زمین شناسی مهندسی کارست

فصل دوم

ویژگی های انحلال پذیری سنگ های کارستی

انحلال پذیری سنگهای کارستی

انحلال پذیری، فرایندی است که با جریان یافتن آب در سنگ ها (از روی سنک یا از درون آن) با توجه به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی (آب و سنگ) اتفاق می افتد .

در این فرایند کانی های مختلف موجود در آن یا قسمت هایی از آنها بصورت یونها و یا مولکولهایی تجزیه شده و در داخل محلول منتشر میشوند.

انحلال پذیری یک فرآیند وابسته به زمان است که موجب افزایش نفوذپذیری، کاهش ظرفیت باربری و افزایش نشست پذیری توده سنگ میشود.

سنگ های کربناتی و خصوصیات انحلال پذیری آن ها از نظر سد سازی، اکتشاف منابع اب، اکتشاف منابع نفت و گازو ذخایر هیدروکربورها بسیار حائز اهمیت هستند

انحلال پذیری سنگهای کارستی

انحلال پذیری متجانس

تمام ترکیبات یک کانی به همراه یکدیگر دچار انحلال گردند.

Table Dissociation reactions and solubilities of some representative minerals that dissolve congruently in water, at 25 °C and 1 bar (105 Pa) pressure (Modified with permission from Freeze, R.A. and Cherry, J.A. Groundwater © 1979 Prentice Hall)

Mineral	Dissolution reaction	Solubility (mg L^{-1})	Common range of abundance in waters (mg L^{-1})
Gibbsite	$Al(OH)_3 + H_2O \rightarrow 2Al^{3+} + 6OH^-$	0.001	Trace
Quartz	$SiO_2 + H_2O \rightarrow H_4SiO_4$	12	1–12
Amorphous silica	$SiO_2 + H_2O \rightarrow H_4SiO_4$	120	1–65
Calcite	$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$	60*, 400†	10–350
Dolomite	$CaMg(CO_3)_2 + 2H_2O + 2CO_2 \leftrightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4HCO_3^-$	50*, 300†	10–300
Gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightarrow Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$	2400	0–1500
Sylvite	$KCl + H_2O \rightarrow K^+ + Cl^- + H^+ + OH^-$	264 000	0–10 000
Mirabilite	$NaSO_4 \cdot 10H_2O + H_2O \rightarrow Na^+ + SO_4^{2-} + H^+ + OH^-$	280 000	0–10 000
Halite	$NaCl + H_2O \rightarrow Na^+ + Cl^- + H^+ + OH^-$	360 000	0–10 000

*$P_{CO_2} = 10^{-3}$ bar.
†$P_{CO_2} = 10^{-1}$ bar.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

انحلال پذیری غیر متجانس

قسمتی از ترکیبات دچار انحلال گردند. کانیهای گروه آلومینوسیلیکاتها همگی از رده غیر متجانس میباشند که یونهایی نظیر Na^+، K^+، $3HCO^-$ و غیره آزاد می کنند که در تقابل با آب هستند ولی برخی ازآنها بصورت جامد می باشند، مانند کائولینیت

در شرایط طبیعی کانیهای کارستی از نظر انحلال متجانس می باشند. البته ممکن است انحلال نامتجانس دولومیت و ته نشینی کلسیت در شرایط استثنایی اتفاق افتد.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- **عوامل وابسته به سنگ**
  - ✓ ترکیب کانی شناسی سنگ
  - ✓ ناپیوستگی های توده سنگ و منشاء آنها
  - ✓ مواد پرکننده درزه ها و سطح در معرض تماس با آب

- **عوامل وابسته به آب**
  - ✓ ترکیب شیمیایی آب
  - ✓ درجه حرارت آن
  - ✓ اسیدیته یا pH آب
  - ✓ سرعت جریان آب، نوع جریان آب و حجم یا دبی جریان

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- **عوامل وابسته به سنگ**

✓ **ترکیب کانی شناسی سنگ**

سنگ نمک یا هالیت انحلال پذیر می باشد و به سرعت تحت تأثیر عوامل مخرب قرار می گیرد، بجز در نواحی خشک. نقش این کانی در کارستی شدن بین لایه ای بسیار مهم میباشد.

پدیده های کارستی به سرعت در ژیپس و انیدریت توسعه می یابند، زیرا به نسبت انحلال پذیری بالایی از خود نشان می دهند.

در ارتباط با پدیده انحلال پذیری و میزان معمول انحلال در آب، سنگهای کربناته رنج وسیعی از انحلال پذیری را از خود نشان میدهند،

سنگهای سیلیکاته معمولا جزء سنگهای کارستی به حساب نمی آیند.

انحلال: سنگ های کلروره > سنگ های سولفاته> سنگهای کربناته> سنگ های سیلیکاته

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- **عوامل وابسته به سنگ**

✓ **ناپیوستگی های توده سنگ و منشاء آنها**

فرایند انحلال به عوامل متعددی وابسته است. یکی از این عوامل، وجود شکستگی های پیوسته است که اجازه عبور و حرکت آب در سنگ را مهیا می کند. طبعاً علت اصلی نفوذپذیری وجود این ناپیوستگی است(درزه، شکاف، چین خوردگی و گسل). نا پیوستگی ها ممکن است خالی یا از مواد مختلفی مانند رس ها، کربنات ها، سولفات ها، کوارتز و نظیر آن پُر شود. در فرایند انحلال، مواد حل شده در توسعه باز شدگی ها کمک می کند، در حالیکه با توجه به نوع مواد پُر کننده می تواند نفوذپذیری و به دنبال آن جریان آب و انحلال پذیری افزایش ویا کاهش یابد. بطور مثال رس هایی که متورم می شوند حجم آن ها افزایش و باعث می شود میزان نفوذپذیری و جریان آب در ناپیوستگی را کُند ویا متوقف کند. در حالیکه رس های واگرا به راحتی با آب شسته شده و با جریان آب بیشتر در ناپیوستگی ها، میزان انحلال را افزایش داده و تَرک های موجود را توسعه می دهند.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- **عوامل وابسته به آب**

✓ **ترکیب شیمیایی آب**

آب باران H2O خالص نیست . ترکیب شیمیايي اين آب توسط فاكتورهاي طبيعي تحت تأثيرقرار مي گيرد. به عنوان مثال در مناطق ساحلي, وجود ذرات نمک در بخار آب

موجود در فضا باعث تغيير تركيب شيميايي باران مي گردد. همچنين وجود آلودگي هاي

موجود در هوا تركيب شيميايي باران را تحت تأثيرقرار مي دهد.

نوع آبهای موجود در مناطق متشکل از سنگ های کربناته از نظر ترکیب شیمیایی کربناته هستند.

آبها در صورت اشباع نبودن(نسبت به کانی های تشکیل دهنده سنگ) قادر به انحلال سنگ ها هستند.

وجود گاز کربنبک در آب سبب افزایش حلالیت کربنات کلسیم می گردد.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- عوامل وابسته به آب

✓ درجه حرارت آن

انحلال پذیری با افزایش درجه حرارت افزایش می یابد(در بیشتر کانی ها) بطوری که در دمای 100 درجه سانتیگراد کوارتزیت بیشتر از کلسیت انحلال می یابد.

انحلال پذیری کلسیت با درجه حرارت نسبت معکوس دارد که یک استثناء محسوب میشود زیرا در آب های سرد میزان انحلال گاز کربنیک افزایش یافته و میران pH کاهش می یابد.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- **عوامل وابسته به آب**

✓ **اسیدیته یا** pH**آب**

آب های جاری در مناطق کربناته معمولا قلیایی هستند و PH **آنها عموماً بین ۷.۵–۸ متغیر است.**

با ورود گاز کربنیک به درون آب به ویژه در درجه حرارت های پایین حلالیت این گاز در آب بیشتر شده و سبب کاهش PH **آب می گردد**

کاهش PH **آب سبب افزایش انحلال کربنات کلسیم می شود.**

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- عوامل وابسته به آب

✓ سرعت جریان آب، نوع جریان آب و حجم یا دبی جریان

- افزایش سرعت آب سبب ممانعت از اشباع شدگی و درنتیجه افزایش سرعت انحلال می گردد
- جریان های آب با ماهیت آشفته قدرت انحلال بیشتری نسبت به جریان خطی دارند
- افزایش حجم جریان های ورودی (ریزش های جوی) سبب افزایش انحلال سنگ می گردد

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

واحدهای اندازه گیری غلظت

میلی گرم بر لیتر mg/l

قسمت در میلیون ppm

گرم بر متر مکعب gr/m^3

درجه سختی آلمانی [German Degree of Hardness (GD)]

برابر 17 میلیگرم بر لیتر کربنات کلسیم

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

واحدهای اندازه گیری غلظت

غلظت مولار (Molar concentration)

مولاریته (molarity) کمیتی از نوع غلظت است که برای سنجش غلظت محلول ها در علم شیمی کاربرد دارد.

این کمیت به صورت نسبت تعداد مول حل شده در محلول به حجم کل محلول، تعریف می‌شود.

$$c_i = \frac{n_i}{v}$$

ni: تعداد مول حل شده

V: حجم کل محلول

این کمیت در سیستم SI با واحد mol/m^3 گزارش می‌شود اما به‌طور معمول از واحد mol/L برای گزارش مقدار مولاریته استفاده می‌شود

انحلال پذیری سنگهای کارستی

واحدهای اندازه گیری غلظت

پرسش - اگر غلظت NaCl برابر ۰/۳۶۴ مولار باشد چند گرم از این نمک در ۱۵۲ میلی لیتر محلول وجود دارد؟

انحلال پذیری سنگهای کارستی

واحدهای اندازه گیری غلظت

پرسش - اگر غلظت NaCl برابر ۰/۳۶۴ مولار باشد چند گرم از این نمک در ۱۵۲ میلی لیتر محلول وجود دارد؟

حل: 1- داده ی مسئله مولار(مول بر لیتر) است و این به این معنی است که ۰/۳۶۴ مول از این ماده در یک لیتر حل شده
2- چون داده بر حسب جرم(گرم) خواسته شده باید جرم مولی نمک (NaCl) را حساب کنیم که برابر ۵۸/۵ می شود. 3- در سوال حجم بر حسب میلی لیتر که باید آن را به لیتر تبدیل و سپس استفاده کنیم؟

① $C_M = \frac{C}{m}$

C = غلظت گرم بر لیتر

C_M = غلظت مولار

m = جرم مولکولی

استفاده از فرمول ⇐

$۰/۳۶۴ = \frac{C}{۵۸/۵} \Rightarrow C = ۲۱/۲۹۴\ g/L$

② $\begin{cases} ۲۱/۲۹۴\ g & 1L \\ x = ۳/۲۴\ g & ۰/۱۵۲\ L \end{cases}$

جواب $۳/۲۴\ g/۱۵۲\ cc$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- **کاربرد منفی لگاریتم**

از آنجایی که آبهای کارستی محلولهای خیلی رقیق می باشند، اعداد محاسباتی ممکن است اغلب کوچک باشند. بنابراین به خاطر دوری از بکار بردن اعداد بسیار کوچک اعشاری و جلوگیری از خطا میتوان از منفی لگاریتم استفاده نمود. نشانه کاربرد منفی لگاریتم در بسیاری از موارد .p میباشد. بعنوان مثال:

$$100\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{lit}}\mathrm{Ca}^{2+} = 0.0025\frac{mol}{lit} \rightarrow \log_{10} Molarity = 10^{-2.68} = pCa^{2+} = 2.68$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- قدرت یونی که حاصلضرب مولاریته یک عنصر در توان دو ظرفیت آن میباشد، از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$I = \frac{1}{2}\sum m_i z_i^2$$

where m_i is the molar concentration of ion i and z_i is its charge. In most karst waters there will be only seven constituents in significant concentration:

$$I = \frac{1}{2}\cdot\Big([Na^+] + [K^+] + 4[Ca^{2+}] + 4[Mg^{2+}] + [HCO_3^-] + [Cl^-] + 4[SO_4^{2-}] + [NO_3^-]\Big)$$

In limestone and dolomite areas, Na^+, Cl^-, SO_4^{2-} and NO_3^- are often present in very low concentrations and thus can be neglected as well, but it is important to establish this by measurement: it should not be assumed.

As a rule of thumb, the ionic strength of brackish waters ≈ 0.1; fresh waters > 0.01.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- **کل مواد جامد محلول (TDS)**

کل مواد جامد محلول (TDS) شامل مجموع مواد جامدی است که در آب محلول است، ولی شامل رسوبات معلق، کلوئیدها و گازهای محلول نمیشود. اگر تمام مواد جامد محلول در آب بوسیله آزمایش شیمیایی دقیقاً تعیین شود، مجموع عددی تمام آنها برابر TDS است.
TDSبر حسب میلی گرم در لیتر یا ppm بیان میشود.

از آنجا که هر چه غلظت مواد محلول در آب بیشتر باشد هدایت الکتریکی آب افزایش می یابد، لذا با اندازه گیری هدایت الکتریکی آب، که به آسانی با یک هدایت سنج انجام می گیرد، به آسانی میتوان مقدار مواد محلول در آب را برآورد نمود. واحد هدایت الکتریکی mho است که عکس واحد مقاومت الکتریکی (ohm) می باشد.

هدایت الکتریکی ویژه (EC): توانایی مکعبی به ابعاد یک سانتیمتر برای عبور جریان برق که بر حسب mho/cm اندازه گیری میشود که به علت کوچکی آن در آب با واحد های میلی مو بر سانتیمتر، میکرو مو بر سانتیمتر، میلی زیمنس و میکرو زیمنس (µS) نشان داده می شوند

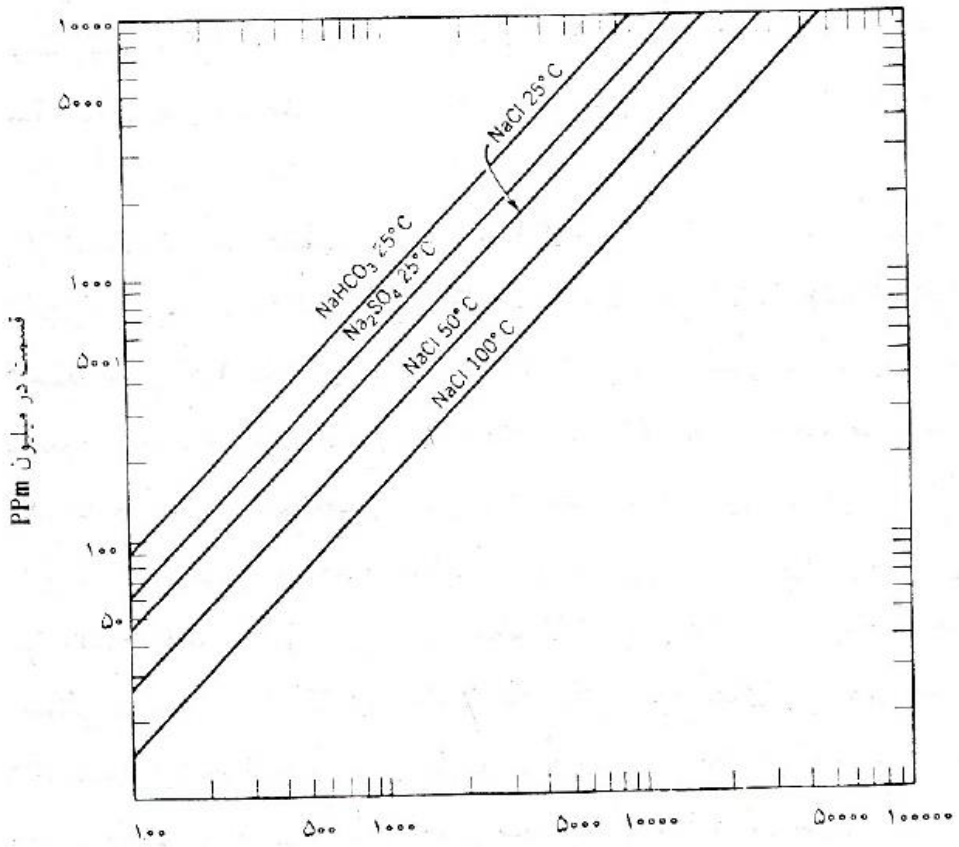
$$TDS = B \times EC$$

مقدار B بستگی به به ترکیب یونی محلول دارد و بین ۰/۵۵ و ۰/۷۵ می‌باشد.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

هدایت الکتریکی ویژه آب علاوه بر غلظت یونها به دما و نوع یونها نیز بستگی دارد



انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

طبقه بندی کل مواد جامد محلول(هم، ۱۹۷۰)

نوع آب	TDS (میلی‌گرم در لیتر)
آب شیرین	کمتر از ۱۰۰۰
آب نسبتاً شور	۱۰۰۰۰-۳۰۰۰
آب خیلی شور	۳۵۰۰۰-۱۰۰۰۰
شوراب	بیشتر از ۳۵۰۰۰

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

Common chemical classifications of waters

	Total dissolved solids* ($mg\,L^{-1}$)
Soft water	< 60
Hard water	> 120
Brackish water	1000–10 000
Saline water	10 000–100 000
(Seawater)	(35 000)
Brines	$> 100\,000$
Potable water for humans	< 1000 or $< 2000^{\dagger}$
Potable water for livestock	< 5000

*Total dissolved solids in potable waters are presumed to be only the bicarbonates, sulphates, chlorides and their associated species as discussed in this chapter.

†Varies between jurisdictions: these are the two most frequent limits.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- سختی

سختی آب به واکنش آب با صابون و رسوبگذاری در ظرفها یا لوله هایی که آب را می جوشانند یا هدایت می کنند، مربوط میشود

تقسیم بندی آب بر اساس سختی

توصیف	سختی بر حسب $CaCO_3$ (میلی اکی والان گرم در لیتر)
سبک	کمتر از ۵۰
سختی کم	۵۰-۱۵۰
متوسط	۱۵۰-۳۰۰
خیلی سخت	بیشتر از ۳۰۰

سختی کل را می توان به دو بخش سختی کربناته و غیر کربناته تقسیم نمود. سختی کربناته مربوط به سختی کربنات و بی کربنات منیزیم و کلسیم است (سختی کربناته به علت این که با حرارت دادن، رسوب میکند سختی موقت نامیده میشود).
سختی غیرکربناته ناشی از ترکیبات سایر آنیونها با کلسیم و منیزیم است.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- سختی

سختی آب را معمولاً بر اساس غلظت کلسیم و منیزیم بر حسب اکی والان گرم بر لیتر یا میلی گرم در لیتر بیان می کنند.

وزن اکی والان یک عنصر عبارت است از وزن اتمی یا ملکولی آن تقسیم بر ظرفیت یونی آن عنصر. برای مثال وزن اکی والان کربنات کلسیم و منیزیم برابر با:

$$E_w(CaCO_3) = \frac{40.1+12+(3\times16)}{2} = 50\ \frac{mg}{meq}$$

$$E_w(Ca^{+2}) = \frac{40.1}{2} = 20.05\ \frac{mg}{meq}$$

$$E_w(Mg^{+2}) = \frac{24.3}{2} = 12.15\ \frac{mg}{meq}$$

$$E_w(HCO_3^{-1}) = \frac{1+12+(3\times16)}{1} = 61\ \frac{mg}{meq}$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- سختی کل (TH)

سختی کلی آب بر حسب کربنات کلسیم برابر است با مجموع سختی تمام کاتیونها در صورتی که تنها غلظت کلسیم و منیزیم را در نظر بگیریم سختی کل برابر است با:

$$TH = Ca \times \left(\frac{CaCo_3}{Ca}\right) + Mg \times \left(\frac{CaCO_3}{Mg}\right)$$

غلظت Ca و Mg برحسب میلی گرم در لیتر و نسبت داخل پرانتز بر حسب اکی والان وزنی محاسبه میشود. عبارت بالا را میتوان به صورت زیرخلاصه نمود :

$$TH = 2.5Ca + 4.1Mg$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- سختی کل (TH)

مثال:

اگر غلظت کاتیون‌هایی نظیر Ca، Mg، Na و B و آنیون‌هایی نظیر Cl، SO_4 و HCO_3 در یک نمونه آب به ترتیب ۸۰، ۳۰، ۷۲، ۶، ۱۰۰، ۲۰۱، ۱۶۵ میلی گرم در لیتر باشد. سختی کل (TH) ، سختی کربناته (CH) و سختی غیرکربناته (NCH) و غلظت کل مواد جامد محلول (TDS) در آب مذکور را بدست آورید.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- سختی کل (TH)

حل:

$$TH = ۸۰ \times \frac{۵۰}{۲۰/۰۵} + ۳۰ \times \frac{۵۰}{۱۲/۱۵} = ۱۹۹/۵ + ۱۲۳/۵ = ۳۲۳ \qquad Mg/lcaco_3$$

$$CH = ۱۶۵ \times \frac{۵۰}{۶۱} = ۱۳۵/۲ \qquad Mg/lcaco_3$$

$$NCH = ۳۲۳ - ۱۳۵/۲ = ۱۸۷/۸ \qquad Mg/lcaco_3$$

$$TDS = ۸۰ + ۳۰ + ۷۲ + ۶ + ۱۰۰ + ۲۰۱ + ۱۶۵ = ۶۵۴ \qquad Mg/lit$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- تفکیک آب
- محلول های ابی در نتیجه واکنش تفکیکی زیر همواره مقادیر کمی از یونهای هیدرونیوم و هیدروکسیل دارند

Pure water itself dissociates to a small extent:

$$H_2O \overset{H_2O}{\Leftrightarrow} H^+ + OH^-$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- تفکیک آب

آب یک مایع انحلالی مرتبط کننده مؤثر می باشد، چون به صورت دوقطبی است. پیوندهای الکتریکی کاتیون آنیون آن درحضور جامدات گسسته شده و در مجاورت آنها قرار میگیرد. این عمل باعث انتشار یونها در داخل محلول میگردد. بعنوان مثال برای هالیت:

$$NaCl \overset{H_2O}{\Leftrightarrow} Na^+ + Cl^-$$

در این واکنش $\overset{H_2O}{\longleftrightarrow}$ به معنی در حضور آب می‌باشد

$$CaCO_3 \overset{H_2O}{\longleftrightarrow} Ca^{2+} + {CO_3}^{2-}$$

$$Ca^{2+} + {CO_3}^{2-} + H^+ \leftrightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- قانون فعالیت جرم (Law of mass action)

در یک سیستم شیمیایی واکنش ممکن است در جهت رفت یا برگشت آنقدر ادامه یابد تا مواد واکنشگر با محصولات به حالت تعادل برسند. البته در این پدیده شرایط فیزیکی نظیر فشار و درجه حرارت نیز مؤثر میباشند. قانون فعالیت جرم را می توان به صورت زیر معرفی نمود:

$$bB + cC \leftrightarrow dD + eE$$

حروف کوچک معرف مقدار غلظت مواد (بر حسب مول) واکنش گر یا محصول (حروف بزرگ) می باشند

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- ثابت تعادل ترمودینامیکی (Thermodynamic equivalent constant)

$$K_{eq} = \frac{(D)^d + (E)^e}{(B)^b + (C)^c}$$

ثابت تعادل آب

$$H_2O = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]} = K_w$$

$$K_w = (H^+) + (OH^-)$$

ثابت تعادل آب (K_w) است در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و فشار یک بار برابر 10^{-14} می‌باشد.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- انرژی آزاد گیبس (Gibbs free energy)

یک سیستم در حال تعادل دارای کمترین انرژی است. بنابراین سیستمهایی که به حال تعادل نرسیده اند بصورت پیشرونده عمل کرده و انرژی آزاد میکنند تا به حال تعادل برسند. در سیستمهای آبی انرژی به صورت انرژی آزاد گیبس محاسبه میشود.

$$G = H + TS$$

در این رابطه، G انرژی آزاد گیبس، H آنتالپی،S آنتروپی یا بی‌نظمی و T درجه حرارت بر حسب کلوین می‌باشد.

آنتالپی (به فرانسوی: Enthalpie)[۱]یا **اندرتافت** یا **درون‌گرمی** مقدار کل محتوای انرژی یک سامانه در فشار و دما ثابت است. آنتالپی جمع انرژی درونی سیستم و حاصلضرب فشار و حجم آن است. واحد اندازه‌گیری آنتالپی در سامانه استاندارد بین‌المللی یکاها ژول (J) نام دارد. آنتالپی به‌وسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$H = E + PV,$$

که H نمایانگر آنتالپی سیستم (در واحد ژول)، E نمایانگر انرژی درونی سامانه (در واحد ژول)، P نمایانگر میزان فشار در مرز سامانه (در واحد پاسکال) و V نمایانگر حجم سامانه (در واحد مترمکعب) می‌باشد.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- فعالیت (Activity)

فعالیت عبارت از میزان یونهای آزاد موجود در یک الکترولیت است.

$$a_i = \gamma_i \times [m_i]$$

a_i فعالیت یون iام، γ_i ضریب فعالیت و $[m_i]$ غلظت آن می‌باشد

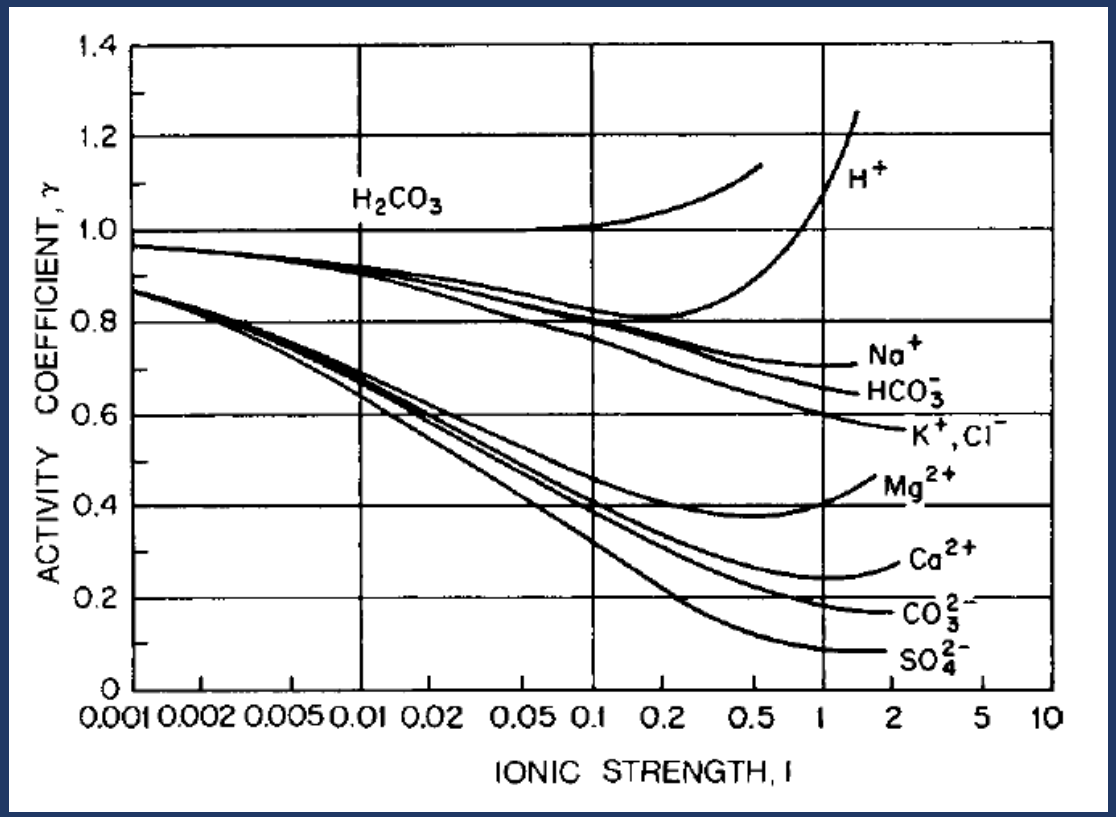
$$\gamma_i = \frac{a_i}{[m_i]} \quad \text{و} \quad \gamma_i \to 1 \Rightarrow \sum m_i = 0$$

هرچه مقدار m_i به یک نزدیکتر باشد، سیستم به حالت تعادل نزدیکتر است و فعالیت آن کمتر است

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- فعالیت (Activity)



رابطه بین فعالیت و قدرت یونی برای یونهای مرسوم در پدیده کارست

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- فعالیت (Activity)

برای $I \leq 0.1$ پلامر و باسنبرگ (۱۹۸۱)، باتلر (۱۹۸۲) و استام و مورگان (۱۹۸۰)[۲] رابطه زیر را پیشنهاد نموده‌اند:

$$\log \gamma_i = \frac{-A.Z_i^2.\sqrt{I}}{1+B.r_o.\sqrt{I}} \qquad (۱۲-۳)$$

در این رابطه، Z ظرفیت یون iام، A و B ثابتهایی هستند که وابسته به فشار و درجه حرارت می‌باشند و r_o شعاع هیدراتاسیون یون iام است. مقادیر A، B و r_o در جدول (۴-۳) ارائه شده است. باید دقت داشت که در این جدول I بزرگتر از ۰/۱ ولی کوچکتر از ۰/۵ می‌باشد. دیویس[۳] در این خصوص رابطه زیر را ارائه نموده است:

$$\log \gamma_i = -A.Z_i^2\left(\frac{\sqrt{I}}{1+\sqrt{I}} - 0.21\right)$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- فعالیت (Activity)

Table 3.4 Ionic radii of ions most frequent in karst waters

r_i ($\times 10^{-8}$ m)	Ion
2.5	NH_4^+
3.0	K^+, Cl^-, NO_3^-
3.5	OH^-, HS^-
4.0	SO_4^{2-}, PO_4^{3-}
4.0–4.5	Na^+, HCO_3^-
4.5	CO_3^{2-}
5.0	Sr^{2+}, Ba^{2+}, S^{2-}
6.0	Ca^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}
8.0	Mg^{2+}
9.0	H^+, Al^{3+}, Fe^{3+}

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- رابطه انرژی گیبس با ثابت تعادل ترمودینامیکی

$$\frac{(D)^d + (E)^e}{(B)^b + (C)^c} = \frac{\Delta G^0}{RT} = K_{eq}$$

در این رابطه، R ثابت گاز و برابر است با $1.987 \times 10^{-3}\ Kcal/°/mol$ و T درجه حرارت بر حسب کلوین می‌باشد و ΔG^0 انرژی آزاد استاندارد[1] نامیده می‌شود.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- انحلال انیدریت و ژیپس

انیدریت[1] در حضور آب انحلال پیدا می‌کند. بطوری که ابتدا آب جذب کرده و به ژیپس تبدیل می‌شود و سپس انحلال می‌یابد.

$$CaSO_4 + 2H_2O \xrightleftharpoons{H_2O} CaSO_4 \,.\, 2H_2O$$

$$CaSO_4 \,.\, 2H_2O \xrightleftharpoons{H_2O} Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$$

ثابت تعادل این واکنش بصورت زیر است:

$$K_g = \frac{(Ca^{2+})(SO_4^{2-})}{(CaSO_4)_S}$$

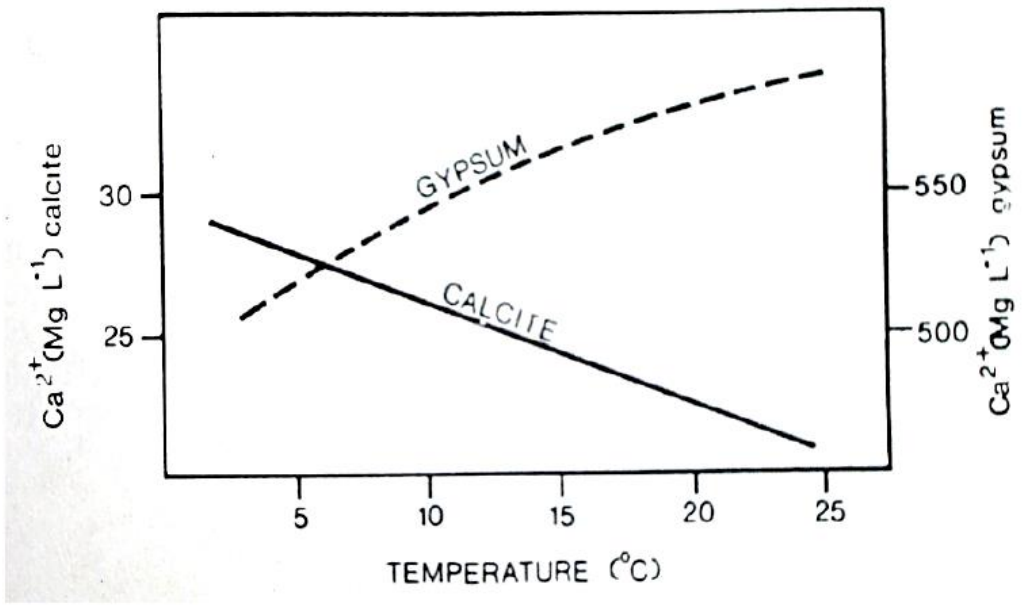
که اندیس S معرف جامد می‌باشد.

ثابت تعادل ژیپس در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد برابر $10^{-4.61}$ است که در دمای صفر درجه به $10^{-4.65}$ کاهش می‌یابد.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- انحلال انیدریت و ژیپس



انحلال پذیری کلسیت و ژیپس با تغییرات درجه حرارت

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- انحلال انیدریت و ژیپس

مطالعات جامز و لاپتن (۱۹۷۸) بر روی ژیپس و انیدریت که در معرض حلال‌های آبی قرار گرفتند، به ارائه معادله زیر جهت تعیین ثابت سرعت انحلال (ضریب انحلال‌پذیری) ژیپس و انیدریت منجر گردید. این معادله بر مبنای روش وزنی می‌باشند.

$$\frac{dM}{dt} = K_c.A(C_S - C)^n$$

در این رابطه، dM تغییرات جرم یا وزن سنگ در معرض حلال آبی، dt تغییرات زمان، K_c ضریب انحلال‌پذیری یا ثابت سرعت انحلال، A سطح تماس سنگ با آب، C_S غلظت یون کلسیم در حالت اشباع و C غلظت عادی یا اولیه یون کلسیم می‌باشند. لازم به توضیح است که ارتباط بین ثابت سرعت انحلال و قابلیت انحلال بصورت معکوس می‌باشد.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- انحلال نمک

$$K_h = \frac{(Na^+)(Cl^-)}{(NaCl)_S}$$

با در نظر گرفتن غلظت یا فعالیت NaCl جامد معادل واحد، این رابطه به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$K_h = (Na^+)(Cl^-)$$

در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد $K_h = 10^{-1.58}$ و در صفر درجه $10^{-1.51}$ می‌باشد.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی

تعادل کربناتها و انحلال سنگهای کربناته

آبهای بیکربناته

انحلال کلسیت و دولومیت در آبهای خالص که یونیزه نشده اند خیلی کم است

با یونیزه شدن آب و تبدیل آن به یونهای H^+ و OH^- انحلال پذیری افزایش مییابد.

انحلال کلسیت مقدار حدود 14 میلی گرم در لیتر در دمای 25 درجه سانتیگراد است.

مطالعات انحلال پذیری نشان می دهد که انحلال کانی های کربناته به خاطر هیدراته شد ن CO_2 اتمسفر است. این پدیده تولید اسید کربنیک میکند و اسید کربنیک به نوبه خود تولید H^+ نموده که باعث افزایش انحلال پذیری میشود.

اسیدهای دیگری نیز وجود دارند که به پدیده انحلال پذیری کمک میکنند ولی از همه مهمتر همان اسید کربنیک است که از هیدراته شدن CO_2 حاصل می گردد.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی

تعادل کربناتها و انحلال سنگهای کربناته

آبهای بیکربناته

قانون هانری برای انحلال CO2

$$CO_2(aqueous) = C_{ab} \times P_{CO_2} \times 1.963$$

سمت چپ این رابطه غلظت CO_2 برحسب (g/lit) و P_{CO_2} فشار نسبی گاز CO_2 می‌باشد. عدد 1.963 وزن یک لیتر CO_2 برحسب گرم در دمای ۲۰° سانتیگراد و C_{ab} ضریب جذب وابسته به حرارت[2] می‌باشد

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- نقش C02 در فرآیند انحلال پذیری

$$CO_2(gas) \rightarrow CO_2(aqueous)$$

$$CO_2(aqueous) + H_2O \rightarrow H_2CO_3$$

$$K_{CO_2} = \frac{(H_2CO_3)}{P_{CO_2}}$$

ثابت تعادل CO_2

$$H_2CO_3^{\,o} \rightarrow H^+ + HCO_3^-$$

تفکیک اسید کربنیک

ثابت تعادل (تفکیک) این واکنش (K_1) بصورت زیر است:

$$K_1 = \frac{(HCO_3^-)(H^+)}{(H_2CO_3)}$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- نقش C02 در فرآیند انحلال پذیری

ثابت تعادل (تفکیک) این واکنش (K_1) بصورت زیر است:

$$K_1 = \frac{(HCO_3^-)(H^+)}{(H_2CO_3)}$$

بیکربنات ممکن است بصورت زیر تفکیک شود:

$$HCO_3^- \rightleftharpoons H^+ + CO_3^{2-}$$

که ثابت تعادل آن (K_2) بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K_2 = \frac{(H^+)(CO_3^{2-})}{(H_2CO_3)}$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- انحلال پذیری CO2 (بوگلی 1980)

(a) Absorption coefficients of CO_2

Temperature of solution (°C)	0	10	20	30
Absorption coefficient C_{ab}	1.713	1.194	0.878	0.665

(b) Equilibrium solubility of CO_2 (mg L^{-1})

	Temperature (°C)			
P_{CO_2} (atm)	0	10	20	30
0.0003	1.01	0.7	0.52	0.39
0.001	3.36	2.34	1.72	1.31
0.003	10.10	7.01	5.21	3.88
0.01	33.6	23.5	17.2	13.1
0.05	168	117	86	65.3
0.10	336	235	172	131
0.20	673	469	342	261

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- انحلال کلسیت و دولومیت

در نواحی کربناته آهکی و دولومیتی، pH آب معمولاً بین ۶/۵ تا ۸/۹ در تغییر است. در این محدوده مقدار یون بیکربنات (HCO_3^-) غالب است و کربنات (CO_3^{2-}) ناچیز می‌باشد. در این شرایط:

$$CaCO_{3S} \rightleftharpoons Ca^{2+} + CO_3^{2-}$$

که $CaCO_{3S}$ کلسیت بصورت جامد می‌باشد. ثابت تعادل کلسیت یا آراگونیت بصورت زیر بدست می‌آید:

$$K_{(c-or-a)} = (Ca^{2+})(CO_3^{2-})$$

پس:

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} + H^+ \rightleftharpoons Ca^{2+} + HCO_3^-$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- انحلال کلسیت و دولومیت

مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته توسط پلامر و همکاران (۱۹۷۸) (Plummer el al. 1978) نشان می‌دهد که انحلال کلسیت طی فرآیندهای پیشروند سه واکنش مذکور صورت می‌گیرد که در واقع واکنش با اسید کربنیک است:

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

و برای انحلال در محیط آبی (انحلال دو گانه یا مضاعف):

$$CaCO_3 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3^- + OH^-$$

که واکنش اول اغلب بصورت زیر خلاصه می‌شوند:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftarrows Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- انحلال کلسیت و دولومیت

برای دولومیت واکنش انحلال بصورت زیر می‌باشد:

$$CaMg(CO_3)_2 \rightleftarrows Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2CO_3^{2-}$$

پس ثابت تعادل دولومیت عبارت است از:

$$K_d = (Ca^{2+})(Mg^{2+})(Co_3^{2-})^2$$

و بطور خلاصه واکنش انحلال دولومیت به صورت زیر است:

$$CaMg(CO_3)_2 + 2CO_2 + 2H_2O \rightleftarrows Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4HCO_3^-$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی

Equilibrium constants for the carbonate dissolution system, gypsum and halite, at 1 atm pressure. (From Garrels and Christ 1965; Langmuir 1971; Plummer and Busenberg 1982)

Temperature (°C)	pK_{CO_2}	pK_1	pK_2	$pK_{calcite}$	$pK_{aragonite}$	$pK_{dolomite}$	pK_{gypsum}	pK_{halite}
0	1.12	6.58	10.63	8.38	8.22	16.56	4.65	1.52
5	1.19	6.52	10.56	8.39	8.24	16.63	—	—
10	1.27	6.46	10.49	8.41	8.26*	16.71	—	—
15	1.34	6.42	10.43	8.42	8.28	16.49	—	—
20	1.41	6.38	10.38	8.45	8.31	16.89	—	—
25	1.47	6.35	10.33	8.49	8.34	17.0	4.61	1.58
30	1.52	6.33	10.29	8.52*	8.37*	17.9		
50	1.72	6.29	10.17	8.66	8.54*	—		
70	1.85[8]	6.32*	10.15	8.85*	8.73*	—		
90	1.92*	6.38*	10.14	9.36	9.02	—		
100	1.97	6.42	10.14	—	—	—		

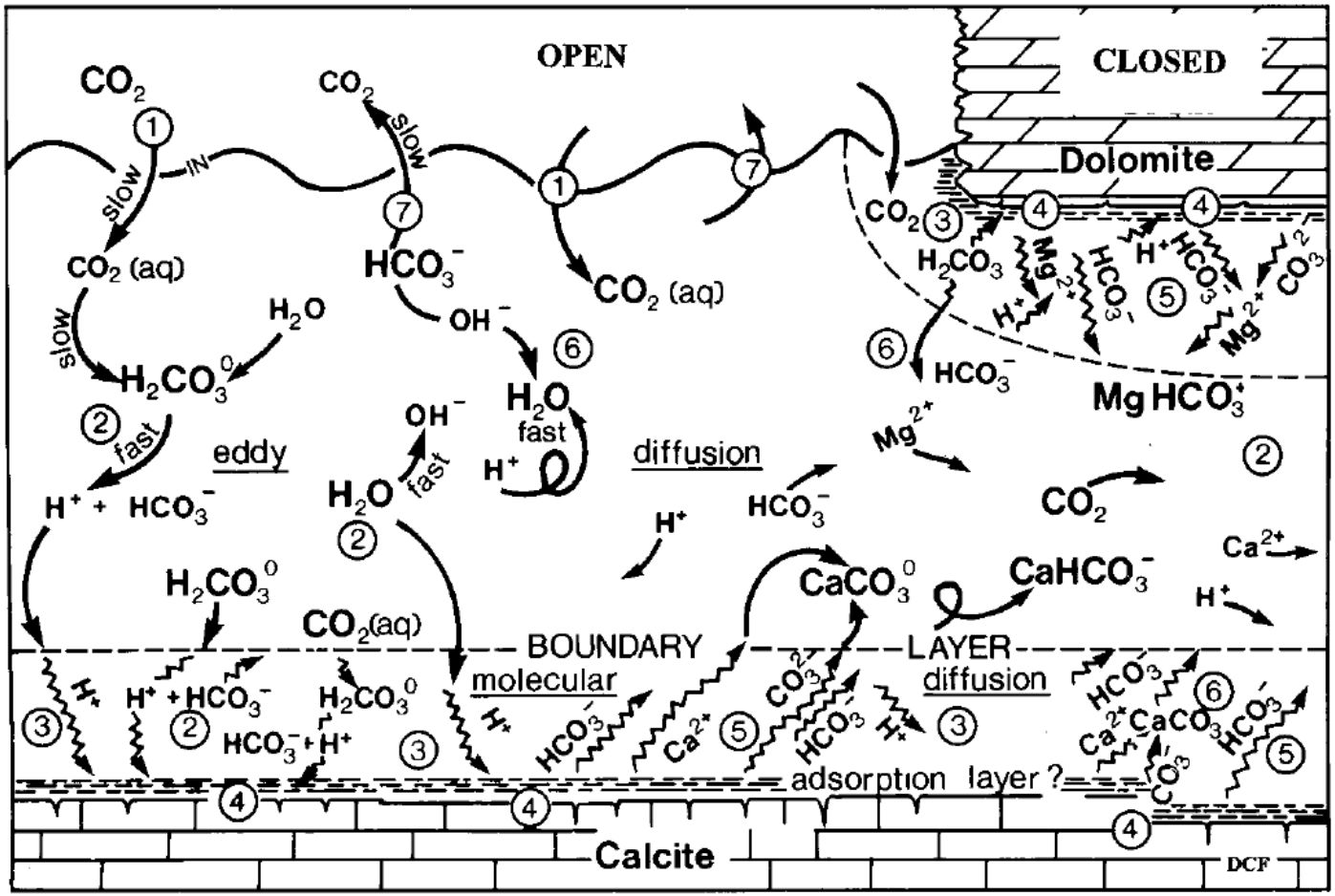
$pK_1 = 356.3094 + 0.06091964T - 21834.37/T + 126.8339 \log T + 1684915/T^2$.
$pK_2 = 107.8871 + 0.03252849T - 5151.79/T - 38.92561 \log T + 563713.9/T^2$.
$pK_C = 171.9065 + 0.077993T - 2839.319/T - 71.595 \log T$.
$\log K\,CaHCO_3^+ = 1.11$ at 25°C, $\log K\,MgHCO_3^+ = -0.95$ at 25°C, $\log K\,CaCO_3^0 = 3.22$ at 25°C.
*Interpolated

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی

نقش CO_2 در فرآیند انحلال‌پذیری



انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- رابطه حجمی برای تعیین ثابت سرعت انحلال (ضریب انحلال پذیری) سنگهای کربناته

$$\frac{V}{A} \times \frac{dc}{dt} = K_c (C_S - C)^n$$

در این رابطه، V حجم جریان آب است و A سطح تماس سنگ با آب، dc تغییرات غلظت، dt تغییرات زمان، K_c ضریب انحلال‌پذیری یا ثابت سرعت انحلال، ، C_S غلظت یون کلسیم در حالت اشباع و C غلظت عادی یا اولیه یون کلسیم می‌باشند. n نیز درجه واکنش است که برای کانی‌های مختلف مقدار آن متفاوت است.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- رابطه وزنی برای تعیین ثابت سرعت انحلال (ضریب انحلال پذیری) سنگهای کربناته

$$\frac{dM}{dt} = K_c.A(C_S - C)$$

در این رابطه، dM تغییرات جرم یا وزن سنگ در معرض حلال آبی، dt تغییرات زمان، K_c ضریب انحلال‌پذیری یا ثابت سرعت انحلال، A سطح تماس سنگ با آب، C_S غلظت یون کلسیم در حالت اشباع و C غلظت عادی یا اولیه یون کلسیم می‌باشند.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی

در طی فرآیند انحلال کلسیت و آراگونیت در آب ترکیبات انحلالی موجود عبارتند از؛ Ca^{2+}، H^{+}، H_2CO_3، CO_3^{2-}، HCO_3^{-}، OH^{-}. فراوانی مولار (غلظت) گونه‌های (ترکیبات) مذکور با اضافه نمودن یک واکنش بیشتر بصورت زیر خلاصه می‌شود.

$$m_i z_{i\ cations} = m_i z_{i\ anions}$$

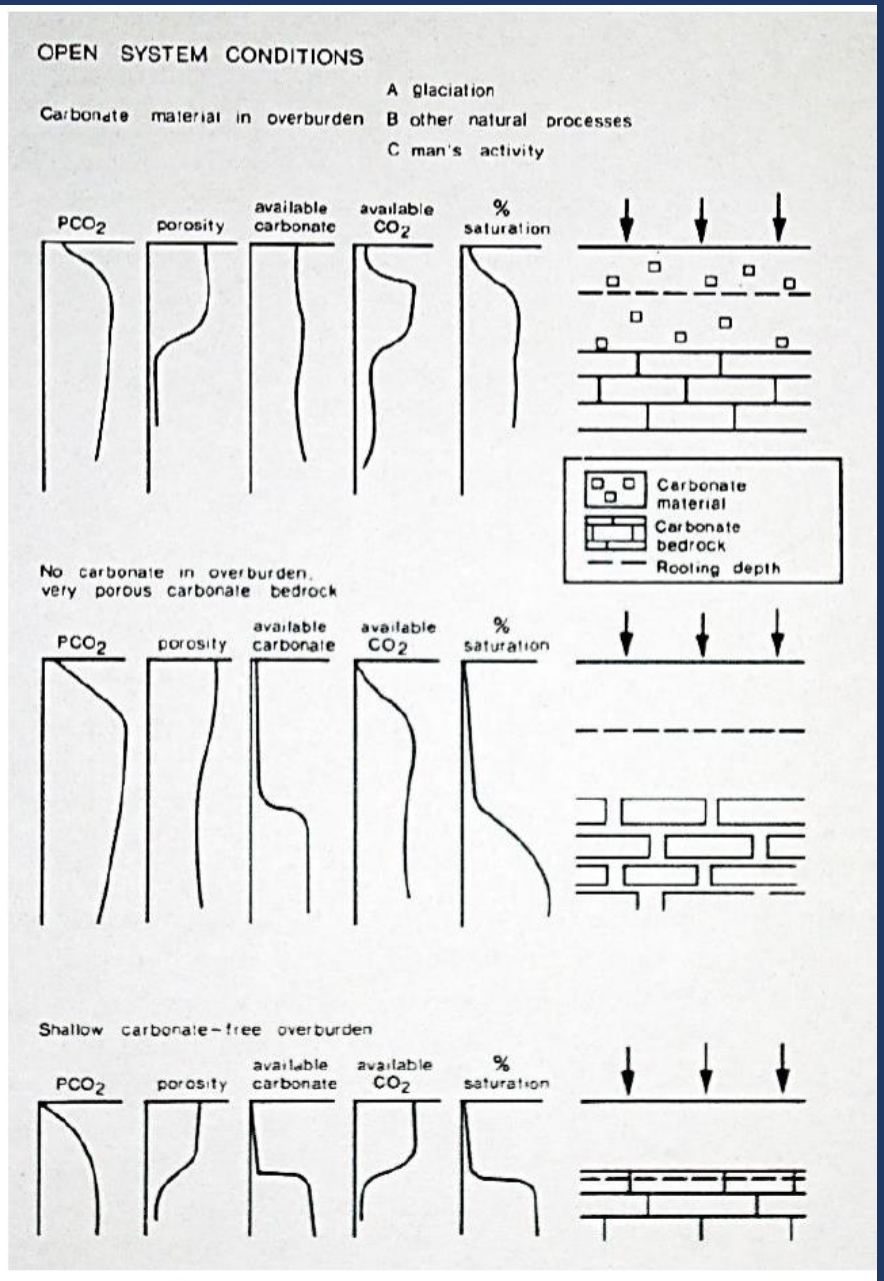
برای کربنات کلسیم این رابطه بصورت زیر است:

$$2m_{Ca^{2+}} + m_{H^{+}} = 2m_{Co_3^{2-}} + m_{HCo_3^{-}} + m_{OH^{-}}$$

یک واکنش تعادلی برای مناطق کارستیک بصورت زیر است:

$$2m_{Ca^{2+}} + 2m_{Mg^{2+}} + m_{Na^{+}} + m_{K^{+}} + m_{H^{+}} = 2m_{Co_3^{2-}} + 2m_{So_4^{2-}} + m_{HCo_3^{-}} + m_{Cl^{-}} + m_{OH^{-}}$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی



عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

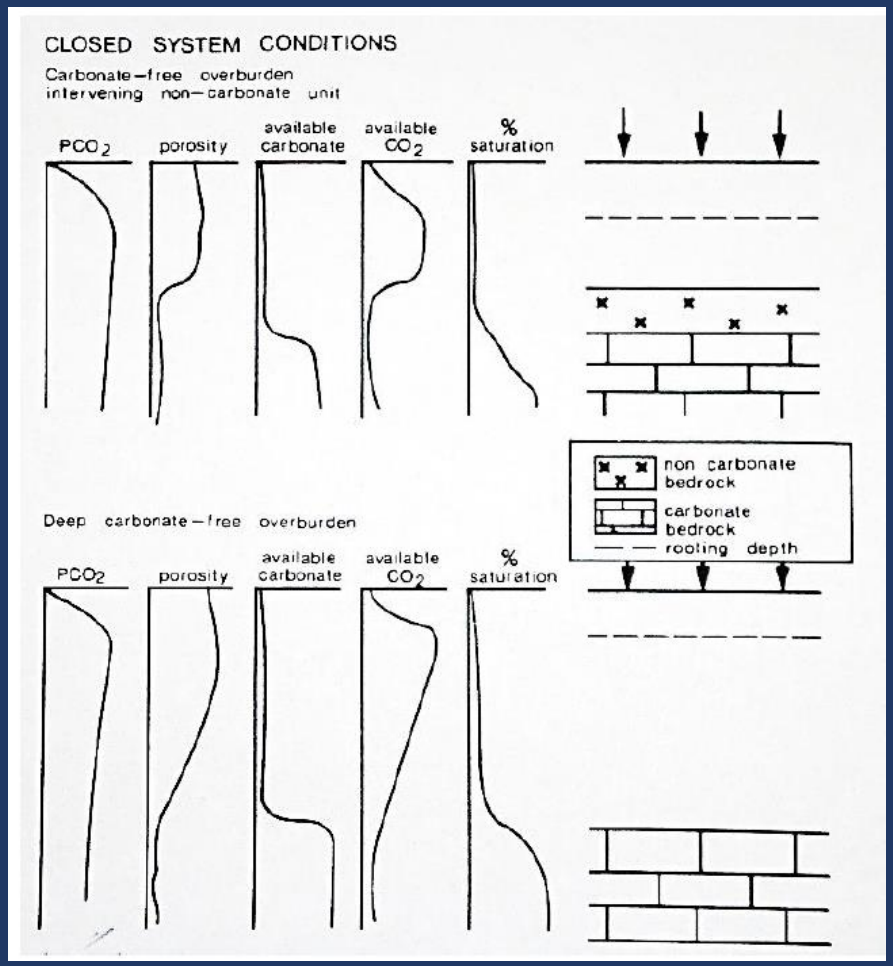
- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی

مدل مفهومی دریک معرف ارتباط بین کربنات موجود در سنگ بستر و مناطق زیر آن جهت انحلال و متغیرهای کنترلکننده انحلال در سیستم های تصادفی

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی



مدل مفهومی دریک معرف ارتباط بین کربنات موجود در سنگ بستر و مناطق زیر آن جهت انحلال و متغیرهای کنترلکننده انحلال در سیستم های تناوبی

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- شاخص اشباع

الف) حالت غیراشباع در این حالت محلول به تعادل نرسیده و غیراشباع می‌باشد و واکنش بصورت رفت صورت می‌گیرد.

ب) حالت تعادل دینامیکی: زمانی است که محلول اشباع از کانی است.

ج) حالت فوق اشباع: واکنش بصورت برگشتی صورت می‌گیرد و ممکن است کانی در محلول ته‌نشین شود.

حالت استاندارد شاخص اشباع برای کاربرد در بسیاری از کارهای کارستی توسط Langmuir (1971) و بصورت رابطه زیر ارائه شده است:

$$SI = \log \frac{K_{IAP}}{K_{eq}}$$

در این رابطه، K_{IAP} فعالیت یون محصول می‌باشد. محلول‌های در حال تعادل دارای SI معادل صفر و محلول‌های غیراشباع دارای شاخص اشباع منفی می‌باشند

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- شاخص اشباع ژیپس

$$SI_g = \log \frac{(Ca^{2+})(SO_4^{2-})}{K_g}$$

$$SI_g = \log(Ca^{2+}) + \log(SO_4^{2-}) + pK_g$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- شاخص اشباع کلسیت یا آراگونیت

شاخص اشباع برای کلسیت یا آراگونیت بصورت زیر است:

$$SI_{c(or-a)} = \frac{\log(Ca^{2+})(CO_3^{2-})}{K_{e\,(orA)}}$$

از آنجایی که غلظت CO_3^{2-} بسادگی اندازه‌گیری نمی‌شود، می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$SI_c = \log\frac{(Ca^{2+})(HCO_3^{-})K_2}{(H^{+})(K_c)}$$

$$SI_c = \log(Ca^{2+}) + \log(HCO_3^{-}) - pK_2 + pH_2 + pK_c$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- شاخص اشباع دولومیت

$$SI_d = \log(Ca^{2+}) + \log(Mg^{2+}) + 2\log(HCO_3^-) + 2pH - 2pK_2 + pK_d$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- P_{CO2} پارامتر خیلی مهم برای مشخص کردن تاریخچه و ماهیت آبهای کارستی

$$P_{CO_2} = \frac{(HCO_3^-)(H^+)}{K_1 \cdot K_{CO_2}}$$

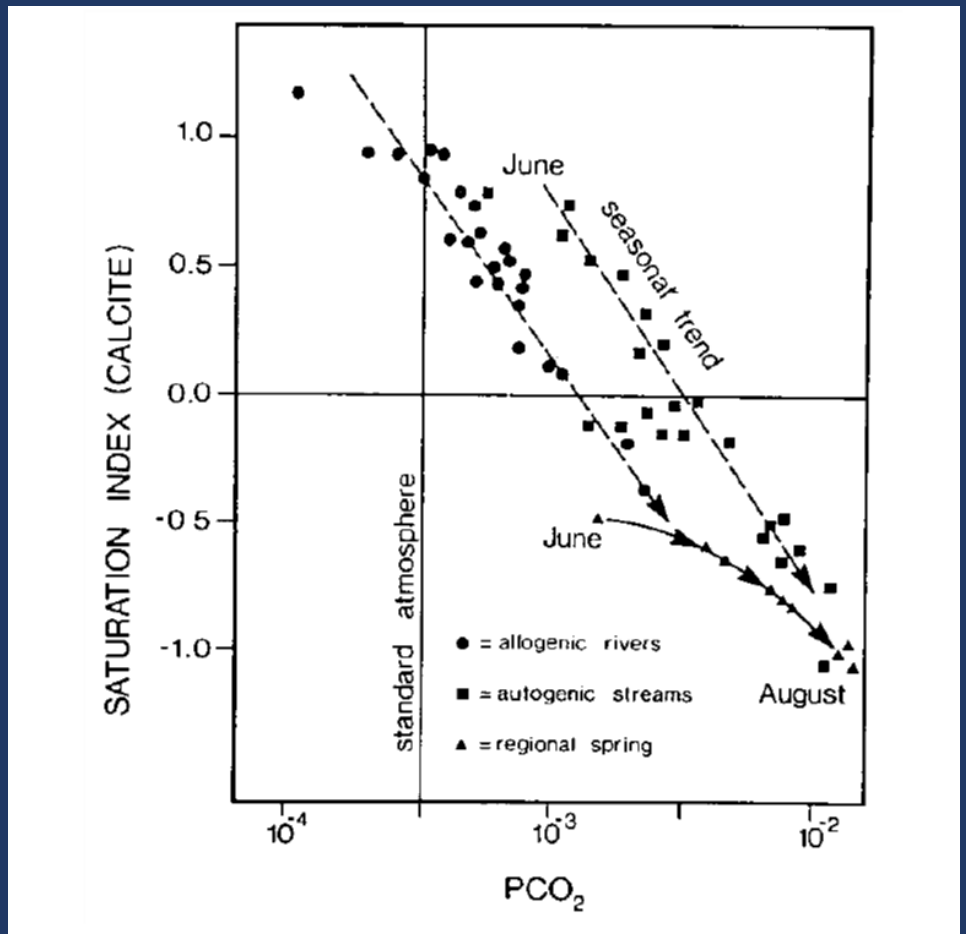
$$\log P_{CO_2} = \log(HCO_3^-) - pH + pK_{CO_2} + pK_1$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- محلولهای آبی و تعادل شیمیایی
- P_{CO2} پارامتر خیلی مهم برای مشخص کردن تاریخچه و ماهیت آبهای کارستی

مثال از محاسبه شاخص اشباع و P_{CO_2}



انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- اندازه گیریهای صحرایی و آزمایشگاهی

اندازه‌گیری صحرایی pH و درجه حرارت

یکی از کارهایی که باید در مطالعات کارست صورت گیرد، محاسبه pH در صحرا می‌باشد که باید با دو رقم اعشار و با دقت ± 0.05 برای اندازه‌گیری pH می‌توان از pH متر استفاده نمود. مطابق نظر EK(1973) بین pH صحرایی و آزمایشگاهی رابطه خطی خوبی وجود دارد.

همچنین درجه حرارت آب نیز باید محاسبه شود که برای این منظور باید دقت کار $\pm 0.5^{o}C$ باشد. هدایت مترهای[1] مدرن دارای یک نیشتر برای اندازه‌گیری درجه حرارت می‌باشند.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- اندازه گیریهای صحرایی و آزمایشگاهی

هدایت الکتریکی

در I (قدرت یونی) پایین، هدایت الکتریکی آب متناسب با غلظت کل یون‌ها می‌باشد. دستگاه‌های قابل حمل مدرن رنج وسیعی از هدایت الکتریکی آب را اندازه‌گیری می‌کنند که نتایج باید برای درجه حرارت ۲۵ درجه سانتیگراد تصحیح شود. بنابراین لازم است که به هنگام کار با هدایت متر درجه حرارت آب نیز ثبت گردد.

در شرایط آزمایشگاهی Herman & white (1984) دریافتند که:

$$Calcite\ (as\ mg\ 1^{-1} CaCO_3) = 0.78\ SpC - 21$$

و

$$dolomite\ (as\ mg\ 1^{-1}\ CaCO_3) = 0.66\ SpC - 13$$

سمت چپ این روابط غلظت کربنات کلسیم و SpC هدایت ویژه آب می‌باشد.

در مطالعات صحرایی پنسیلوانیای مرکزی آنها بدست آوردند:

$$mg\ 1^{-1} CaCO_3 = 0.59\ SpC - 30$$

برای مناطق جغرافیایی مشابه، Langmuir (1971) رابطه زیر را ارائه نموده است:

$$I = 1.88 \times 10^{-5} (SpC) \qquad (۲۱-۳)$$

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- اندازه گیریهای صحرایی و آزمایشگاهی

روش‌های آزمایشگاهی

تمام روش‌های صحرایی را می‌توان در آزمایشگاه نیز بکار برد. در آزمایشگاه با محاسبه غلظت یونهای Ca^{2+} و Mg^{2+} به روش طیف نگاری جذاب اتمی[1] می‌توان پی به pH محلول برد.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- اندازه گیریهای صحرایی و آزمایشگاهی

صحت آنالیز یا تحلیل

صحت آنالیز و مطالعه یک نمونه آب را می‌توان با محاسبه خطای تعادل یونها که از طریق رابطه زیر بدست می‌آید، بررسی نمود:

$$E = \frac{\sum m_i z_{i\ cations} - \sum m_i z_{i\ anions}}{\sum m_i z_{i\ cations} - \sum m_i z_{i\ anions}} \times 100$$

در این رابطه E برحسب درصد بدست می‌آید. در مطالعات صحرایی برای محلول‌های خیلی رقیق مقدار E تا ۵ درصد قابل قبول می‌باشد. در صورتی که مقدار E از ۵ درصد بیشتر باشد یک اشتباه رخ داده است. بخاطر مشکلات روش‌های صحرایی شاخص اشباع برای کلسیت، آراگونیت و دولومیت خطایی در حدود (0.2 تا 0.1 ±) معمول است.

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- پیچیدگی های شیمیایی در انحلال کربناتها
- عوامل موثر در انحلال پذیری سنگهای کربناته

۱- تأثیر فشار و درجه حرارت[۲]
۲- CO_2 موجود در خاک
۳- CO_2 موجود در حفرات و شکستگی‌های زون ودوز[۳]
۴- تاثیر سیستم‌های باز یا بسته[۴]
۵- خوردگی ترکیبی[۵]
۶- زوج یون‌ها[۱]

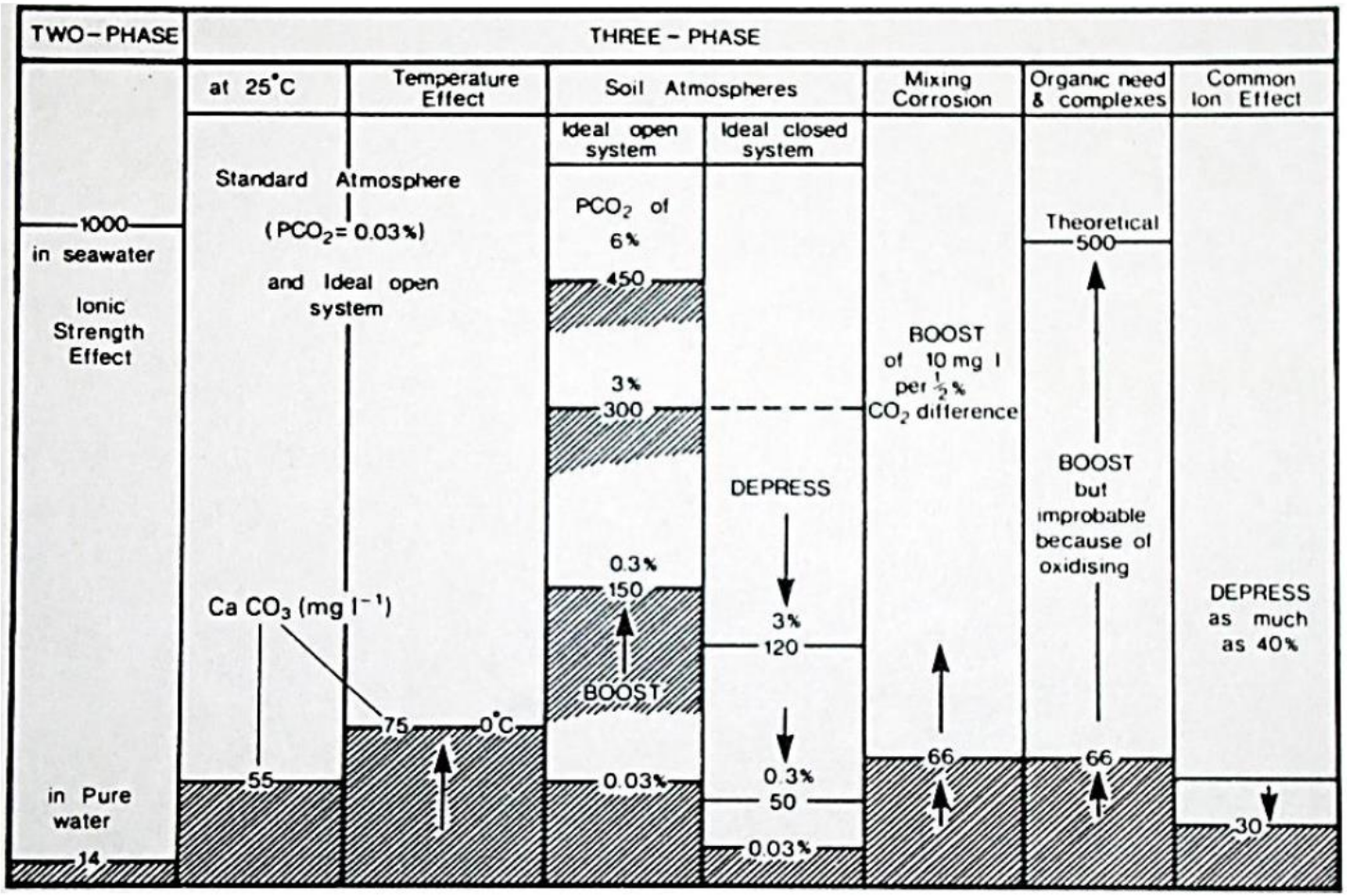
2. simple temperature and pressure effects
3. Co_2 in cave fissures of Vadose zone
4. Coincident (or open) and Sequenced (or Close) systems
5. Mixing Corrosion

1. Ion Pairs

۷- یون‌های رایج[۲]
۸- تاثیر قدرت یونی و ترکیب آب دریا[۳]
۹- اسیدها غیرمعمول غیر ارگانیک[۴]
۱۰- باران‌های اسیدی[۵]
۱۱- اسیدها و ترکیبات ارگانیک[۶]

2. Common ions
3. Ionics strength effect and Seawater mixing
4. Inorganic exotic acids
5. Acid rain
6. Organic Complexes and acids

انحلال پذیری سنگهای کارستی

عوامل مؤثر بر انحلال پذیری

- پیچیدگی های شیمیایی در انحلال کربناتها
- عوامل موثر در انحلال پذیری سنگهای کربناته