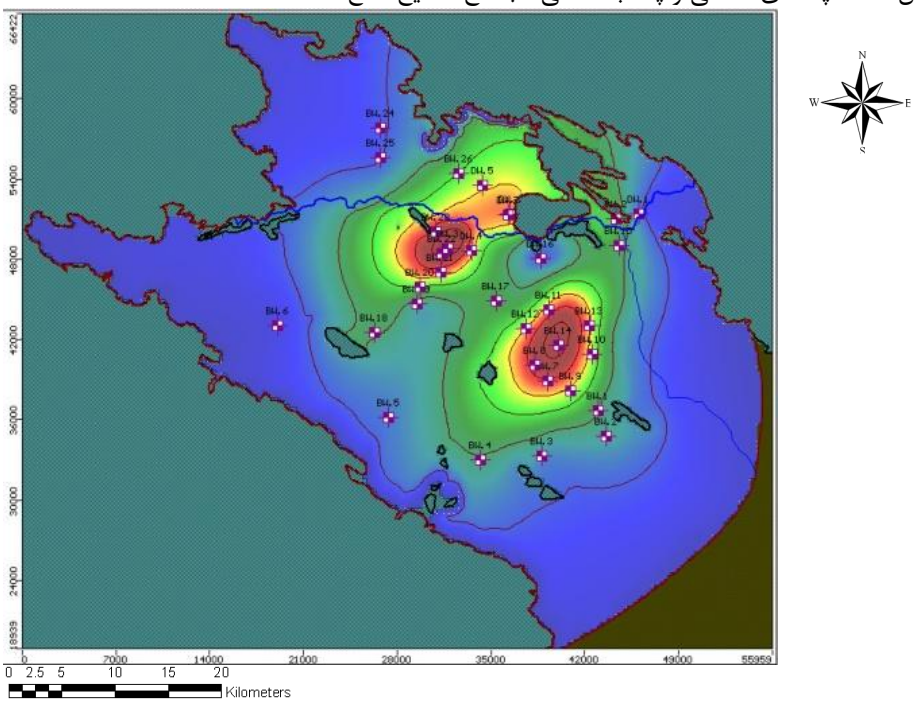

**شکل ۱۴. پهنه‌بندی مقدار تخلخل مؤثر حاصل از مدل انتقال واسنجی شده آبخوان لنجانات**

براساس نوع رسوبات آبخوان لنجانات میزان آب برگشتی حاصل از آبیاری درمدل جریان ۲۰ درصد منظور شده و از میزان پمپاژ چاه‌ها و تخلیه قنوات و چشمه‌ها کسر شده است. نظر به این که در مرحلهٔ واسنجی مدل جریان محدودهٔ بررسی شده تا حد امکان افت سطح ایستابی در چاه‌های مشاهده‌ای تصحیح شده است و با توجه به نتایج تحلیل حساسیت انجام شده، میزان پمپاژ و تخلیه حاصل از مرحلهٔ واسنجی به‌دلیل خطای RMS کم‌تر به‌عنوان مقادیر نهایی در نظر گرفته شده است. بر این اساس حجم آب برگشتی کشاورزی در دورهٔ تنش چهارم مدل‌سازی انتقال ۹۱۰۰۶۶۲

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

مترمکعب، دورهٔ تنش هفتم ۱۵۵۵۰۴۷۰ مترمکعب و در دورهٔ تنش دهم ۱۸۷۳۰۲۰۹ مترمکعب محاسبه شده است. با توجه به جرم محاسبه شده برای نیترات ورودی به آبخوان با مدل انتقال، میزان نیتروژن فروشویی شده به آب زیرزمینی محدودهٔ بررسی شده ۱۰۸ $kg\ N\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ است. با در نظر داشتن شرایط اکسیداسیون/احیای حاکم بر آبخوان، $NO_3$ مهم‌ترین شکل نیتروژن انتقالی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتقال نیترات در محدودهٔ بررسی شده حاکی از وجود هالهٔ آلودگی به‌وسعت تقریبی ۳۲۴ کیلومترمربع در بخش میانی دشت در دورهٔ تنش اول (اردیبهشت ماه) است. غلظت نیترات درهالهٔ مذکور، بیش از ۴۵ $mgL^{-1}$ در حاشیه‌ها تا ۱۴۰ $mgL^{-1}$ در دو بخش مرکزی آن است (شکل ۱۵).

با در نظر داشتن شیب ایستابی و ضخامت آبخوان،هالهٔ شمال‌غربی با سرعتی حدود ۲۰ $m\ day^{-1}$ و هالهٔ جنوب‌شرقی با سرعت تقریبی ۳۱ $m\ day^{-1}$ حرکت کرده است. در دورهٔ تنش دهم وسعت محدودهٔ آلوده به نیترات به ۱۲۶ کیلومترمربع کاهش یافته است. لازم به ذکر است که نیترات ورودی به‌هالهٔ شمال‌غربی علاوه بر منشأ کشاورزی، حاصل نشت چاه‌های خانگی و پساب انسانی مجتمع صنایع دفاع است.




**شکل ۱۵. موقعیت‌هالهٔ آلودگی نیترات در دورهٔ اول شبیه‌سازی در محدودهٔ بررسی شده**

## نتیجه‌گیری

سنجش فصلی غلظت نیترات در نمونه‌های آب زیرزمینی محدودهٔ بررسی شده و مقایسهٔ آن‌ها با استانداردهای آب شرب انسان و دام و آبیاری حاکی از غلظت بیش‌تر از حد استاندارد نیترات در آب زیرزمینی است. منبع ورود ترکیبات نیتروژن به آبخوان فعالیت‌های کشاورزی و استفادهٔ گسترده از حاصل‌خیزکننده‌های نیتراته در اراضی کشاورزی محدودهٔ بررسی شده است. نتایج حاصل از واسنجی و تحلیل حساسیت مدل انتقال نیترات در محدودهٔ تمرکز فعالیت‌های کشاورزی دشت لنجانات نشان می‌دهد که تغذیه نیترات از سطح، میزان تجزیهٔ مرتبه اول، تخلخل مؤثر و

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

بارش بیش‌ترین تأثیر را در ورود و ماندگاری این آنیون در آب زیرزمینی دارند. تأثیر تغذیه از مرزهای آبخوان و فرایند پخشیدگی ناچیز است. میزان تغذیهٔ نیترات از سطح با توجه به فصول کشت و تنوع گیاهان زراعی در بخش‌های مختلف دشت (گندم، جو، برنج، یونجه، شبدر، ذرت) متغیر است. شرایط اکسیدی حاکم بر آبخوان لنجانات و وجود غلظت‌های زیاد اکسیژن (میانه: $mgL^{-1}$ ۷/۶) در آب زیرزمینی همراه با مقادیر اندک مواد آلی ($TOC$ ۵ $mgL^{-1}$) >سبب کاهش میزان نیترات‌زدایی در آبخوان شده به‌طوری‌که نیمه‌عمر آنیون نیترات در آبخوان بیش از ۲/۵ سال است. حساس نبودن مدل انتقال بررسی شده به پخشیدگی طولی حاکی از تأثیر اندک فرایند پخشیدگی در انتقال نیترات در آبخوان است. نفوذ نیترات به آبخوان از طریق بارندگی، تنها در فصول بارش و به‌میزان اندک انجام می‌شود. تغذیه نیترات از طریق جریان‌های ورودی از مرزها اندک است. بر اساس نوع و میزان حاصل‌خیزکننده‌های نیتراته مصرفی در محدودهٔ بررسی شده و کارایی جهانی جذب نیتروژن و با توجه به جرم محاسبه شده برای آلایندهٔ ورودی به آبخوان با مدل انتقال، میزان نیتروژن فروشویی شده به آب زیرزمینی محدودهٔ بررسی شده $kg\ N^{-1}\ yr^{-1}$ ۱۰۷/۷۱۲ha است. با در نظر داشتن تغییرات ایجاد شده در سیستم جریان آب زیرزمینی دشت لنجانات، کاهش میزان پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری ضروری است. به‌دلیل ورود آلایندهٔ نیترات به آبخوان در اثر فعالیت‌های کشاورزی، کنترل استفاده از حاصل‌خیزکننده‌های ازته در اراضی کشاورزی دشت لازم است.

## منابع

1. USEPA, "Nitrate and pesticides in groundwater in agricultural watersheds" United State Environmental Protection Agency (2006).
2. Zheng C., "Recent developments and future directions for MT3DMS and related transport codes", Groundwater, 47(2009) 620-625.
3. Shamrukh M., Corapcioglu M.Y., Hassona F.A.A., "Modeling the effect of chemical fertilizers on groundwater quality In the Nile valley aquifer", Egypt, Groundwater, 39 (2001) 59-67.
۴. Ghoraba S.M., Zyedan B.A., Rashwan I.M.H., "Solute transport modeling of the groundwater for quaternary aquifer quality management in Middle Delta, Egypt", Alexandria Engineering Journal, 52 (2013) 197-207.
۵. Mol´enat J., Gascuel-Odoux C., "Modelling flow and nitrate transport in groundwater for the prediction of water travel times and of consequences of land use evolution on water quality", Hydrological Processes, 16 (2002) 479-492.
6. Serhal H., Bernard D., El Khattabi J., Sabine B., Shahrour I., "Impact of fertilizer application and urban wastes on the quality of groundwater in the Cambrai Chalk aquifer", Northern France Environ. Geol., 57 (2009) 1579-1592.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

7. Almasri M.N., Kaluarachchi J.J., "Modeling nitrate contamination of groundwater in agricultural watersheds", Journal of Hydrology, 343 (2007) 211-229.

8. Jiang Y., Somers G., "Modeling effects of nitrate from non-point sources on groundwater quality in an agricultural watershed in Prince Edward Island", Canada, Hydrogeology Journal, 17 (2009) 707-724.

9. Zhang H., Hiscock K.M., "Modelling the effect of forest cover in mitigating nitrate contamination of groundwater: a case study of the Sherwood Sandstone aquifer in the East Midlands", UK, Journal of Hydrology, 34 (2011) 125-135.

10. Stamatis G., Parpodis K., Filintas A., Zagana E., "Groundwater quality, nitrate pollution and irrigation environmental management in the Neogene sediments of an agricultural region in central Thessaly (Greece)", Environ. Earth Sci. (2011) published online.

11. Marković T., Brkić Z., Larva O., "Using hydrochemical data and modelling to enhance the knowledge of groundwater flow and quality in an alluvial aquifer of Zagreb", Croatia, Science of The Total Environment, 458(2013) 508-516.

۱۲. لاله‌زاری ر.، طباطبایی ح.، خیاط خلقی م.، صبا ع.، *شبیه‌سازی انتقال آلاینده نیترات در آبخوان شهرکرد با استفاده از مدل MT3D* ، نخستین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران (۱۳۸۹).

۱۳. ناصری ح، ندافیان ح، *مدل‌سازی انتقال آلاینده نیترات آب‌های زیرزمینی در محدودهٔ چاه‌های آب شرب همدان*، فصلنامهٔ زمین‌شناسی ایران ، سال دوم، شمارهٔ ۶ (۱۳۸۷).

۱۴. علیجانی ف.، *هیدروژئوشیمی و آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت ایذه*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه شهیدبهشتی (۱۳۸۱).

۱۵. عزیزی‌پور ز.، سامانی ن.، شاکری ع.، *مدل‌سازی ریاضی آلودگی نیترات و نیتریت در آبخوان ش‌هرک صنعتی شیراز*، سی امین گردهمایی علوم زمین (۱۳۹۰).

۱۶. احتشامی م.، ع. شریفی، *ارزیابی مدل کیفی آبخوان شهرری*، علوم و تکنولوژی محیط زیست، دورهٔ هشتم، شمارهٔ ۴ (۱۳۸۵).

۱۷. جعفرپور ا.، *مطالعات طرح تغییر محور مجتمع فولاد مبارکه*، جلد پنجم، مطالعات اقلیم، دفتر دانشگاه اصفهان (۱۳۶۴).

۱۸. کریمی م.، *آب و هوای استان اصفهان*، سازمان برنامه و بودجه استان اصفهان (۱۳۷۱).

۱۹. جعفریان م.ع.، *مطالعات طرح تغییر محور مجتمع فولاد مبارکه*، جلد چهارم، مطالعات زمین‌شناسی، دفتر دانشگاه اصفهان (۱۳۶۴).

۲۰. بهادران ب.، نعیمی م.ر.، *مطالعات طرح تغییر محور مجتمع فولاد مبارکه*، جلدنهم، مطالعات آب‌های زیرزمینی، دفتر دانشگاه اصفهان (۱۳۶۴).

۲۱. سازمان آب منطقه‌ای اصفهان، *گزارش مطالعات آب‌های زیرزمینی لنجان و سمیرم سفلی، امور مطالعات آب‌های زیرزمینی* (۱۳۷۰).

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

22. Geological Survey of Iran, "Geological Map of Iran 1:100000 Series", Sheet 6254 Riz-e-Lenjan' Ministry of Industry and Mines (1976).

23. Geological Survey of Iran, "Geological Map of Iran 1:100000 Series", Sheet 6354 Shahreza, Ministry of Industry and Mines (1976).

۲۴. سازمان آب منطقه‌ای اصفهان، *گزارش حفاری‌های اکتشافی و پیزومتر آبرفتی حوضه عمل‌کردی سازمان آب منطقه‌ای اصفهان*، امور مطالعات منابع آب (۱۳۸۰).

۲۵. شرکت سهامی ذوب آهن اصفهان، *مقطع زمین شناسی و لیتولوژی چاه‌ها*، مهندسی آبرسانی (۱۳۷۴).

۲۶. وزارت نیرو، *گزارش مطالعات ژئوفیزیک منطقه مبارکه، طالخونچه ( اصفهان) به طریقه الکتریک*، دفتر بررسی‌های منابع آب، بخش‌آب‌های زیرزمینی (۱۳۶۴).

۲۷. وزارت نیرو، *گزارش مطالعات ژئوفیزیک منطقه لنجانات اصفهان با روش ژئوالکتریک*، دفتر بررسی‌های منابع آب، بخش آب‌های زیرزمینی (۱۳۷۰).

28. USEPA, "Groundwater Sampling SESDPROC-301-R1, SESD operating procedure for groundwater sampling", United State Environmental Protection Agency (2007).

29. USGS, "Field measurement", TWRI Book 9, Chapter 6, United State Geological Survey (2006).

30. APHA, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", American Public Health Association (APHA)' American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF), 21st Edition (2005).

31. Stigter T.Y., Ribeiro L., Dill A.M.M.C., "Building factorial regression models to explain and predict nitrate concentrations in groundwater under agricultural land", Journal of Hydrology, 357(2008) 42-56.

32. Kresic N., "Groundwater Resources Sustainability, Management, and Restoration, McGraw-Hill Inc (2009).

33. Schulze-Makuch D., "Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior", Groundwater, 43(2005) 443-456.

34. Shuwei Q., Xiujuan L., Changlai X., Bo L., Jinfeng L., "Solving for dispersivity in field dispersion test of unsteady flow in mixing flow field: mass transport modeling", Procedia Earth and Planetary Science, 7 (2013) 709-712.

35. Frind E., Duynisveld W., Strebel O., Boettcher J., "Modeling of multicomponent transport with microbial transformation in ground water: the Fuhrberg case", Water Resources Research, 26 (1990) 1707-1719.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

36. Zheng C., Wang P.P., "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. U.S. Army Eng. Res. and Devel. Center (1999).

37. USEPA, "National primary and secondary water regulations", United State Environmental Protection Agency (2009).

38. WHO, "Guidelines for Drinking-Water Quality", Third Editio, Vol. 1, Recommendations, World Health Organization, Geneva (2008).

۳۹. مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، استاندارد شماره ۱۰۵۳، *ویژگی‌های آب آشامیدنی*، چاپ چهارم (۱۳۶۳).

40. FAO, "Water Quality for Agriculture' Food and Agriculture Organization of the United Nations" (1994).

۴۱. سازمان جهاد کشاورزی استان اصفهان، *گردش موجودی انبار خدمات حمایتی کشاورزی* (۱۳۸۸).

42. Raun W.R., Johnson G.V., "Improving nitrogen use efficiency for cereal production, Agronomy Journal, 91(1999) 357-363.

43. Halvorson A.D., Wienhold B.J., Black A.L., "Tillage and nitrogen fertilization influence grain and soil nitrogen in an annual cropping system", Agronomy Journal, 93 (2001) 836-841.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]