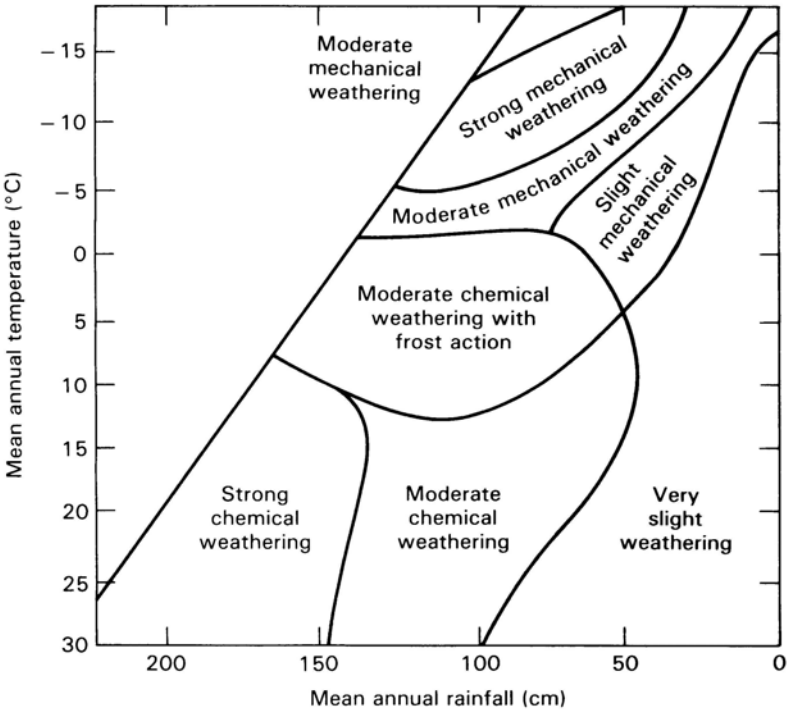
هوازدگی وفرسایش
(Weathering & Erosion)

هوازدگی تخریب مکانیکی و شیمیایی سنگ‌های سطح زمین است که طی آن سنگ به ذرات کوچکتر تبدیل می‌شود و ممکن است ترکیب این ذرات با سنگ اصلی فرق کند. اگر چه جنبه‌های مکانیکی وشیمیایی هوازدگی به صورت جداگانه مورد بحث قرار می گیرند اما این دو زمینه (شیمیایی و مکانیکی) معمولا همزمان اتفاق می افتند و در بسیاری از موارد به‌هم مربوط هستند.

فرایند هوازدگی برای دانشمندان و مهندسین مهم است. دانشمندان متخصص خاک فرآیندهایی از هوازدگی را مطالعه می کنند که مربوط به تشکیل و ایجاد خاک‌های حاصلخیز کشاورزی می‌باشد. هیدروژئولوژیست‌ها برروی آن دسته از ترکیبات شیمیایی تحقیق می کنند که حاصل از واکنش های شیمیایی هوازدگی بر روی قشر و لایه ای از زمین است که درچند متری بالای خاک قرار دارند و بعدها این ترکیبات به لایه های زیرین زمین منتقل شده و بر روی آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارند.

زمین‌شناسان و مهندسین، نقش هوازدگی را در زمین‌لغزه‌ها (landslides) و انواع دیگر لغزش شیروانی‌ها (slope failure) نشان داده‌اند. در صنعت ساختمان تأثیر هوازدگی برسنگ‌های ساختمانی بسیار مورد توجه است. خرابی سنگهای ساختمانی و خرد شدن سنگدانه های مورد استفاده در جاده‌ها و نیز سایر مصالح ساختمانی، نتیجه جدی و پرهزینه پدیده هوازدگی است. احتمالا مهمترین تاثیر هوازدگی، ارتباط آن به طراحی و عملکرد سازه‌های احداث شده روی سنگ هوازده است. هوازدگی به تدریج سنگ را سست و ضعیف می کند. در بعضی از آب و هواها، نتیجه نهایی این پدیده باعث ایجاد خاک پس‌ماند (residulal soil) می‌شودکه ازلحاظ مشخصات مهندسی با سنگهای اصلی (مادر) بسیار تفاوت دارند. تأثیرات هوازدگی باید در هر پروژه‌ای که مستلزم وجود سنگهای مقاوم دربرابرهوازدگی است، ارزیابی شود.

انواع و شدت فرایندهای هوازدگی که در یک منطقه بخصوص روی می‌دهد، نخست تحت تأثیرآب و هوای آن منطقه است. دما، فرایندهای مکانیکی که بوسیله انجماد و ذوب شدن ایجاد می‌شوند را کنترل می‌کند، همانطوری که سرعت واکنش‌های شیمیایی را نیز کنترل می‌کند. عامل آب وهوایی مهم دیگر میزان بارندگی است.زیرا آب درهر دو فرآیند مکانیکی و شیمیایی نقش دارد. انواع مهم هوازدگی که درنواحی مخصوص آب وهوائی وجود دارد، درشکل ۱۰-۱ آمده است، که دراین شکل از میزان متوسط بارندگی سالانه و میزان متوسط دما در سال، برای توصیف آب و هوا استفاده شده است.



شکل ۱۰-۱ تأثیر آب وهوا بر نوع فرایند هوازدگی

هوازدگی مکانیکی

هوازدگی مکانیکی شامل فرآیندهایی است که سنگ را به ذرات کوچکتر تقسیم می‌کند که این عمل بوسیله اعمال نیروهایی است که از مقاومت سنگ بیشتر هستند. معمولا این نیروها به سنگها اثر می‌کنند تا بر مقاومت کششی آنها که خیلی کمتر ازمقاومت فشاری آنها است، غلبه کنند. فرآیندهای اصلی هوازدگی شیمیایی و فیزیکی درجدول ۱۰-۱ نشان داده شده است.

۱-یخ زدگی (Frost action)

عمل یخ زدگی یکی ازموثرترین فرایندهای فیزیکی درهوازدگی است. وقتی آب یخ می‌بندد حجم آن در حدود ۹٪ زیاد می‌شود. این افزایش حجم باعث ایجاد نیروی عظیمی می‌شود. هنگامیکه آب درمیان سنگ یخ می‌زند، تمایل یخ به انبساط، اغلب فشاری بزرگتر از مقاومت کششی سنگ را به سنگها اعمال می‌کند. آب وقتی به درون ترک‌ها و شکاف‌های سنگ نفوذ کرده و یخ می‌زند، دو دیواره سنگ که رو به روی هم قرارگرفته‌اند، ممکن است در اثر نیروی ناشی از انجماد آب ازهمدیگر جدا شوند. اندازه و شکل این تکه‌سنگهای تولید شده به موقعیت و جهت درزه و شکاف‌های سنگ بستگی دارد. درسراشیبی، تکه‌سنگهای ایجاد شده در اثرعمل یخزدگی ممکن است به پایین سراشیبی سقوط کنند، که یک توده و کپه‌ای را ایجاد میکند که talus نام دارد.

جدول ۱۰-۱ فرایندهای هوازدگی شیمیایی و مکانیکی

مکانیکی

۱- عمل یخ زدگی

۲- هوازدگی بوسیله نمک

۳ - تغییرات دما

۴- تغییرات رطوبت

۵- باربرداری

۶- فرایند های زیستی

شیمیایی

۱- انحلال شیمیایی:

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

(Calcite) + (Carbonic acid) (Calcium ion) + Bicarbonate ion)

۲- هیدرولیز:

$2KAlSi_3O_8 + 2H^+ + 9H_2O \longrightarrow AI_2Si_2O_5(OH)_4 + 4H_4SiO_4 + 2k^+$

(Orthoclase) (Kaolinite) + (Dissolved silica) + (Dissolved potassium)

۳- هیدراسیون:

$CaSO_4 + 2H_2O \longrightarrow CaSO_4.2H_2O$

(Anhydrite) (Gypsum)

۴- اکسیداسیون :

$4FeSiO_3 + O_2 + H_2O \longrightarrow 4FeO(OH) + 4SiO_2$

(Pyroxene) (Limonite) + (Dissolved silica)

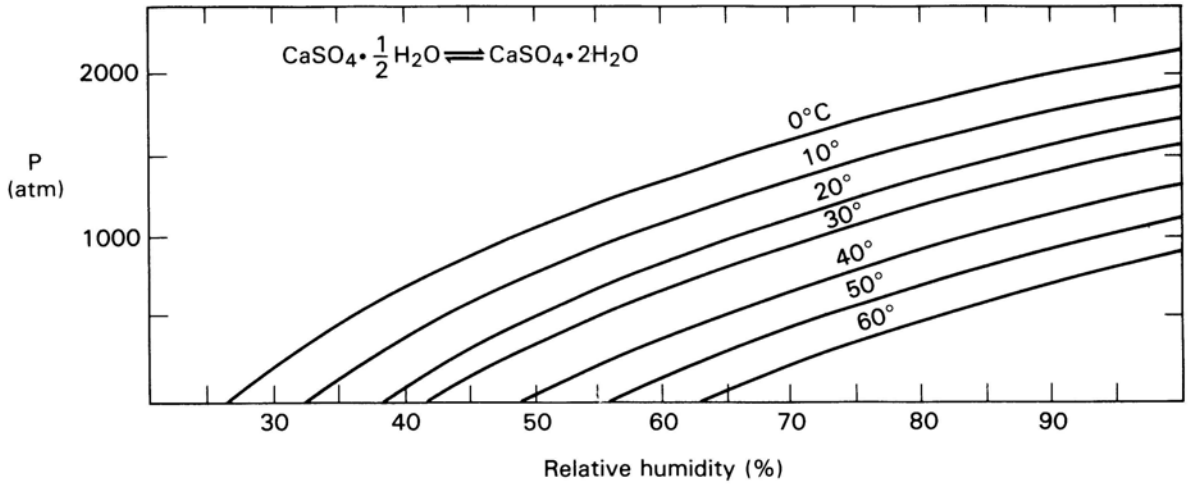
شکل ۱۰-۲- تکه سنگ های ایجاد شده در اثر یخ زدگی

۲- هوا زدگی با نمک (Salt weathering)

کریستالیزه شدن نمک دریک سنگ، تاحدی شبیه یخ زدگی است. تخریب سنگ بوسیله کریستالیزه شدن نمک، هوازدگی بوسیله نمک (salt weathering) نام دارد و این عمل یکی از تهدیدات جدی برای دوام و ظاهر سنگهای ساختمانی است.

نمکی که از طریق انحلال درسنگ، کریستالیزه می‌شود محدود به کلرید سدیم نمی‌شود، بلکه دارای تعدادی نمکهای کلریدی، سولفاتی، کربناتی نیز هست که می توانند از طرق مختلف به درون سنگ نفوذ کنند. سنگهای رسوبی ممکن است از منبع اصلی خود، نمک داشته باشند. سایر مواد محلول ممکن است ازطریق هوازدگی شیمیایی بوجود آیند. همچنین نمک ممکن است بعد از استخراج سنگ، وارد سنگ شود. برای مثال هوای آلوده شهری و بارندگی منبع خوبی از نمک ها هستند.

نمک می تواند از یک محلول آبی برروی سطح سنگ و یا درحفره‌ها و فضاهای خالی سنگ کریستالی شود. اغلب، تجمع نمک، یک لایه نازک درست زیر سطح سنگ، ایجاد می‌کند. دراین گونه موارد لایه سطحی به تدریج متلاشی شده و از سطح سنگ جدا می‌شود و این فرایند تکرار می‌شود. بلورهای نمک به سه طریق ممکن است باعث تخریب سنگ شوند. اول به دلیل فشار و انبساطی که در اثر رشد اولیه بلور نمک حاصل می‌شود. انبساط حرارتی بلور نمک، مکانیزم بعدی است. در اثر گرم شدن، بلورهای نمک بیشتر از بلورهای کانی سنگ میزبان منبسط میشوند، بنابر این باعث ایجاد فشار میشود. و سرانجام اینکه بلورهای نمک تمایل دارند آب را به درون ساختار خود جذب کنند تا بلورهای هیدرات تشکیل دهند. این امر مستلزم یک انبساط حجمی و تشدید فشار بر روی ذرات مجاور است که ممکن است این فشار به مقدار بسیار زیادی برسد (شکل۱۰-۳). این فشار هیدراسیون میتواند بیشتر از مقاومت کششی سنگ باشد و موجب تخریب لایه ی نازک بیرونی میشود.



شکل۱۰-۳- فشار ناشی از هیدراسیون $CaSO_4.1/2H_2O$

۳- تغییرات دما (Temperature Changes)

تغییرات دما مدت زیادی است که به عنوان یکی از مکانیزم های هوازدگی محسوب میشود، چون باعث انقباض و انبساط حرارتی، در کانی‌های سنگ می‌شود که ممکن است در نهایت به تخریب سنگ منجر شود.

۴- تغییرات رطوبتی (Moisture Changes)

تغییرات رطوبتی بصورت خشک شدن و مرطوب شدن متناوب میتواند موجب انقباض و انبساط شود که ممکن است به تخریب سنگ بیانجامد. این مکانیزم زمانیکه با تغییرات دما همراه شود، اثر بیشتری خواهد داشت.

شکل۱۰-۴- نتیجه exfoliation در جداسازی صفحات نازک سنگ از یک صخره در راستای صفحات موازی باسطح

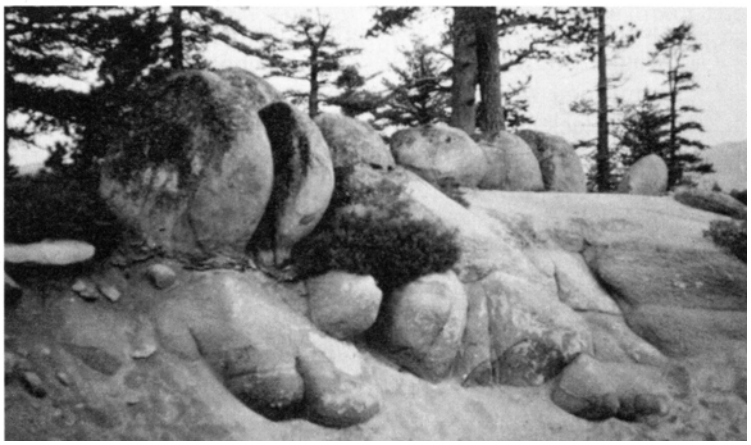
۵- هوا زدگی ناشی از باربرداری (Unloading)

سنگها، مثل سایر مواد، تحت تاثیر فشار، تغییر شکل میدهند. سنگهای مدفون شده در اعماق هر دو تغییرشکل الاستیک و پلاستیکی که از وزن سنگهای بالاتر ناشی میشود را تحمل میکنند. با ازبین رفتن بارهای وارده که میتواند بعلت فرسایش دره توسط رودخانه یا با گودبرداری و حفاری عمیق برای پروژه‌های ساختمانی رخ دهد، جزء الاستیکی تغییر شکل بازگشته و سنگ منبسط میشود. انبساطی که از باربرداری (unloading) ناشی میشود، اغلب برای شکستن سنگ در راستای صفحات موازی با سطحی که فشار از روی آن برداشته شده است، کافی است. این نوع از هوازدگی exfloiation نام دارد و هنگامی که مواد رویی برداشته میشوند، صفحات نازک سنگ که دارای درزه هایی موازی سطح زمین هستند را تولید می کنند (شکل ۱۰-۴). سنگهایی که ازطریق exfloiation ایجاد می شوند، آماده و مستعد هوازدگی بیشتری هستند.

فرایند و روندی که تقریبا همین نتیجه را بدنبال دارد، هوازدگی شبه کروی (Spheroidal weathering) است که درآن لایه های متحد المرکزی ایجاد می شود و بتدریج از بیرون لاشه سنگ ها (boulder) جدا می شود. برخلاف exfloiation، نیروهایی که بدین ترتیب سنگ را تخریب می‌کند و باعث می‌شود ازهسته مرکزی جدا شوند، از طریق واکنش‌های هوازدگی شیمیایی ایجاد می‌شوند. سنگ‌های گرانیتی که بسیار درمعرض هوازدگی قرارگرفته‌اند، اغلب شامل هسته‌های شبه‌کروی سنگ‌های هوانزده‌اند که توسط سنگ های هوازده احاطه شده است (شکل۱۰-۵). اندازه هسته‌ها به‌تدریج توسط هوازدگی شبه کروی کوچک می‌شوند.

۶- فرایندهای زیستی

موجودات زنده در هر دو نوع هوازدگی شیمیایی وفیزیکی، نقش دارند. تأثیرات فیزیکی در جایی ظاهر می‌شوند که ریشه‌های گیاهان رشد می‌کنند و درزه‌های کوچک وترک‌ها را در سنگ‌ها ایجاد می‌کنند. فشاری که از رشد ریشه‌ها ناشی می‌شود می‌تواند قسمت‌هایی ازسنگ را از هم جدا کند و به سرعت دیگر فرایندهای هوازدگی بیافزاید.



شکل ۱۰-۵ سنگهای گردشده‌ای که توسط هوازدگیSpheroidal تولید شده‌اند.

هوازدگی شیمیایی

بیشتر سنگ ها تحت شرایطی ایجاد می شوند که بسیار متفاوت با شرایط موجود در سطح زمین است. به‌ویژه، سنگ‌های آذرین و دگرگونی در دما و فشار بسیار بالایی متبلور شده‌اند. هنگامی که این سنگ‌ها در معرض دما و فشار پایین موجود در سطح زمین قرار می‌گیرند، ناپایدار هستند و تمایل پیدا می‌کنند تا با عناصر اتمسفر واکنش شیمیایی انجام دهند تا کانیهای جدیدی را ایجادکنند که در این شرایط بسیار پایدارتر هستند.مهمترین واکنش دهنده‌های اتمسفر، اکسیژن، دی‌اکسیدکربن و آب هستند. در هوای آلوده، واکنش دهنده‌های دیگر نیز موجودند.

دو کنترل کننده مهم بر واکنش‌های شیمیایی هوازدگی، دما و PH هستند. هوازدگی در آب وهوای گرم شدیدتر است. PH، یا منفی لگاریتم غلظت یون هیدروژن، شاخصی برای میزان اسیدی بودن واکنش‌های هوازدگی است. آبی که زمین از طریق بارندگی دریافت می‌کند، کمی اسیدی است (PH~5.9). این اسیدی بودن بخاطر واکنش با دی‌اکسیدکربن ودیگر عناصر موجود درجو است. باران‌های اسیدی که در اثر نفوذ گازهای صنعتی به اتمسفر شکل می‌گیرند. پتانسیل این را دارند که عمل هوازدگی را شروع کنند. شکل ۱۰-۶ شرایط در منطقه رشد گیاهان را- نواحی بالایی سطح خاک – درهنگامیکه باران یا برف به زیرزمین نفوذ می کند، نشان می‌دهد. پوسیدگی مواد آلی دراین ناحیه، تحت شرایط هوازی، دی اکسید کربن تولید می‌کند. برای مثال، واکنش زیر نشان می دهدکه کربوهیدرات (CH_2O) با اکسیژن واکنش می‌دهد تا دی اکسید کربن تولید کند.

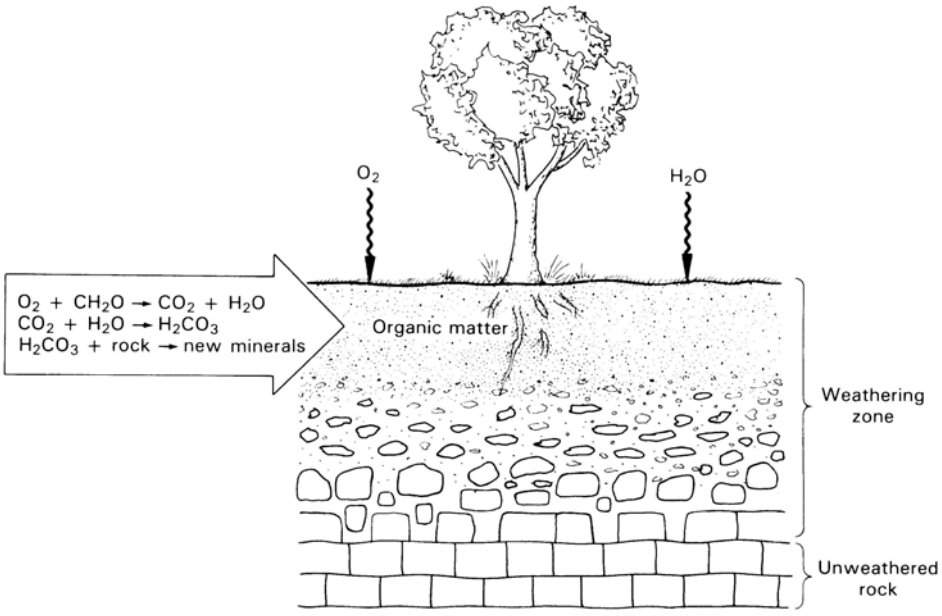
$$O_2 + CH_2O \longleftrightarrow CO_2 + H_2O$$

دی اکسید کربن در ناحیه خاکی می تواند به بزرگی و غلظتی بیش از غلظت آن در اتمسفر برسد و سپس با آب باران یا برف ذوب شده‌ای که به درون خاک نفوذ کرده، واکنش دهد تا اسید کربونیک تولید کند. مانند :

$$H_2O + CO_2 \Leftrightarrow H_2CO_3$$

تولید اسید کربونیک، بوسیله جداسازی جزئی و ناتمام، از PH می‌کاهد. مطابق واکنش زیر :

$$H_2CO_3 \Leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$$



شکل ۱۰-۶: تولید محلولهای اسیدی که موجب هوازدگی می‌شوند، بوسیله تشکیل CO_2 در ناحیه خاک. نتیجه افزایش غلظت یون هیدروژن (PH کمتر)، حمله شدیدتر محلول به بلورهای کانی است.

گونه های خاصی از واکنش های هوازدگی که تاکنون شناخته شده‌اند درجدول ۱۰-۱، به همراه مثال برای واکنش های شیمیایی آورده شده اند. وقتی یک کانی در طول مدت هوازدگی به طور کامل حل می‌شود، واکنش تحت عنوان انحلال (solution) شناخته می‌شود. میزان تمایل کانی‌ها به حل شدن در محلول‌های هوازدگی، قابلیت انحلال (solubility) نام دارد. کانی های تبخیری به‌راحتی در آب حل می‌شوند، در حالیکه کانیهای کربناتی تقریبا کم محلول هستند.

کلرور سدیم (هالیت یا نمک طعام) و سولفات کلسیم (ژیپس) به راحتی در آب حل می‌شوند و آبهای زیرزمینی و جریانهای نفوذی سبب ایجاد حفرات متعددی در سطح و یا در عمق این رسوبات می‌گردند. حتی، حل شدن سنگ آهک می‌تواند غارهای آهکی بزرگی در زیر سطح زمین ایجاد کند. بعضی از کانی‌های سیلیکاتی، توسط انحلال، هوازده می شوند. اما انحلال‌پذیری آنها بسیار کم است. برای مثال، کوارتز معمولاً فقط تحت شرایط شدید هوازدگی مناطق گرمسیری حل می‌شود.

هیدرولیز (hydrolysis) واکنش بین محلول‌های هوازدگی اسیدی (محلول‌های اسیدی که موجب هوازدگی می‌شوند) و تعداد زیادی از کانی های سیلیکاتی است، که شامل feldspar ها هستند. واکنش موجود در جدول ۱-۱۰ نشان می دهد که در هیدرولیز، کانی feldspar با یونهای هیدروژن واکنش می‌دهد، تا محصولات متعدد محلول و همچنین محصول جامد کانی خاک رس را ایجاد کند. بقیه کانی‌های رسی توسط واکنشهای هوازدگی مشابهی تولید می‌شوند. این واکنش مثالی برای تخریب کانی است که در برابر دما و فشار بالا پایدار است، ولی بعد از تخریب به کانی جدیدی تبدیل می‌شود که در برابر شرایط سطح زمین پایدار است. توجه داشته باشید که هیدرولیز، سیلیس و پتاسیم محلول تولید می‌کند. این اجزا به طرف پایین و به ناحیه‌ای دور از ناحیه هوازدگی حمل می‌شوند و به طرف سفره آب می‌روند و در آب حل می‌شوند و قسمتی از سیستم جریان آبهای زیرزمینی می‌شوند. واکنشهای هیدرولیز، نهشته‌های رسی را، که در بسیاری از صنایع مصرف می شوند، تولید می کنند.

جذب آب به درون ساختار شبکه‌ای کانی‌ها هیدراسیون (hydration) نام دارد. تشکیل ژیپس (gypsum) از انیدریت، توسط هیدراسیون در جدول ۱۰-۱ نشان داده شده است. کانی‌های رسی نیز برای هیدراسیون آماده و مستعد هستند. انبساط حجمی‌ای که با هیدراسیون همراه است عامل مهم تخریب فیزیکی و سست شدن سنگ است. نقش هیدراسیون در هوازدگی بوسیله نمک قبلاً توضیح داده شده است.

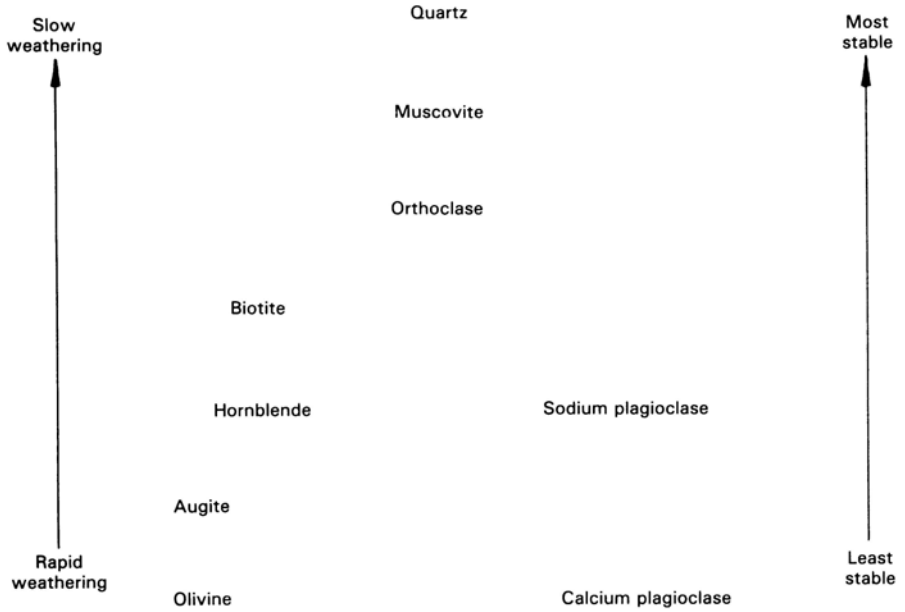
واکنش اکسیژن آزاد با عناصر فلزی برای همه، با عنوان زنگ‌زدگی، آشناست. این فرایند مثالی برای اکسیداسیون (oxidation) است. اکسیداسیون بر سنگهائی که حاوی آهن و دیگر عناصر است تاثیر می‌گذارد. آهن در طبیعت به مقدار فراوان در کانیهایی نظیر الیوین، پیروکسن و... وجود دارد که در آنها آهن با اکسیژن ترکیب می‌شود. برای مثال در هوازدگی پیروکسن بوسیله اکسیداسیون، همان طور که در

جدول ۱-۱۰ آمده است، آهن با اکسیژن ترکیب می شود و هیدراته می شود تا کانی limonite را بوجود آورد. وجود limonite در سنگ یا خاک بوسیله لکه‌های قهوه‌ای یا قرمز مشخص می‌شود.

پایداری (Stability)

پایداری کانی‌ها در برابر هوازدگی شیمیایی در سطح زمین به تفاوت شرایطی که این کانی ها کریستالیزه شده‌اند و شرایط آنها در روی زمین، بستگی دارد. پایداری کانی‌های سنگ‌های آذرین درمقابل هوازدگی شیمیایی بر عکس ترتیب بلوری شدن این کانی ها از مواد مذاب است (شکل ۱۰-۷). این رابطه به عنوان سری‌های پایداری گلدیچ (Goldich's stability series) مشهور است. برای مثال اولیوین، اولین کانی است که از مواد مذاب سیلیکاتی متبلور می‌شود، بنابراین اولیوین ناپایدارترین کانی در محیط هوازدگی است. کوارتز که آخرین کانی است که از ماگما متبلور می‌شود، در برابر اغلب محیط‌های هوازدگی، بسیار پایدار است.

کوارتز بقدری آهسته حل می‌شود که عملا به عنوان یک کانی انحلال ناپذیر در نظر گرفته می شود، البته به جز شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب. پایداری کوارتز این مطلب را توجیه می کند که چرا کوارتز در سنگهای رسوبی مانند ماسه سنگ بسیار متداول است. کانی فلدسپار و کانی‌های فرومنیزین (ferromagnesian) موجود در سنگ، نسبتاً به سرعت هوازده شده و کانی‌های رسی را ایجاد می نمایند. ولی کوارتز به محیط های رسوبی حمل شده و در آنجا رسوب می‌کند. کانی‌های رسی که از هوازدگی فلدسپارها و دیگر کانیها ایجاد می‌شوند، محصولات هوازده پایداری هستند که بصورت گل در محیط‌های رسوبی کم انرژی رسوب می کنند و سپس به شیل تبدیل می‌شوند.

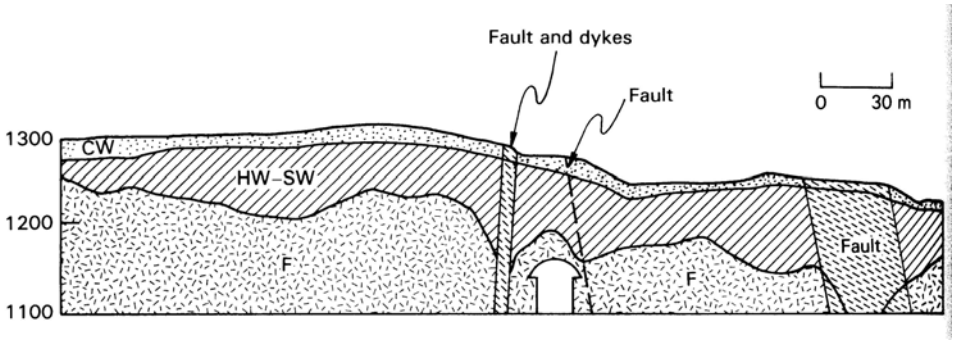


شکل ۱۰-۷- سری های پایداری گلدیچ که پایداری کانی های اولیه سنگ آذرین را در شرایط هوازدگی به طور نسبی نشان می دهد.

هوازدگی سنگ ها و مهندسی (Rock weathering and Engineering)

درجه و الگوی هوازدگی از مهم ترین عواملی هستند که باید در پروژه های مهندسی مشخص شوند. تاثیرات هوازدگی بر روی مشخصات مهندسی سنگ‌ها شامل کاهش مقاومت، از بین رفتن خاصیت ارتجاعی (elasticity)، کاهش چگالی و افزایش مقدار رطوبت و تخلخل است. این تغییرات می‌تواند برای پایداری سازه هایی مانند سدهای قوسی که حداکثر استحکام و قابلیت ارتجاعی را نیاز دارند، بسیار مضر باشد.

درجه و الگوی هوازدگی جزو عوامل مهمی هستند که باید در سایت یک پروژه آنها را مشخص کرد. درزه‌ها و گسل‌ها مجراهایی را برای حرکت سیال از سطح فراهم می کند. بنابراین سنگ ممکن است در اعماق زیاد، در محل شکستگیها به شدت هوازده شوند شرایط هوازدگی در یک نیرو گاه زیر زمینی در شکل ۱۰-۸ نشان داده شده است. در این شکل مناطق هوازده به گروههای بدون هوازدگی (F) و هوازدگی جزئی (SW) و بسیار هوازده (HW) و کاملاً هوازده (CW) تقسیم‌بندی شده‌اند. تونل و حفاری های زیرزمینی برای پروژه در محلی قرار گرفته است تا از نواحی دارای گسل و دارای هوازدگی اجتناب شود.



شکل ۱۰-۸- درجه هوازدگی سنگها در محل یک نیروگاه زیر زمینی در استرالیا : نواحی هوازده شامل سنگ های تازه (F) سنگ های هوازده جزئی (SW) , بسیار هوازده (HW) و سنگهای کاملاً هوازده (CW) هستند.

فرسایش

تجزیه فیزیکی و شیمیایی سنگها با فرایندهای هوازدگی به تشکیل موادی منجر می‌شود که می‌توانند به آسانی توسط فرایندهای موجود در سطح زمین حمل شوند. فرسایش، جابجایی و حمل مواد سطحی را تحت عمل یک یا چند نیرو توصیف می‌کند. موادی که برای فرسایش مستعد هستند نه تنها شامل مواد تولید شده در اثر هوازدگی سنگ‌هاست بلکه شامل مواد رسوبی سطحی غیرمتراکم (خاک) نیز می‌باشد.

فرسایش با آب

فرسایش با آب یا فرسایش رودخانه‌ای مهمترین نوع فرسایش می‌باشد. کاهش حاصلخیزی خاک که به‌وسیله‌ی فرسایش خاک‌های سطحی صورت می‌پذیرد، یکی از مهمترین مشکلات انسان هاست. فرسایش در کانالهای رودخانه ها نیز از مشکلات مهم است. پایه پل‌ها، خاکریزها و دیگر سازه‌ها می تواند در اثر فرسایش با آب تخریب شوند.