

آلودگی سفره‌های کارستی زیرزمینی

چکیده

با افزایش روزافزون برداشت آب، سطح آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های کشور به حد بحرانی رسیده است. این در حالی است که بخش قابل ملاحظه‌ای از مصارف شرب، کشاورزی و صنعت از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. لذا حفاظت کیفی و مدیریت آب‌های زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله ابتدا به بررسی علل آسیب‌پذیری شدید سفره‌های کارستی زیرزمینی پرداخته شده و سپس منابع آلاینده سفره‌های کارستی زیرزمینی با تأکید بر منابع آلاینده شهری و راه‌های کاهش و مدیریت آلودگی سفره‌های کارستی مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم زهکشی اصلی مناطق کارستی، کانال‌ها و مجراهای کارستی هستند که قابلیت آسیب‌پذیری و آلودگی بالایی دارند. توصیف انتقال آلودگی در این کانال‌ها و مجراها به دلیل ناهمگنی شدید، بسیار مشکل و پیچیده است و در بسیاری از مواقع، تغذیه سریع سفره‌های کارستی از بارش‌ها باعث بالا آمدن سطح سفره‌ها و مشارکت آن‌ها در سیل‌خیزی حوضه‌ها و شهرها می‌شود. اصولاً سفره‌های کارستی به سبب دارا بودن خلل و فرج و درزها و شکاف‌های فراوان، نازک بودن خاک‌های سطحی و انتقال سریع و آسان منابع آلاینده، بسیار آسیب‌پذیرند. فعالیت‌های شهری و صنعت، روستاها و فعالیت‌های کشاورزی، توریسم و حمل و نقل از منابع اصلی آلاینده سفره‌های کارستی هستند. فاضلاب‌های شهری، به‌ویژه نقاط شهری که دارای سیستم فاضلاب شهری نیستند و از چاه‌های جاذب استفاده می‌کنند از خطرناک‌ترین منابع آلاینده سفره‌ها هستند. همچنین تجمع زباله‌ها و نخاله‌های شهری به‌صورت زمین‌انباشت‌ها به‌ویژه استفاده از فروچاله‌ها و دولین‌های کارستی برای این منظور، آلودگی سفره‌های کارستی را در شهرهایی که روی زیربنای آهکی ساخته شده‌اند، در پی دارد.

کلیدواژه‌ها: سفره‌های کارستی زیرزمینی، نقش شهرها، آلاینده، سنگ‌های کربناته، آسیب‌پذیری

پیمان کریمی سلطانی

دبیر آموزش و پرورش قروه و دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه رازی کرمانشاه

کارست ناحیه‌ای است با هیدرولوژی و سیمای متمايز که باعث ایجاد محیطی



منحصربه‌فرد شده است. این سیمای
متمايز، از حلالیت بالای سنگ و
توسعه تخلخل ثانویه به وجود آمده
است. کارست در سنگ‌های کربناته و
تبخیری (گچ و نمک) ایجاد می‌شود.
نتیجه تخلخل ثانویه، ایجاد پدیده‌های
کارستی از قبیل چاله‌های کارستی،
مجاری کارستی، غار، پولیه، گرایک
و چشمه‌های بزرگ است. کارست
امروزه اصطلاحی رایج در ادبیات
فنی زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و
ژئومورفولوژی شده است

مقدمه

بسیاری از جمعیت‌های شهری و روستایی هنوز به‌طور گسترده به مخازن آب کارست وابسته‌اند. برای مثال در اروپا، قلمروهای کربناته حدود 3×10^6 کیلومتر مربع را اشغال می‌کنند و بسیاری از شهرهای مهم به‌طور کلی یا جزئی با آب‌های کارست تأمین می‌شوند که شامل برسی‌تول، لندن، پاریس، رم و وین است. در بعضی از کشورهای اروپایی، آب کارست، ۵۰ درصد از کل آب نوشیدنی را تشکیل می‌دهد و در بسیاری از نواحی، آب کارست تنها منبع قابل دسترس آب شیرین است. ۴۰ درصد از مناطق شرقی ایالات متحده در شرق رودخانه می‌سی‌سی‌پی زیر سفره‌های کارست قرار گرفته‌اند. در یک مقیاس جهانی، چنانچه کسی توزیع جمعیت جهانی را با توزیع سنگ‌های کربناته مقایسه کند، احتمال دارد ۲۰ تا ۲۵ درصد از جمعیت جهان در یک حد کم‌وبیش، وابسته به منابع آب کارست باشند. در چین جنوبی به تنهایی بیش از صد میلیون نفر روی کارست زندگی می‌کنند (Ford & Williams, 2007: 441).

کارست ناحیه‌ای است با هیدرولوژی و سیمای متمایز که باعث ایجاد محیطی منحصربه‌فرد شده است. این سیمای متمایز، از حلالیت بالای سنگ و توسعه تخلخل ثانویه به وجود آمده است. کارست در سنگ‌های کربناته و تبخیری (گچ و نمک) ایجاد می‌شود. نتیجه

تخلخل ثانویه، ایجاد پدیده‌های کارستی از قبیل چاله‌های کارستی، مجاری کارستی، غار، پولیه، گرایک و چشمه‌های بزرگ است. کارست امروزه اصطلاحی رایج در ادبیات فنی زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و ژئومورفولوژی شده است. با وجود تنوع بسیار زیاد در سرزمین‌های کارستی، این جمله آغازین یعنی «هیدرولوژی و سیمای متمایز سرزمین‌های کارستی» طلیعه‌ای است که بسیاری از محققان برای گفتار فنی خویش برگزیده‌اند. کارست، مفهومی فیزیوگرافی است که خاستگاهی جغرافیایی و منشأ زمین‌شناسی با کارکرد مهندسی دارد، البته با عدم قطعیت‌های فراوان. رفتار و ساختار کارست از دو منظر عمده می‌تواند مدنظر قرار گیرد: اول به‌عنوان منبعی برای تأمین نیاز و دوم، محلی برای مخاطره (طاهری و رئیسی: ۱۳۸۹: ۲).

تشکیلات آهکی از دو نظر برای توسعه شهرها محدودیت ایجاد می‌کنند. نخست از نظر شرایط خاص آب‌شناختی آن‌ها، زیرا آلودگی آب‌ها در تشکیلات آهکی به راحتی امکان‌پذیر است؛ و دوم به دلیل نحوه تحول خاص آن‌ها، چرا که ممکن است در طی آن، فرونشینی‌هایی رخ دهد. فرونشینی در مناطق آهکی از جدی‌ترین مسائل ژئومورفولوژیک به شمار می‌رود. در بین انواع مختلف فروچاله‌ها، فروچاله‌های فروریزی، (که در نتیجه ریزش سقف غارها شکل می‌گیرند) خطرهای مصیبت‌باری را در پی دارند که اغلب از دید پنهان‌اند (روستایی و جباری، ۱۳۹۱: ۲۳).

به سبب قرارگیری بخش وسیعی از کشور ما در کمربند خشک و نیمه‌خشک نیمکره شمالی و استفاده وسیع از آب‌های زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین منبع تأمین آب مورد نیاز در این مناطق، شناخت عوامل و شرایط طبیعی و انسانی آلاینده آب‌های زیرزمینی لازم و ضروری است. به دلیل پراکندگی وسیع تجمعات انسانی، اعم از شهری و روستایی ایران در نیمه غربی و شمالی کشور به‌عنوان مهم‌ترین نقاط پراکندگی سنگ‌های کربناتی و به تبع آن، شکل‌گیری آبخوان‌های کارستی، شناخت شرایط و عوامل آلوده‌کننده سفره‌های کارستی ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس در این مقاله ابتدا به بررسی علل آسیب‌پذیری سریع و بالای سفره‌های کارستی زیرزمینی و سپس به بررسی عوامل آلاینده سفره‌های کارستی با تأکید ویژه بر نقش مراکز شهری و راهکارهای کاهش آسیب‌پذیری سفره‌های کارستی، پرداخته خواهد شد.

آسیب‌پذیری سفره‌های کارستی

آسیب‌پذیری از نظر مفهومی به دو دسته ذاتی و ویژه تقسیم می‌شود. آسیب‌پذیری ذاتی به خصوصیات آبخوان (هدایت هیدرولیکی، گرادیان هیدرولیکی و چگونگی خلل و فرج) و تنش‌های وارد شده به سیستم (تغذیه، ارتباط با آب سطحی، زمان ماندگاری آب در منطقه اشباع و دبی پمپاژ) بستگی دارد. به عبارت دیگر، آسیب‌پذیری ذاتی فقط به خصوصیات زمین‌شناسی، هیدرولوژی و هیدرولوژیکی یک آبخوان بستگی دارد و با منابع آلودگی طبیعی یا غیرطبیعی ناشی از فعالیت‌های انسانی بی‌ارتباط است. این در حالی است که آسیب‌پذیری ویژه نشان‌دهنده آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به آلاینده‌های خاص یا گروهی از آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی است. به عبارت بهتر، آسیب‌پذیری ویژه از واکنش آلاینده‌ها با اجزای مختلف آسیب‌پذیری ذاتی به وجود می‌آیند (افروزی و محمدزاده به



به دلیل پراکندگی وسیع تجمعات انسانی، اعم از شهری وروستایی

ایران در نیمه غربی و شمالی کشور
به عنوان مهم ترین نقاط پراکندگی
سنگ های کربناتی و به تبع آن،
شکل گیری آبخوان های کارستی،
شناخت شرایط و عوامل آلوده کننده
سفره های کارستی ضروری به نظر
می رسد

لار در البرز، نمونه بارز عملکرد تشکیلات آهکی است (روستایی و جباری، ۱۳۸۹: ۲۲). برای مثال این مسئله در سد لار در شمال پلور (شرق تهران) بسیار حائز اهمیت است. سد لار روی رودخانه لار (از شاخه های هراز) و عمدتاً به منظور تنظیم آب این رودخانه و تأمین بخشی از آب مصرفی تهران و آبیاری مازندران ساخته شده است. اما پس از احداث و آب گیری این سد معلوم شد که مقدار زیادی آب به ویژه از طریق سنگ های آهکی متخلخل و درز و شکاف دار طرف راست دریاچه سد فرار می کند. بررسی ها پس از احداث سد، وجود حفره های بزرگ از جمله حفره ای به گنجایش حدود ۹۰ هزار مترمکعب را مشخص ساخته که فعالیت هایی برای مسدود کردن آن ها انجام شده است (صداقت، ۱۳۸۱: ۷۵). در این گونه موارد پر کردن منافذ با سیمان و غیرقابل نفوذ کردن جایگاه مخازن آبی از اقدامات اولیه است (روستایی و جباری، ۱۳۸۹: ۲۲).

۲. لایه نازک خاک سطحی

خاک، اولین سطحی است که آلودگی با آن تماس پیدا می کند و بر میزان نفوذ و جذب آلودگی در طول لایه خاک نیز، تأثیر دارد. منابع آب زیرزمینی عاری از عوامل بیماری زا هستند. خاک، فیلتر مؤثری برای حذف میکروارگانیسم ها و دیگر ذرات بالانسبه بزرگ در نتیجه عمل صاف سازی است. به طور معمول در مقایسه با آب های سطحی،

نقل از چیت سازان، ۱۳۹۱: ۲).

به طور کلی آب های زیرزمینی در چند زمینه آسیب پذیرند:

۱. آلودگی آب های زیرزمینی؛
۲. تغییرات دوره ای: تغییر در نوع سنگ و تغییرات سطح ایستایی؛
۳. کارست: تغییرات دوره ای + پراکندگی چاله های فرونشسته + آلودگی (Roth, 2002: 8).

مراقبت از منابع آب کارستی زیرزمینی، نیازمند مدیریت حساس و دقیق بر پایه تجزیه و تحلیل های جامع از خطر و نقشه های آسیب پذیری منابع کارست های زیرزمینی است. در متون مختلف خطر آلودگی آب های زیرزمینی و پتانسیل ایجاد خطر برای آب های زیرزمینی تنها به فعالیت های انسانی صورت گرفته در سطح زمین نسبت داده شده است (De Ketelaere et al, 2004: 86). به دلایل زیر، سفره های کارستی زیرزمینی در برابر منابع آلاینده انسانی آسیب پذیرند.

۱. دارا بودن درزها و شکاف های وسیع

سنگ های کربناتی دارای مجموعه ای از فضاهای خالی با منشأهای مختلف اند که ظرفیت ذخیره و انتقال آب را تحت تأثیر قرار می دهند. بنابراین، سفره های کارستی عموماً به سه نوع مختلف براساس ماهیت فضاها که آب در آن ها ذخیره و از میان آن جابه جا می شود، تقسیم می شود که خلل و فرج بسیار ریز، شکافی و مجرای (آب گذری) خوانده می شوند. اغلب سفره های کارستی در عمل، ترکیبی از هر سه را دارند. اما در تعریف باید ترکیب آب گذرهای مهم و غالب بیان شود. جدول ۱ مثال خوبی از توزیع و پراکندگی میزان تخلخل را در ۴ سفره کربناتی براساس تفاوت در نوع سنگ (آهکی و دولومیتی)، دوره تغذیه (آلوتونیک و اتونیک) و مرحله بلوغ سنگ زایی (پالئوتونیک تا سنوزونیک) نشان داده است. تخلخل دانه ای در تمام موارد مهم و در ایجاد ذخیره آبی بسیار مهم است. با این همه، هنوز همان طور که ما بعداً می بینیم در هر یک از این موارد، تخلخل مجرای (نوع سوم) است که به هنگام فراهم آوردن مسیریایی برای جریان آب های زیرزمینی، غالب می شود (Ford & Williams, 2007: 104).

جدول ۱. درصد خلل و فرج اولیه، ثانویه و از نوع سوم در ۴ سفره کربناتی (Ford & Williams, ۲۰۰۷: ۱۰۶)

محل	درصد خلل و فرج			عمر سنگ ها
	درز و شکاف (اولیه)	ترک ها و شکاف ها (ثانویه)	کانال ها و مجراها (ثالث)	
اسمیت ویل، اونتاریو، کانادا	۶/۶	۰/۲	۰/۰۳	سیلورین
غار ماموت، کنتاکی	۲/۴	۰/۳	۰/۰۶	می سی سی پی
گچ، انگلستان	۳۰	۰/۰۱	۰/۰۲	کرتاسه
یوکوتان، مکزیک	۱۷	۰/۰۱	۰/۰۵	آلوسن

موضوع دوم درباره وضعیت آب شناسی سنگ های کربناتی، نفوذ پذیری بالای آن هاست که وجود هرگونه سد یا مخزن آبی در درون یا بیرون شهرها را به دلیل نشت آب یا حتی زهکشی آب مخزن به داخل سنگ با مشکل مواجه می کند. مشکل ایجاد شده برای سد



آب‌های زیرزمینی را به‌عنوان منابعی در نظر می‌گیرند که کمتر در معرض خطرات ناشی از فعالیت‌های انسانی است، زیرا بخش سطحی خاک، نقش حفاظتی و فیلترکننده دارد.

سفره‌های کارستی به سبب وجود لایه نازک خاک یا عدم وجود خاک و پوشش گیاهی یا رسوباتی که توانایی نفوذ سریع و پخش روی فضاهای وسیع را دارند، می‌توانند در شرایط نامتجانس، جریان را به داخل زمین نفوذ دهند. وجود شرایط ویژه مانند وجود لایه‌های رویی و تمرکز سریع و ساده آب به سوی ناحیه اشباع، فرصت کمی را برای رقیق (کاسته شدن) شدن آلودگی تا رسیدن به آب‌های زیرزمینی، چشمه‌ها و چاه‌ها فراهم می‌کند. بسیاری از مشکلات جدی آلودگی ممکن است ناشی از برخوردهای متفاوت انسانی باشد (Ravbar, 2006: 171).

**سفره‌های کارستی
به سبب وجود
لایه نازک خاک یا
عدم وجود خاک و
پوشش گیاهی یا
رسوباتی که توانایی**



**نفوذ سریع و پخش روی فضاهای وسیع
را دارند، می‌توانند در شرایط نامتجانس،
جریان را به داخل زمین نفوذ دهند.
وجود شرایط ویژه مانند وجود لایه‌های
رویی و تمرکز سریع و ساده آب به سوی
ناحیه اشباع، فرصت کمی را برای رقیق
(کاسته شدن) شدن آلودگی تا رسیدن
به آب‌های زیرزمینی، چشمه‌ها و چاه‌ها
فراهم می‌کند. بسیاری از مشکلات جدی
آلودگی ممکن است ناشی از برخوردهای
متفاوت انسانی باشد**

کارستی که در انگلستان صورت پذیرفت، آن‌ها دریافتند که با رها کردن فاضلاب‌های روستایی روی اراضی کشاورزی، آب آلوده به میزان ۱۰۰ متر در درزها و شکاف‌ها و آون‌های لایه‌های زیرین نفوذ می‌کند و با عبور از رسوبات رسی کواترنری وارد کارست‌های گچی زیرین می‌شود. در مدت ۲۴ ساعت آلودگی‌ها به سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی رسید و قبل از اینکه دوباره در روستا برای مصرف مجدد، پمپاژ شود تحت‌تأثیر شیب هیدرولیک حدود ۲۰۰ متر به سمت پایین حرکت کرد (Edmonds et, 2008: 101).

مکان‌یابی چشم‌اندازها به منظور توسعه شهری نیازمند درک ویژگی‌های ساختاری و هیدرولوژیکی است. رخداد حفره‌هایی در خاک‌ها و سنگ نیاز به ملاحظات مهندسی خاص به منظور ایجاد تأسیسات ثابت برای ساخت جاده‌ها و ساختمان‌ها دارند، زیرا آب‌های زیرزمینی در مناطق کارست خیلی سریع حرکت می‌کنند، به گونه‌ای که آلودگی‌ها می‌توانند در فواصل زیادی در یک دوره زمانی کوتاه گسترش یابند. مکان‌یابی مناسب مخازن آب نوشیدنی ممکن است به دلیل خطر آلودگی مشکل باشد. فروچاله‌های تخریبی، مسائل زهکشی، آلودگی آب‌های زیرزمینی، مسائل محیطی و مهندسی از مسائل مرتبط با توسعه روی مناطق کارست هستند (Veni et al, 2001: 7).

منابع آلاینده سفره‌های کارستی زیرزمینی

به‌طور کلی می‌توان عوامل مؤثر در آلودگی آب‌های کارستی را چنین طبقه‌بندی کرد:
الف. انتقال آلاینده‌ها (فاضلاب‌ها و پساب‌های شهری) به سیستم

۳. مکانیسم پخش سریع

نفوذ بسیار زیاد آب در بیشتر سازندهای کارستی باعث شده است که کارست، آب را چون یک سد ذخیره کند و به مرور زمان از چشمه‌های زیردست خارج یا وارد دشت‌های مجاور سازد و به وسیله چاه‌های پمپاژ از آن‌ها بهره‌برداری شود. خطر آلودگی آب‌های کارستی به واسطه حرکت سریع آلاینده‌ها در چاله‌های کارستی، مجاری کارستی و غارها افزایش می‌یابد (طاهری و رئیس، ۱۳۸۹: ۲). در پژوهشی با هدف بررسی سرعت و آسیب‌پذیری سفره‌های



غارها در کیفیت آب آشامیدنی
ما نقشی حیاتی ایفا می کنند. در
مناطق کارست و شبه کارست،
جریان آب سطحی با پالایشی
اندک به سرعت، درون غارها
جریان می یابد. این آب و
ناخالصی هایی که با خود می برد
(مثل زباله ها و فضولات انسانی
و حیوانی، آفت کش ها، کودهای
شیمیایی، فرآورده های نفتی و
سایر آلاینده ها) اغلب با آلودن
چاه ها، چشمه ها و لایه های آب ز،
مسافت های بزرگ زیرزمینی را طی
می کند. تنها با مدیریت عاقلانه و
محتاطانه ارتباط بین کارست و آب
و جلوگیری از ورود آلاینده ها به
غارها می توانیم از کیفیت آب های
آشامیدنی مان حفاظت کنیم

هیدرولوژیکی کارست؛

ب. مدفون کردن زباله ها و نخاله های شهری در سنگ چال ها
و شکاف های کارستی و به عبارتی، تبدیل کردن فروچاله ها به
زمین انباشت ها؛

ج. زهاب های آلوده به کود و سموم شیمیایی از اراضی زراعی
و باغات و پساب های آلوده به فضولات و کودهای دامی در مسیر
آب های رودخانه ها و فروچاله ها؛

د. انتقال مواد شوینده و آلاینده های شیمیایی به حوضه زهکشی
کارست و آبخوان.

۱. فاضلاب های شهری

آلودگی در مناطق شهری با تراکم بالای جمعیت، یک پدیده رایج
در سفره های کارستی است. آلودگی ها شامل مخازن ذخایر آلوده،
رواناب های حاوی فلزات، نفت و گریس، زائدات و زباله های جامد
و آزادسازی تصادفی یا عمدی زوائد شیمیایی به وسیله تجهیزات
صنعتی و ملک داران است. سفره های کارست در ایالات متحده
به وسیله فلزات سمی، پلی کلریدها، مواد شیمیایی رادیواکتیو،
حلال های آلی و بسیاری از آلوده کننده های دیگر آلوده شده اند.
اگرچه این آلاینده ها در هر ناحیه توسعه یافته به طور معمول
وجود دارند، اما به آسانی می توانند وارد سفره های کارست شوند
و گسترش یابند و باعث آسیب پذیری آب های زیرزمینی کارست
شوند. نشت های تصادفی و ریختن عمدی زائدات، به سرعت
سفره های کارست را آلوده می کند، زیرا مواد شیمیایی به راحتی
از طریق خاک و سنگ بستر آهک انتقال می یابند. نشت هایی در



احداث ساختمان‌های مسکونی روی سازندهای کارستی باعث آلودگی

آب‌های کارستی شده است. برای
مثال در دامنه کوه باباکوهی شیراز،
به شکلی گسترده، منازل مسکونی
روی سازند کارستی احداث شده‌اند و
در پایین دست چاه‌های شرب شیراز
قرار دارند

مناطق کارست و شبه کارست، جریان آب سطحی با پالایشی اندک به سرعت، درون غارها جریان می‌یابد. این آب و ناخالصی‌هایی که با خود می‌برد (مثل زباله‌ها و فضولات انسانی و حیوانی، آفت‌کش‌ها، کودهای شیمیایی، فراورده‌های نفتی و سایر آلاینده‌ها) اغلب با آلودن چاه‌ها، چشمه‌ها و لایه‌های آب‌زا، مسافت‌های بزرگ زیرزمینی را طی می‌کند. تنها با مدیریت عاقلانه و محتاطانه ارتباط بین کارست و آب و جلوگیری از ورود آلاینده‌ها به غارها می‌توانیم از کیفیت آب‌های آشامیدنی‌مان حفاظت کنیم.

احداث ساختمان‌های مسکونی روی سازندهای کارستی باعث آلودگی آب‌های کارستی شده است. برای مثال در دامنه کوه باباکوهی شیراز، به شکلی گسترده، منازل مسکونی روی سازند کارستی احداث شده‌اند و در پایین دست چاه‌های شرب شیراز قرار دارند (طاهری و رئیس: ۱۳۸۹: ۹).

تخلیه غیرقانونی پسماندها در فلات کراس واقع در اسلوونی زمانی صورت گرفته که تخلیه و تجمع مواد زائد سازمان‌دهی نشده است. متأسفانه تعدادی از زمین‌انباشت‌های قدیمی هنوز هم در حال استفاده‌اند. در بین نخاله‌ها و مواد زائد ساختمانی و مواد برداشت شده، مواد زائد ناشی از فعالیت‌های روستایی و مبلان‌های منازل رواج بیشتری دارند. همچنین وسایل و مواد خطرناک دیگری نیز وجود دارند (یخچال‌ها، موتور ماشین‌ها، مخازن نیروی برق، باتری‌ها، روغن‌های جلا و موتور، جعبه‌های بی‌ارزش، پاک‌کننده‌ها، باقی‌مانده‌های مواد شیمیایی و بی‌ارزش کشاورزی، قطعه‌های منفصل و شیمیایی رایانه‌ها) (شکل ۱). در چنین محل‌هایی تخلیه و تجمع مواد زائد، پسماندها و زباله‌ها به راحتی می‌توان آه‌آلات قدیمی، مواد تجزیه‌شونده، تیرهای بادی و بقایای فعالیت‌های باغداری، کشاورزی و... را پیدا کرد (Ravbar, 2006: 173).



شکل ۱. زمین‌انباشت‌ها، زباله‌ها و مواد زائد، اصلی‌ترین منابع آلاینده سفره‌های کارستی زیرزمینی در فلات کراس (Ravbar, ۲۰۰۶: ۱۷۴).

۳. توریسم

زمین گردشگری از مواردی است که با جاذبه‌بخشی به کارست و به‌ویژه غارها و چشمه‌ها می‌تواند ضمن ایجاد انگیزه اقتصادی به اشتغال نیز بپردازد. کشف یک غار آبی حتی در دورافتاده‌ترین مناطق نیز می‌تواند سیل گردشگران را به خود معطوف سازد و به همان نسبت موجبات توسعه و رفاه اقتصادی را فراهم آورد. از نمونه‌های بارز این مدعا می‌توان به غار قوری قلعه (روانسر)، غار علیصدر (همدان) و غار ماموت کنتاکی (آمریکا) اشاره کرد که در

امتداد جاده و ریل‌ها همانند نشت نفت و گاز، خطوط لوله و مخازن ذخیره زیرزمینی بسیاری از سفره‌های کارست را آسیب‌پذیر کرده است. بنزین باعث بعضی از مشکلات قابل توجه آلودگی در غار هیک (Hick) در کنتاکی و غار واترفال (Water Fall) در جورجیا شده است. در نواحی کارست، زمین‌انباشت‌ها چالش‌های خاصی ایجاد می‌کنند. در سراسر جهان، زمین‌انباشت‌ها به داخل سفره‌های کارستی نفوذ می‌کنند و باعث مشکلات آلودگی شدید با فرکانس، سرعت و شدت بیشتر نسبت به سفره‌های غیرکارستی می‌شوند (Veni et al: 2001: 30).

۲. زباله‌های شهری

سیستم‌های هیدرولوژیکی کارست نسبت به تأثیرات محیطی حساس‌تر از سیستم‌های دیگرند، زیرا علاوه بر آب‌های سطحی، مجموعه‌ای از مشکلات دیگر مرتبط با شبکه‌های هدایت زیرزمینی و اکوسیستم‌های حساس وجود دارند. در همه کارست‌های مسکونی دولین‌ها و چاله‌ها مشاهده می‌شوند که متأسفانه مکانی برای ریختن زباله‌های مایع یا جامد به حساب می‌آیند، زیرا در زیر زمین ناپدید می‌شوند از ذهن و دید ما خارج خواهند شد (Ford & Williams, 2007: 449).

غارها در کیفیت آب آشامیدنی ما نقشی حیاتی ایفا می‌کنند. در



گسترش فعالیت‌های ژئوتوریسم و اکوتوریسم در نواحی کارستی به

سبب پتانسیل بسیار بالایی که این
نواحی در جذب گردشگر دارند،
اگر علمی و تحت نظارت صورت
نگیرد به راحتی آلودگی سفره‌های
کارستی را در پی خواهد داشت

مورد اخیر تعداد بازدیدکنندگان سالیانه به دو میلیون نفر می‌رسد. غارها و چشمه‌های آب گرم مناطق کارستی نیز می‌توانند برای اهداف سلامت و تسکین آلام و تفرج عمومی به کار روند. مثال‌های متعددی از این گونه کاربردهای اقتصادی را می‌توان در کشورهایمانند کانادا و مجارستان مشاهده کرد. افزون بر این، غارها و مناطق کارستی به عنوان پناهگاه در حملات نظامی و جنبش‌های چریکی در ملل مختلف به دفعات مورد استفاده قرار گرفته‌اند (طاهری و رئیسی، ۱۳۸۹: ۵).

گسترش فعالیت‌های ژئوتوریسم و اکوتوریسم در نواحی کارستی به سبب پتانسیل بسیار بالایی که این نواحی در جذب گردشگر دارند، اگر علمی و تحت نظارت صورت نگیرد به راحتی آلودگی سفره‌های کارستی زیرزمینی را در پی خواهد داشت (شکل ۲).

۴. حمل و نقل

حاشیه جاده‌ها و بزرگراه‌های اطراف شهرها محل تجمع مواد زائد، زباله‌ها و نزولات جوی می‌باشد. در این نقاط نزولات و آلودگی‌ها تجمع یافته و به درون سفره‌های کارستی نفوذ می‌کنند. انتقال مواد خطرناک، یک خطر ویژه در بخش حمل و نقل جاده‌ای است. تصادفات می‌توانند سبب نشت و تراوشات کنترل نشده‌ای در محیط شوند. یکی از عوامل و منابع آلوده‌کننده کارست آب‌های زیرزمینی سرویس‌های جابه‌جایی مواد نفتی می‌باشد. در اغلب نقاط کشور و به ویژه در نواحی کوهستانی هرساله هزاران تن نمک و یا سایر ترکیبات شیمیایی و نمکی با هدف کاهش خطرات برف و یخ بر روی جاده‌ها و بزرگراه‌ها ریخته می‌شوند. این مواد توسط چرخ ماشین‌ها پراکنده شده و یا به حاشیه جاده‌ها کشیده شده و همراه با نزولات جوی وارد سفره‌های کارستی زیرزمینی می‌شوند.



شکل ۲. تبدیل شدن یک چاله کارستی به زباله‌دان گردشگران و کاهش ۴ متری عمق آن از سال ۱۳۵۲ تا سال ۱۳۹۲ - باباگرگر قروه

۵. محیط روستاها و فعالیت‌های کشاورزی

در نواحی روستایی و کشاورزی، سفره‌های کارست در معرض آلودگی محیطی ناشی از تنوع منابع، شامل کودهای شیمیایی، حشره‌کش‌ها و آفت‌کش‌ها قرار دارند. سطوح این آلاینده‌ها در پی استفاده فصلی از آن‌ها و افزایش طوفان‌ها بالاست. غلظت افزایش یافته پاتوژن‌ها می‌تواند از طریق خاک‌ها به داخل سفره‌های واقع در زیر مراتع حیوانات، شست‌وشو یابد. رسوبات هم‌چنین می‌توانند با پر کردن مجراها و تغییر

زهکش‌های زیرزمینی روی جریان آب زیرزمینی تأثیر بگذارند. یک عملیات رایج در بسیاری از چشم‌اندازهای روستایی، انداختن زباله‌های خانگی، مصالح ساخت‌وساز و احشام مرده به داخل چاه‌هاست. مقدار آلودگی که وارد یک سفره می‌شود وابسته به حجم و نوع موادی است که به داخل چاله‌ها ریخته شده‌اند. مضرترین محصولات عبارت‌اند از: باکتری‌های ناشی از اجساد حیوانات، ضدیخ و روغن موتور استفاده شده و ظروف خالی علف‌کش‌ها، حلال‌ها و رنگ. این مواد به آسانی وارد سفره می‌شوند و به سرعت به چشمه‌ها و چاه‌های مجاور انتقال می‌یابند (Veni, et al, 2001: 31).

نمونه دیگر، رها کردن لاشه گوسفندان و سایر احشام تلف شده روی سازندهای کارستی مرتفع یا در داخل فروچاله‌هاست. غارهای فراوانی در درون سازندهای کارستی قرار دارند که بعضی از آن‌ها در سطح بین‌المللی معروف‌اند. این غارها آزمایشگاه بزرگی برای محققان به شمار می‌روند و حل بسیاری از مسائل کاربردی به شناخت همه‌جانبه غار مرتبط است. متأسفانه غارنهبشته‌های بسیاری از غارها را تخریب یا از غار خارج کرده‌اند و محدودیت‌های بودجه‌ای برای مطالعات غارشناسی وجود دارد.

تخریب و آلودگی منابع کارست در ایران رو به افزایش است. انجام تحقیقات و ارائه برنامه اجرایی برای حفاظت از منابع کارستی را باید جدی گرفت (طاهری و رئیسی، ۱۳۸۹: ۹).

بحث و نتیجه‌گیری

تشکیلات کارستی از نظر هیدرولوژی می‌توانند ۳ مسئله ایجاد کنند:

۱. نخست از طریق استعداد خاص آن‌ها در توسعه آلودگی، زیرا آلودگی آب‌ها در تشکیلات آهکی به راحتی امکان‌پذیر است؛
۲. دوم به دلیل نفوذپذیری بالای آن‌ها و ایجاد مشکل در زمان احداث سد؛
۳. سوم ایجاد سیل در هنگام بسته شدن و ریزش مجراهای زیرزمینی.

به منظور کاهش خطرات ناشی از آلودگی آب‌های سطحی، تقدیس‌بخشی به چشمه‌های کارستی، چشم‌اندازهای بدیع و تنوع زیستی در مناطق کارستی می‌تواند به اشکال گوناگون، دوستداران طبیعت و به‌ویژه سازمان‌های مردم‌نهاد یا NGOها را متوجه ارزش و اهمیت کارست سازد و از این رهگذر موجبات حفاظت این منابع و به‌ویژه منابع آب کارست را فراهم آورد. در غیر این صورت، تغییر کاربری‌های فزاینده و البته غیراصولی می‌تواند با سرعتی باورنکردنی سیلی از آلوده‌سازها را روانه آبخوان‌های کارستی کند. البته اگر بتوان در ساختار قانونی و به‌ویژه وضع قوانین به‌روز و کارآمد تضمین قانونی برای حفاظت از منابع کارست ایجاد کرد، می‌توان به حفاظت این منابع دلخوش بود.

مطالعه و پژوهش‌های ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی در قلمروهای کارستی به منظور شناسایی دقیق آن‌ها و بررسی درجه تکامل‌یافتگی آن‌ها ضروری است، زیرا هرچه درجه تحول کارست‌ها و نواحی کارستی بالاتر باشد، آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر آلاینده‌ها نیز بیشتر می‌شود. کنترل کاربری اراضی در قلمروهای کارستی که از منابع آب آن‌ها به منظور شرب شهرها یا نواحی روستایی استفاده می‌شود، از دیگر اقدامات لازم در این زمینه است. برای مثال، جنگل‌زدایی در پهنه‌های کارستی و تغییر مسیر شبکه‌های آبی، استخراج معادن، زراعت یا هرگونه تغییر اساسی در ساختار زمین، باید متکی بر اصول مدیریت سرزمین انجام پذیرد.

راه‌حل دیگر، جمع‌آوری زباله‌ها و جلوگیری از دفن کردن آن‌ها در فروچاله‌های کارستی یا شکاف‌های کارستی است، زیرا دفن زباله‌ها در مسیرهای سیستم زهکشی کارست، ضمن تجزیه آن‌ها به سهولت می‌تواند آن‌ها را همراه با آب باران به درون آبخوان‌ها هدایت کند و باعث آلودگی کارست شود. در مناطقی که شهرها یا تعداد زیادی از آبادی‌ها روی قلمروهای کارستی واقع شده‌اند، سیستم فاضلاب نباید نفوذی و به‌صورت چاه‌های جاذب باشد، زیرا تخلخل ثانویه بالا در کارست باعث آلودگی منابع آب خواهد شد. از این نظر احداث شبکه الگو یا سیستم‌های ذخیره‌سازی فاضلاب ضروری است. در نواحی روستایی باید از هدایت فاضلاب‌ها به شکاف‌های کارستی یا رودخانه و آب‌های سطحی کارست جلوگیری شود. هم‌چنین لازم است برای حفاظت از کارست‌های کوهستانی که در آن‌ها مسیر عبور دام‌های عشایر یا روستایی وجود دارد، برنامه‌ریزی نشود استقرار دام‌ها در مسیر چشمه‌ها یا حوضه زهکشی آن‌ها یا مسیر رودخانه‌های مناطق کارستی می‌تواند به دلیل تجمع فضولات و کودهای دامی خطرآفرین باشد. کنترل زباله‌ریزی و هرگونه مواد آلاینده از طریق بازدیدکنندگان و جهانگردان راهکار دیگری برای جلوگیری از آلودگی کارست‌هاست.

مطالعه و پژوهش‌های
ژئومورفولوژیکی و
هیدرولوژیکی در
قلمروهای کارستی به
منظور شناسایی دقیق
آن‌ها و بررسی درجه
تکامل‌یافتگی آن‌ها
ضروری است، زیرا هرچه
درجه تحول کارست‌ها
و نواحی کارستی بالاتر
باشد، آسیب‌پذیری آن‌ها
در برابر آلاینده‌ها نیز
بیشتر می‌شود

منابع

۱. افروزی، محسن و محمدزاده، حسین (۱۳۹۱). «ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان دشت بروجن - فرادنه به آلودگی با استفاده از روش DRASTIC در محیط GIS». فصلنامه پژوهش آب ایران، شماره ۱۰، صص ۱۰-۱.
۲. روستایی، شهرام و جباری، ایرج (۱۳۹۱). ژئومورفولوژی مناطق شهری. چاپ چهارم. تهران: سمت.
۳. صداقت، محمود (۱۳۸۱). منابع و مسائل آب در ایران. تهران: انتشارات دانشگاه پیام نور.
۴. طاهری، کمال و عزت‌الله رئیسی (۱۳۸۹). «منابع کارست ایران، مقدمه‌ای بر یک مفهوم». مجموعه مقالات نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران. کرمانشاه: صص ۱-۱۴.
5. De Ketelaere, D., Htzi, H., Neukum C., Civitá, M., Sappa, G. 2004: "Hazard Analysis and Mapping. In: Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karstic) Aquifers". Final report COST Action 620. Brüssel.
6. Edmonds, Clive Brett, Peter (2008). "Improved groundwater vulnerability mapping for the karstic chalk aquifer of south east England", Engineering Geology, 99, pp: 95-108.
7. Ford, D. C., Williams, P.W. 1989. Karst geomorphology and hydrology. Unwin Hyman Ltd. London.
8. Ravbar, Nataša, (2006): "Karst Aquifer Hazard Assessment And Mapping On The Classical Karst, Acta geographica slovenica", 46-2, pp169-189.
9. Roth, Chris, 2002, Sinkholes. A Direct and Rapid Conduit for Surface Water to Groundwater, ppt.
10. Veni, G et al., (2001). "Living with karst". American Geological Institute, CLB Printing Company.