



پیش‌بینی کوتاه‌مدت و درازمدت تغییر اقلیم بر آسیب‌پذیری سفره‌های آب زیرزمینی با استفاده از شاخص DRASTIC و نرم‌افزار TerrSet

امیررضا سپهرآرا^۱، سامان جوادی^{۲*}، سید عباس حسینی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: Javadis@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۱

چکیده

امروزه اثر تغییرات کاربری اراضی بر میزان آسیب‌پذیری آبخوان سنجیده شود. از آنجایی که پتانسیل آلودگی نقاط مختلف یک آبخوان از نظر رسیدن آلاینده به آب زیرزمینی متفاوت می‌باشند، ضروری است با پیش‌بینی کاربری‌های اراضی در آینده، میزان تغییرات آسیب‌پذیری آبخوان‌ها بررسی شود. اهمیت این تحقیق در نظر گرفتن توأمان آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان به روش DRASTIC و تغییرات کاربری اراضی در آینده می‌باشد. برای نخستین بار اثر تغییرات کاربری اراضی در آینده بر آسیب‌پذیری آبخوان هشتگرد برای دوره‌های ۲۰۲۵، ۲۰۳۵ و ۲۰۴۵ بررسی شده و با وضعیت موجود سال ۲۰۱۸ مقایسه گردیده است. ابتدا با استفاده از روش زنجیره مارکف در نرم‌افزار TerrSet، تغییرات کاربری اراضی برای سه مقطع زمانی ۲۰۲۵، ۲۰۳۵ و ۲۰۴۵ استخراج شد. نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره لندست برای سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۸ در نرم‌افزار ۵.۳ ENVI انجام شد. نقشه‌های تولیدشده به‌عنوان یک پارامتر به روش آسیب‌پذیری DRASTIC اضافه شده و در نهایت DRASTIC-Lu برای سه دوره پیش‌بینی گردید. نتایج نشان می‌دهد میزان آسیب‌پذیری در کلاس زیاد و خیلی زیاد در سال ۲۰۴۵، به ترتیب به میزان ۳۴ درصد و ۸۳ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین روند افزایشی میزان آسیب‌پذیری در کلاس خیلی زیاد برای سه دوره افزایشی بوده و از ۱۴ درصد در سال ۲۰۲۵ به ۲۰ و ۸۳ درصد در سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۴۵ خواهد رسید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد برای سال‌های آینده در جهت حفظ منابع آب زیرزمینی لازم است اقدامات پایشی ویژه‌ای در مناطق شمالی و شمال شرقی آبخوان در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: آبخوان هشتگرد، آسیب‌پذیری، تغییرات کاربری اراضی، نرم‌افزار TerrSet، DRASTIC.

مقدمه

کشاورزی موجب کاهش سطح آب زیرزمینی و افزایش آسیب‌پذیری آن گردیده است. از این رو ضروری است جهت حفظ این منابع ارزشمند راهکارهای مدیریتی حفاظتی ارائه شود. از طرف دیگر پس از ورود آلودگی به آبخوان‌ها، رفع آن بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر می‌باشد، بنابراین مناسب‌ترین راه، شناسایی مناطق مستعد آلودگی و جلوگیری از ورود آن خواهد بود. در این راستا تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری می‌تواند بهترین و

امروزه سفره‌های آب زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین منابع تأمین آب استراتژیک به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شوند. این منابع به دلیل افزایش روزافزون تقاضا در شرب، صنعت و کشاورزی و نیز تغییرات اقلیمی و کاهش تغذیه با تنزل کمی و کیفی روبرو شده‌اند (Javadi et al., 2011; 2017). به عبارت دیگر فعالیت‌های انسانی و به‌ویژه

DRASTIC گردید. در این راستا جهت در نظر گرفتن فعالیت-های انسانی، (Secunda et al., 1998) برای نخستین بار لایه کاربری اراضی را به این شاخص اضافه نموده و به ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با استفاده از شاخص تلفیقی DRASTIC با کاربری اراضی کشاورزی در فلسطین اشغالی پرداختند. نتایج تحقیق آنها گویای مفید بودن استفاده از این پارامتر در ارزیابی آسیب‌پذیری بود (Secunda et al., 1998). در ادامه Al-Adamat et al. (2003) نقشه ریسک و آسیب-پذیری را برای آبخوان بازالتیک با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی، سنجش از دور و DRASTIC به‌دست آوردند و در شاخص DRASTIC از هدایت هیدرولیکی به‌دلیل ناقص بودن داده‌ها استفاده نکردند و در عوض نقشه کاربری اراضی را به‌عنوان فاکتور اضافی برای شاخص DRASTIC استفاده کردند تا نقشه پتانسیل ریسک را تهیه کنند. همچنین Hao et al. (2017) نشان دادند با اضافه کردن ضخامت آبخوان (M)، بهره‌برداری از آب زیرزمینی (E) و کاربری اراضی (L)، روش اصلاح شده DRMSICEL جواب بهتری نسبت به DRASTIC استاندارد می‌دهد. در ادامه (Asadi et al., 2017) روش DRASTIC-LU را با اضافه کردن لایه کاربری اراضی در مطالعات خود استفاده نمودند، که نتایج به‌دست‌آمده از روش-های اصلاح شده بهتر از DRASTIC استاندارد بود (Asadi et al., 2017). در ایران نیز احمدی و همکاران (۱۳۹۲) ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت خضرآباد را به روش DRASTIC انجام دادند. آن‌ها برای تفکیک بهتر منطقه اقدام به تعیین واحد کاری به روش ژئومورفولوژی کردند و نقشه‌های موضوعی ژئومورفولوژی، کاربری اراضی و تیپ گیاهی را تلفیق و واحد کاری آن را استخراج کردند. همچنین محمدپور و همکاران (۱۳۹۹) بررسی نوسانات آب زیرزمینی دشت اهر تحت‌تأثیر تغییر اقلیم و بهبود روش آبیاری را بررسی کردند نتایج تحقیق آنها نشان داد در صورت اعمال سناریوهای اقلیمی برای آینده با توجه به کم‌آب بودن منطقه، منابع آبی آن شرایط خوبی را در آینده تجربه نخواهد کرد. بنابراین سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار نه‌تنها باعث صرفه‌جویی در مصرف آب نشده، بلکه منجر به تخریب آبخوان زیرزمینی نیز می‌شود. نتایج این مطالعه بر لزوم مطالعات مدیریت حوضه‌های آبریز جهت اتخاذ استراتژی‌های صحیح مدیریتی، به‌خصوص در مناطق

اقتصادی‌ترین راهکار در این زمینه باشد (Kardan et al., 2017). مفهوم آسیب‌پذیری اولین بار توسط مارگات مطرح گردید که طبق تعریف، سهولت رسیدن آلودگی به سفره‌های آب زیرزمینی را آسیب‌پذیری نامید (Nadiri et al., 2017). روش-های مختلفی جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی توسط محققین مختلف ارائه شده است. در این میان شاخص DRASTIC به‌دلیل تعداد پارامترهای مهم و در دسترس، رایج‌ترین و پرکاربردترین روش بوده که در گزارش محیط‌زیست آمریکا (EPA) ارائه شده است (Aller et al., 1987). روش DRASTIC در بسیاری از تحقیقات در آبخوان-های دنیا از دهه گذشته تاکنون همواره جهت ارزیابی آسیب-پذیری به‌کاررفته است (Allouche et al., 2017; Kardan et al., 2011; Javadi et al., 2011; Kumar et al., 2020; Machiwal et al., Nahin et al., 2020). این روش جهت ارزیابی آسیب‌پذیری از بیشترین ویژگی‌های مؤثر آبخوان استفاده نموده و به همین علت اثر عدم قطعیت‌های احتمالی در ویژگی‌ها را کاهش می‌دهد (Al-Zabet, 2002; Gogu et al., 2003; Stigter et al., 2006; Vías et al., 2006). علاوه بر روش DRASTIC، روش‌های دیگری همچون SI، GOD، SINTACS، AVI، GOD، SI نیز توسط Ribeiro et al. (2003)، Shrestha et al. (2017) و ندیری و همکاران (۱۳۹۸) جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها ارائه شده که اکثراً از تعداد پارامترهای کمتری استفاده می‌کنند. به‌طورکلی تمامی روش‌های به‌کاربرده شده در این زمینه دارای کاستی-هایی بوده که مهم‌ترین آن ثابت بودن رتبه و وزن پارامترها و همچنین ثابت بودن تعداد پارامترها برای تمامی آبخوان‌ها می-باشد (Babiker et al., 2005; Saeidi et al., 2011; Javadi et al., 2017). اما با توجه به کاربرد بالای این روش در تحقیقات گسترده، این شاخص به‌دلیل عدم در نظر گرفتن عامل انسانی دارای نقص بوده و کامل نمی‌باشد. ازاین‌رو یک دهه پس از رایج شدن DRASTIC، به‌تدریج روش‌های اصلاحی آن نظیر اصلاح رتبه توسط (Javadi et al., 2011) اصلاح وزن توسط (Torkashvand et al., 2021) و سعیدی رضوی (۱۳۹۹)، اضافه نمودن لایه توسط (Rahmani et al., 2021) موردتوجه قرار گرفت که تمامی روش‌های اصلاحی موجب بهبود روش

همچنین در نیمه جنوبی دشت، آبخوان چندلایه و تحت فشار مشاهده می‌شود که با توجه به رسوبات دانه ریزتر نسبت به نیمه شمالی، آبدهی چاه‌ها کمتر از قسمت‌های شمالی و شرقی است.

در اراضی مخروط افکنه‌ای واقع در شمال دشت به واسطه کم بودن ضخامت اشباع آبخوان آبرفتی منحنی هم قابلیت انتقال با رقم ۲۵۰ مترمربع در روز گسترش دارد که به سمت جنوب به واسطه افزایش ضخامت اشباع آبخوان آبرفتی رقم منحنی‌های هم قابلیت افزایش یافته و منحنی ۳۰۰۰ مترمربع در روز در مرکز دشت در اراضی مابین سعیدآباد، قاسم‌آباد بزرگ، هشتگرد، شمال قویه و سنقرآباد گسترش دارد. نوع آبخوان هشتگرد از نوع آزاد بوده، البته در بخش‌هایی از آبخوان نیز سفره‌های معلق وجود دارد که از نظر وسعت مهم نمی‌باشد.

روش DRASTIC

متداول‌ترین روش برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان، روش DRASTIC است که توسط انجمن ملی آب زیرزمینی با همکاری آژانس حفاظت محیطی ایالات متحده ارائه شده است (Aller et al., 1987). سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا (EPA) این روش را جهت تعیین پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی توسعه داد و در سال‌های اخیر در بسیاری از تحقیقات به کار گرفته شد.

با توجه به اهمیت تأثیر هر پارامتر در انتقال آلودگی، به هر پارامتر وزنی بین یک تا پنج داده می‌شود که عدد پنج نسبت به آلودگی حائز بیشترین اهمیت و عدد یک کمترین اهمیت را دارا است. DRASTIC آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان را نسبت به آلودگی با استفاده از هفت شاخص هیدرولوژیکی، هیدروژئولوژیکی، زمین‌شناسی و توپوگرافی تعیین می‌کند. این روش شامل ۷ پارامتر اعم از عمق آب‌های زیرزمینی (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، تأثیر منطقه غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی (C) می‌باشد. هر پارامتر DRASTIC بر اساس ویژگی به صورت یک نقشه رستری رتبه‌بندی شده که برای هر یک از پارامترها ارزش عددی بین ۱ تا ۱۰ در نظر گرفته می‌-

بحران زده تأکید دارد. علی‌رغم استفاده زیاد از کاربری اراضی، اما در هیچ‌یک از تحقیقات بالا پیش‌بینی کاربری اراضی در آسیب‌پذیری در نظر گرفته نشده است. به عبارت دیگر اثر تغییرات کاربری اراضی نظیر تبدیل شدن جنگل‌ها به زمین‌های کشاورزی و یا تغییر اراضی بایر به مناطق شهری در میزان شاخص DRASTIC ضروری است تعیین شود. از این‌رو در این تحقیق برای نخستین بار اثر تغییرات کاربری اراضی در ۳۰ سال آینده بر روی آسیب‌پذیری دشت هشتگرد مورد مطالعه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت هشتگرد با مساحتی در حدود ۴۱۰ کیلومترمربع در قسمت مرکزی استان البرز واقع گردیده است. این دشت بین طول‌های ۵۰ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۶ دقیقه شرقی و عرض‌های ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۷ دقیقه شمالی قرار دارد (شکل ۱). آب و هوای منطقه در بخش‌های شمالی حوضه آبخیز، نیمه‌مرطوب و به تدریج به سوی جنوب دشت، با کاهش ارتفاع، به نیمه‌خشک تبدیل می‌شود. با توجه به گزارش بیان محدودده مطالعاتی دشت هشتگرد، مقدار متوسط دمای سالانه در این دشت، ۱۴/۷ درجه سانتی-گراد می‌باشد. همچنین با توجه به همین گزارش میزان بارش متوسط این دشت نیز ۲۵۸/۱ میلی‌متر است. بنابراین بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی دمارتن، میزان شاخص مطابق رابطه دمارتن ۱۰/۵ بوده که اقلیم دشت هشتگرد با این عدد نیمه‌خشک محاسبه می‌شود. به‌طورکلی شیب دشت از قسمت‌های شمالی به سمت جنوبی کاهش یافته و جهت جریانات سطحی و زیرزمینی از شمال شرقی به جنوب‌غربی است. رسوبات درشت‌دانه در شمال دشت مخصوصاً مخروط-افکنه رودخانه کردان، مکان مناسبی جهت تغذیه آبخوان از جریانات سطحی ایجاد کرده است. هرچه از قسمت‌های شمالی دشت به سمت جنوب پیش رفته رسوبات ریزدانه‌تر گردیده و از عمق آبخوان کاسته می‌شود. در محل مخروط‌افکنه کردان بیشترین عمق رسوبات درشت‌دانه مشاهده می‌شود که بیشترین عمق آبخوان در این قسمت است. در قسمت‌های غربی و جنوب‌غربی دشت نیز عمق رسوبات کاهش می‌یابد.

شود (Almasri, 2008). در نهایت شاخص آسیب‌پذیری به صورت مجموع وزنی از رتبه‌بندی هفت عامل با توجه به رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

که در آن (VI) نشان‌دهنده شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC است و شاخص‌های W و R به ترتیب نشان‌دهنده وزن و رتبه برای هر پارامتر می‌باشند. نقص اصلی این شاخص در تعیین مقدار رتبه و وزن نسبی است (Saeidi et al., 2011). آسیب‌پذیری ذاتی با استفاده از روش DRASTIC در مقایسه با سایر شاخص‌ها می‌تواند با انواع مختلف پارامترهای هیدروژئولوژیکی ارزیابی شده و نیاز به تعداد نسبتاً کمتری از داده‌ها دارد (Wang et al., 2012).

در جدول ۱ وزن نسبی هر یک از پارامترها آمده است. با توجه به شرایط منطقه و ویژگی آبخوان به هر یک از پارامترهای شاخص DRASTIC رتبه‌ای اختصاص داده می‌شود. مبنای رتبه‌دهی به این پارامترها بر اساس جدول ارائه شده توسط Aller et al. (1987) می‌باشد.

$$VI = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W \quad (1)$$

جدول ۱- وزن‌دهی پارامترهای شاخص DRASTIC.

Parameter (DRASTIC)	Weighting coefficient
Depth to water (D)	5
Net Recharge (R)	4
Aquifer Media(A)	3
Soil Media (S)	2
Topography (T)	1
Impact of Vadose Zone (I)	5
Hydraulic Conductivity(A)	3

برای پارامتر کاربری اراضی (Lu) می‌باشد. لایه کاربری اراضی با توجه به نقشه کاربری شهری، نقشه کاربری کشاورزی و نیز وضعیت پوشش و نوع کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه، تهیه و در چهار طبقه با کاربری مسکونی، کشاورزی، مرتع و سایر تقسیم‌بندی می‌گردد که در جدول ۲، رتبه مربوط به طبقات مختلف کاربری اراضی آورده شده است. همچنین وزن در نظر گرفته شده برای پارامتر کاربری اراضی مطابق مطالعات گذشته پنج می‌باشد (Secunda et al., 1998).

روش DRASTIC_{Lu}

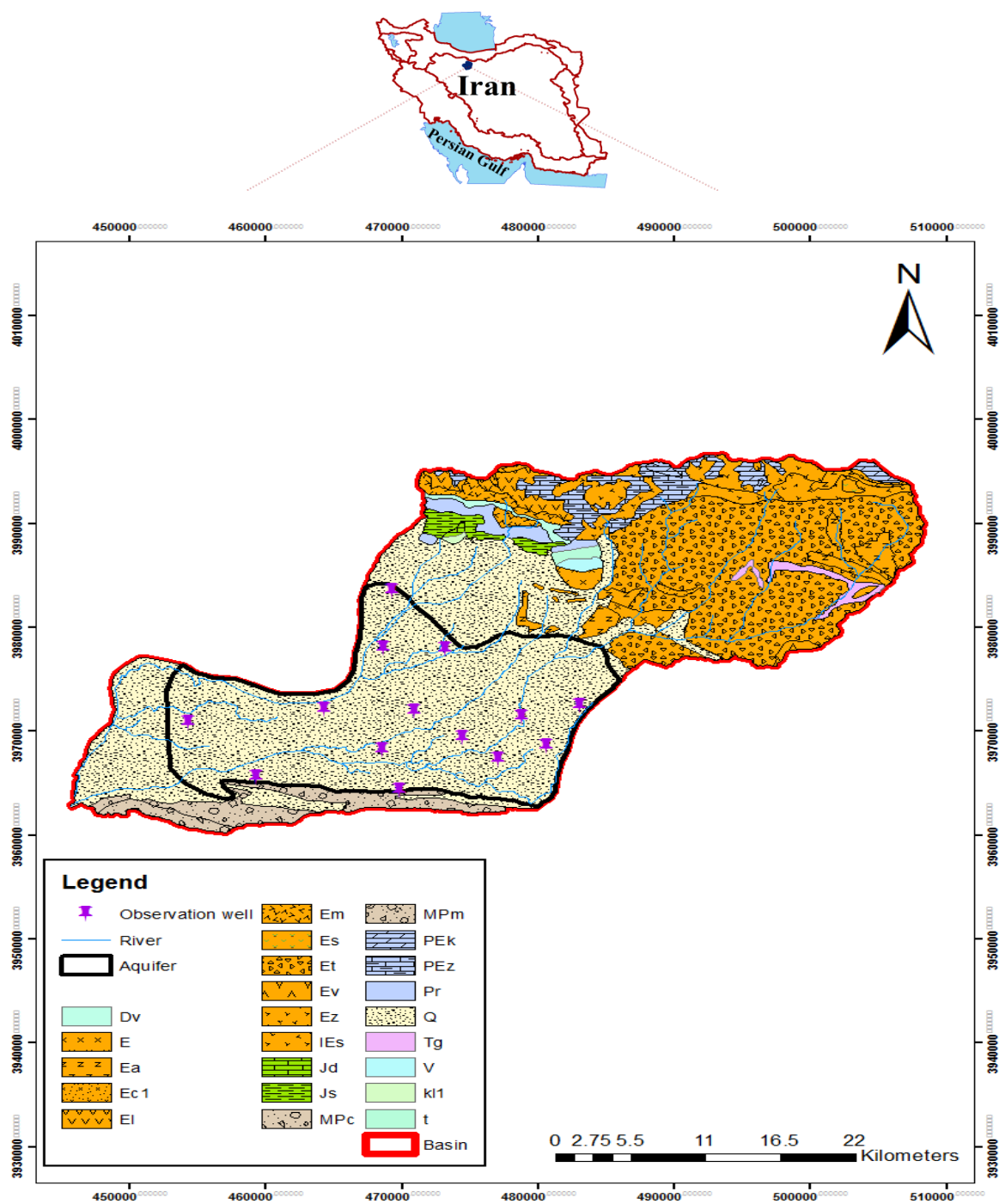
با پیش‌بینی کاربری اراضی در آینده، می‌توان میزان تغییرات آسیب‌پذیری آبخوان‌ها را بررسی نمود. در این روش نقشه کاربری اراضی به‌عنوان یک پارامتر (Lu) به روش آسیب‌پذیری DRASTIC اضافه شده و در نهایت DRASTIC_{Lu} به رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$DRASTIC_{Lu} = VI + Lu_R \times Lu_W \quad (2)$$

که در آن (VI) نشان‌دهنده شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC است و شاخص‌های W و R به ترتیب نشان‌دهنده وزن و رتبه

جدول ۲- رتبه‌دهی طبقات پارامتر Land use.

Land use category	Rating
Irrigated field crops	8
Pasture	5
Open area	1
Built up area	10



شکل ۱- موقعیت دشت هشتگرد همراه با موقعیت‌های مشاهده‌ای و سازندهای زمین‌شناسی.

های کاربری اراضی از نرم‌افزار ENVI 5.3 و داده‌های سنجنده-های ETM+ و OLI ماهواره لندست استفاده گردید. تصاویر استفاده شده به ترتیب شامل تصاویر سنجنده ETM+ لندست ۷ سال ۱۹۹۰ و تصاویر سنجنده OLI لندست ۸ سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۱۸ بود.

استخراج نقشه‌های کاربری اراضی (Lu)

جهت پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی لازم است تا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای مقاطع مختلف زمانی این نقشه استخراج گردد. از این‌رو در این مطالعه برای تهیه نقشه-

۸۷، ۸۹ و ۹۲ درصد شد. ارزیابی نتایج حاکی از آن است که بالاترین ضریب کاپا به دلیل قوی تر بودن قدرت تفکیک رادیومتریکی تصاویر، مربوط به سال ۲۰۱۸ است.

پیش‌بینی تغییرات کاربری‌های اراضی آینده

برای پیش‌بینی کاربری اراضی در سال‌های آینده از پکیج تغییر زمین LCM در نرم‌افزار TerrSet استفاده شد. ابتدا نقشه‌های کاربری سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۰۵ به همراه نقشه‌های DEM و شیب منطقه به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار وارد شد. همچنین برای پتانسیل تبدیل در این تحقیق از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شده است. روش شبکه‌های عصبی مصنوعی قادر است که پتانسیل تبدیل مجموعه‌ای از کاربری‌ها به کاربری‌های دیگر را در مجموعه‌ای از زیر مدل‌ها گروه‌بندی نماید. در این روش حتی پتانسیل تبدیل همه کاربری‌ها به کاربری‌های دیگر را در یک زیر مدل واحد، مدل‌سازی و محاسبه نماید. در نهایت پس از تنظیم زیر مدل‌ها، نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۸ با استفاده از روش زنجیره مارکوف در نرم‌افزار TerrSet پیش‌بینی گردید.

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل، نقشه‌های پیش‌بینی شده و موجود سال ۲۰۱۸ مقایسه و اعتبار سنجی آن با ضریب کاپا انجام شد. پس از اعتبارسنجی مدل، نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۵، ۲۰۳۵ و ۲۰۴۵ پیش‌بینی شد. نقشه‌های کاربری اراضی در شکل ۲، ۳، ۴ و ۵ قابل مشاهده است. نتایج نشان داد در سال ۲۰۴۵ نسبت به سال ۲۰۱۸ مناطق مرتع تقریباً بدون تغییر، کشاورزی و باغ ۱۰۳ درصد افزایش، مسکونی ۱۴۲ درصد افزایش و بایر ۴۹ درصد کاهش داشته است.

در ابتدا لازم است کیفیت داده‌های تصاویر ماهواره‌ای از لحاظ رادیومتری^۱ و هندسی^۲ قبل از استفاده مورد بررسی قرار گیرد. به‌عبارت‌دیگر داده‌ها باید عاری از هرگونه خطای رادیومتری، نوارشدگی و هندسی باشند (Birhanu et al., 2019). از این رو در مرحله بعد به‌منظور حذف این خطاها، از تصحیحات هندسی^۳ و رادیومتری^۴ بر روی تصاویر در نرم‌افزار ENVI استفاده گردید. در این تحقیق پس از بررسی وضعیت کاربری‌های موجود منطقه، کاربری‌ها در قالب چهار کلاس مسکونی، کشاورزی و باغات، مراتع و بایر استخراج شدند. سپس برای هر یک از کلاس‌های تعریف‌شده، نمونه‌ها از روی تصاویر ماهواره‌ای برداشت و از نمونه‌های برداشت‌شده ۷۰ درصد برای آموزش، ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی استفاده شد.

در این مرحله مطابق پیشنهاد (Tarawally et al., 2019) با تفسیر بصری و با کمک گرفتن از نقشه توپوگرافی و تصاویر حاصل از Google Earth، نمونه‌ها به‌صورت تصادفی از روی تصاویر ماهواره‌ای جمع‌آوری گردید. سپس با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده و الگوریتم حداکثر احتمال در نرم‌افزار ENVI نقشه طبقه‌بندی کاربری سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۱۸ تهیه شد. از میان روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده، روش حداکثر احتمال به‌عنوان دقیق‌ترین و پراستفاده‌ترین روش، ذکر شده است. این روش واریانس و کوواریانس کلاس‌ها را ارزیابی می‌کند (Islam et al., 2018).

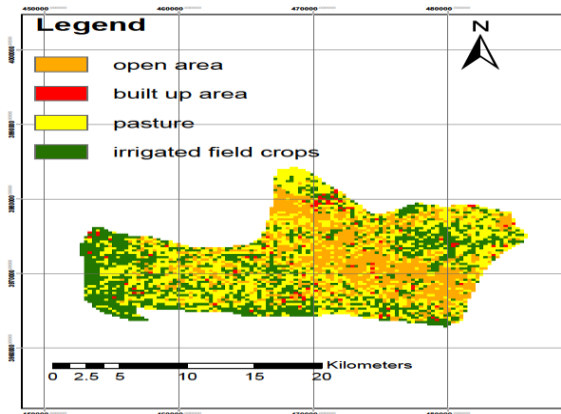
پس از تهیه نقشه‌های کاربری، نتایج با استفاده از ۳۰ درصد نمونه‌های برداشت‌شده، مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفت. برای ارزیابی نقشه‌های تولیدشده و دقت طبقه‌بندی از ضریب کاپا استفاده شد. نتایج شاخص کاپای برای نقشه‌های کاربری تهیه‌شده سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۱۸ به‌ترتیب

³ Geometric Correction

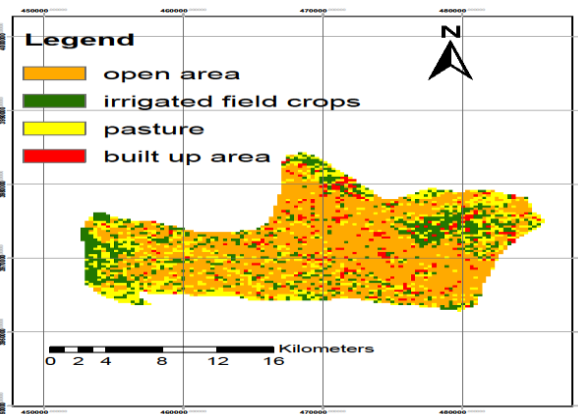
⁴ Radiometric

¹ Radiometry

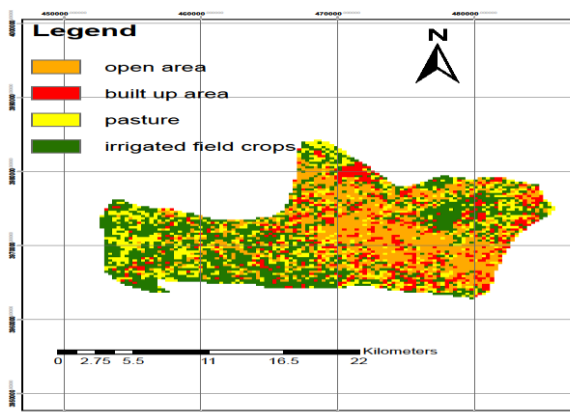
² Geometric



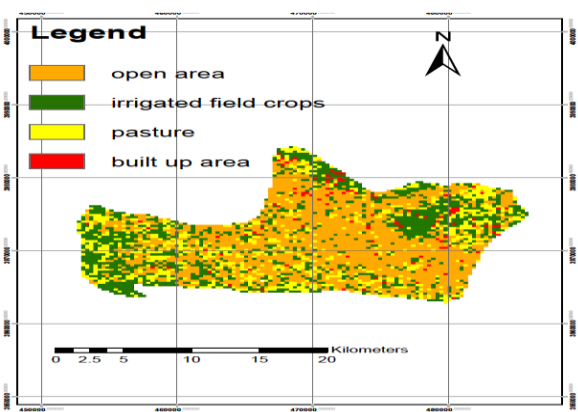
شکل ۳- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۵.



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۸.



شکل ۵- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۴۵.

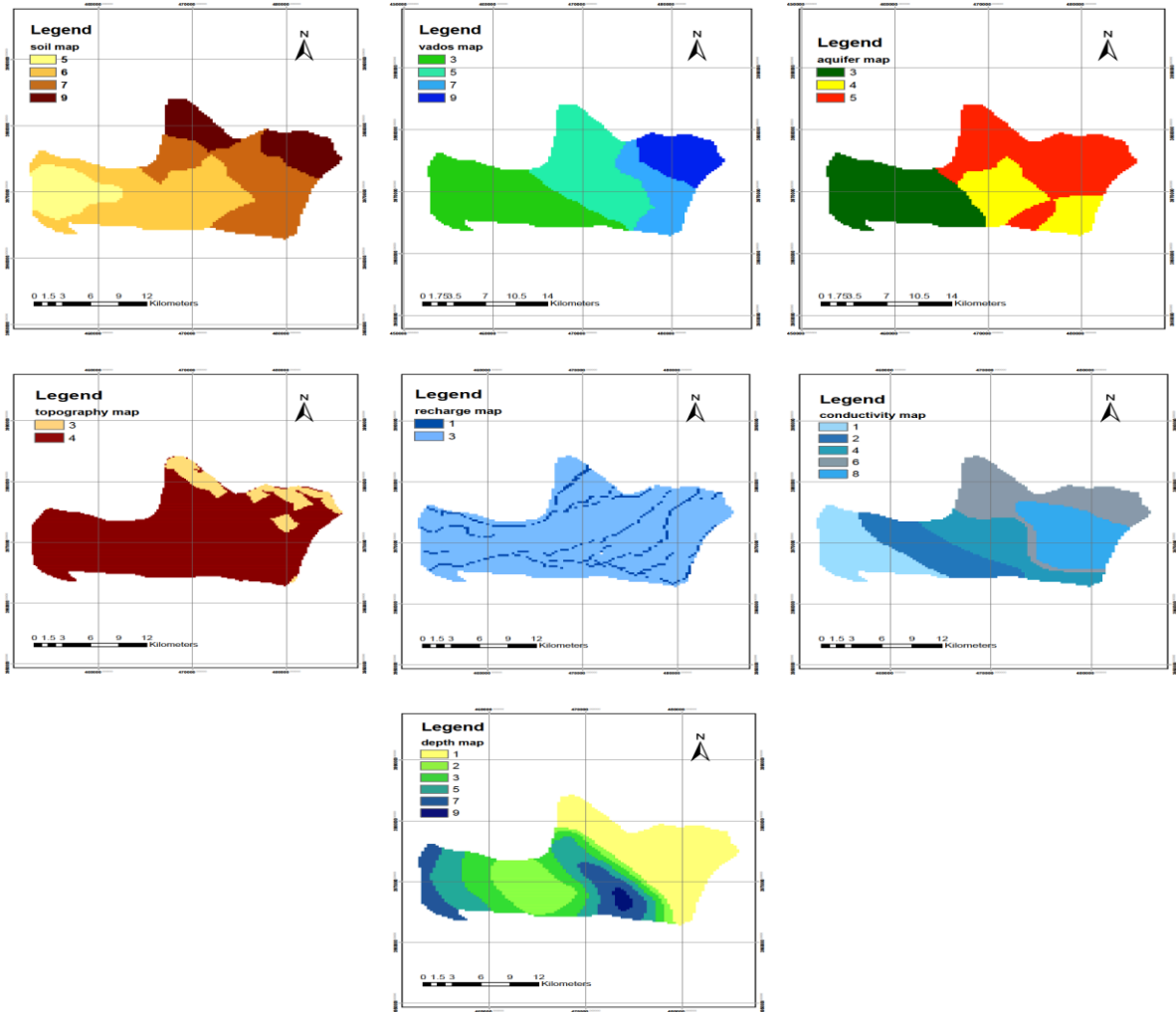


شکل ۴- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۳۵.

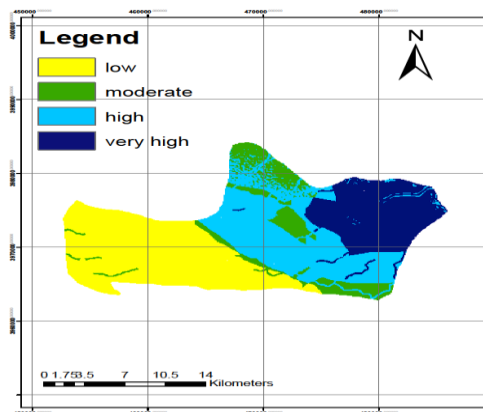
نتایج و بحث

آبخوان، محیط خاک و لایه غیراشباع از پروفیل خاک، نقشه زمین‌شناسی و پروفیل چاه تهیه شدند. در نهایت شاخص آسیب‌پذیری بر اساس روش DRASTIC با ترکیب و تلفیق هفت پارامتر شکل ۶ با توجه به رابطه (۱) به دست آمد که در شکل ۷ نشان داده شد. شاخص نهایی در محدوده مورد مطالعه بین ۶۳ تا ۱۳۲ متغیر است که با توجه به محدوده‌ی عددی آسیب‌پذیری، پهنه‌بندی حاصل بر اساس طبقه‌بندی (Aller et al., 1987) به چهار کلاس طبقه‌بندی شد. آسیب‌پذیری کم با ۳۶/۲ درصد، آسیب‌پذیری متوسط با ۱۱/۹ درصد، آسیب‌پذیری زیاد با ۳۰/۴ و در نهایت آسیب‌پذیری خیلی زیاد با ۲۱/۵ درصد از کل منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شد که مطابق نقشه‌ی نهایی آسیب‌پذیری مشخص گردید که قسمت‌های شمال شرقی محدوده مطالعاتی دارای پتانسیل آسیب‌پذیری خیلی بالایی است.

شاخص DRASTIC دشت هشتگرد با در نظر گرفتن مقادیر و وزن‌های ارائه شده در جدول ۱ و با استفاده از رابطه (۱)، محاسبه شد. اطلاعات جمع‌آوری شده در دو فرمت خام و دیجیتالی بر اساس نیاز پارامترهای شاخص قابل استفاده بودند. در عین حال برای ادغام عناصر شاخص جهت تجزیه و تحلیل پارامترها از چندین ابزار GIS استفاده گردید. در مورد مکان‌های چاه که به صورت فایل‌های نقطه‌ای در GIS وجود دارند از تکنیک درون‌یابی کریجینگ برای تبدیل اطلاعات عمق آب زیرزمینی به یک سطح پیوسته استفاده شد. جهت محاسبه درصد شیب از DEM منطقه مورد مطالعه استفاده شد و تغذیه خالص با استفاده از داده‌های ثبت‌شده هواشناسی و همچنین تجزیه و تحلیل سطح آب برای منطقه مورد مطالعه تعیین شد. تغذیه به عنوان تابعی از قابلیت نفوذ مواد نزدیک به سطح آبخوان مشخص شد (Javadi et al., 2017). لایه‌های محیط



شکل ۶- نقشه هفت پارامتر شاخص آسیب پذیری DRASTIC.



شکل ۷- نقشه DRASTIC Lu وضع موجود دشت هشتگرد سال ۲۰۱۸.

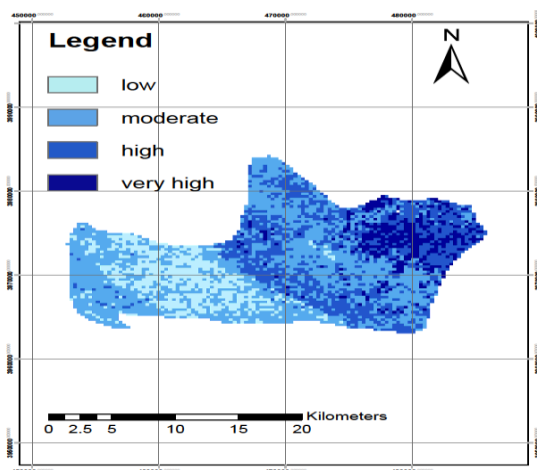
زیرزمینی دارد و شدت و میزان آلودگی در ارتباط با نوع کاربری اراضی متفاوت است. همچنین نحوه توزیع کاربری در مناطق شهری می تواند تأثیر بسزایی بر پارامترهای هیدروژئولوژیکی داشته باشد. در کاربری های کشاورزی به دلیل استفاده از

نقشه DRASTIC Lu دشت هشتگرد

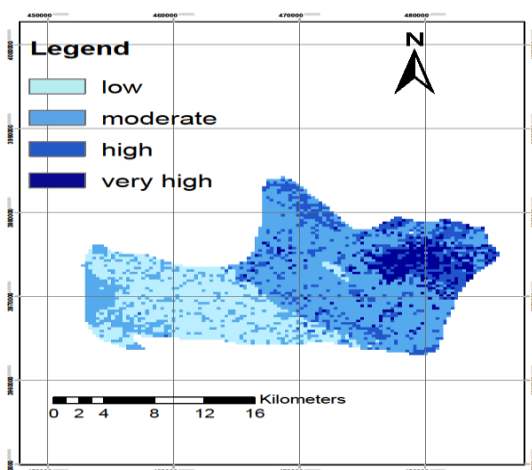
کاربری اراضی ریسک آلودگی آبخوان به وسیله منابع آلاینده را بیان می کند. نوع کاربری و فعالیت های انسانی صورت گرفته در آن تأثیر قابل توجهی بر روی آسیب پذیری منابع آب

۲۰۳۵ و ۲۰۴۵ پیش‌بینی و تهیه شد که در شکل‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ ارائه گردیده است. همان‌طور که در شکل‌های فوق مشاهده می‌گردد بر اساس مقدار عددی شاخص محاسبه شده، نقشه‌های آسیب‌پذیری به چهار طبقه با خطر آسیب‌پذیری و ریسک آلودگی کم تا خیلی زیاد تقسیم‌بندی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد میزان آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد در سال ۲۰۴۵، به ترتیب ۳۴ و ۸۳ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین روند افزایشی میزان آسیب‌پذیری در کلاس خیلی زیاد برای سه دوره افزایشی بوده و از ۱۴ درصد در سال ۲۰۲۵ به ۲۰ و ۸۳ درصد در سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۴۵ خواهد رسید. به عبارت دیگر ضروری است در راستای حفظ منابع آب زیرزمینی برای سال‌های آینده، اقدامات پایشی ویژه‌ای در مناطق با آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد بالاخص مناطق شمالی و شمال شرقی آبخوان در نظر گرفته شود.

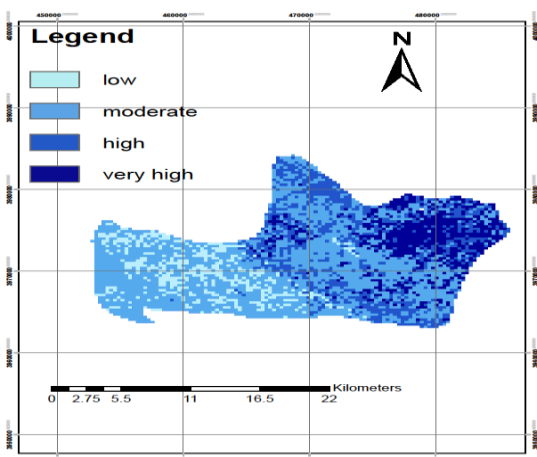
کودهای شیمیایی و حیوانی، آب‌های زیرزمینی نسبت به آلودگی نیترا ت خیلی آسیب‌پذیر بوده و میزان آلودگی بستگی به خصوصیات خاک، میزان تغذیه، جهت و سرعت حرکت آب-های زیرزمینی دارد. در کاربری‌های مسکونی، فاضلاب‌ها، مواد زائد جامد و غیره می‌تواند در آلودگی و آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی مؤثر باشد. در این مطالعه، با توجه به وضعیت پوشش و نوع کاربری اراضی برای سال ۲۰۱۸، منطقه مورد مطالعه به ۴ طبقه با کاربری مسکونی، کشاورزی و باغات، مرتع و بایر تقسیم‌بندی شد. همچنین تغییرات کاربری اراضی دشت هشتگرد برای دوره‌های ۲۰۲۵، ۲۰۳۵ و ۲۰۴۵ نیز پیش‌بینی و تهیه گردید. نقشه‌های تولیدشده تغییرات کاربری اراضی که در شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است به‌عنوان یک پارامتر به نقشه آسیب‌پذیری DRASTIC که در شکل ۷ نمایش داده شده، اضافه گردید و در نهایت نقشه DRASTIC Lu برای وضع موجود (سال ۲۰۱۸) و سه دوره آتی ۲۰۲۵،



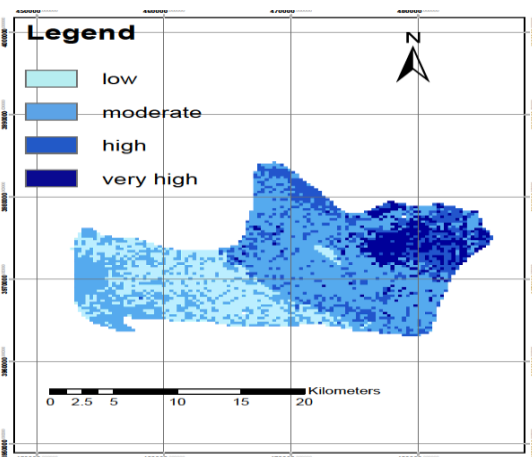
شکل ۹- نقشه DRASTIC Lu دشت هشتگرد سال ۲۰۲۵.



شکل ۸- نقشه DRASTIC Lu دشت هشتگرد سال ۲۰۱۸.



شکل ۱۱- نقشه DRASTIC Lu دشت هشتگرد سال ۲۰۴۵.



شکل ۱۰- نقشه DRASTIC Lu دشت هشتگرد سال ۲۰۳۵.

نتیجه گیری

تغییرات کاربری اراضی چنانچه بدون مدیریت و برنامه ریزی صورت بگیرد موجب عواقب زیست محیطی شدیدی خواهد شد. به عبارت دیگر تغییرات کاربری از مراتع و یا زمین های بایر به سمت کشاورزی و مناطق مسکونی علاوه بر فشار مضاعف بر منابع آب منطقه، در صورت نبود مدیریت موجب آسیب های زیست محیطی به رودخانه ها و آبخوان ها خواهد شد. از این رو در این تحقیق برای نخستین بار اثر تغییرات کاربری اراضی در آینده بر روی آسیب پذیری سفره آب زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره ای ابتدا کاربری اراضی برای سال های نزدیک (سال ۲۰۲۵) و دور (سال ۲۰۳۵ و سال ۲۰۴۵) پیش بینی گردید و مشخص شد دو سطح کشاورزی و مناطق مسکونی افزایش چشمگیری در آینده خواهند داشت. نتایج نشان داد در سال های آتی سطح اراضی مسکونی ۱/۵ برابر خواهد شد. از طرف دیگر زمین های کشاورزی نیز افزایش ۱۰۰ درصدی نسبت به وضع موجود (سال ۲۰۱۸) خواهد داشت. در نتیجه اثرات افزایش سطوح مناطق مسکونی و زمین های کشاورزی می تواند تأثیرات مخربی بر آسیب پذیری سفره های آب زیرزمینی بگذارد. در ادامه با تلفیق نقشه آسیب پذیری دشت هشنگرد با روش DRASTIC و نقشه کاربری اراضی، این اثرات بررسی گردید. نتایج نشان داد در سال های ۲۰۲۵ و ۲۰۳۵ مقادیر آسیب پذیری DRASTIC-LU در کلاس خطر بسیار زیاد به ترتیب ۱۴ و ۲۰ درصد نسبت به سال ۲۰۱۸ افزایش خواهد یافت. همچنین این افزایش در سال ۲۰۴۵ محسوس تر بوده به طوری که مقادیر آسیب پذیر زیاد و خیلی زیاد این سال به ترتیب ۳۴ و ۸۳ درصد نسبت به سال ۲۰۱۸ خواهد شد. نتایج این تحقیق نشان می دهد که با افزایش سطوح کشاورزی و مناطق مسکونی در آینده یا باید فاضلاب های شهری و یا زه آب های کشاورزی مدیریت شوند و یا پایش آب زیرزمینی در مناطق شمالی و شمال شرقی این دشت به صورت مرتب صورت پذیرد. نتایج کاربردی و برتری متدولوژی این تحقیق نشان می دهد، با پیش بینی نسبت دقیق تغییرات کاربری اراضی، می توان مناطق حساس تر به ورود آلودگی را شناسایی نمود. به عبارت دیگر با شناسایی مناطق آلوده در آینده، می توان از

هم اکنون در خصوص پایش آن مناطق و یا مدیریت کیفی از نفوذ بیشتر آلودگی جلوگیری نمود.

منابع

- احمدی، ح.، زهتابیان، غ.، صادقی روشن، م. ح.، ۲۰۰۷. تجزیه و تحلیل حساسیت راهبردهای بهینه بیابان زدایی در چارچوب فرایند تحلیلی سلسله مراتبی (AHP) مطالعه موردی منطقه خضرآبادیزد. جغرافیایی سرزمین، ۴(۳): ۳۰-۱۵.
- ندیری، ع. ا.، صدقی، ز.، ۱۳۹۸. ارزیابی آسیب پذیری آبخوان های چندگانه با استفاده از روش های DRASTIC و SINTACS. هیدروژئولوژی، ۴(۲): ۱۷۱-۱۸۶.
- سعیدی رضوی، ب.، ۱۳۹۹. بررسی آسیب پذیری آب زیرزمینی دشت گلپایگان با استفاده از بهینه سازی روش دراستیک. هیدروژئولوژی، ۵(۲): ۶۱-۷۴.
- محمدپور، م.، زینالزاده، ک.، رضوردی نژاد، و.، حصاری، ب.، ۱۳۹۹. بررسی نوسانات آب زیرزمینی تحت تاثیر تغییر اقلیم و بهبود روش آبیاری (مطالعه موردی: دشت اهر). هیدروژئولوژی ۵(۲): ۹۹-۱۱۲.
- Al-Adamat, R. A., Foster, I. D., Baban, S. M., 2003. Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, remote sensing and DRASTIC. Applied Geography, 23(4), 303-324.
- Aller, L., Lehr, JH., Petty, RJ., Hackett, G., 1987. DRASTIC: A Standardised System For Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. US Environmental Protection Agency Report (EPA/600/2-87/035).
- Allouche, N., Maanan, M., Gontara, M., Rollo, N., Jmal, I., Bouri, S. 2017. A global risk approach to assessing groundwater vulnerability. Environmental Modelling & Software, 88, 168-182.
- Almasri, M. N., 2008. Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. Journal of Environmental Management, 88(4): 577-593.
- Al-Zabet, T., 2002. Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. Environmental geology, 43(1): 203-208.
- Asadi, P., Ataie-Ashtiani, B., Beheshti, A., 2017. Vulnerability assessment of urban groundwater

- Kumar, A., Pramod Krishna, A., 2020. Groundwater vulnerability and contamination risk assessment using GIS-based modified DRASTIC-LU model in hard rock aquifer system in India. *Geocarto International*, 35(11): 1149-1178.
- Machiwal, D., Cloutier, V., Güler, C., Kazakis, N., 2018. A review of GIS-integrated statistical techniques for groundwater quality evaluation and protection. *Environmental Earth Sciences*, 77(19): 1-30.
- Nadiri, A. A., Gharekhani, M., Khatibi, R., Moghaddam, A. A., 2017. Assessment of groundwater vulnerability using supervised committee to combine fuzzy logic models. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(9): 8562-8577.
- Nahin, K. T. K., Basak, R., Alam, R., 2020. Groundwater vulnerability assessment with DRASTIC index method in the salinity-affected southwest coastal region of Bangladesh: a case study in Bagerhat Sadar, Fakirhat and Rampal. *Earth Systems and Environment*, 4(1): 183-195.
- Neshat, A., Pradhan, B. 2017., Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using DRASTIC framework and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(22): 501-509.
- Neshat, A., Pradhan, B., Pirasteh, S., Shafri, H. Z. M., 2014. Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. *Environmental earth sciences*, 71(7): 3119-3131.
- Rahmani, B. E., Guefaifia, O., Gouaidia, L., Baali, F., 2021. Sensitivity analysis of groundwater vulnerability maps in the Messaad plateau. *South Algerian steppe region. Algerian Journal of Environmental Science and Technology*. 9(2): 3093-3100.
- Ribeiro, L., Serra, E., Paralta, E., Nascimento, J., 2003. Nitrate pollution in hardrock formations: vulnerability and risk evaluation by geomathematical methods in Serpa-Brinches aquifer (South Portugal). In *Proc IAH International Conference on Groundwater in Fractured Rocks, Prague, Czech Republic, IHP-VI, Series on Groundwater*, 7: 377-378.
- Saidi, S., Bouri, S., Ben Dhia, H., 2011. Sensitivity analysis in groundwater vulnerability assessment based on GIS in the Mahdia-Ksour Essaf aquifer, Tunisia: a validation study. *Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques*, 56(2): 288-304.
- resources to nitrate: the case study of Mashhad, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 76(1): 41.
- Babiker, I. S., Mohamed, 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(1-3): 127-140.
- Birhanu, A., Masih, I., van der Zaag, P., Nyssen, J., Cai, X., 2019. Impacts of land use and land cover changes on hydrology of the Gumara catchment, Ethiopia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 112, 165-174.
- Gogu, R. C., Hallet, V., Dassargues, A. 2003. Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques. Application to the Néblon river basin (Belgium). *Environmental Geology*, 44(8): 881-892
- Hao, J., Zhang, Y., Jia, Y., Wang, H., Niu, C., Gan, Y., Gong, Y., 2017. Assessing groundwater vulnerability and its inconsistency with groundwater quality, based on a modified DRASTIC model: a case study in Chaoyang District of Beijing City. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(6): 144.
- Islam, M. T., Huda, N., Abdullah, A. B., Saidur, R., 2018. A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91: 987-1018
- Javadi, S., Hashemy, S. M., Mohammadi, K., Howard, K. W. F., Neshat, A., 2017. Classification of aquifer vulnerability using K-means cluster analysis. *Journal of hydrology*, 549: 27-37.
- Javadi, S., Kavehkar, N., Mohammadi, K., Khodadadi, A., Kahawita, R., 2011. Calibrating DRASTIC using field measurements, sensitivity analysis and statistical methods to assess groundwater vulnerability. *Water International*, 36(6): 719-732.
- Javadi, S., Kavehkar, N., Mousavizadeh, M. H., Mohammadi, K., 2011. Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using nitrate measurements in agricultural areas. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13(2): 239-249.
- Kardan Moghaddam, H., Jafari, F., Javadi, S., 2017. Vulnerability evaluation of a coastal aquifer via GALDIT model and comparison with DRASTIC index using quality parameters. *Hydrological Sciences Journal*, 62(1): 137-146.

- Sierra Leone. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 16: 100262.
- Torkashvand, M., Neshat, A., Javadi, S., Yousefi, H., 2021. DRASTIC framework improvement using stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA) and combination of genetic algorithm and entropy. Environmental Science and Pollution Research, 28(34): 46704-46724.
- Vías, J. M., Andreo, B., Perles, M. J., Carrasco, F., Vadillo, I., Jiménez, P., 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Hydrogeology Journal, 14(6): 912-925.
- Wang, J., He, J., Chen, H., 2012. Assessment of groundwater contamination risk using hazard quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijing Plain, China. Science of the Total Environment, 432: 216-226.
- Secunda, S., Collin, M. L., Melloul, A. J., 1998. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. Journal of environmental management, 54(1): 39-57.
- Shrestha, S., Kafle, R., Pandey, V. P., 2017. Evaluation of index-overlay methods for groundwater vulnerability and risk assessment in Kathmandu Valley, Nepal. Science of the Total Environment, 575: 779-790.
- Stigter, T. Y., Ribeiro, L., Dill, A. C., 2006. Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. Hydrogeology Journal, 14(1-2): 79-99.
- Tarawally, M., Wenbo, X., Weiming, H., Mushore, T. D., Kursah, M. B., 2019. Land use/land cover change evaluation using land change modeller: A comparative analysis between two main cities in