هیدروژئولوژی، سال پنجم، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۹
Hydrogeology, Volume 5, No. 2, Winter 2021

بررسی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی دشت گلپایگان با استفاده از بهینه‌سازی روش دراستیک

بهزاد سعیدی رضوی [1]*

۱- استادیار پژوهشی، گروه پژوهشی ساختمانی و معدنی پژوهشگاه استاندارد کرج- ایران

* نویسنده مسئول: bsaidi@standard.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۵

چکیده

ارزیابی کیفی و پتانسیل آلودگی منابع آب زیرزمینی جهت حفاظت از آلودگی و همچنین مدیریت مؤثر آن‌ها ضروی می‌باشد. محدوده مطالعاتی گلپایگان نیز به عنوان یک مهم‌ترین د شت‌های ا ستان ا صفهان و یکی از مناطق مهم ک شاورزی، در معرض خطر آلودگی به نیترات قرار گرفته است. لذا بررسی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان این منطقه با روش مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق ابتدا از روش دراستیک معمولی برای تعیین مناطق آسیب‌پذیر دشت گلپایگان استفاده شد. سپس برای بهینه‌سازی روش درا ستیک با ا ستفاده از الگوریتم ژنتیک، تابع هدفی به الگوریتم ژنتیک تعریف شد و وزن‌های بهینه پارامترهای درا ستیک با بیشـــینه کردن تابع هدف بدســـت آمد. همچنین از روش فازی ســـاگنو از بین روش‌های منطق فازی جهت بهبود وزن های روش دراستیک استفاده گردید. داده‌های غلظت نیترات و شاخص همبستگی آن با آسیب‌پذیری برای بررسی صحت‌سنجی روش‌های ارائه شده به کار برده شد. شاخص همب ستگی ن شان داد که درا ستیک بهینه شده با ا ستفاده از الگوریتم ژنتیک، شاخص همب ستگی بالاتری با نیترات دا شته و نتیجه بهتری ن سبت به درا ستیک معمولی برای منطقه ارائه داده ا ست. نق شه بهینه شده با ا ستفاده از روش الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد که حدود ۶، ۲۳، ۳۴، ۲۱ و ۱۶ درصد از د شت به ترتیب در مناطق با آ سیب‌پذیری خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد واقع‌شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، آلودگی، الگوریتم ژنتیک، دشت گلپایگان، دراستیک.

۱-مقدمه

تعیین میزان آسیب‌پذیری آبخوان به منظور جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی و سوق دادن تلاش‌های مدیریتی به سمت مناطق آسیب‌پذیر برای حفظ کیفیت آب مهم و ضروری به نظر می‌رسد. محدودیت منابع آب سطحی و بهره‌برداری بیش از اندازه از آبخوان‌ها و همچنین ورود آلاینده‌ها از طریق فعالیت‌های کشاورزی، شهری و صنعتی باعث تحمیل خسارت‌های جبران‌ناپذیری بر آب‌های زیرزمینی می‌شود. علاوه بر آن به دلیل رخنمون سازندهای تبخیری در بخش وسیعی از کشور، بخشی از آب‌های زیرزمینی موجود در آن‌ها از کیفیت مناسبی برخوردار نیستند. از سوی دیگر ضعف مدیریتی در کنترل منابع آب سطحی و زیرزمینی کشور موجب گردیده تا خواسته یا ناخواسته این منابع در معرض آلودگی و افزایش شوری قرار گیرند. بدین لحاظ با توجه به اهمیت موضوع و پیامدهای نامطلوب بر اکوسیستم و زندگی مردم، مطالعه تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی و کشف علل آن و ارائه راهکارهای پیشگیرانه از اهداف مطالعات هیدروشیمیایی و آسیب‌پذیری می‌باشد. آلودگی‌های مختلف انتشار یافته در آب‌های زیرزمینی دارای مضرات زیست محیطی فراوانی است که مستقیماً زندگی بشر را تحت تأثیر قرار می‌دهند .از این‌رو لازمه هر گونه اقدام جهت کنترل و کاهش آلاینده-های آب‌های زیرزمینی و تأثیرات آن‌ها، آگاهی کامل از نحوه توزیع آلاینده‌ها در محیط‌های آلوده است (Nadiri et al., 2019). در اختیار داشتن چنین اطلاعاتی صرفاً از طریق نمونه‌برداری و سنجش آلودگی در سطح منطقه امکان‌پذیر می‌باشد. بهترین و مؤثرترین راه‌حل، جلوگیری از ورود آلاینده‌ها به این منبع با ارزش است. تعیین میزان آلودگی آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین مطالعات هیدروژئولوژیکی می‌باشد که در این ارتباط شناخت مناطق در معرض خطر آلودگی و بررسی آسیب‌پذیری آبخوان دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای می‌باشد. مفهوم آسیب‌پذیری برای اولین بار در اواخر سال ۱۹۶۰ میلادی در فرانسه برای آگاهی بخشی در مورد آلودگی آب زیرزمینی ارائه شده است (Vrba et al., 1994). آسیب‌پذیری یک ویژگی ذاتی آب‌های زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود که پتانسیل آبخوان را برای نفوذ و انتشار آلاینده‌ها از سطح زمین به سیستم آب زیرزمینی نشان می‌دهد (Babiker et al., 2005). آسیب‌پذیری نوعی خصوصیت نسبی، بدون بعد و غیرقابل اندازه‌گیری است و به ویژگی‌های آبخوان، محیط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بستگی دارد (Antonakos et al., 2007). ارزیابی آسیب‌پذیری برای تعیین آلودگی آب‌های زیرزمینی بخشی از مدیریت آب‌های زیرزمینی در بسیاری از مناطق جهان به شمار می‌رود. با شناسایی مناطقی که استعداد آلودگی در آن قوی است می‌توان منطقه را از لحاظ آسیب‌پذیری پهنه-بندی نمود و در نتیجه با اعمال تمهیدات لازم از آلوده شدن مناطق با پتانسیل آسیب‌پذیری بالا جلوگیری کرد. نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی بر این اساس است که در برخی اراضی، پتانسیل آسیب‌پذیری نسبت به آلودگی بیش‌تر از سایر اراضی است (Piscopo, 2001). تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری ارائه شده که می‌توان آن‌ها را به سه دسته کلی تقسیم کرد. این سه دسته عبارت‌اند: از رتبه‌دهی توصیفی، آماری و تحلیلی و روش ترکیبی (Niknam et al., 2007). یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان روش دراستیک است که پرکاربردترین روش از مدل‌های PCSM[۳۸] است که در این مدل‌ها علاوه بر طبقه‌بندی پارامترهای مختلف، ضرایب وزنی نسبی برای هر عامل تعیین می‌شود. این روش‌ها بر پایه تلفیق لایه‌های حاصل از پارامترهای مختلف بنا نهاده شده‌اند و اساس کار یکسانی دارند و همچنین بر ارزیابی توصیفی و کمی آسیب‌پذیری تکیه دارند. روش‌های PCSM در به‌کارگیری نوع و تعداد پارامترها باهم تفاوت داشته ولی درنهایت منجر به ثبت یک شاخص عددی یا امتیاز برای هر ویژگی می‌گردند. روش دراستیک توسط انجمن ملی آب زیرزمینی (NGWA[۳۹]) با همکاری آژانس حفاظت محیطی ایالت متحده (USEPA) ایجاد شده است (Aller et al., 1987). تاکنون مطالعات زیادی در زمینه آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش دراستیک انجام شده است که می‌توان به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان کاکامیگاهارا در مرکز ژاپن (Babiker et al., 2005) اشاره نمود. همچنین در کره جنوبی از مدل دراستیک برای ارزیابی محل مناسب دفع زباله‌ها و جلوگیری از آلوده شده آب‌های زیرزمینی استفاده شده است(Lee, 2003). از آنجا که این روش در مکان‌های

[38] Point Count System Models

[39] National Groundwater Association

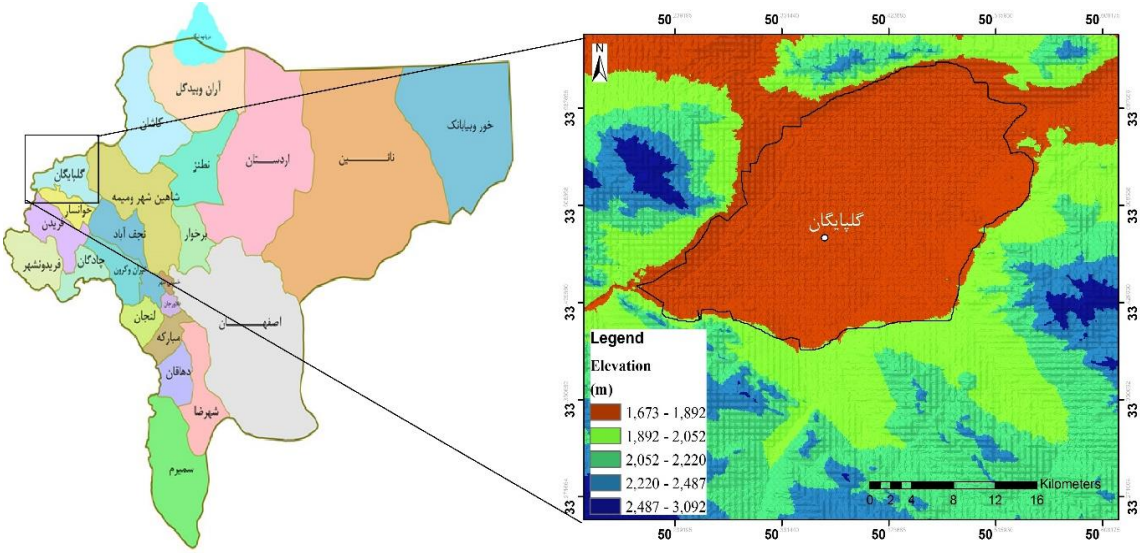
مختلف بدون هیچ تغییری مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌تواند اثرات نوع و ویژگی‌های آلودگی را در نظر نگیرد. بنابراین، این روش باید برای آبخوان و آلودگی خاص کالیبراسیون و تصحیح شود. مدل دراستیک با روش‌های متعددی مانند شبکه عصبی مصنوعی[40] و جنگل تصادفی[41] (Baghapour Norouzi et al., 2016; Nadiri et al., 2019 et al., 2016 ;) بهبود یافته است.

محدوده مطالعاتی گلپایگان به عنوان یکی از مهم‌ترین دشت‌های استان اصفهان، از مناطق مهم کشاورزی می‌باشد، لذا به دلیل استفاده بیش از اندازه از انواع کودهای شیمیایی می‌تواند جزو دشت‌های آلوده به نیترات بوده و در معرض آلودگی باشد. همچنین پساب‌ها و فاضلاب‌های حاصل از منطقه می‌تواند منابع آب زیرزمینی در این دشت را در معرض خطر آلودگی قرار دهند. بنابراین با توجه به اهمیت آب زیرزمینی در منطقه گلپایگان که برای آشامیدن نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، ارزیابی آسیب‌پذیری این دشت ضروری می‌باشد. در مطالعه حاضر، بررسی مناطق دارای خطر آلودگی با استفاده از روش آسیب‌پذیری دراستیک مورد بررسی قرار گرفته است و نقشه آسیب‌پذیری حاصل با استفاده از الگوریتم ژنتیک[42] و منطق فازی ساگنو[43] بهینه گردیده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

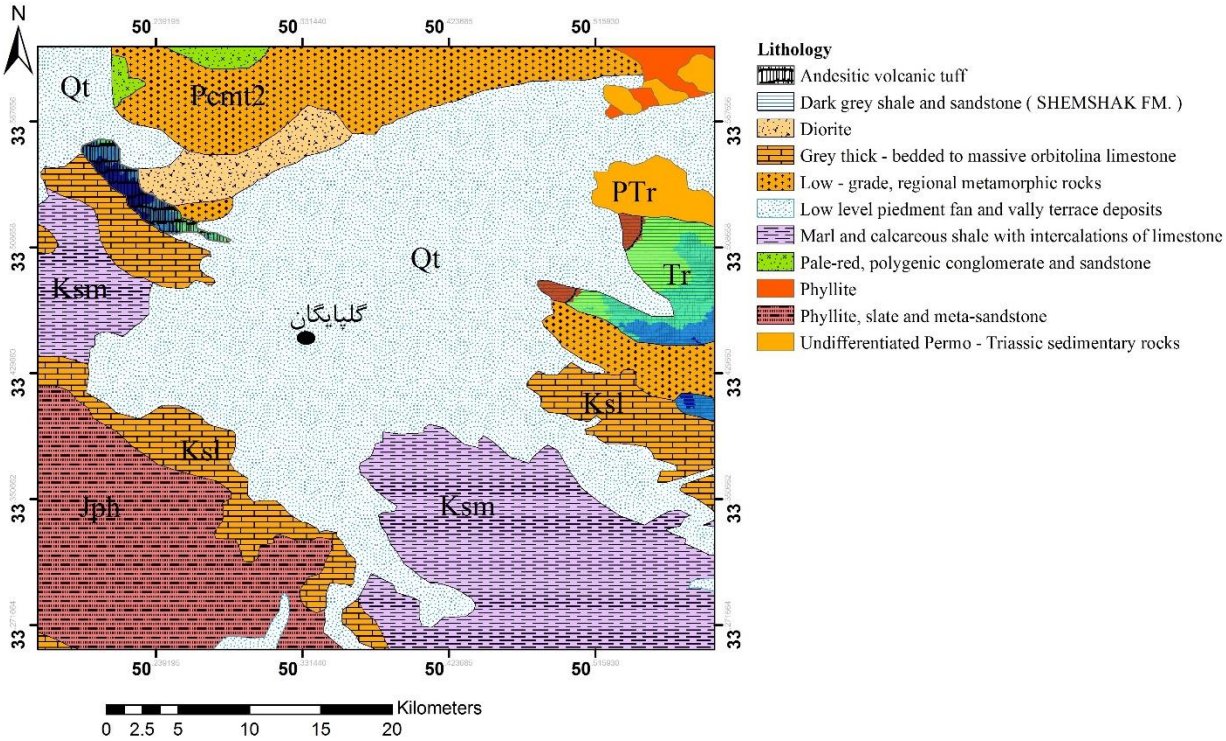
دشت گلپایگان با وسعت با ۷۷۰ کیلومترمربع در استان اصفهان واقع شده و جزو زون زمین‌ساختاری سنندج - سیرجان محسوب می‌شود. میانگین بارندگی سالانه بر اساس آمار سی ساله (۹۷-۱۳۶۸) ایستگاه گلپایگان در دشت و بخش کوهستانی به ترتیب ۱۹۰ و ۲۵۰ میلی‌متر و میانگین بارندگی در محدوده مطالعاتی گلپایگان حدود ۲۰۰ میلی‌متر در سال است. این حوزه بر اساس روش تجربی آمبرژه و با استفاده از آمار ایستگاه گلپایگان، دارای اقلیم سرد و نیمه‌خشک می‌باشد (سازمان هواشناسی استان اصفهان، ۱۳۹۷). شکل ۱ موقعیت جغرافیای منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. میزان تبخیر و تعرق پتانسیل و تبخیر از تشتک به ترتیب برابر با ۶۸۹ و ۱۵۳۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. رودخانه گلپایگان مهم‌ترین رودخانه دشت گلپایگان می‌باشند که آب‌های منطقه را به سمت قم زهکشی می‌نماید. آبخوان دشت گلپایگان از نوع آزاد بوده و بر اساس مطالعات ژئوفیزیکی انجام گرفته در منطقه مورد مطالعه بر اساس ۵۳ سونداژ ژئوالکتریکی در ۸ پروفیل، از سمت جنوب به شمال منطقه افزایش پیدا کرده و به حدود ۱۸۰ متر می‌رسد. همچنین ضخامت آبخوان از سمت شرق به غرب افزایش پیدا می‌کند(مهندسین مشاور و خدمات زمین فیزیک، ۱۳۷۹). جهت جریان آب زیرزمینی در دشت گلپایگان از دو سمت جنوب غربی و غرب به سمت مرکز دشت بوده و از سمت شرق و شمال شرق خارج می‌گردد.



شکل۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

[40] Artificial Nearal Network
[41] Random Forest
[42] Genetic Alghoritm
[43] Sugeno Fuzzy Logic

منطقه گلپایگان از نظر زمین‌شناسی در قسمت میانی زون سنندج – سیرجان واقع شده و حاشیه آن شاخه جنوبی سیستم کوهزایی آلپی ایران (کرتاسه – ترشیاری) می‌باشد. این منطقه دارای سازندهای زمین‌شناسی مختلفی می‌باشد. سازند شیلی و آهکی در جنوب منطقه برون‌زد دارد و سازند شمشک در قسمت شرقی مشهود است. از نظر زمین‌شناسی قدیمی‌ترین تشکیلات منطقه گلپایگان مربوط به دوران پرکامبرین می‌باشد که شامل تشکیلات دگرگونی شده از فیلیت، کوارتزیت، پاراگنایس، شیست‌های سبز، آمفیبولیت و مرمر تشکیل شده است. سازندهای دگرگونی در قسمت شمالی، جنوب غربی و شرق منطقه دیده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، بخش اعظمی از مساحت منطقه در بخش غربی مربوط به رسوبات آبرفتی دوره کواترنر است. در قسمت جنوب و جنوب شرقی دشت گلپایگان مجموعه رسوبات آهک و مارن- ژیپس دیده می‌شود که مربوط به دوره کرتاسه و مجموعه سنگ‌های پیروکلاستیک و رس‌سنگ‌ها مربوط به دوره پلیوسن می‌باشند. در قسمت شمال و شمال‌غربی دشت گلپایگان، سنگ‌های آهکی تا توده خاکستری روشن مربوط به دوره تریاس و ژوراسیک و تودهٔ آهک‌های کرتاسه به چشم می‌خورد. از لحاظ تکتونیکی در این منطقه گسل مهمی وجود ندارد.



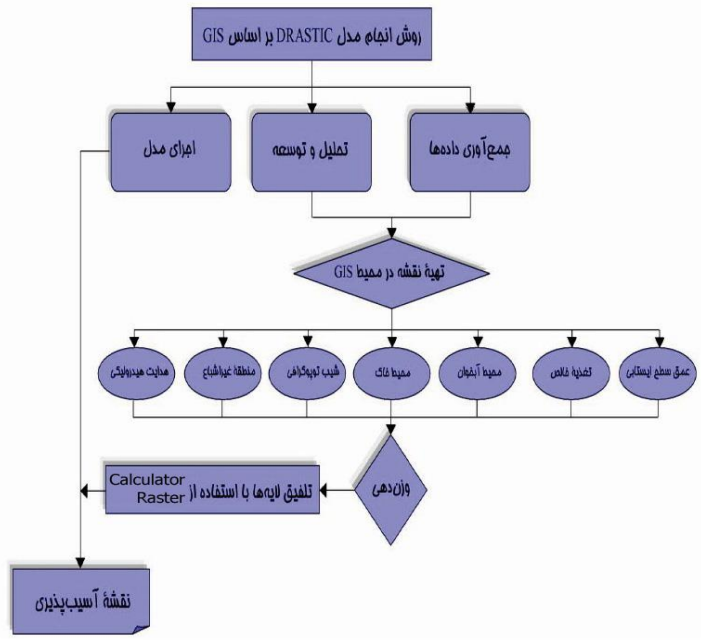
شکل۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

۲-۲. بررسی آسیب‌پذیری با روش دراستیک

در روش دراستیک ۴ فرض در نظر گرفته می‌شود که شامل؛ ۱) آلودگی از سطح زمین وارد آب زیرزمینی می‌شود، ۲) آلودگی از طریق بارندگی شسته شده و وارد آب زیرزمینی می‌شود، ۳) انتقال آلودگی از طریق آب و با سرعتی مشابه آن صورت می‌گیرد و۴) منطقه مورد مطالعه توسط این روش باید ۴ هکتار یا بزرگ‌تر باشد (Voudouris et al. 2010). روش دراستیک برگرفته از هفت پارامتر هیدرولوژیکی است که شامل؛ عمق آب (**D**)، میزان تغذیه (**R**)، محیط آبخوان (**A**)، جنس بافت خاک (**S**)، شیب توپوگرافی (**T**)، تأثیر محیط غیراشباع (**I**) و هدایت هیدرولیکی سفره (**C**) می‌باشند که به هرکدام از این پارامترها با توجه به پتانسیل آلودگی آن، نرخی از ۱ تا ۱۰ اختصاص داده می‌شود. ۱ به معنای کمترین و ۱۰ بیشترین خطر برای آلودگی آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود (Panagopoulos et al. 2005). هریک از پارامترهای روش دراستیک با توجه به اهمیت نسبی آن در توانایی انتقال آلودگی به سیستم آب زیرزمینی در ضریب وزنی (وزن ۱ تا ۵) ضرب می‌شود. از این‌رو شاخص دراستیک بر اساس وزن‌دهی به مجموع هفت پارامتر به‌صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$DI = D_rD_w + R_rR_w + A_rA_W + S_rS_w + T_rT_w + I_rI_W + C_rC_w$$

در رابطه بالا DI شاخص آسیب‌پذیری دراستیک و حروف بزرگ نشان‌دهنده پارامترهای هفت‌گانه و r نرخ ارزش (رتبه) و w وزنی است که به هر پارامتر تخصیص داده می‌شود. پس از محاسبه شاخص دراستیک، نواحی آسیب‌پذیر آبخوان مشخص می‌شوند. بزرگ بودن این شاخص بیان‌گر آسیب‌پذیری بیشتر آب‌های زیرزمینی می‌باشد. شکل ۳ مراحل انجام روش دراستیک را نشان می‌دهد. رتبه‌بندی و محدوده تقسیمات پارامترهای دراستیک در جدول ۱ ارائه شده است. نتیجه نهایی برای هر مجموعه هیدرولوژیکی یک ارزش عددی است که از مجموع حاصل‌ضرب وزن هر پارامتر در رتبه آن به دست می‌آید و به‌عنوان شاخص دراستیک معرفی می‌شود.



شکل ۳: مراحل انجام روش دراستیک

جدول۱. رتبه‌بندی، امتیاز رتبه‌ها و وزن مربوط به هرکدام از پارامترهای روش دراستیک(Aller et al.,1987)

توپوگرافی(درصد)		محیط خاک		محیط آبخوان		تغذیه (سانتی‌متر در سال)		عمق آب زیرزمینی(متر)		هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)		محیط غیر اشباع	
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
۱۰	۰ -۲	۴	لوم سیلتی	۳	رس و سیلت	۱	۰ -۵/۰۸	۱۰	۰-۱/۵	۱	۴ >	۲	سیلت و رس
۹	۲ -۶	۶	لوم ماسه‌ای		با کمی ماسه	۳	-۱۰/۱۶	۹	۱/۵ -۴/۶	۲	۴ -۱۲	۴	سیلت و رس
۵	۶ -۱۲	۷	ماسه لومی	۵	ماسه با کمی	۶	۵/۰۸	۷	۴/۶ -۹/۱	۴	۱۲ -۲۸	۶	با کمی ماسه
۳	۱۲ -۱۸	۸	گراول و		سیلت و رس	۸	-۱۷/۷۸	۵	۹/۱-۱۵/۲			۸	ماسه با
۱	۱۸ <		ماسه	۸	ماسه و گراول	۹	۵/۰۸	۳	۱۵/۲-۲۲/۹				اندکی سیلت
							-۲۵/۴	۲	۲۲/۹ -۳۰/۵				و رس
							۱۷/۷۸	۱	۳۰/۵ <				گراول و ماسه
							۲۵/۴ <						
وزن‌های اختصاص یافته به پارامترها													
۱		۲		۳		۴		۵		۳		۵	

۲-۳. بهینه‌سازی روش دراستیک با استفاده از الگوریتم ژنتیک

از آنجا که این روش در مکان‌های مختلف بدون هیچ تغییری مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌تواند اثرات نوع و ویژگی‌های آلودگی را در نظر نگیرد. بنابراین، این روش باید برای آبخوان و آلودگی خاص کالیبراسیون و تصحیح شود که در مطالعه حاضر با توجه به برخی مزیت‌های الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر روش‌ها در رسیدن به جواب

بهینه، از این روش استفاده گردیده است. منظور از بهینه‌سازی یک سامانه، کمینه یا بیشینه کردن تابعی است که این تابع معیاری از عملکرد سامانه می‌باشد. این عمل در نهایت به بهبود کارایی سامانه می‌انجامد. هدف از بهینه‌سازی یافتن بهترین جواب قابل قبول، با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسئله است(Blum and Roli 2003). برای یک مسئله، ممکن است جواب‌های مختلفی موجود باشد که برای مقایسه آن‌ها و انتخاب جواب بهینه، تابعی به نام تابع هدف تعریف می‌شود. انتخاب این تابع به طبیعت مسئله وابسته است. یکی از روش‌هایی که می‌تواند به منظور بهینه‌سازی استفاده گردد، الگوریتم ژنتیک می‌باشد. الگوریتم ژنتیک که روش بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت جاندار(موجودات زنده) است که می‌توان در طبقه‌بندی‌ها، از آن به عنوان یک روش عددی، جستجوی مستقیم و تصادفی یاد کرد. این الگوریتم، الگوریتمی مبتنی بر تکرار است و اصول اولیهٔ آن همانطور که پیشتر اشاره شد از علم ژنتیک اقتباس گردیده است و با تقلید از تعدادی از فرآیندهای مشاهده شده در تکامل طبیعی اختراع شده است و به طور موثّری از معرفت قدیمی موجود در یک جمعیت استفاده می‌کند، تا حل‌های جدید و بهبود یافته را ایجاد کند. این الگوریتم در مسائل متنوعی نظیر بهینه‌سازی، شناسایی و کنترل سیستم، پردازش تصویر و مسایل ترکیبی، تعین توپولوژی و آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم‌های مبتنی بر تصمیم و قاعده به کار می‌رود(Holland, 1975). الگوریتم ژنتیک به عنوان یک الگوریتم محاسباتیِ بهینه‌سازی با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از نقاط فضای جواب در هر تکرار محاسباتی به نحو مؤثری نواحی مختلف فضای جواب را جستجو می‌کند(Holland, 1975). در مکانیزم جستجو گرچه مقدار تابع هدف تمام فضای جواب محاسبه نمی‌شود ولی مقدار محاسبه شده تابع هدف برای هر نقطه، در متوسط‌گیری آماری تابع هدف برای هر نقطه، در متوسط‌گیری آماری تابع هدف در کلیه زیر فضاهایی که آن نقطه به آن‌ها وابسته بوده دخالت داده می‌شود و این زیر فضاها به طور موازی از نظر تابع هدف متوسط‌گیری آماری می‌شوند. این مکانیزم را توازی ضمنی می‌گویند. این روند باعث می‌شود که جستجوی فضا به نواحی از آن که متوسط آماری تابع هدف در آن‌ها زیاد بوده و امکان وجود نقطه بهینه مطلق در آن‌ها بیشتر است سوق پیدا کند. چون در این روش برخلاف روش‌های تک‌مسیری فضای جواب به طور همه جانبه جستجو می‌شود، امکان کمتری برای همگرایی به یک نقطه بهینه محلی وجود خواهد داشت. امتیاز دیگر این الگوریتم آن است که هیچ محدودیتی برای تابع بهینه شونده، مثل مشتق‌پذیری یا پیوستگی لازم ندارد و در روند جستجو خود تنها به تعیین مقدار تابع هدف در نقاط مختلف نیاز دارد و هیچ اطلاعاتِ کمکی دیگری، مثل مشتق تابع را استفاده نمی‌کند. لذا می‌توان در مسائل مختلف اعم از خطی، پیوسته یا گسسته استفاده می‌شود و به سهولت با مسائل مختلف قابل تطبیق است(Bennett et al., 2003). روند کلی الگوریتم ژنتیک برای انجام فرایند بهینه‌سازی در تحقیق حاضر شامل چهار مرحله زیر می‌باشد: ۱- مرحله ابتدایی یا اولیه، ۲- انتخاب، ۳- تقاطع یا ترکیب مجدد و ۴- جهش. در مرحله ابتدایی جمعیت کروموزوم‌ها به عنوان نقطه شروع فرایند انتخاب می‌شود. در مرحله بعد، هر کروموزوم با تابع برازش ارزیابی می‌شود. در روش الگوریتم ژنتیک هر جمعیت جدیدی که تولید می‌شود، جایگزین جمعیت قبلی می‌گردد. این فرایندها تا جایی ادامه می‌یابد که بهترین جواب در دو نسل متوالی تغییر نکند و یا به عبارتی بهبودی در جمعیت جدید مشاهده نگردد. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه‌سازی وزن پارامترهای روش دراستیک استفاده شده است. متغیرهای تصمیم مسئله، وزن‌های مربوط به پارامترهای دراستیک می‌باشد. تابع هدف مدل بهینه‌سازی بر اساس رابطه زیر می‌باشد که با بیشینه کردن این تابع هدف که در واقع با افزایش میزان ضریب همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری و غلظت نیترات همراه است، وزن‌های مناسب و بهینه پارامترهای دراستیک را محاسبه می‌نماید(Nadiri et al., 2019).

$$F=\frac{\sum_{i=1}^{n}(V_i-\bar{V})(N_i-\bar{N})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(V_i-\bar{V})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(N_i-\bar{N})^2}}$$

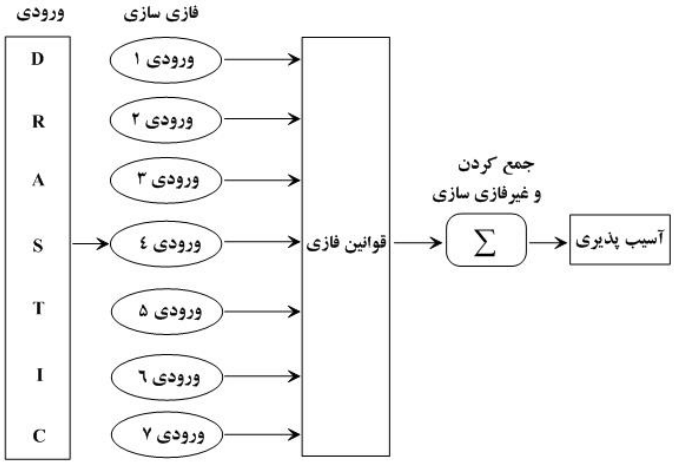
رابطه(۲)

در این رابطه F تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، V_i شاخص آسیب‌پذیری مربوط به نقطه، $\bar{V}$ میانگین شاخص‌های آسیب‌پذیری، N_i غلظت نیترات در نقطه i، $\bar{N}$ میانگین غلظت نیترات و n تعداد داده می‌باشد. اندازه جمعیت اولیه برابر با ۱۰۰، نرخ جهش برابر با ۰/۰۷۵ و نحوه رسیدن به

جواب بهینه رو به جلو انتخاب گردیده است. همچنین محدودیتی که برای الگوریتم ژنتیک اعمال گردیده است، اختصاص وزن‌های ۱ تا ۵ برای ۷ پارامتر روش دراستیک می‌باشد.

۲-۴. منطق فازی

اساس تئوری فازی برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط زاده (Zadeh, 1965) معرفی گردید. این تئوری قادر است بسیاری از مفاهیم و متغیرها و سیستم‌هایی را که نادقیق و مبهم هستند، صورت‌بندی ریاضی بخشیده و زمینه را برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم آورد. مدل‌های فازی عموماً در مسائلی که با عدم قطعیت ذاتی همراه هستند، مناسب می‌باشند (Pulido and Gutierrez, 2009; Nadiri et al., 2014). هر سیستم فازی شامل سه بخش اصلی است: الف) فازی کردن داده‌ها با استفاده از تابع عضویت ب) ایجاد ارتباط بین ورودی و خروجی با استفاده از یک سری قوانین مانند اگر آنگاه (if-then)، ج) بررسی سیستم و غیرفازی‌سازی داده‌ها به وسیله عمل‌گرهای فازی مانند and، or و no. عمل‌گر and به صورت مینیمم‌سازی (min) و وزن‌دهی (prod) و عمل‌گر or نیز به صورت ماکزیمم‌سازی (max) عمل می‌کند (Nadiri et al., 2014). شکل (۵) ساختار کلی سیستم فازی را نشان می‌دهد. مدل فازی به روش‌های ممدانی (MFL) (Mamdani, 1975)، ساجنو (SFL) (Sugeno, 1985) و لارسن (LFL) (Larsen, 1980) قابل اجراست. تفاوت روش ساجنو با دو روش دیگر در خروجی آن‌هاست که در روش ساجنو بر خلاف روش ممدانی تابع عضویت خروجی سیستم فازی به صورت ثابت یا رابطه خطی است که توسط روش دسته‌بندی به دست می‌آید (Nadiri et al., 2013). اولین مرحله در ایجاد مدل فازی دسته‌بندی داده‌ها می‌باشد. روش‌های زیادی برای دسته‌بندی وجود دارند (Hongixing et al., 2001). از جمله این روش‌ها می‌توان به روش Clustering Subtractive (SC) برای روش ساجنو و روش Fuzzy C-Means (FCM) برای روش‌های ممدانی و لارسن اشاره کرد (Nadiri et al., 2015). در منطق فازی، میزان عضویت یک عنصر در یک مجموعه، با مقداری در بازه یک (عضویت کامل) تا صفر (عدم عضویت کامل) تعریف می‌شود.



شکل ۴. ساختار کلی سیستم فازی

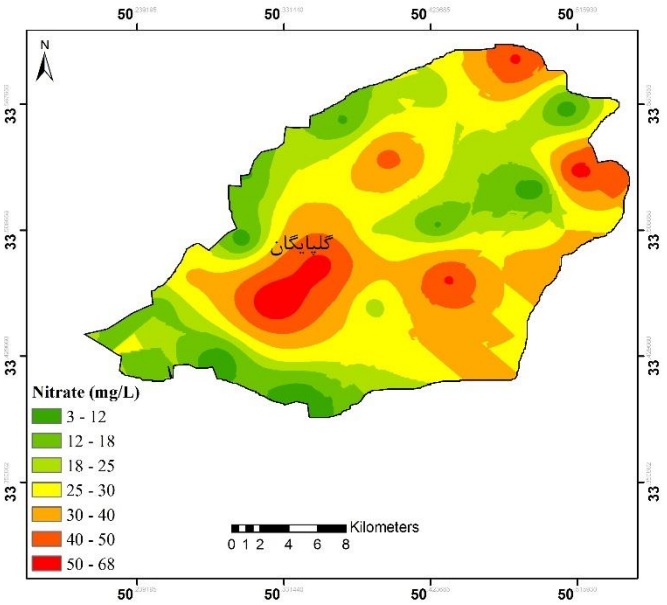
در این تحقیق ابتدا مدل دراستیک اولیه برای منطقه تهیه گردید، سپس بهینه‌سازی مدل دراستیک اولیه با توجه به غلظت‌های نیترات آب زیرزمینی دشت بر مبنای منطق فازی صورت گرفته است. در واقع هدف اصلی این است که با ارائه روش‌های تلفیقی بتوان آسیب‌پذیری یا خطر آلودگی آب زیرزمینی را دقیق‌تر نشان داد.

۳. بحث و نتایج

افزایش فعالیت‌های کشاورزی و در نتیجه افزایش خطر آلودگی منابع آب‌های زیرزمینی به نیترات حاصل از آب‌های برگشتی از کشاورزی و استفاده‌ی بیش از حد از کودهای شیمیایی در منطقه گلپایگان نیز می‌تواند مشکل‌ساز باشد چرا که منابع آب‌های زیرزمینی بیشترین منبع تأمین‌کننده‌ی آب شرب، کشاورزی و صنعت منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشد. همچنین فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری آلاینده‌های مختلفی را به آبخوان‌ها تحمیل می‌کنند که برای جلوگیری از ادامه افت کمّی و کیفی، مدیریت بهره‌برداری و حفاظت از آب‌های زیرزمینی باید به عنوان یک اصل و پایه در برنامه‌ریزی‌های کشور

قرار گیرد. بدین منظور ۲۷ نمونه از آب زیرزمینی دشت گلپایگان جمع‌آوری و مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت.

شکل ۵ تغییرات مکانی میزان نیترات آب زیرزمینی آبخوان دشت گلپایگان را نشان می‌دهد.

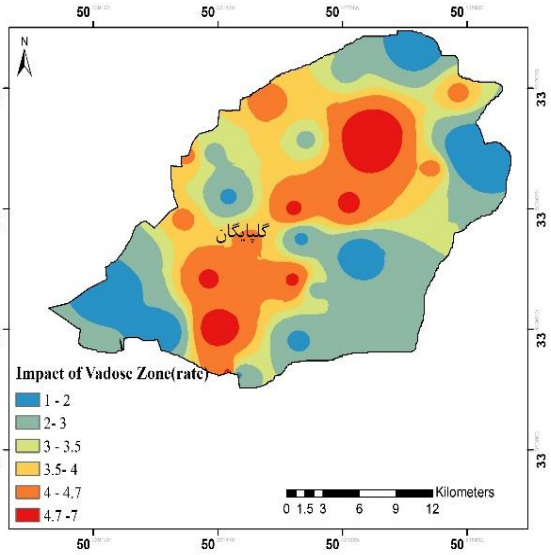


شکل۵- تغییرات مکانی میزان نیترات آب زیرزمینی آبخوان دشت گلپایگان

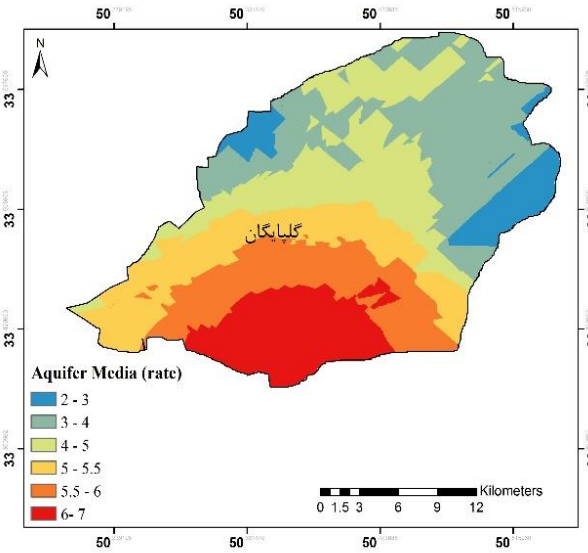
به منظور اجرای مدل دراستیک در محیط GIS، مراحل آماده‌سازی نقشه‌های معیار مدل، وزن‌دهی و تلفیق لایه‌های مختلف اطاعاتی اعمال شدند. تمامی داده‌های مورد نیاز برای تهیه مدل به سیستم تصویر درآمدند که در این راستا از توابع تحلیلی مکانی و سطوحی مختلف و تبدیل بردار به رستر استفاده گردید. در این تحقیق برای تهیه لایه‌های لازم در آسیب‌پذیری از داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای سال آبی ۹۷-۹۶، اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری، گزارش آزمون پمپاژ آبخوان، لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و اکتشافی، اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی و نقشه رقومی ارتفاعی منطقه استفاده گردید. جهت تهیه لایه عمق سطح ایستابی (D) از داده‌های سطح آب زیرزمینی شهریور ماه در پیزومترهای دشت استفاده شده است. در ادامه موقعیت و عمق سطح ایستابی چاه‌های موجود در منطقه به محیط اکسل وارد و سپس به فرمت قابل قبول برای نرم افزار Arc GIS تبدیل شد و سپس با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ در GIS نقشه هم عمق سطح ایستابی تهیه و مطابق جدول ۱ رتبه‌بندی گردید (شکل ۶). جهت تهیه لایه اطلاعاتی تغذیه خالص (R) از دو پارامتر مهم بارش و آب برگشتی کشاورزی به عنوان منابع عمده تغذیه آبخوان استفاده شد. برای هر یک از این دو تغذیه لایه‌های رستری بصورت جداگانه تهیه شد، سپس با هم‌پوشانی دو لایه مذکور و رتبه‌دهی طبق طبقه-بندی آلر (۱۹۸۷) لایه تغذیه خالص به دست آمد (شکل ۶). اطلاعات مربوط به محیط آبخوان در دشت گلپایگان از کاوش‌های زیرسطحی (لوگ حفاریهای اکتشافی، پیزومتری و چاه‌های بهره‌برداری)، کاوشهای ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی منطقه به دست می‌آید. با استفاده از این اطلاعات، نقشه نوع و جنس محیط آبخوان تهیه و با توجه به رتبه محیط آبخوان (جدول ۱) نقشه رستری رتبه‌بندی محیط آبخوان در اندازه سلول ۱۰۰ متری در محیط GIS تهیه شد (شکل ۶). با استفاده از لوگ چاه‌های حفاری و پیزومتری نقشه نوع و جنس خاک تا عمق ۲ متری تهیه و سپس با توجه به رتبه‌بندی این پارامتر (جدول ۱) نقشه رستری محیط خاک در اندازه سلول ۱۰۰ متری در محیط GIS تهیه گردید برای تهیه لایه توپوگرافی از نقشه درصد شیب استفاده می‌شود. برای این منظور نقشه‌های توپوگرافی در نرم افزار Arc- Gis به مدل رقومی ارتفاع (نقشه DEM) تبدیل شده و سپس نقشه رستری درصد شیب از مدل رقومی ارتفاع محاسبه و استخراج شده است و در نهایت با استفاده از رتبه‌بندی این پارامتر نقشه رتبه‌بندی شیب تهیه گردید (شکل ۶). با استفاده از لوگ چاه‌های حفاری و پیزومتری و نقشه‌های مقاطع ژئوالکتریک دشت، نوع و جنس مواد تشکیل دهنده منطقه

غیراشباع مشخص و نقشه رستری منطقه غیراشباع تهیه گردید و سپس به کمک این نقشه و با توجه به (جدول ۱) نقشه رستری رتبه‌بندی مربوط به منطقه غیراشباع با اندازه سلول ۱۰۰ متری تهیه گردید (شکل ۶).

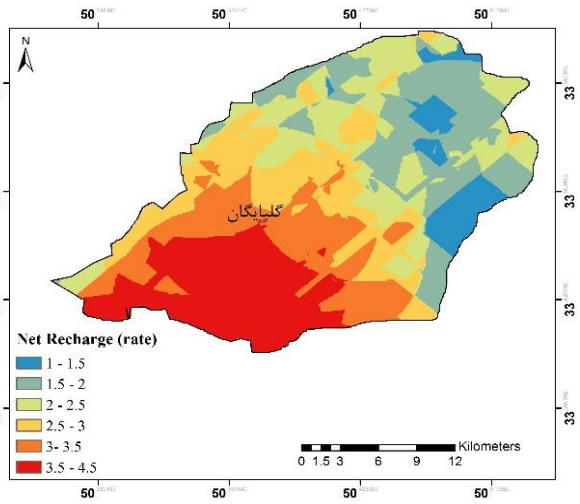
اطلاعات مربوط به هدایت هیدرولیکی از محاسبات آزمایش پمپاژ حاصل می‌گردد. برای ایجاد نقشه هدایت هیدرولیکی می‌توان از نقشه ضخامت لایه اشباع و قابلیت انتقال استفاده کرد. به طوری که با تقسیم نقشه قابلیت انتقال بر ضخامت لایه اشباع، نقشه هدایت هیدرولیکی به دست می‌آید. بدین ترتیب اطلاعات به دست آمده همراه با موقعیت هر چاه مشاهده‌ای از محیط اکسل به محیط نرم‌افزار GIS انتقال و به یک لایه‌ی نقطه‌ای تبدیل شد. در نهایت با اعمال بهترین روش درون‌یابی به‌کل محدوده مطالعاتی تعمیم داده شد و مطابق جدول ۱ رتبه‌بندی و نقشه‌ی هدایت هیدرولیکی نهایی آماده گردید (شکل ۶).



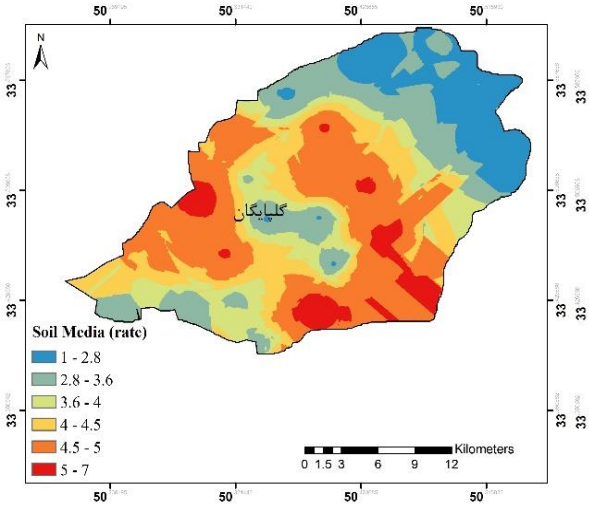
الف)



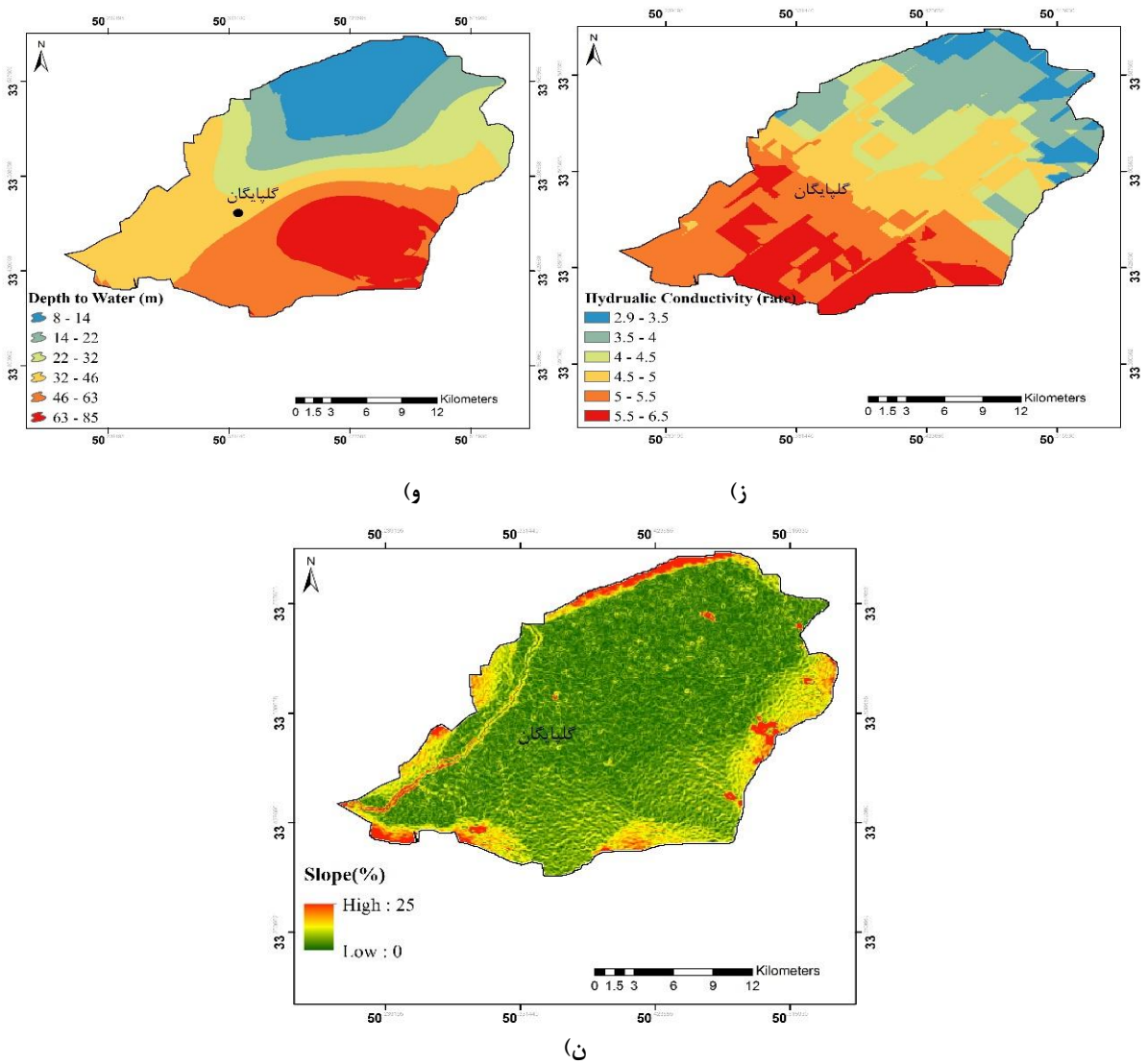
ب)



پ)



ر)



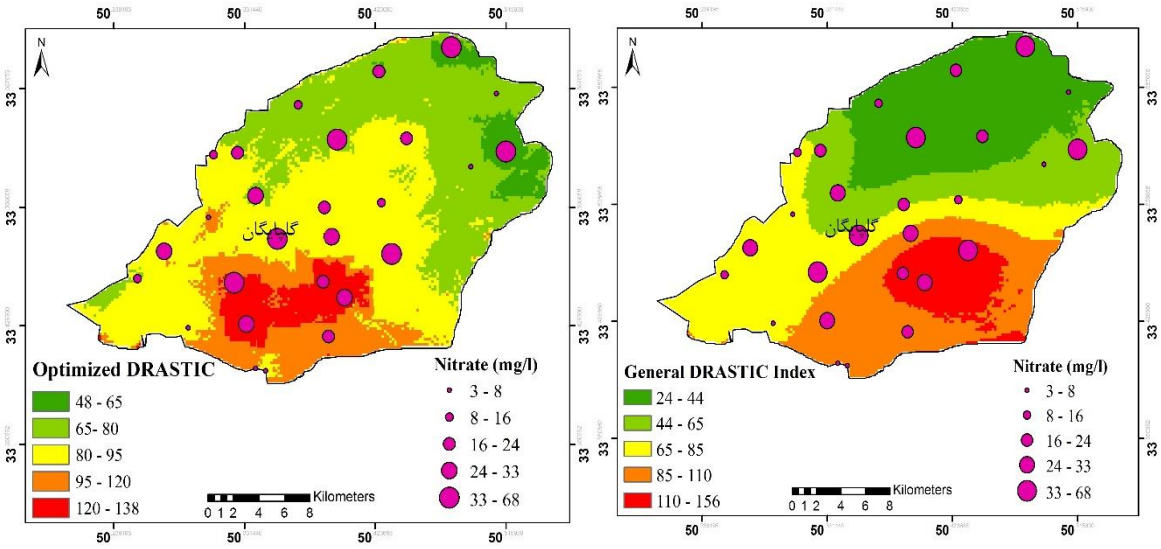
شکل۶. نقشه‌های رستری پارامترهای روش دراستیک: الف) محیط زون وادوز، ب) محیط آبخوان، پ) تغذیه خالص، ر) محیط خاک، ز) هدایت هیدرولیکی، و) عمق تا آب زیرزمینی، ن) شیب

نقشه اصلی دراستیک جهت ارزیابی آسیب‌پذیری با اعمال وزن‌های مربوط به هر پارامتر و تلفیق لایه‌ها با استفاده از تابع هم‌پوشانی تهیه شد (شکل ۷ الف). بر اساس نتایج مدل دراستیک برای دشت، ۳۱، ۱۸، ۲۲، ۱۹ و ۱۰ درصد به ترتیب در مناطق با آسیب‌پذیری خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد واقع‌شده‌اند. با توجه به نتایج مدل بخش‌های جنوبی دشت گلپایگان به‌عنوان مناطق آسیب‌پذیرتر معرفی شده است. در روش الگوریتم ژنتیک وزن‌های بهینه پارامترهای دراستیک با بیشینه کردن تابع هدف در رابطه ۲ به دست آمد که با قرار دادن وزن‌های بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک رابطه اول، شاخص دراستیک بهینه شده با الگوریتم ژنتیک بدست آمد. وزن‌های بهینه شده دراستیک با استفاده از الگوریتم ژنتیک در جدول ۲ آورده شده است. در این روش و در محاسبه شاخص دراستیک بهینه شده با الگوریتم ژنتیک، وزن‌ها، وزن‌های حاصل شده از الگوریتم ژنتیک و رتبه‌ها بر اساس رتبه‌های روش دراستیک می‌باشد. بر اساس روش الگوریتم ژنتیک، عمق آب زیرزمینی، هدایت هیدرولیکی و محیط غیر اشباع به ترتیب بیشترین تاثیر را در آسیب‌پذیری آب زیرزمینی منطقه دارند. نقشه بهینه شده با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد که حدود ۱۸، ۱۱، ۲۸، ۲۶ و ۱۷ درصد از دشت به ترتیب در مناطق با آسیب‌پذیری خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد واقع‌شده‌اند (شکل ۷ ب). با توجه به نتایج مدل بخش‌های مرکزی دشت گلپایگان به‌عنوان مناطق آسیب‌پذیرتر معرفی شده است.

جدول۲. وزن‌های بهینه شده دراستیک با استفاده از الگوریتم ژنتیک

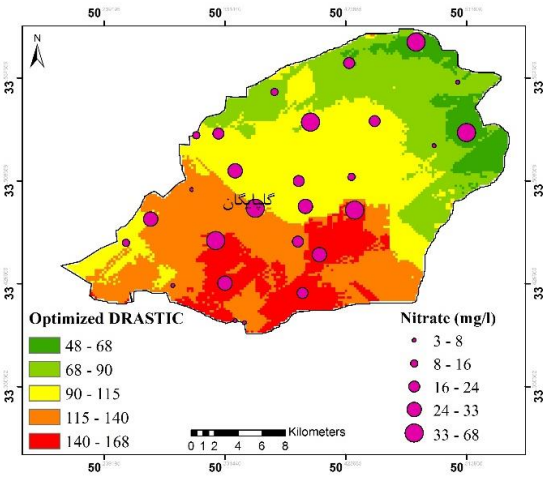
توپوگرافی	محیط خاک	محیط آبخوان	تغذیه	عمق آب زیرزمینی	هدایت هیدرولیکی	محیط غیر اشباع
۱/۷	۳/۱	۴/۱	۳/۲	۴/۳	۵	۳/۹

در این تحقیق از روش فازی مختلف ساگنو (SFL)، برای بهینه‌سازی مدل دراستیک اولیه استفاده شد. به‌طوری‌که ابتدا در مرحله آموزش اقدام به تصحیح مقادیر آسیب‌پذیری شد و سپس با آموزش سه مدل فوق‌الذکر صحت‌سنجی مدل با استفاده از مقادیر آسیب‌پذیری و مقادیر نیترات انجام شد. اولین مرحله در روش‌های فازی، دسته‌بندی داده‌ها و تعیین توابع عضویت می‌باشد. در این تحقیق به منظور دسته‌بندی داده‌ها در مدل ساگنو از روش کاهشی استفاده گردید. پارامتر اصلی در روش دسته‌بندی کاهشی در مدل SFL برای تعیین دسته‌ها و قوانین اگر-آنگاه، شعاع دسته‌بندی می‌باشد. مقادیر این پارامتر بین یک و صفر می‌باشد (Hongxing et al., 2001). کاهش شعاع دسته‌بندی باعث افزایش دسته‌ها و قوانین و افزایش آن باعث کاهش دسته‌ها و قوانین خواهد بود (Chiu, 1994). در مدل SFL براساس کمترین مقدار RMSE که برابر ۴/۴۲ می‌باشد، شعاع دسته‌بندی ۰/۶ انتخاب شد. بر این اساس داده‌های ورودی که شامل عمق آب زیرزمینی، تغذیه، محیط آبخوان، محیط خاک، شیب توپوگرافی، ناحیه غیراشباع، هدایت هیدرولیکی، غلظت نیترات و شاخص دراستیک بودند، به ۶ دسته تقسیم شد و۶ قانون نیز تولید شد. تابع عضویت خروجی مدل ساجنو، تابعی است خطی که بر اساس ورودی‌ها ساخته می‌شود. بنابراین، مدل SFL با ۴۲ تابع عضویت گوسی برای داده‌های ورودی و ۶ تابع عضویت خطی برای خروجی تهیه شد. در این مدل برای مرحله آموزش، مقادیر RMSE و R^2 به ترتیب ۴/۴۲ و ۰/۹۶ به دست آمد و سپس مدل برای مرحله آزمایش اجرا شد.



ب)

الف)



ج)

شکل ۷- نقشه‌های آسیب‌پذیری با استفاده از: الف) دراستیک معمولی، ب) دراستیک بهینه شده با الگوریتم ژنتیک، ج) دراستیک بهینه شده با روش فازی

به منظور ارزیابی صحت آسیب‌پذیری دراستیک بهینه شده از غلظت نیترات اندازه‌گیری شده استفاده شد. نتیجه داده‌های نیترات بر روی نقشه نهایی مدل‌ها منطبق شد (شکل ۸). برای صحت‌سنجی روش‌های استفاده شده در محدوده مورد مطالعه از داده‌های غلظت نیترات استفاده شد. در همین راستا برای بررسی دقیق‌تر و همچنین مقایسه روش‌ها، از روش محاسبه شاخص همبستگی (CI[۴۴]) که توسط فیجانی(۲۰۱۳) ارائه گردید، برای ارزیابی روش‌های مختلف و داده‌های نیترات استفاده شد. برای این منظور مقادیر نیترات به سه دسته نیترات کم، متوسط، زیاد تقسیم‌بندی شده و سپس تعداد چاه‌هایی که مقادیر نیترات آن با نقشه‌های آسیب‌پذیری دارای ارزش یکسانی است و در یک گروه قرار دارند به ۳ ضرب می‌شوند، آن تعداد از چاه‌هایی که مقادیر نیترات و گروه آسیب‌پذیری آن به مقدار ۱ و ۲ اختلاف دارند به ترتیب در ۲ و ۱ ضرب می‌شوند. سپس مقادیر حاصل باهم جمع بسته می‌شود و شاخص همبستگی (CI) به دست می‌آید که این می‌تواند همبستگی بین روش‌های آسیب‌پذیری و مقادیر نیترات را نشان دهد. CI بالاتر به معنی همبستگی بیشتر است. انطباق چاه‌های با سه سطح آلودگی نیترات و دسته‌های آسیب‌پذیری پیش‌بینی شده توسط روش‌های دراستیک و دراستیک اصلاح‌شده با روش تئوری کاتاستروف و منطق فازی درجدول (۳) آورده شده است. بر اساس نتایج حاصل در ارزیابی آسیب‌پذیری، دراستیک تصحیح شده با روش تئوری کاتاستروف با داشتن بیشترین شاخص همبستگی (CI) از اولویت بالاتری برخوردار می‌باشد.

جدول ۳. شاخص همبستگی روش‌های مورد بررسی با استفاده از نیترات

روش	گروه	نمونه‌های نیترات			
		بالا	متوسط	پایین	شاخص همبستگی(CI)
دراستیک	بالا	۴	۲	۲	CI= ۵۷
	متوسط	۳	۳	۳	
	پایین	۴	۴	۲	
دراستیک بهینه شده با منطق فازی	بالا	۳	۲	۲	CI= ۵۹
	متوسط	۳	۳	۴	
	پایین	۳	۳	۴	
دراستیک تصحیح شده با الگوریتم ژنتیک	بالا	۶	۲	۳	CI= ۶۵
	متوسط	۳	۵	۲	
	پایین	۲	۲	۳	
نحوه محاسبه شاخص همبستگی برای دراستیک معمولی: ۸۴= ۱(۴+۲) + ۲(۳+۴+۳+۲) + ۳(۲+۳+۴)					

[44] Correlation Index

۴. نتیجه‌گیری

به دلیل اهمیت موضوع در منطقه گلپایگان، در مطالعه حاضر، بررسی مناطق دارای خطر آلودگی با استفاده از روش آسیب‌پذیری دراستیک مورد بررسی قرار گرفته است و نقشه آسیب‌پذیری حاصل با استفاده از الگوریتم ژنتیک و منطق فازی ساگنو بهینه گردیده است. بر اساس نتایج مدل دراستیک بخش‌های جنوبی دشت گلپایگان به‌عنوان مناطق آسیب‌پذیرتر معرفی شدند. در روش الگوریتم ژنتیک وزن‌های بهینه پارامترهای دراستیک با بیشینه کردن تابع هدف به دست آمد. بر اساس روش الگوریتم ژنتیک، عمق آب زیرزمینی، هدایت هیدرولیکی و محیط غیر اشباع به ترتیب بیشترین تاثیر را در آسیب‌پذیری آب زیرزمینی منطقه دارند. نقشه بهینه شده با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد که حدود ۶، ۲۳، ۳۴، ۲۱ و ۱۶ درصد از دشت به ترتیب در مناطق با آسیب‌پذیری خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد واقع‌شده‌اند. بر اساس نتایج شاخص همبستگی(CI)، دراستیک بهینه شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک به دلیل داشتن بیشترین شاخص همبستگی (CI) با نیترات از اولویت بالاتری در شناسایی مناطق در معرض خطر آلودگی برخوردار می‌باشد. به طور کلی شناسایی مناطق مستعد به آلوده شدن با استفاده از روش‌های مناسب، منابع و عوامل موثر در آلودگی، می‌تواند برای مدیریت و نظارت صحیح آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج حاصل از تطابق نقشه‌های شاخص آسیب‌پذیری با توزیع غلظت نیترات و مقادیر R^2 نشان داد که تصحیح وزن مربوط به پارامترهای مدل دراستیک بر اساس خصوصیات هر منطقه می‌تواند در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان منطقه مفید باشد.

منابع

مهندسین مشاور و خدمات زمین فیزیک. ۱۳۷۹. گزارش مطالعات ژئوفیزیکی در منطقه گلپایگان.

سازمان هواشناسی استان اصفهان. ۱۳۹۷. گزارش وضعیت هواشناسی استان اصفهان.

Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R. 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrogeologic settings. US EPA/Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory. EPA/600/2–85/018.

Antonakos, A., Lambrakis, N. 2007. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. Journal of Hydrology. 12: 288– 304.

Babiker, I.S., Mohamed, M.M.A., Hiyama, T. & Kato, K. 2005. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara, Heights, Gifu Prefecture, central Japan. Science of the Total Environment. 345: 127–140.

Baghapour, M.A., Fadaei Nobandegani, A., Talebbeydokhti, N., Bagherzadeh, S., Nadiri, A.A., Gharekhani, M., Chitsazan, N. 2016. Optimization of DRASTIC method by artificial neural network, nitrate vulnerability index, and composite DRASTIC models to assess groundwater vulnerability for unconfined aquifer of Shiraz Plain, Iran. Journal of Environmental Health Science and Engineering.43: 1343-1356.

Bennett, D., Xiao, N. and Armstrong. 2003. Using genetic algorithms to create multicriteria class intervals for choropleth maps.Annals of the Association of American Geographers, 93(3): 595–623.

Boughriba, M., Barkaoui, A., Zarhloule, Y., Lahmer, Z., El-Houadi, B., Verdoya, M. 2009. Groundwater vulnerability and risk mapping of the Angad transboundary aquifer using DRASTIC index method in GIS environment. Arabian Journal of Geoscience. 3: 207-220.

Blum and Roli, 2003. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. Journal ACM Computing Surveys (CSUR). 35: 268-308.

Emberger, L. 1952. Sur le quotient pluviothermique. C.R. Sciences. 234: 2508-2511.

Holland, J. H. 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press.

Lee, S. Y., Gilkes, R. J. 2005. Groundwater geochemistry and composition of hardpans in southwestern Australian regolith. Journal of Geoderma. 126(1): 59-84.

Fijani, E., Nadiri, A.A., Moghaddam, A.A., Tsai, F.T.C., Dixon, B. 2013. Optimization of DRASTIC method by supervised committee machine artificial intelligence to assess groundwater vulnerability for Maragheh–Bonab plain aquifer, Iran. Journal of Hydrolgy. 503:89–100.

Nadiri, A.A., Norouzi, H., Khatibi, R., Gharekhani, M. 2019. Groundwater DRASTIC Vulnerability Mapping by Unsupervised and Supervised Techniques Using a Modelling Strategy in Two Levels. Journal of Hydrology. 574: 744-759.

Niknam, R., Mohammadi, K., Majd, V. 2007. Groundwater Vulnerability Evaluation of Tehran-Karaj Aquifer Using DRASTIC Method and Fuzzy Logic, Iran Water Resources Research. 2: 39-47.

Norouzi, H., Moghaddam, A.A., Nadiri, A.A. 2016. Determining vulnerable areas of Malekan Plain Aquifer for Nitrate, Using Random Forest method, Journal of environmental studies. 41(4): 923-942.

Norouzi, H., Nadiri, A.A., Moghaddam, A.A. 2018. Identifying the Susceptible Area of Malikan Plain Aquifer to contamination using Fuzzy methodes, Journal of environmental studies. 44(2): 205-221.

Norouzi, H., Nadiri, A.A., Moghaddam, A.A., Gharekhani, M. 2018. Comparing Performans of Fuzzy Logic, Artificial Neural Network and Random Forest Models in Transmissivity Estimation of Malekan Plain Aquifer, Journal of ecohydrology. 5(3): 739-751.

Voudouris. K., Nazakis. N., Polemio. M., Kareklas. K., 2010. Assessment of intrinsic vulnerability using the DRASTIC model and GIS in the Kiti aquifer, Cyprus. European Water journal. 30:13-24.

Vrba, J., Zoporozec, A. 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability, International Contributions to Hydrogeology. Verlag Heinz Heise GmbH and Co, KG.

Panagopoulos, G., Antonakos, A., Lambrakis, N. 2005. Optimization of DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment by the use of simple statistical methods and GIS, Hydrogeology Journal. 12: 432-458.

Piscopo, G. 2001. Groundwater vulnerability map, explanatory notes, Castlereagh Catchment, NSW, Department of Land and Water Conservation, Australia.

Sadeghfam, S., Hassanzadeh, Y., Nadiri, A., Zarghami, M. 2016. Localization of Groundwater Vulnerability Assessment Using Catastrophe Theory. Water Resour Manage. 30: 4585–4601.