

شاہ ولی اللہ
یونیورسٹی
ڈاکہ

آب زمین شیمی

(کارشناسی ارشد زمین شناسی)

دکتر زہرا کی ہمایون

«امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.»^۱

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه‌ی فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه‌ی الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پربار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه‌ی مطالعه‌ی هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره‌ی دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه‌ی دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان، تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه‌ی بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاورد انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

۱. پیام مقام معظم رهبری به مناسبت آغاز هفته کتاب ۷۲/۱۰/۴

سوره‌ای که بر آن فرستاده‌ی عظیم‌الشأن خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «إِقْرَأْ وَرَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه‌ی انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره‌ی جغرافیایی ایران شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه‌ی مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه‌ی خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب

پیشگفتار.....	یازده
فصل اول. کلیات ژئوشیمی آب‌های زیرزمینی.....	۱
هدف کلی.....	۱
هدف‌های یادگیری.....	۱
مقدمه.....	۱
۱-۱ کیفیت آب زیرزمینی.....	۲
۲-۱ چرخه هیدروژئوشیمیایی.....	۵
۳-۱ سیستم ژئوشیمیایی آبخوان.....	۶
۴-۱ محلول آب زیرزمینی.....	۹
۱-۴-۱ ساختار مولکول آب.....	۹
۲-۴-۱ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب.....	۱۱
خلاصه فصل اول.....	۱۴
خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل اول.....	۱۵
فصل دوم. فرایندهای شیمیایی در آبخوان.....	۱۷
هدف کلی.....	۱۷
هدف‌های یادگیری.....	۱۷
مقدمه.....	۱۷
۱-۲ تعادل شیمیایی و جنبش.....	۱۸
۱-۱-۲ تعادل شیمیایی.....	۱۸
۱-۱-۲-۱ انرژی شیمیایی.....	۱۹

۲۲	.....۲-۱-۱-۲ فعالیت شیمیایی
۲۵	.....۳-۱-۱-۲ قانون اثر جرم و ثابت تعادل
۲۹	.....۴-۱-۱-۲ اثر یون مشترک
۳۰	.....۲-۲ جنبش و سرعت واکنش‌ها در آبخوان
۳۲	.....۳-۲ واکنش‌ها و فرایندهای شیمیایی غالب در آبخوان
۳۲	.....۱-۳-۲ واکنش‌های رسوب/انحلال
۳۶	.....۲-۳-۲ واکنش‌های اسید/باز
۴۱	.....۳-۳-۲ واکنش‌های کمپلکس
۴۱	.....۴-۳-۲ واکنش‌های جاننشینی/هیدرولیز
۴۲	.....۵-۳-۲ واکنش‌های اکسیداسیون/احیا
۴۲	.....۶-۳-۲ فیلتراسیون یونی و اسمز
۴۳	.....۷-۳-۲ انحلال و خروج گازها
۴۴	.....۸-۳-۲ جذب و دفع
۴۸	.....۴-۲ ترکیب شیمیایی آب‌زیرزمینی
۴۸	.....۱-۴-۲ مواد حل‌شده در آب‌زیرزمینی
۵۱	.....۲-۴-۲ عناصر شیمیایی در آب‌زیرزمینی
۵۵	.....خلاصه فصل دوم
۵۶	.....خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل دوم
۵۷	.....خودآزمایی تشریحی فصل دوم
۵۹	.....فصل سوم. پایش کیفی آبخوان
۵۹	.....هدف کلی
۵۹	.....هدف‌های یادگیری
۵۹	.....مقدمه
۶۰	.....۱-۳ پایش کیفی آب
۶۰	.....۲-۳ پایش کیفی آبخوان
۶۰	.....۱-۲-۳ هدف‌های پایش کیفی آب‌زیرزمینی
۶۱	.....۲-۲-۳ نمونه‌برداری از آب‌زیرزمینی
۶۳	.....۳-۲-۳ طراحی شبکه نمونه‌برداری
۶۷	.....۴-۲-۳ طراحی برنامه نمونه‌برداری
۶۷	.....۱-۴-۲-۳ انتخاب آزمایشگاه
۶۷	.....۲-۴-۲-۳ نمونه‌برداری آزمایشی
۶۷	.....۳-۴-۲-۳ اندازه‌گیری عمق سطح ایستابی و عمق چاه
۶۸	.....۴-۴-۲-۳ ساختمان و توسعه چاه
۶۸	.....۵-۴-۲-۳ خروج آب راکد چاه
۶۹	.....۶-۴-۲-۳ فیلتر کردن نمونه‌ها

۷۰	..... خلاصه فصل سوم
۷۱	..... خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل سوم
۷۳	..... فصل چهارم. پارامترهای مورد سنجش در پایش کیفی آبخوان
۷۳	..... هدف کلی
۷۳	..... هدف‌های یادگیری
۷۳	..... مقدمه
۷۶	..... ۱-۴ پارامترهای صحرایی
۷۸	..... ۴-۱-۱-۴ دما
۷۹	..... ۴-۱-۴ هدایت الکتریکی
۸۲	..... ۴-۱-۴ pH
۸۴	..... ۴-۱-۴ پتانسیل اکسیداسیون/احیا، Eh, ORP
۹۰	..... ۴-۱-۴ اکسیژن محلول (DO)
۹۲	..... ۴-۱-۴ قلبائیت، اسیدیته و سختی
۹۵	..... ۴-۲ پارامترهای غیرآلی
۹۵	..... ۴-۲-۱ کاتیون‌ها و آنیون‌ها
۹۵	..... ۴-۲-۱-۱ یون‌های اصلی
۹۶	..... ۴-۲-۱-۲ آمونیوم (NH_4^+) و نیتрат (NO_3^-)
۹۸	..... ۴-۲-۱-۳ فسفات (PO_4^{2-})
۹۸	..... ۴-۲-۲ فلوراید
۹۸	..... ۴-۲-۲ آهن و منگنز
۹۹	..... ۴-۲-۲ سیلیکا
۱۰۰	..... ۴-۲-۲ عناصر نادر و فلزات سنگین
۱۰۱	..... ۴-۲-۲ پوسته‌گذاری و خوردگی
۱۰۱	..... ۴-۲-۲ کل جامدات حل‌شده (TDS)
۱۰۴	..... ۴-۳ ایزوتوپ‌ها
۱۰۴	..... ۴-۳-۱ اکسیژن ۱۸ و دوتریوم
۱۰۶	..... ۴-۳-۲ نیتروژن ۱۵
۱۰۶	..... ۴-۳-۲ رادیوکربن
۱۰۷	..... ۴-۳-۲ تریتیوم
۱۰۸	..... ۴-۳-۳ CFC _s و SF ₆
۱۰۹	..... ۴-۳-۳ سولفور ۳۴ و اکسیژن ۱۸ در سولفات‌ها
۱۰۹	..... ۴-۳-۳ سایر ایزوتوپ‌ها و ردیاب‌ها
۱۰۹	..... ۴-۳-۳ رادیواکتیویته
۱۱۰	..... ۴-۴ ترکیبات آلی
۱۱۳	..... ۴-۴-۱ ظروف نمونه‌برداری از ترکیبات آلی

۱۱۴	۵-۴ پارامترهای میکروبیولوژیک.....
۱۱۵	۶-۴ ارزیابی قابلیت اطمینان سنجش‌ها (کنترل کیفیت).....
۱۱۷	خلاصه فصل چهارم.....
۱۲۰	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل چهارم.....
۱۲۱	خودآزمایی تشریحی فصل چهارم.....
۱۲۳	فصل پنجم. پردازش داده‌های حاصل از سنجش‌های کیفی آب زیرزمینی.....
۱۲۳	هدف کلی.....
۱۲۳	هدف‌های یادگیری.....
۱۲۳	مقدمه.....
۱۲۴	۱-۵ ترکیب تجزیه‌ای آب زیرزمینی.....
۱۲۶	۲-۵ پردازش نتایج آزمایش‌ها.....
۱۲۷	۱-۲-۵ ارزیابی صحت مقادیر مشاهداتی.....
۱۲۹	۱-۲-۵-۱ توازن آنیون-کاتیون (توازن مقدار اکسی‌والان).....
۱۳۱	۲-۲-۵-۲ مقایسه EC اندازه‌گیری شده و TDS اندازه‌گیری شده.....
۱۳۱	۳-۲-۵-۱ مقایسه EC اندازه‌گیری شده و جمع یون‌ها.....
۱۳۳	۴-۲-۵-۱ مقایسه باقی‌مانده خشک با TDS اندازه‌گیری شده.....
۱۳۴	۵-۲-۵-۱ مقایسه TDS محاسبه شده با TDS اندازه‌گیری شده.....
۱۳۴	۶-۲-۵-۱ مقایسه EC اندازه‌گیری شده با EC محاسبه شده.....
۱۳۵	۷-۲-۵-۱ مقایسه حضور و غلظت عناصر.....
۱۳۸	۲-۲-۵-۲ ساماندهی مقادیر مشاهداتی.....
۱۳۸	۳-۲-۵ تعاریف و واحدهای غلظت.....
۱۳۹	۱-۳-۲-۵ غلظت‌های جرمی.....
۱۴۱	۲-۳-۲-۵ غلظت‌های مولار.....
۱۴۳	۳-۳-۲-۵ غلظت‌های نرمال.....
۱۴۶	خلاصه فصل پنجم.....
۱۴۸	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل پنجم.....
۱۴۸	خودآزمایی تشریحی فصل پنجم.....
۱۵۱	فصل ششم. تفسیر داده‌های کیفی آب زیرزمینی (روش‌های هیدروژئوشیمیایی).....
۱۵۱	هدف کلی.....
۱۵۱	هدف‌های یادگیری.....
۱۵۱	مقدمه.....
۱۵۲	۱-۶ روش‌های هیدروژئوشیمیایی.....
۱۵۳	۱-۱-۶ روش‌های ترسیمی.....
۱۵۴	۱-۱-۶ نمودارهای غلظت یونی.....

۱۶۳	۲-۱-۱-۶ نمودارهای تحلیلی (Analytical Diagram).....
۱۷۳	۳-۱-۱-۶ نقشه‌ها و مقاطع عرضی.....
۱۷۶	۲-۱-۱-۶ روش‌های محاسباتی (عددی).....
۱۷۸	۱-۲-۱-۶ نسبت‌های معین.....
۱۸۶	۲-۲-۱-۶ مدل‌سازی ژئوشیمیایی.....
۱۹۱	خلاصه فصل ششم.....
۱۹۲	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل ششم.....
۱۹۵	فصل هفتم. تفسیر داده‌های کیفی آب زیرزمینی (روش‌های آماری).....
۱۹۵	هدف کلی.....
۱۹۵	هدف‌های یادگیری.....
۱۹۵	مقدمه.....
۱۹۶	۱-۷ ویژگی‌های آماری داده‌های کیفی آب.....
۱۹۸	۲-۷ روش‌های آماری ترسیمی.....
۱۹۸	۱-۲-۷ نمودارهای جعبه‌ای.....
۲۰۱	۲-۲-۷ منحنی تابع توزیع تجمعی (CDF).....
۲۰۴	۳-۷ روش‌های آماری چند متغیره.....
۲۰۶	۱-۳-۷ تحلیل عاملی (FA).....
۲۱۱	۲-۳-۷ تحلیل خوشه‌ای (CA).....
۲۱۳	خلاصه فصل هفتم.....
۲۱۴	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل هفتم.....
۲۱۷	فصل هشتم. آلودگی آب زیرزمینی و استانداردهای مصرف جهانی و ملی.....
۲۱۷	هدف کلی.....
۲۱۷	هدف‌های یادگیری.....
۲۱۷	مقدمه.....
۲۱۸	۱-۸ آلودگی آب زیرزمینی.....
۲۲۳	۲-۸ استانداردهای مصرف آب.....
۲۲۴	۱-۲-۸ آب شرب انسان.....
۲۲۴	۱-۱-۲-۸ استاندارد WHO.....
۲۲۶	۲-۱-۲-۸ استاندارد U.S.EPA.....
۲۲۷	۳-۱-۲-۸ استاندارد آب آشامیدنی ایران.....
۲۲۸	۴-۱-۲-۸ استاندارد کیفیت آب‌های ایران.....
۲۲۸	۲-۲-۸ آب آبیاری.....
۲۳۳	۳-۲-۸ آب شرب دام.....
۲۳۵	۴-۲-۸ استاندارد خروجی فاضلاب.....

۲۳۸	..... خلاصهٔ فصل هشتم
۲۴۱	..... خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل هشتم
۲۴۳	..... پیوست‌ها
۲۴۹	..... پاسخنامه خودآزمایی‌های چهارگزینه‌ای
۲۵۱	..... پاسخنامه خودآزمایی‌های تشریحی
۲۵۹	..... واژه‌نامه انگلیسی - فارسی
۲۶۳	..... منابع

پیشگفتار

ژئوشیمی آب‌زیرزمینی علمی میان رشته‌ای است که شیمی آب در محیط زیرسطحی را بررسی می‌کند و اغلب به‌جای آن از عبارت کیفیت آب‌زیرزمینی استفاده می‌شود. اهمیت این علم بیشتر به جهت بررسی کیفی آب‌زیرزمینی برای مصارف مختلف و به‌ویژه آب شرب است که در سال‌های اخیر، آلودگی منابع آب‌زیرزمینی نیز اهمیت آن را دوچندان کرده است.

شیمی آب‌زیرزمینی نشان‌دهنده تاریخ پیچیده حرکت آب در آبخوان است و مطالعه آن شواهد مهمی از ویژگی‌های هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی و هیدرولیکی مؤثر بر سیستم جریان آب‌زیرزمینی ارائه می‌دهد. براین اساس شناخت فرایندهای ژئوشیمیایی تغییردهنده پارامترهای کیفی آبخوان، پیش‌بینی تغییرات احتمالی در کیفیت آب‌زیرزمینی را امکان‌پذیر خواهد کرد. هیدروژئوشیمی آبخوان در حالت طبیعی متأثر از ترکیب آب ورودی به منطقه اشباع و واکنش‌های آب/سنگ وابسته به زمان در آب‌زیرزمینی است. عوامل غیرطبیعی مؤثر بر ژئوشیمی آب‌زیرزمینی تقریباً همگی در اثر فعالیت‌های انسانی به‌وجود آمده است که عمده‌ترین آن‌ها فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و گسترش شهرنشینی است. رشد جمعیت و افزایش مصرف آب هم‌زمان با آلودگی منابع آب از طریق بازگشت آب‌های مصرفی به‌صورت پساب، کیفیت منابع آب را در بسیاری از کشورها به پایین‌تر از حدود استاندارد تنزل داده است. نیاز شدید به آب، به‌ویژه در کشورهای درحال توسعه، سبب بهره‌برداری از منابع آب‌زیرزمینی بدون

شناخت وضعیت هیدروژئوشیمی آبخوان شده که این امر موجب شیوع و گسترش بیماری‌های سخت درمان در سرتاسر جهان شده است.

کتاب حاضر براساس سرفصل‌های مصوب درس آب‌زمین‌شیمی (ژئوشیمی آب‌های زیرزمینی) برای مقطع کارشناسی ارشد رشته هیدروژئولوژی نوشته شده است. مطالعه این کتاب نیاز به دانستن اطلاعاتی در حد دوره کارشناسی در رشته‌های زمین‌شناسی، شیمی، ریاضی، آمار و هیدروژئولوژی دارد. با توجه به اینکه نگارش کتاب برای دانشجویان مقطع کارشناسی ارشد است انتظار می‌رود که واژه‌ها و عبارات انگلیسی در مطالعه کتاب مدنظر قرار گیرد. از این رو برخی از جداول و اشکال نیز به زبان اصلی آورده شده است.

این کتاب حاصل تجربیات عملی نویسنده در دوره دکترا و تدریس در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد است. نظرات و پیشنهادهای خوانندگان محترم مایه امتنان است.

از همسر، آقای دکتر کریمی و مهشید و مهسای عزیز به‌خاطر وقتی که باید در کنار آن‌ها می‌گذشت و صرف نوشتن این کتاب شد، سپاسگزارم.

فصل اول

کلیات ژئوشیمی آب‌های زیرزمینی

هدف کلی

آشنایی با گستره علم ژئوشیمی آب‌های زیرزمینی، سیستم ژئوشیمیایی آبخوان، ویژگی‌های محلول آب‌زیرزمینی و کیفیت آب‌های زیرزمینی.

هدف‌های یادگیری

پس از مطالعه این فصل باید بتوانید:

۱. محدوده مورد مطالعه علم ژئوشیمی آب‌های زیرزمینی را مشخص کنید.
۲. اجزای چرخه هیدروژئوشیمیایی و سیستم ژئوشیمی آبخوان را بیان کنید.
۳. ساختار مولکول آب و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب را توضیح دهید.
۴. واحدهای متداول اندازه‌گیری غلظت اجزای محلول در آب زیرزمینی را تعریف کنید.

مقدمه

شناخت عناصر موجود در زمین تحت عنوان دانش ژئوشیمی بررسی می‌شود. یکی از زیرشاخه‌های این علم ژئوشیمی آبی^۱ یا هیدروژئوشیمی است که واکنش‌های عناصر موجود در هیدروسفر را با اتمسفر، لیتوسفر و بیوسفر تشریح می‌کند. شاخه‌ای از ژئوشیمی آبی که واکنش‌های آب/سنگ در منطقه غیراشباع و زیرسطح ایستابی آبخوان‌ها را مطالعه می‌کند، ژئوشیمی آب‌های زیرزمینی نامیده می‌شود. در این علم

ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی، حاصل از تأثیر سیستم‌های مختلف آبخوان، تشریح می‌شود و فرایندهای کنترل‌کننده این ترکیب شناسایی می‌شود؛ به عبارت دیگر، ژئوشیمی آب‌های زیرزمینی خصوصیات سنگ‌شناسی و هیدرولوژیک آبخوان‌های مختلف را مشخص می‌نماید.

هدف اصلی کاربرد ژئوشیمی آب‌های زیرزمینی در گذشته، بررسی تفاوت انواع آب در آبخوان‌ها به منظور کمک به شناخت کمی^۱ منابع آب بوده است. امروزه، ژئوشیمی به دلیل توصیف سیستم‌های طبیعی، شناخت نحوه مهاجرت آلاینده‌ها و کاربرد در طراحی پروژه‌های اصلاح آلودگی^۲ نقش بسیار مهم‌تری در مطالعات آب‌های زیرزمینی دارد.

۱-۱ کیفیت آب زیرزمینی

ژئوشیمی آب‌های زیرزمینی اغلب مترادف با کیفیت آب زیرزمینی^۳ است و تحقیقات هیدروژئولوژی شیمیایی به منظور شناخت عوامل کنترل‌کننده کیفیت آب‌های زیرزمینی طبیعی و آلوده^۴ انجام می‌شود.

از عهد باستان تا حدود دهه ۱۹۰۰ تمرکز اصلی بر اکتشاف و توسعه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی بوده، با این وجود در تاریخ بسیار قدیم بشری تفاوت طعم و کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌ها از محلی به محل دیگر ذکر شده است. توجیه این تفاوت‌ها اغلب در حوزه‌های معنوی بیان شده است. بسیاری از تمدن‌ها برای تشریح تفاوت کیفیت آب چشمه‌ها استدلال‌های اساطیری داشته‌اند، به طوری که آب با کیفیت مناسب برای شرب را با خدایان نیکی و کیفیت نامناسب را با خدایان اهریمنی مرتبط می‌دانستند. اثرات درمانی کیفیت آب برخی چشمه‌ها یا چاه‌های خاص نیز ذکر شده به طوری که شناخت اجزای حل شده موجود در آب این چشمه‌ها و چگونگی تأثیر درمانی این اجزا، یکی از اولین انگیزه‌ها برای مطالعه کیفیت آب زیرزمینی بوده است. برای مثال، استیل^۵ (۱۸۳۸) عنصر ید و خصوصیات درمانی مفید آن را در آب چشمه‌های ساراتوگا^۶ (نیویورک) بررسی کرد، هر چند تشخیص

1. Quantity
2. Remediation
3. Groundwater Quality
4. Polluted
5. Steel
6. Saratoga

خاصیت دارویی این عنصر برای درمان یا پیش‌گیری از بیماری گواتر، توسط وی، مورد تردید است. نگرانی‌های عملی مشابه باعث انجام اولین تجزیه‌های شیمیایی کیفی آب‌زیرزمینی شد. به‌عنوان نمونه، روگرز^۱ (۱۹۱۷) نشان داد که شورابه‌های میدان‌های نفتی همراه با هیدروکربن‌های نفتی، فاقد رسوبات حل شده است درحالی‌که شورابه‌های این میدان‌ها بدون همراهی با هیدروکربن‌های نفتی، سولفات فراوان دارد. تحقیق وی مبنای استفاده از کیفیت شیمیایی آب در اکتشافات نفتی شد. سایر مطالعات در اوایل دهه ۱۹۰۰ نشان داد که تغییرات کیفیت آب به‌صورت ناگهانی نوسان نمی‌کند بلکه در طول مسیر جریان آب و در جهت شیب هیدرولیکی ناحیه‌ای، تغییرات منظم در شیمی آب ایجاد می‌شود. برای مثال رینیک^۲ (۱۹۲۴) نشان داد که آب‌زیرزمینی کم‌عمق در مناطق تغذیه‌ای تشکیلات فورتونیون^۳ مونتانا از نوع سخت^۴ است، به‌عبارت دیگر حاوی غلظت‌های نسبتاً بالا از یون‌های کلسیم و منیزیم است. در پایین دست جریان، این آب‌ها به نوع نرم^۵ تبدیل شده و حاوی غلظت‌های نسبتاً بالا از سدیم است. وی این تغییرات را به فرایند تبادل کاتیونی نسبت داد که طی آن کلسیم و منیزیم در محلول توسط سدیم جایگزین می‌شود. ارتباط تغییرات کیفی با مسیرهای جریان آب‌زیرزمینی و تلاش برای شناخت واکنش‌های خاص فعال در آبخوان به‌وسیله محققین بعدی دنبال شد.

واژه رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی^۶ توسط باک^۷ (۱۹۶۶) برای نشان دادن تغییرات معمول شیمی آب در مسیر جریان آب‌زیرزمینی ارائه شد. مشاهدات مختلف نشان داد که شیمی آب تمایل به تغییر منظم و قابل پیش‌بینی دارد و بر این اساس فرایندهای شیمیایی و یا بیولوژیکی مرتبط با این تغییرات قابل شناسایی است. در طی سه دهه بعد، روش‌های متعددی برای مطالعه این فرایندها و شناخت چگونگی تأثیر آن‌ها در شیمی غالب آب زیرزمینی ارائه شد. در تمامی این روش‌ها فرض بر این است که آب‌های ورودی به آبخوان در ابتدا آب‌های نسبتاً خالص^۸ باران یا حاصل از ذوب

1. Rogers
2. Renik
3. Fortunion
4. Hard
5. Soft
6. Hydrogeochemical Facies
7. Back
8. Unmineralized

برف است که در صورت وجود دی‌اکسید کربن در آن‌ها، اسیدکربنیک حاصل در تماس با مواد آبخوان باعث انحلال کانی‌ها می‌شود. بنابراین شیمی آب‌زیرزمینی از طریق تغییر از شرایط نامتعادل اولیه به سمت تعادل شیمیایی، به واسطه واکنش با کانی‌های آبخوان، تشریح می‌شود. روش تعادلی مذکور، تحت عنوان روش تعادل جرم^۱، به وسیله گارلز^۲ و کریست^۳ (۱۹۶۵) مستند شد و یک چهارچوب کمی برای شناخت ترکیب آب‌زیرزمینی ارائه کرد.

روش تعادل جرم تفسیری منطقی برای تغییرپذیری شیمیایی آب‌زیرزمینی است که بر پایه اصل بقای جرم ارائه شده است. بیان کلی از اصل بقای جرم برای ترکیب شیمیایی آب‌زیرزمینی در حال حرکت در طول یک خط جریان به صورت زیر است:

ترکیب اولیه آب + کانی‌های حل شده - کانی‌های رسوب کرده = ترکیب نهایی آب به عبارت دیگر روش تعادل جرم به وضوح نشان می‌دهد که ترکیب آب‌زیرزمینی به وسیله نوع و مقدار کانی‌هایی که در آبخوان حل و یا رسوب شده، تعیین می‌شود. کاربرد این روش به زودی نشان داد که در صورت شناخت واکنش‌های انحلال کانی‌ها، محاسبه مقداری از هر کانی انحلال‌یافته برای تشکیل یک ترکیب خاص از آب‌زیرزمینی، با استفاده از روش تعادل جرم امکان‌پذیر است. پس از آن، روش تعادل جرم در مورد توازن الکترون‌ها (محاسبه واکنش‌های پتانسیل اکسیداسیون/ احیا) و ایزوتوپ‌ها تشریح شد و با یک چهارچوب ریاضیاتی پیچیده ارائه شد. در این روش مفاهیم تعادل شیمیایی و تعادل مواد^۴ ترکیب شد و به صورت مدل‌سازی ژئوشیمیایی ارائه شد. کاربردهای این روش کمی به زودی نشان داد که فازهای کانی‌سازی بسیار زیادی با ترکیبات شیمیایی متغیر در آبخوان وجود دارد که می‌تواند در یک مدل ژئوشیمیایی شبیه‌سازی شود. بر این اساس ساخت مدل‌های ژئوشیمیایی بدون محدودیت و به صورت مجازی، شیمی آب مشاهداتی را تشریح می‌کند. ماهیت غیر یگانه^۵ مدل‌های ژئوشیمیایی بازتابی از پیچیدگی کانی‌شناسی آبخوان‌ها است و این حقیقت را نشان می‌دهد که آبخوان هرگز در تعادل ترمودینامیکی واقعی نیست. با این

1. Mass Balance
 2. Garrels
 3. Christ
 4. Material Balance
 5. Non Unique

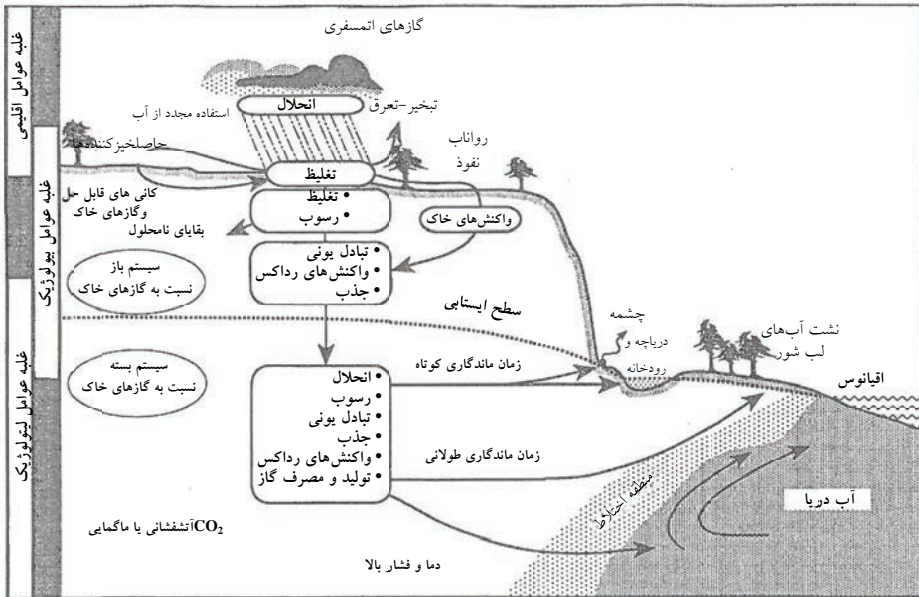
وجود با به‌کاربردن روش مدل‌سازی ژئوشیمیایی، شناخت زیادی از فرایندهای طبیعی و انسانی کنترل‌کننده کیفیت آب زیرزمینی حاصل می‌شود.

۱-۲ چرخه هیدروژئوشیمیایی

سیستم هیدروژئولوژیک، یک سیستم انرژی است که در آن هیدروژئولوژیست، کنترل‌کننده‌های ورودی، خروجی و تبدیلات انرژی در آب را شناسایی می‌کند. این انرژی شامل انرژی‌های پتانسیل و جنبشی جریان آب زیرزمینی، انرژی گرمایی و انرژی شیمیایی است. هیدروژئولوژی شیمیایی، مطالعه انرژی شیمیایی سیستم هیدروژئولوژیک است که به‌طور ساده به‌صورت مطالعه کنترل‌کننده‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیک مؤثر بر خصوصیات شیمیایی آب زیرزمینی تعریف می‌شود.

مفهوم چرخه هیدروژئوشیمیایی (شکل ۱-۱)، به ارزیابی تأثیرات حال و گذشته عوامل اقلیمی، زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیک، بیولوژیک و انسانی مؤثر بر شیمی آب زیرزمینی کمک می‌کند. این عوامل به‌صورت جزئی‌تر شامل: شیمی آب نفوذی، تفاوت مقدار و مدت بارش، کانی‌شناسی و ضخامت سازندهای زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، پوشش خاک و نرخ تولید گاز در خاک، توزیع بار هیدرولیکی، نوع تخلخل، پستی و بلندی‌های توپوگرافیک و ارتفاع است. عوامل مذکور، نرخ تغذیه، مسیر جریان و زمان ماندگاری آب زیرزمینی را کنترل می‌کنند. پدیده اختلاط آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های مختلف، اختلاط حاصل از پیشروی آب دریا به آبخوان و یا اختلاط با آب‌های شور عمیق، کنترل‌کننده‌های هیدروژئولوژیک کیفیت آب زیرزمینی هستند.

علاوه بر این عوامل طبیعی، اثرات انسانی به‌ویژه در رژیم‌های کم‌عمق، سبب ایجاد تنش‌های شیمیایی و فیزیکی بر سیستم هیدروژئولوژیک می‌شود (شکل ۱-۱). به‌عنوان مثال ضایعات دفن‌شده در محل‌های دفن زباله موجب نشست آلاینده‌ها به آب زیرزمینی می‌شود. علاوه بر این بیشتر فاضلاب و پساب صنایع که قبلاً به رودخانه‌ها تخلیه می‌شد امروزه با روش‌های مختلف دفن یا تزریق به زیرزمین، سبب آلودگی آبخوان‌ها شده است.



شکل ۱-۱. چرخه هیدروژئوشیمیایی (Alley, 1993)

۱-۳ سیستم ژئوشیمیایی آبخوان

محیط زیر سطحی می تواند به عنوان یک سیستم ژئوشیمیایی پویا^۱ در نظر گرفته شود. این سیستم شامل فازهای زیر است:

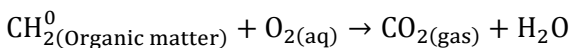
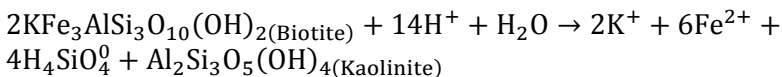
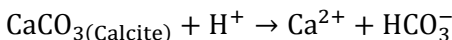
۱. فازهای جامد (کانی ها، جامدات غیر کریستال یا آمورف و مواد آلی)
۲. فاز گازی خاک
۳. فاز محلول آبی (آب و اجزای حل شده در آن).

هر فاز یک وجود فیزیکی مجزا با ترکیب شیمیایی کم و بیش یکنواخت^۲ است. معمولاً یک فاز گازی مجزا و یک فاز محلول مجزا در سیستم وجود دارد، هر چند دو یا چند فاز محلول مانند (آب سطحی یا زیرزمینی) نیز ممکن است برای ایجاد یک فاز محلول ترکیب شود. کانی ها و مواد جامد به عنوان یک فاز مجزا در نظر گرفته می شود. سیستم ژئوشیمیایی آب زیرزمینی مجموعه ای از این فازهای جامد، گاز و محلول در شرایط دما و فشار خاص هر آبخوان است.

1. Dynamic
2. Uniform

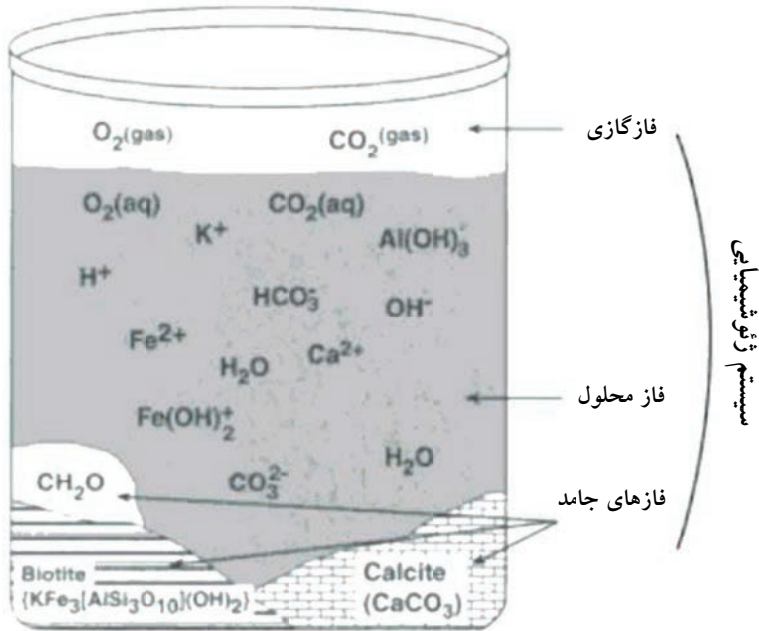
در شکل ۱-۲ یک سیستم ساده ژئوشیمیایی نشان داده شده است. پنج فاز تشکیل‌دهنده این سیستم شامل: محلول، گاز، مواد آلی (CH₂O)، بیوتیت و کلسیت است. آب در تماس با فاز گازی و فازهای جامد مختلف آلی/غیرآلی است. برخی از اجزای فاز محلول ممکن است پس از اضافه‌شدن به بشر در آب حل شده باشند در صورتی که سایر اجزا می‌تواند حاصل واکنش بین فازهای موجود در بشر باشد. در سیستم ژئوشیمیایی طبیعی، آب تغذیه‌ای شیرین با اجزای حل شده کم و غلظت‌های اندک، با مواد زیرسطحی تماس پیدا می‌کند و با سایر فازهای سیستم واکنش می‌دهد. واکنش‌های شیمیایی به دلیل عدم تعادل بین ترکیب آب تغذیه‌ای و فازهای جامد یا گازهای خاک رخ می‌دهد. این عدم تعادل سبب انجام واکنش‌هایی می‌شود که باعث انحلال گازها، ورود کانی‌ها به آب و تغییر ترکیب محلول می‌شود.

فرایند انجام واکنش، از طریق مقایسه دو بشر در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. بشر اول حاوی آب شیرین بدون اجزای حل شده است. به دلیل تماس آب با اتمسفر (یا گاز خاک در زیر سطح)، کانی‌ها و مواد آلی جامد و نیز شرایط عدم تعادل، واکنش‌های انحلالی زیر رخ می‌دهد. محصولات تولید شده در اثر این واکنش‌ها در بشر دوم نشان داده شده است.

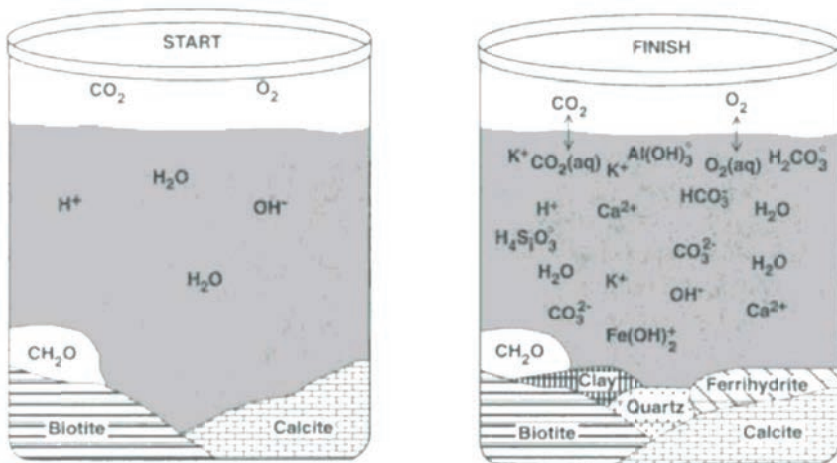


مواد حل شده در آب از انحلال یا آب‌شویی^۱ فازهای جامد و انحلال گازهای هوا یا گازهای تولیدی از واکنش‌های شیمیایی (به‌عنوان مثال کربن دی‌اکسید حاصل از اکسیداسیون مواد آلی) حاصل می‌شود. این واکنش‌ها تا زمانی که عدم تعادل مابین فازها وجود دارد، ادامه می‌یابد. در صورتی که غلظت‌های حل شده اجزای سازنده جامدات و یا گازها به تعادل شیمیایی برسد، غلظت‌های محلول ممکن است ثابت شود. به‌عنوان مثال اگر کلسیت (CaCO₃) به آب خالص اضافه شود، کلسیت جامد حل می‌شود تا زمانی که غلظت اجزای سازنده آن (کلسیم و کربنات) در محلول با کانی

جامد به تعادل برسد. در صورتی که شرایط سیستم تغییر نکند، غلظت‌های حل شده کلسیم و کربنات در مقادیر متعادل با کلسیت ثابت خواهد شد.



شکل ۲۰۱. مدل بشیری از سیستم ژئوشیمیایی (Deutsch, 1997)



شکل ۲۰۱. واکنش‌های آب/سنگ/گاز (Deutsch, 1997)

۴-۱ محلول آب زیرزمینی

آب‌های زیرزمینی و سطحی محلول‌هایی هستند که در آن‌ها یک یا چند ماده حل‌شونده در آب حل شده است. به دلیل رقیق‌بودن این محلول‌های آبی، رفتار آن‌ها بسیار شبیه به آب خالص است. براین اساس خصوصیات شیمیایی آب خالص برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. آب خالص در صفر درجه سانتی‌گراد منجمد می‌شود (نقطه انجماد) و در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به جوش می‌آید (نقطه جوش). وزن مخصوص^۱ آن در ۴ درجه سانتی‌گراد (دمایی که در آن به حداکثر چگالی می‌رسد) ۱ Kg/L است.

۱-۴-۱ ساختار مولکول آب

شیمی آب زیرزمینی توسط ساختار مولکول آب کنترل می‌شود. مولکول آب از دو عنصر هیدروژن (^1H) و اکسیژن (^{16}O) با فرمول کلی ($^1\text{H}_2\text{O}$) ساخته شده است. اتم‌های یک عنصر با تعداد متفاوت نوترون‌ها در هسته، ایزوتوپ نامیده می‌شوند. هیدروژن دارای سه ایزوتوپ (جدول ۱-۱) است: هیدروژن سبک یا ^1H (پروتیوم) با بیشترین فراوانی، هیدروژن سنگین ^2H یا D (دوتریوم) و ^3H (تری‌تیوم). هرچند تری‌تیوم و دوتریوم درصد بسیار کمی از کل ذخیره هیدروژن آب‌ها را تشکیل می‌دهند، این دو ایزوتوپ کاربردهای بسیار مفیدی در هیدرولوژی دارند.

دوتریوم یا ایزوتوپ پایدار هیدروژن، حدود ۰/۱۶ درصد از هیدروژن موجود در آب را تشکیل می‌دهد. برخی از فرایندهای فیزیکی و شیمیایی سبب تغییرات اندک در مقدار این درصد می‌شود.

جدول ۱-۱. ایزوتوپ‌های هیدروژن و اکسیژن (Kehew, 2001)

ایزوتوپ	فراوانی نسبی (%)	نوع
^1H protium	99.984	پایدار
^2H deuterium	0.016	پایدار
^3H tritium	$0 - 10^{-15}$	راديوآکتیو با نیمه‌عمر ۱۲/۳ سال
^{16}O oxygen	99.76	پایدار
^{17}O oxygen	0.04	پایدار
^{18}O oxygen	0.2	پایدار