

ارزیابی آسیب پذیری کیفی آبخوان دشت بیرجند به روش SINTACS

مبین افتخاری^{۱*}؛ محمد اکبری^۲ و عباسعلی قزل سوفلو^۳

۱- عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

(تاریخ دریافت ۹۷/۱۰/۱۷ - تاریخ پذیرش ۹۸/۰۱/۱۰)

چکیده:

با توجه به اهمیت منابع آب های زیرزمینی و بحران کم آبی در ایران باید توجه بسیار زیادی به این منابع شود. یکی از چالش ها در این خصوص آلوده شدن این منابع است، لذا با بررسی های مناسب باید مناطقی که تحت تأثیر آلودگی قرار دارند شناسایی شده و برای رفع آلودگی اقدامات لازم صورت گیرد. در بسیاری از موارد، آلودگی آب های زیرزمینی بعد از آلوده شدن چاه های آب شرب شناسایی می شوند. شناسایی مناطق آسیب پذیر آبخوان می تواند زمینه ساز اقدامات هدفمند پیشگیرانه از آلودگی آب های زیرزمینی گردد. روش های مختلفی برای ارزیابی آسیب پذیری ارائه شده است که یکی از پر استفاده ترین و شناخته شده ترین روش های شاخص همپوشانی به عنوان مدل SINTACS در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. هدف از این مطالعه ارزیابی آسیب پذیری کیفی آبخوان دشت بیرجند با استفاده از مدل SINTACS در دوره آماری سالهای ۹۵ تا ۹۶ می باشد. بر اساس نتایج این ارزیابی نقشه پهنه بندی آسیب پذیری SINTACS نشان می دهد که ۱۲/۸۱ درصد از مساحت منطقه مطالعاتی دارای آسیب پذیری در محدوده متوسط تا زیاد، ۸۰/۴۷ درصد از مساحت منطقه دارای آسیب پذیری زیاد و ۶/۷۱ درصد از مساحت منطقه دارای آسیب پذیری خیلی زیاد می باشد. جهت صحت سنجی مدل SINTACS به بررسی ارتباط بین شاخص آسیب پذیری و مقادیر غلظت نیترات بدست آمده از ۲۱ نمونه آب زیرزمینی پرداخته شده است. ضریب همبستگی بدست آمده بین شاخص آسیب پذیری SINTACS و غلظت نیترات ۷۱ درصد به دست آمده است که نشان دهنده همبستگی مناسب این مدل با غلظت نیترات به عنوان شاخص آلودگی آبهای زیرزمینی است.

کلید واژگان: آب زیرزمینی، آلودگی، سامانه اطلاعات جغرافیایی، نیترات، SINTACS

۱. مقدمه

خاک^۷، محیط آبخوان^۸، هدایت هیدرولیکی^۹ و توپوگرافی^{۱۰} می باشد. این مدل یک روش هم پوشان است که در آن اطلاعات بدست آمده از پارامترهای مختلف به صورت تلفیقی مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد و سپس توسط سامانه سیستم اطلاعات جغرافیایی مورد پردازش قرار می گیرد (Civita, 1994). یکی از مزیت های اصلی مدل SINTACS (1994) انجام ارزیابی آسیب پذیری با استفاده از تعداد زیادی لایه های اطلاعاتی است که تأثیر خطاها و یا عوامل نامعلوم را بر روی خروجی نهایی محدود می کند. Pisciotta و همکاران (۲۰۱۵) به منظور ارزیابی آسیب پذیری ذاتی در برابر خطر آلودگی نیترات در آب های زیرزمینی و مقایسه اثرات زیست محیطی توسعه کشاورزی بیش از حد در منطقه مدیترانه Sicily واقع در ایتالیا از دو روش SINTACS و DRASTIC استفاده کردند. مقادیر غلظت نیترات به دست آمده با مقادیر SINTACS و DRASTIC به روش همبستگی پیرسون مقایسه شد؛ و نتایج گویای این بود که روش SINTACS همبستگی بیشتری با مقادیر نیترات دارد. Qadir و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل SINTACS توانستند ارزیابی از آسیب پذیری آبخوان دشت سلیمانیه واقع در استان کردستان عراق داشته باشند. نتایج این مدل با استفاده از داده های ۹۶ حلقه چاه آب شرب واقع در دشت نشان دهنده همبستگی بالای مدل مذکور و مقدار نیترات واقع در دشت

مفهوم آسیب پذیری اولین بار در سال ۱۹۶۰ میلادی در کشور فرانسه مطرح شد. آسیب پذیری را می توان به عنوان امکان نفوذ و پخشیدگی آلاینده ها از سطح زمین به آب زیرزمینی تعریف کرد (Vrba et al., 1994). آسیب پذیری نوعی خصوصیت نسبی بدون بو و غیر قابل اندازه گیری است و به ویژگی های آبخوان محیط زمین شناسی و هیدروژئولوژی بستگی دارد (Antonakos et al., 2007). روش های مختلفی برای ارزیابی آسیب پذیری ارائه شده است که می توان به روش های پردازشی^۱، همپوشانی^۲ و آماری^۳ اشاره کرد (Tesoriero et al., 1998). روش های پردازشی از مدل های شبیه سازی برای تخمین حرکت آلاینده استفاده می کنند. روش های آماری از روابط همبستگی بین متغیرهای مکانی و میزان آلاینده های موجود در آب زیرزمینی استفاده می کند؛ و همچنین روش های همپوشانی پارامترهای کنترل کننده حرکت آلاینده ها از سطح زمین به منطقه اشباع را تلفیق کرده و شاخصی به نام شاخص آسیب پذیری را در نقاط مختلف یک منطقه تعیین می کند (Tesoriero et al., 1998). یکی از پر استفاده ترین و شناخته شده ترین روش های شاخص همپوشانی مدل SINTACS می باشد (Civita, 1994)؛ که شامل پارامترهای عمق آب زیرزمینی^۴، تغذیه خالص^۵، محیط غیر اشباع^۶، جنس

7 - Typology of Overburden

8 - Hydrogeological characteristics of the Aquifer

9 - Hydraulic Conductivity

10 - Slope of the topographic

1- Processing Methods

2 - Overlapping Methods

3 - Statistical Methods

4 - Soggiacence

5 - Actual Infiltration

6 - Non saturated Zone

۲. مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه، دشت بیرجند می باشد که در قسمت شمالی ارتفاعات باقران با مختصات ۵۹ درجه و ۱۳ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۲ درجه و ۵۳ دقیقه عرض جغرافیایی قرار گرفته است. شکل این دشت بصورت مستطیل بوده که از شمال به ارتفاعات مولی، مارکوه و از جنوب به ارتفاعات باقران، و کوه رچ، از شرق به کوه بندر و امین آباد و از غرب به ارتفاعات کَرنگ و چنگ محدود می شود؛ و در بخش مرکزی آن، آبخوان آبرفتی تشکیل شده است (شکل ۱). وسعت کل حوضه آبریز دشت بیرجند در حدود ۳۴۲۵ کیلومتر مربع بوده که از این میزان حدود ۹۸۰ کیلومتر مربع را دشت و مابقی را ارتفاعات تشکیل می دهد. متوسط بارش در این حوزه نزدیک به ۱۷۰ میلیمتر در سال بوده و حداکثر و حداقل ارتفاع دشت بیرجند از سطح دریا ۱۴۹۱ و ۱۲۹۵ متر می باشد.

۲.۲. مدل SINTACS

این مدل توسط Civita در سال ۱۹۹۴ میلادی به منظور ارزیابی قابلیت آسیب پذیری آلودگی نسبی آب های زیرزمینی با استفاده از هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی به کار گرفته شده است. در این روش شاخص آسیب پذیری از مجموع حاصل ضرب وزن و رتبه هفت پارامتر یادشده، مطابق رابطه ۱ به دست می آید. کلاسه بندی و ارزش گذاری کلاس های مختلف مربوط به هر کدام از پارامترها در محیط GIS انجام میشود. به هر کدام از مشخصه ها با توجه به اهمیت تاثیر در آلودگی سیستم آب زیرزمینی یک وزن نسبی از ۱ تا ۵ تعلق میگیرد که نشان دهنده طریق

سلیمانیه می باشد. Ewusi و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی آسیب پذیری آبخوان شهر ترکا واقع در کشور غنا با استفاده از مدل SINTACS پرداختند.

نتایج این تحقیق نشان داد با توجه به وجود معدن و فعالیت های صنعتی واقع در آبخوان مورد مطالعه بالای ۵۰ درصد مساحت آبخوان دارای آسیب پذیری بالا بوده و همچنین طی تحلیل حساسیت های پارامترهای موجود در آبخوان، عمق تا سطح ایستابی و ضریب هدایت هیدرولیکی تأثیر مهمی در آسیب پذیری آبخوان داشته است. Mastrocicco و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مدل SINTACS نسبت به تهیه نقشه آسیب پذیری دشت کمپانی واقع در جنوب کشور ایتالیا اقدام کردند. نتایج نشان داد به دلیل وجود زمین های کشاورزی با مساحت بسیار و استفاده زیاد از کودهای ازت و نیتروژنی جهت بهره وری بیشتر از محصولات کشاورزی آسیب پذیری، درصد بالایی از منطقه در حد وسیع بود و نیاز به روشی جهت کنترل کودهای شیمیایی توسط کشاورزان می باشد. در این پژوهش با استفاده از روش SINTACS که دارای بیشترین پارامتر هیدروژئولوژی نسبت به سایر روش های همپوشانی می باشد استفاده شده است. با توجه به اینکه دشت بیرجند از دشت های مهم استان خراسان جنوبی به شمار می رود، این دشت برای مطالعه انتخاب گردیده است. علاوه بر شناخت وضعیت آسیب پذیری آبخوان دشت بیرجند نسبت به آلودگی در خصوص پارامترهای تاثیرگذار بر آسیب پذیری آبخوان دشت مذکور جهت مدیریت کیفی منابع آب زیرزمینی نیز بررسی لازم صورت گرفت.

محیط آبخوان، C هدایت هیدرولیکی، Sv توپوگرافی، w وزن و r رتبه مربوط به هرکدام از پارامترهای مدل می‌باشد. در جدول شماره ۱ وزن ها و رتبه های مربوط به مدل SINTACS ملاحظه می شود. همچنین در شکل ۲ وزن ها و رتبه های موجود موثر در تهیه نقشه آسیب پذیری کیفی آبخوان دشت بیرجند به روش SINTACS نیز ارائه شده است.

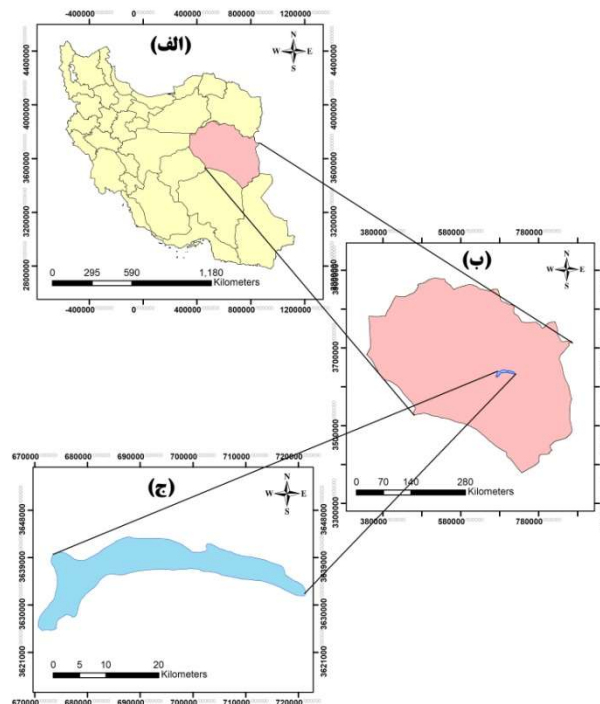
نسبی هر مشخصه بر انتقال آلودگی در آب های زیرزمینی است (Civita, 1994). در این مدل به بازه های هر یک از مشخصه های هیدرولوژیک نیز یک رتبه از ۱ تا ۱۰ بر اساس تاثیر آنها بر آسیب پذیری اختصاص داده می‌شود و به کاربر این امکان را می‌دهد که مدل SINTACS را با ناحیه مورد مطالعه استفاده قرار دهد (Civita, 1994).

(۱)

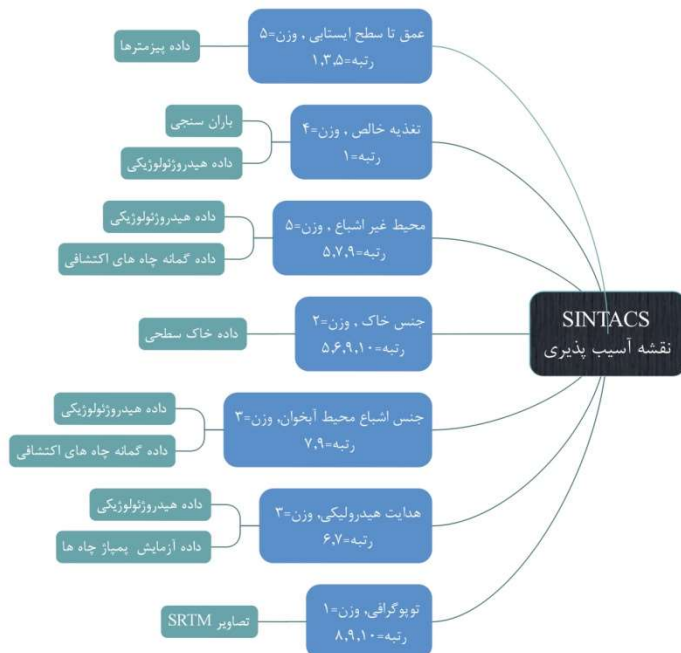
SINTACS-

$$\text{Index} = S_o r S_{ow} + I_r I_w + N_r N_w + T_r T_w + A_r A_w + C_r C_w + S_v r S_v w$$

که در این رابطه S_o عمق آب زیرزمینی، I تغذیه خالص، N محیط غیراشباع، T جنس خاک، A جنس



شکل ۱- موقعیت کلی دشت بیرجند. (الف) ایران (ب) استان خراسان جنوبی (ج) آبخوان دشت بیرجند



شکل ۲- وزن ها و رتبه های موجود موثر در تهیه نقشه آسیب پذیری کیفی آبخوان دشت بیرجند به روش SINTACS

جدول ۱- وزن ها و رتبه های مربوط به مدل SINTACS

رتبه	پارامتر	رتبه	پارامتر
	هدایت هیدرولیکی (متر بر روز) (وزن ۳)		عمق تا سطح ایستابی (متر) (وزن ۵)
۳	۰/۰۷-۰/۱	۹	۰-۳
۴	۰/۱-۰/۸۶۴	۸	۳-۵
۵	۰/۸۶۴-۴/۳۲	۷	۵-۷
۶	۴/۳۲-۸/۶۴	۶	۷-۱۰
۷	۸/۶۴-۴۳/۲	۵	۱۰-۱۳
۸	۴۳/۲-۸۶/۴	۴	۱۳-۲۰
۹	۸۶/۴-۳۶۶/۳۹	۳	۲۰-۳۰
		۲	۳۰-۳۶
		۱	>۳۶

ادامه جدول ۱- وزن ها و رتبه های مربوط به مدل SINTACS

رتبه	پارامتر	رتبه	پارامتر
	توپوگرافی: (وزن ۲)		محیط اشباع آبخوان (وزن ۳)
۱۰	۰-۳	۹	ماسه و گراول
۹	۳-۵	۷	ماسه و گراول با مقداری سیلت و رس
۸	۵-۷		رس و سیلت
۷	۷-۱۰/۵	۳	رس و سیلت
۶	۱۰/۵-۱۳/۵		تغذیه خالص (وزن ۴)
۵	۱۳/۵-۱۶/۵	۱	۰-۵۰
۴	۱۶/۵-۱۹/۵	۳	۵۰-۱۰۰
۳	۱۹/۵-۲۳	۶	۱۰۰-۱۷۵
۲	۲۳-۲۷/۵	۸	۱۷۵-۲۵۰
۱	>۲۷/۵	۹	>۲۵۰
	جنس خاک (وزن ۴)		محیط نیمه اشباع (وزن ۵)
۶	لوم		رسوبات آبرفتی ریزدانه مانند رس و سیلت
۵	لوم ماسه ای		ماسه
۹	ماسه	۵	رسوبات آبرفتی درشت دانه مانند شن و ماسه و گراول
۱۰	شن	۷	رس و سیلت
		۹	
		۲	

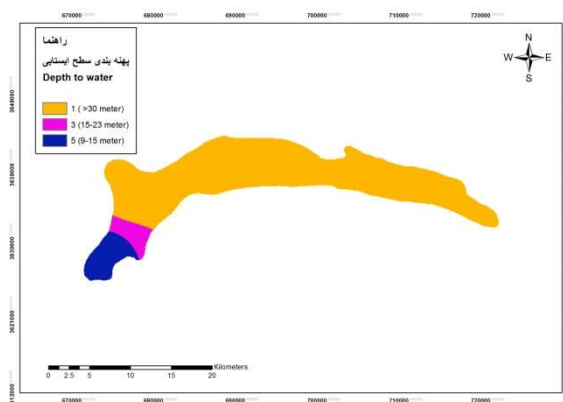
پیزومتر واقع در دشت که برای دوره یک ساله از مهر ۱۳۹۵ تا شهریور ۱۳۹۶ از طریق اداره آب منطقه ای استان خراسان جنوبی جمع آوری شده بود استفاده شد. جهت پهنه بندی عمق آب زیرزمینی از روش درونیابی کریجینگ عمومی^{۱۲} به دلیل داشتن کمترین خطا استفاده گردیده است (شکل ۳).

۲.۲.۱. عمق آب زیرزمینی

به فاصله بین سطح زمین تا سطح ایستابی، عمق آب زیرزمینی گفته می شود. به عبارت دیگر این پارامتر بیان کننده عمقی است که آلودگی باید طی کند تا به آب زیرزمینی برسد (Bartazs et al., 2015). به منظور تهیه لایه عمق تا سطح ایستابی از اطلاعات سطح آب در پیزومترها شامل نام پیزومترها، موقعیت پیزومترها برحسب UTM و عمق سطح آب استفاده گردید. (جدول ۲) اطلاعات مورد نیاز برای تهیه این لایه از موقعیت جغرافیایی تراز سطح ایستابی و ارتفاع ۱۵

جدول ۲- موقعیت پیزومترهای واقع در آبخوان

UTM - Y	UTM - X	ردیف	UTM - Y	UTM - X	ردیف
۳۶۳۴۵۲۸	۶۷۵۷۹۵	۹	۳۶۳۸۹۷۰	۷۰۱۵۳۴	۱
۳۶۳۶۵۴۸	۷۰۵۱۰۶	۱۰	۳۶۳۹۲۷۳	۶۹۵۹۴۰	۲
۳۶۳۷۵۴۲	۶۸۸۰۵۸	۱۱	۳۶۴۰۱۱۹	۶۸۷۷۹۰	۳
۳۶۳۵۵۸۱	۷۱۱۰۱۳	۱۲	۳۶۳۸۳۸۳	۶۷۴۴۹۹	۴
۳۶۴۱۱۴۴	۶۹۴۲۳۹	۱۳	۳۶۲۹۳۶۱	۶۷۳۸۰۲	۵
۳۶۳۸۵۷۰	۶۸۱۴۵۰	۱۴	۳۶۳۸۲۲۷	۶۸۰۹۴۹	۶
۳۶۲۹۹۳۴	۶۷۵۸۰۴	۱۵	۳۶۳۸۳۰۰	۷۱۲۸۰۰	۷
			۳۶۳۷۶۹۵	۶۸۴۷۷۳	۸



شکل ۳- نقشه سطح ایستابی

۲.۲.۲. تغذیه خالص

تغذیه خالص، مقدار آبی است که از سطح زمین نفوذ می کند و خود را به سطح ایستابی می رساند. همچنین با افزایش میزان تغذیه خالص در یک منطقه، پتانسیل آلودگی آب های زیرزمینی آن منطقه افزایش خواهد یافت (Naseri et al., 2011). برای بدست آوردن لایه تغذیه خالص، ابتدا با توجه به معیارهای جدول ۳ طبقه بندی شد. سپس معادله پیسکوپو (Piscop., 2001) رابطه ۲ برای محاسبه تغذیه پتانسیل یک منطقه از استفاده می شود (شکل ۴).

(۲)

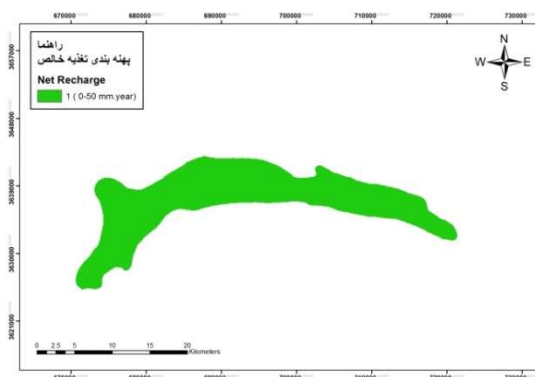
درصد شیب + میزان بارندگی + نفوذپذیری خاک =
تغذیه خالص

۳.۲.۲. محیط غیر اشباع

منطقه غیراشباع شامل محدوده بین سطح ایستابی و محیط خاک که غیراشباع می باشد. این محدوده اساساً غیراشباع بوده و یا به صورت ناپیوسته اشباع می باشد و عبور آلاینده و رقیق شدن آن را کنترل می کند (Ahmadi et al., 2009).

جدول ۳- رتبه بندی تغذیه خالص

تغذیه خالص		نفوذ پذیری خاک		بارش (میلیمتر)		شیب (درصد)	
فاکتور	محدوده	فاکتور	محدوده	فاکتور	محدوده	فاکتور	محدوده
۱۰	۱۱ تا ۱۳	۱	خیلی کم	۱	۵۰۰ <	۴	۲ <
۸	۹ تا ۱۱	۲	کم	۲	۷۰۰ تا ۵۰۰	۳	۲ تا ۱۰
۵	۷ تا ۹	۳	متوسط	۳	۸۵۰ تا ۷۰۰	۲	۱۰ تا ۳۳
۳	۵ تا ۷	۴	زیاد	۴	۸۵۰ >	۱	۳۳ >
۱	۳ تا ۵	۵	خیلی زیاد				



شکل ۴- نقشه تغذیه خالص

پذیری، بافت و درصد مواد آلی خاک بستگی دارد (Kim.,1999). جهت تهیه پارامتر جنس خاک از نقشه استخراج شده با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ توسط اداره جهاد کشاورزی استان خراسان جنوبی استفاده شد و سپس برای تهیه نقشه رستری نقشه اسکن شده اولیه زمین مرجع^{۱۴} و سپس رقومی شد (شکل ۶).

۵.۲.۲. محیط آبخوان

این بخش به خصوصیات مواد تشکیل دهنده منطقه اشباع مانند میزان تخلخل، جنس و اندازه ذرات مربوط می باشد (Brahim et al.,2012). به منظور تهیه لایه محیط آبخوان، از لاگ ۱۹ چاه مشاهده ای و بهره-

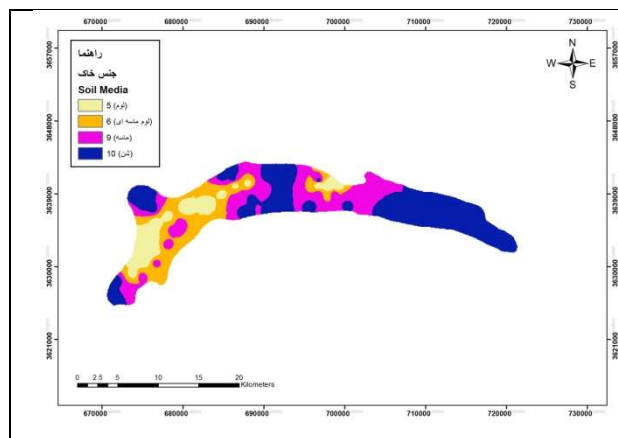
به منظور تهیه لایه محیط غیراشباع، از لاگ ۱۹ چاه مشاهده ای و بهره برداری موجود در آبخوان دشت بیرجند که از طریق اداره آب منطقه ای استان خراسان جنوبی استفاده گردید؛ توسط نرم افزار Techlog تحلیل و ارزیابی شد و جهت پهنه بندی با استفاده از روش درونیابی معکوس فاصله^{۱۳} به دلیل داشتن کمترین خطا انجام شد (شکل ۵).

۴.۲.۲. جنس خاک

این بخش شامل قسمت بالایی منطقه غیر اشباع می باشد که تا حد نفوذ ریشه گیاهان یا فعالیت موجودات ارگانیکی ادامه دارد (Naseri et al.,2011). پتانسیل آلودگی آبخوان به خصوصیات خاک مانند نفوذ

14 - Georeferencing

13 - Inverse Distance Weighted



شکل ۶- نقشه جنس خاک

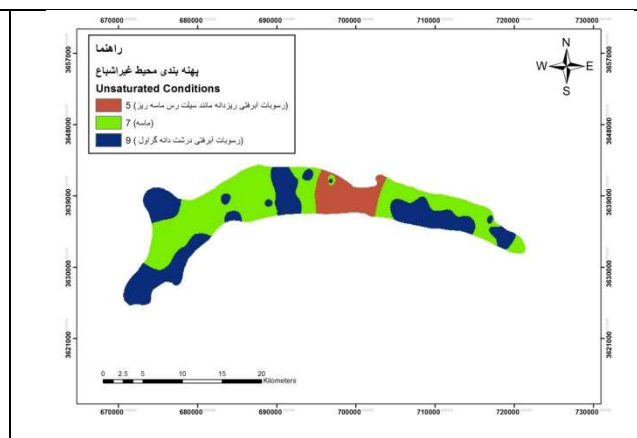
پهنه بندی با استفاده از روش درونیابی معکوس فاصله به دلیل داشتن کمترین خطا انجام شد (شکل ۸).

۷.۲.۲. توپوگرافی

این پارامتر در واقع شیب سطح زمین است. شیب سطح زمین بر حرکت و نفوذ مواد آلاینده تأثیر می گذارد. هر چقدر که میزان شیب کم باشد، مدت زمان تماس آلاینده با سطح زمین افزایش می یابد و به دنبال آن احتمال نفوذ آن به درون زمین نیز افزایش می یابد. در نتیجه با کاهش شیب سطح زمین، امکان آسیب پذیری آبخوان افزایش مییابد (Fadaei Nobandeghani, 2014). تهیه نقشه توپوگرافی با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر در نرم افزار ARC GIS تهیه شد (شکل ۹).

۳.۲. نیترات

از آنجا که نیترات به طور معمول در شرایط طبیعی در آب های زیرزمینی وجود ندارد آن را به عنوان یک شاخص حرکت آلاینده از سطح به آب زیرزمینی بخصوص در اراضی کشاورزی در نظر می گیرند و به عنوان یک شاخص معیار در کیفیت آب های زیرزمینی پیشنهاد شده است (Huan et al., 2012).



شکل ۵- نقشه محیط غیراشباع

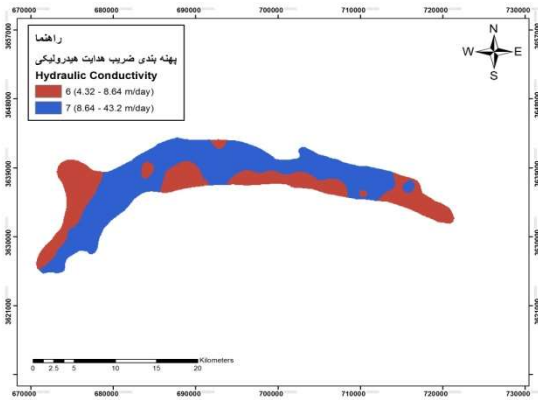
برداری موجود در منطقه که از طریق اداره آب منطقه ای استان خراسان جنوبی استفاده گردید؛ توسط نرم افزار Techlog تحلیل و ارزیابی شد. جهت پهنه بندی از روش درونیابی معکوس فاصله به دلیل داشتن کمترین خطا انجام شد (شکل ۷).

۶.۲.۲. هدایت هیدرولیکی

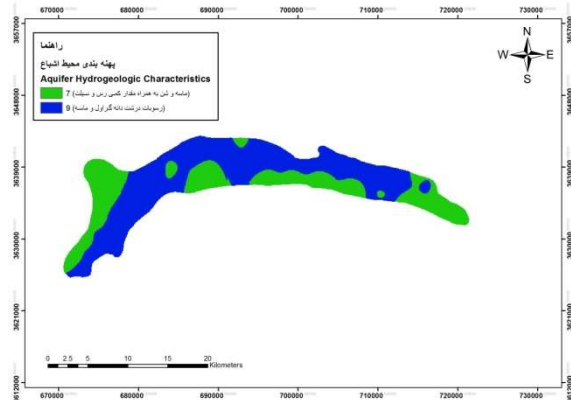
توانایی محیط آبخوان برای انتقال آب و مواد آلاینده همراه آن را هدایت هیدرولیکی می گویند. این پارامتر انتقال و پراکندگی آلاینده ها را از نقطه تزریق در داخل منطقه اشباع کنترل می کند (Mahmoodzadeh et al., 2013). هر چه هدایت هیدرولیکی بیشتر باشد، امکان جریان یافتن آلاینده ها در آبخوان بیشتر بوده و آسیب پذیرتر خواهد بود (Ahmadi et al., 2009). به منظور تهیه لایه هدایت هیدرولیکی ابتدا از داده های آزمایش پمپاژ که توسط سازمان آب منطقه ای استان خراسان جنوبی انجام شده، با استفاده از نرم افزار GW^{۱۰} تحلیل صورت گرفت و با استفاده لایه ضریب قابلیت انتقال بدست آمده و تقسیم این لایه بر ضخامت اشباع آبخوان لایه هدایت هیدرولیکی بدست می آید.

چاه های مشاهده ای واقع در آبخوان در شکل ۱۰ مشخص می باشد. جهت پهنه بندی با استفاده از روش درون یابی معکوس فاصله به دلیل داشتن کمترین خطا انجام شد (شکل ۱۱).

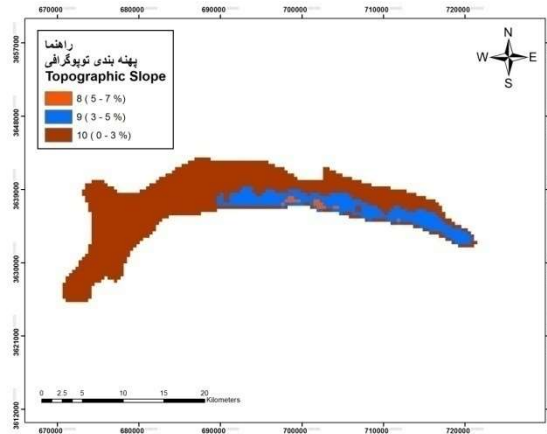
در این تحقیق از مقادیر نیترات ۲۱ حلقه چاه واقع در آبخوان دشت بیرجند که از طریق داده های آزمایشگاه کیفی اداره آب و فاضلاب شهرستان بیرجند در تاریخ تیرماه ۱۳۹۶ تهیه شده استفاده شده است؛ که موقعیت



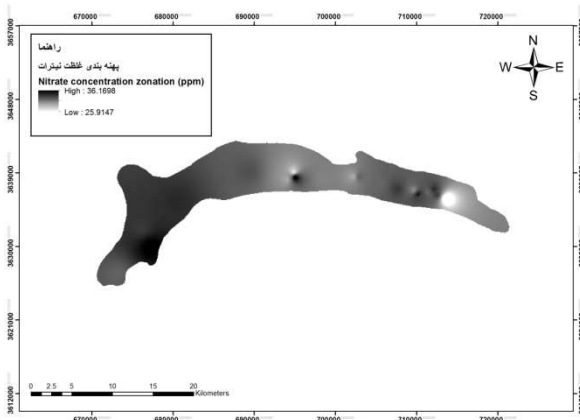
شکل ۸- نقشه هدایت هیدرولیکی



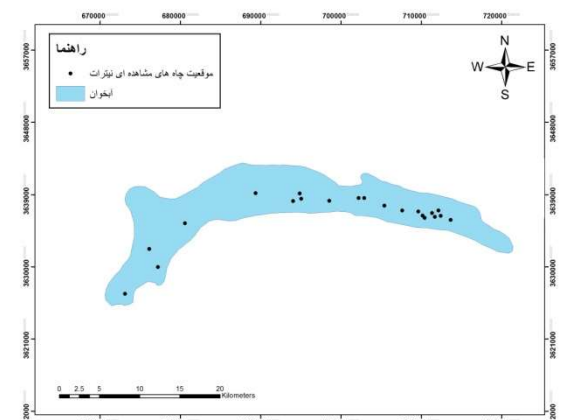
شکل ۷- نقشه جنس آبخوان



شکل ۹- نقشه پهنه بندی توپوگرافی



شکل ۱۱- نقشه پهنه بندی غلظت نیترات



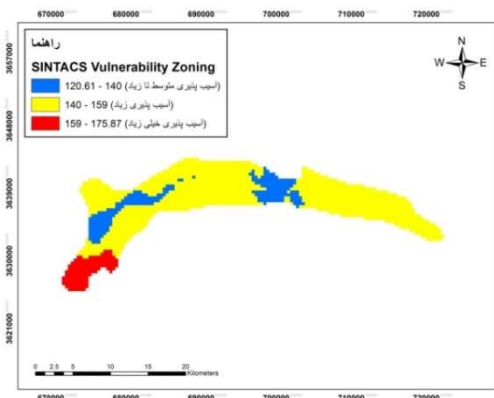
شکل ۱۰- نقشه موقعیت چاه های مشاهده ای نیترات

۳. نتایج

۱.۳. تحلیل حساسیت حذف نقشه

این تحلیل حساسیت توسط Lodwick و همکاران در سال ۱۹۹۰ میلادی معرفی شد. در این روش تغییرات شاخص آسیب پذیری به وسیله حذف یک یا چند لایه اطلاعاتی و به وسیله رابطه ۳ محاسبه می شود. در این رابطه S میزان حساسیت، V و V' به ترتیب شاخص های آسیب پذیری تغییر نیافته و تغییر یافته، N و n به ترتیب تعداد لایه های مورد استفاده برای محاسبه V و V' می باشد. شاخص آسیب پذیری تغییر نیافته در حقیقت با استفاده از هر هفت پارامتر و شاخص آسیب پذیری تغییر یافته با تعداد کمتری از پارامترها محاسبه می شود (Rahman, 2008).

$$S = \left(\frac{V}{N} - \frac{V'}{n} \right) \times 100 \quad (۳)$$



شکل ۱۲- نقشه آسیب پذیری آبخوان دشت بیرجند به روش SINTACS

با تلفیق ۷ نقشه معیار به کار رفته در مدل SINTACS در محیط GIS به روش هم پوشانی شاخص، شاخص های نهایی آسیب پذیری ذاتی آبخوان مورد مطالعه، محاسبه شد. بر این اساس، شاخص نهایی آسیب پذیری ذاتی، برای روش SINTACS بین ۱۲۰ تا ۱۷۶ قرار گرفت (شکل ۱۲). همچنین در این پژوهش ابتدا ضریب همبستگی بین پارامتر های مدل SINTACS محاسبه شد که طبق نتایج آزمون همبستگی یک رابط قوی بین جنس محیط آبخوان، جنس خاک و ضریب هدایت هیدرولیکی وجود دارد که بدلیل تأثیر مستقیم این پارامترها با یکدیگر می باشد.

P_w نیز به ترتیب وزن و نرخ مربوط به آن پارامتر و V نیز شاخص آسیب پذیری کل در آن ناحیه است (Rahman, 2008).

$$W = \left(P_r \times P_w / V \right) \times 100 \quad (۴)$$

۲.۳. تحلیل حساسیت تک پارامتر

در این روش وزن واقعی یا مؤثر هر پارامتر با استفاده از رابطه ۴ به دست آمده و با وزن نظری مقایسه می شود؛ که در این رابطه W، وزن مؤثر هر یک از پارامترها، P_r و

جدول ۴- آنالیز حساسیت حذف نقشه مدل SINTACS

شاخص تغییرات آسیب پذیری	لایه حذف شده						
	S	I	N	T	A	C	S
حداقل	۰/۷۳۱	۰/۰۰۶۸	۱/۷۸۵	۰/۱۰۳	۰/۵۵۶	۰/۳۲۰	۰/۳۰۹
حداکثر	۱/۳۳۶	۱/۰۵۹	۳/۶۱۵	۲/۳۲۶	۱/۹۵۱	۱/۲۸۳	۱/۱۷۹
میانگین	۰/۹۵۶	۰/۶۵۷	۲/۹۳۶	۱/۵۳۴	۱/۲۵۶	۰/۸۹۹	۰/۷۸۵
انحراف از معیار	۰/۱۱۱	۰/۱۹۴	۰/۲۶۴	۰/۴۶۰	۰/۲۲۵	۰/۱۶۸	۰/۱۴۱

جدول ۵- آنالیز حساسیت حذف تک پارامتر مدل SINTACS

شاخص تغییرات آسیب پذیری	پارامتر حذف شده						
	S	I	N	T	A	C	S
حداقل	۱۱/۳۶۸	۲/۲۷۴	۱۹/۱۶۷	۱۱/۱۸	۱۲/۳۶۲	۱۰/۴۴	۲/۷۹
حداکثر	۱۶/۶۹۲	۳/۳۱۶	۳۱/۱۷	۲۱/۱۸۴	۲۱/۸۴	۱۶/۵۸۲	۱۵/۴۱۷
میانگین	۱۳/۸۱	۲/۶۷۲	۲۶/۰۳۱	۱۷/۶۲	۱۵/۹۵۲	۱۳/۱۲۸	۴/۹۱۱
انحراف از معیار	۰/۷۶	۰/۱۴۹	۱/۵۷۶	۲/۰۷۲	۱/۵۱	۰/۸۷۱	۲/۶۳

نظری و باتوجه به اینکه بیش از ۶۰٪ لیتولوژی منطقه اشباع، درشت‌دانه می‌باشد بیشترین تاثیر را در آلودگی آبخوان دشت بیرجند دارد (شکل ۷)؛ همچنین پارامتر عمق تا سطح ایستابی تأثیر به‌سزایی در انتقال و پخشیدگی آلودگی به آب زیرزمینی دارد؛ زیرا پهنه بندی عمق آب بیانگر این بوده که قسمت غربی و جنوب غربی آبخوان دارای سطح ایستابی بالایی بوده که همین مناطق در نقشه آسیب پذیری دارای پتانسیل بیشتری در آلودگی آبخوان دارد (شکل ۳). از طرفی در تحلیل حساسیت‌ها می‌توان دریافت که پارامتر تغذیه

برای ارزیابی مدل و کسب اطلاعات ارزشمند از اثرات مقادیر رتبه و وزن اختصاص یافته به پارامترهای ورودی مدل SINTACS و عکس‌العمل مدل به تغییرات اعمالی، انجام آنالیز حساسیت کمک شایانی به ارزیابی حساسیت هر پارامتر مدل می‌کند. بدین منظور به دو روش کلی حذف لایه‌ها و آنالیز حساسیت پارامتر واحد، ارزیابی حساسیت پارامترهای مدل محاسبه گردید. در قسمت تحلیل حساسیت به دو روش حذف تک پارامتر و تک لایه نتایج بیانگر این می‌باشد که پارامترهای تاثیرگذاری مانند جنس آبخوان به دلیل بالا بودن وزن

خالص کمترین تأثیر را در انتقال آلودگی به آب زیرزمینی دارد زیرا مطابق شکل ۴ می توان دریافت که به دلیل ضعیف بودن بارشها و کمبود تغذیه خالص طی دوره مطالعاتی در منطقه کمترین وزن نظری را به خود اختصاص داده است.

۴. بحث و نتیجه گیری

در پژوهش حاضر پهنه بندی آسیب پذیری آبخوان دشت بیرجند با استفاده از یون نیترا ت به عنوان شاخص آلودگی ناشی از فاضلاب های شهری و پساب های کشاورزی در محیط GIS صورت گرفت. سپس با استفاده از روش SINTACS شاخص آسیب پذیری منطقه محاسبه شد. شاخص آسیب پذیری مدل SINTACS بین ۱۲۰ تا ۱۷۶ قرار گرفت. برای درک بهتر و نشان دادن وضعیت آسیب پذیری ذاتی منطقه، شاخص نهایی به دست آمده به ۳ کلاس مختلف طبقه بندی گردید. مطابق شکل ۱۲ نشان می دهد که ۱۲/۸۱ درصد از مساحت منطقه دارای آسیب پذیری در محدوده متوسط تا زیاد و ۸۰/۴۷ درصد از مساحت منطقه دارای آسیب پذیری زیاد و ۶/۷۱ درصد از مساحت منطقه دارای آسیب پذیری خیلی زیاد می باشد. جهت صحت سنجی مدل SINTACS به بررسی ارتباط بین شاخص آسیب پذیری و مقادیر غلظت نیترا ت به دست آمده از ۲۱ نمونه آب زیرزمینی پرداخته شده است. جهت تعیین میزان همبستگی میان لایه نیترا ت و لایه های شاخص SINTACS در محیط نرم افزار MATLAB همبستگی به دست آمده است. ضریب همبستگی به دست آمده بین شاخص آسیب پذیری SINTACS و غلظت نیترا ت ۷۱ درصد به

دست آمده است؛ این مقدار همبستگی نشان می دهد که مدل SINTACS از همبستگی مناسبی با غلظت نیترا ت برخوردار می باشد. بررسی جداول ۴ و ۵ به عنوان تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SINTACS در ارزیابی آسیب پذیری آبخوان، نشان می دهد اولاً استفاده از روشهای مختلف تحلیل حساسیت حذف نقشه و تحلیل حساسیت تک پارامتر نتایج تقریباً مشابهی را نشان داده و روند حساسیت پارامترها در مدل یکسان می باشد. ثانیاً بر اساس این ارزیابی پارامتر سطح ایستابی آبخوان دارای بیشترین تأثیر و توپوگرافی و تغذیه خالص منطقه دارای کمترین اثر می باشند. بررسی کارهای مشابه در زمینه آسیب پذیری آبخوان نیز تایید کننده این نتایج می باشد. Rahimzade qivi و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی با عنوان تعیین قابلیت آسیب پذیری کیفی آب زیرزمینی دشت بیرجند با استفاده از مدل DRASTIC، در واسنجی مدل از روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده نمودند که نتایج این وزندهی مشابه نتایج تحلیل حساسیت این تحقیق بود (Rahimzade qivi et al., 2015). همچنین Hassanpour و Khozaymehnezhad (۲۰۱۸) در پژوهشی با عنوان مکان یابی چاه های تغذیه جهت تغذیه مصنوعی و بهبود کیفیت آبخوان دشت بیرجند با استفاده از پساب تصفیه شده فاضلاب، وزندهی پارامترهای مورد بررسی از طریق روش ANP را انجام دادند که نتایج آنها بیانگر بیشترین وزن پارامتر هدایت هیدرولیکی بود که مقایسه آن با نتایج تحلیل حساسیت این تحقیق هم بیانگر اثر و اهمیت بالای هدایت هیدرولیکی در آسیب پذیری آبخوان می باشد که تایید کننده نتایج این تحقیق می باشد (Hassanpour &

دشت بیرجند می باشد. در مقایسه با دو مدل GODS و SINTACS نتایج همبستگی نسبت به غلظت نیترا ت بیانگر این می باشد که مدل SINTACS همبستگی بالاتری نسبت به مدل GODS دارد و علت آن پارامترهای بیشتر در انتقال و پخشیدگی آلودگی مدل SINTACS می باشد. همچنین همانگونه که نتایج تحقیق Rahimzade qivi و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد نتایج حاصل از مدل آسیب پذیری به روش DRASTIC بیانگر این بوده که مناطق غربی و جنوبی غربی آبخوان دارای آسیب پذیری متوسط به بالا و مناطق مرکزی آبخوان دارای آسیب پذیری متوسط و کم می باشد که تایید کننده نتایج حاصل از این تحقیق می باشد. باتوجه به اینکه قسمت های غربی و جنوب غربی آبخوان دارای غلظت نیترا ت بیش از ۳۶ PPM می باشد؛ و مطابق استاندارد ۱۰۵۳ آب شرب ایران حداکثر غلظت مجاز برابر ۵۰ PPM است (ISIRI 1053,2015)، در صورت عدم مدیریت کیفی آب های زیرزمینی، مناطقی که دارای آسیب پذیری زیاد هستند در آینده به سمت کاملاً مستعد آلودگی خواهند رفت و مشکلات جبران ناپذیری را ایجاد خواهند کرد. همچنین با توجه به اقلیم منطقه، کمبود بارندگی، خشکسالی های اخیر، افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی، افزایش فعالیت های کشاورزی و صنعتی، در نتیجه افزایش آلودگی های ناشی از فاضلاب های شهری، پساب های کشاورزی و صنعتی و در مقابل افزایش نیازمندی به آب جهت تأمین مصارف آشامیدنی این امر تنها با مشارکت مردم، کارشناسان و مدیران مربوطه تحقق خواهد یافت.

(Khozeymehnezhad, 2018). پهنه بندی محل های حفر چاه جاذب توسط Hassanpour و Khozeymehnezhad (۲۰۱۸) با رویکرد بهبود کیفیت آبخوان دشت بیرجند نشان داد که مناطقی که از نظر اولویت ضعیف تلقی می شوند مشابه نتایج تحقیق حاضر و همانگونه که در شکل ۱۲ مشخص شده دارای آسیب پذیری خیلی زیاد است. Keshavarz و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیق دیگری با عنوان مکان یابی مناسب استحصال آب شرب با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی در آبخوان دشت بیرجند، نقشه طبقه بندی استعداد استحصال آب شرب در سطح آبخوان بیرجند با استفاده از ۵ کلاس از ضعیف تا بسیار خوب را تهیه نمودند (Keshavarz et al., 2014). بر اساس نتایج بدست آمده مناطق غربی و جنوب غربی آبخوان دارای کلاس ضعیف و مناطق شرقی آبخوان دارای کلاس بسیار خوب می باشد که در مقایسه با پهنه بندی آسیب پذیری مدل SINTACS نتایج بیانگر این بوده که مناطق ضعیف در زمینه استحصال آب شرب دارای آسیب پذیری خیلی زیاد می باشد. Shiekhvanloo (۲۰۰۷)، در ارزیابی آسیب پذیری کیفی آبخوان دشت بیرجند به روش GODS نقشه آسیب پذیری آبخوان دشت بیرجند در سه کلاس آسیب پذیری کم، آسیب پذیری متوسط و آسیب پذیری زیاد را تهیه نمود (Shiekhvanloo, 2007). بر اساس این نقشه مناطق شرقی و مرکزی آبخوان دارای آسیب پذیری کم تا متوسط و مناطق غربی و جنوب غربی آبخوان دارای آسیب پذیری زیاد می باشد که نشان دهنده عملکرد مناسب مدل SINTACS در پهنه بندی کیفی آبخوان

References:

- Ahmadi, A., Aberoumand, M. 2009. Vulnerability of Khash-Plain Aquifer, Eastern Iran, to Pollution Using Geographic Information System (GIS). *Journal of Geotechnical Geology*,5,1,1-11(In Persian)
- Antonakos, A.K., lambrakis., N.J. 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*,2.333,288-304.
- Brahim, F.B., Kanfir, H. Bouri, S. 2012. Groundwater Vulnerability and Risk mapping of the Northern sfax Aquifer, Tunisia". *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37.5, 1405-1421.
- Civita, M . 1994. Vulnerability maps of aquifers subjected to pollution: theory and practice. Pitagora Editrice, Bologna,p325
- Ewusi, A., Ahenkorah, I., Kuma, J.2017. Groundwater Vulnerability Assessment of the Tarkwa Mining Area Using SINTACS Approach and GIS. *Ghana Mining Journal*,17,18-30
- Fadaei Nobandeghani, A. 2014. The evaluation of the inherent vulnerability potential of Shiraz plain aquifer using DRASTIC and COMPOSITE DRASTIC (CD) and NITRATE VULNERABILITY NV models in the GIS. Master's Thesis Shiraz University of Medical Sciences. (In Persian)
- Hassanpour, M., Khozaymehnezhad, H. 2018. Placement of nutrient wells for artificial nutrition and improvement of aquifer quality in Birjand plain using treated wastewater. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*,4.3, 215-226. (In Persian)
- Huan, H., Wang, J., Teng, Y. 2012. Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate based on a modified DRASTIC model: A case study in Jilin City of northeast China. *Science of the Total Environment*,440.1,14-23
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran. Drinking water -Physical and chemical specifications.2015. 5th.Revision. ICS:13.060.020.(In Persian)
- Keshavarz, A., Khashei Seouki, A., Najafi, M.H.2013. Locating of Suitable Area of Pumping Drinking Water Using FAHP Method (Case Study: Birjand Aquifer). *Journal of Water and Wastewater*,25.3, 135-142. (In Persian)
- Kim, YJ., Hamm S.Y.1999. Assessment of the potential for groundwater contamination using the DRASTIC/EGIS technique, Cheongju area, South Korea. *Hydrogeology Journal*,17.2, 227-235.
- Lodwick, W.A., Monson, W., Svoboda, L. 1990. Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical informations systems: suitability analysis. *International Journal of Geographical Information System*, 4.4, 413-428.
- Mahmoodzadeh, E., Rezaeian, S. and Ahmadi, A. 2013. Sensitivity Analysis of Groundwater Vulnerability in the Meymeh Plain of Isfahan using the DRASTIC Method. The 1st International Conference on Environmental Crisis and its Solutions. Kish Island - Islamic Azad University of Science and Research Branch of Ahwaz. (In Persian)
- Mastrocicco, M., Gianluigi, B., Kazakis, N., Colombani, N., Voudouris, K., Tedesco, D.2017. A modified SINTACS method for groundwater vulnerability and pollution risk assessment in highly anthropized regions based on NO₃ and SO₄ concentrations. *Science of the Total Environment*,609,1512-1523
- Naseri, H. and Sareminejad, F. 2011. Comparison of the Evaluation of Aquifer Vulnerability by DRASTIC and Fuzzy Logic Models Case Study: Golgir Plain of Masjed Soleyman. *Journal of Physical Geography*,11,4,17-34. (In Persian)
- Pisciotta, A., Cusimano, G., Favara, R.2015. Groundwater nitrate risk assessment using intrinsic vulnerability methods: A comparative study of environmental impact by intensive farming in the Mediterranean region of Sicily, Italy. *Journal of Geochemical Exploration*,156,89-100
- Piscopo, G., 2001. Groundwater vulnerability map explanatory notes - Lachlan Catchment. NSW Department of Land and Water Conservation, Parramatta, NSW, Australia, 14 p.

Qadir, R., Hamamin D., Saeed S.2016. Groundwater vulnerability map of Sulaymaniyah sub-basin using SINTACS model, Sulaymaniyah Governorate, Kurdistan Region, Iraq. Journal of Zankoy Sulaimani ,20,277-292

Rahimzadeh kivi, M., Hamzeh, S., Kardan Moghadam, H. 2015. Identification of Vulnerability Potential of Groundwater Quality in Birjand Plain using DRASTIC Model and its calibration using AHP. Physical Geography Research ,47.3 , 481-498. (In Persian)

Rahman, A., 2008.A Gis based Drastic model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh. India. Applied Geography, 28.1, 32-53.

Shiekhvanloo, M.2007.Assessment of Groundwater Vulnerability Potential of Birjand plain. Dissertation for M.Sc. Degree in Hydrogeology. University of Sistan and Baluchestan.(In Persian)

Tesoriero, A.J., Inkpen E.L., Voss, F.D. 1998. Assessing ground-water vulnerability using logistic regression. Proceedings for the Source Water Assessment and Protection 98 Conference, Dallas, TX, 157- 65.

Vrba, J.,Zaporozec, A.1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International contributions to hydrogeology. 16