

مروری بر خصوصیات لندفرم‌های کارستی در لایه‌های گچی

امیر صفاری* - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه خوارزمی
عزت اله قنوتی - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه خوارزمی
فرشاد علیجانی - استادیار دانشگاه شهید بهشتی
زکيه محمدی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۲۱ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۰۱/۲۰

چکیده

کارست در سنگ گچ و انیدریت عموماً "کارست گچی" نامیده می‌شود، به دلیل حلالیت و سرعت انحلال بالای گچ، توسعه عوارض کارستی در آن بسیار سریع‌تر از سنگ‌آهک رخ می‌دهد، به بیانی دیگر کارست گچی می‌تواند به‌جای مقیاس زمان زمین‌شناسی، در مقیاس زمانی انسانی تکامل یابد. بنابراین عوارض کارست گچی بسیار قابل توجه هستند. علی‌رغم رخداد گسترده‌ی کارست‌های گچی در سطح جهان و اهمیت وابسته به آن از لحاظ کاربردی (مخاطرات، اثرات و منابع)، کمتر مورد توجه قرار گرفته و نسبتاً مطالعه نشده باقی‌مانده است. تقریباً از دهه ۱۹۹۰ مطالعه کارست گچی به‌صورت جدی در سطح جهان آغاز شد. در ایران نیز مطالعه کارست‌های گچی بسیار جوان می‌باشد و به‌ندرت مطالعه‌ای به‌صورت خاص به کارست گچی پرداخته است و این شاخه از علم کارست در ابتدای راه قرار دارد. نبود منابع فارسی مدون در این رابطه انگیزه اصلی نگارش این مقاله بوده است تا بتواند مقدمه‌ای برای مطالعات مدون کارست گچی در ایران فراهم آورد. مقاله حاضر بررسی روایی از مطالعات انجام‌شده پیرامون کارست گچی با محوریت ژئومورفولوژی است، بنابراین ابتدا کارست گچی معرفی و تفاوت‌هایش با کارست کربناته بیان شده و در ادامه لندفرم‌های سطحی کارست گچی از جمله فروچاله‌ها، کارن‌ها، اشکال گنبدی‌شکل، تامولی‌ها، پلیگون‌ها، پرتگاه‌ها و زمین‌لغزه‌های گچی، پولیه‌ها، دره‌های کور، چشمه‌ها و لندفرم‌های حاصل از انحلال میان‌لایه‌ای گچ و فرونشست سنگ‌های پوشاننده آن توصیف و به مشکلات و فوایدی که برای زندگی انسان ایجاد می‌کنند، اشاره شده است. درنهایت می‌توان گفت با توجه به اینکه حدود هشتاد هزار کیلومتر مربع از مساحت زمینی کشور ما ایران توسط رخنمون‌های گچی پوشیده شده‌اند، انجام مطالعات مدون درباره رخنمون‌های گچی، نقشه‌برداری از لندفرم‌های کارست گچی و تولید نقشه‌های حساسیت و خطر فروچاله‌ها و فرونشست‌ها و همچنین بررسی هیدروژئولوژی محلی چنین مناطقی برای توسعه و امنیت عمومی بسیار ضروری می‌باشد.

واژگان کلیدی: کارست گچی، لندفرم‌های سطحی، انحلال میان‌لایه‌ای، مسائل کارست گچی (مخاطرات کارست گچی).

مقدمه

سازندهای تبخیری، که بسیاری از آن‌ها حاوی واحدهای گچی نازک هستند، ۸ درصد از سطح زمین را پوشانده و زیربنای حدود ۲۵ درصد از سطح قاره‌ای زمین را به خود اختصاص داده‌اند (فورد و ویلیامز^۱، ۲۰۰۷). کارست گچی علیرغم رخداد گسترده (کلیمچاک و همکاران^۲، ۱۹۹۶) و اهمیت وابسته به آن از لحاظ کاربردی (مخاطرات، اثرات و منابع)، کمتر مورد توجه قرار گرفته و نسبتاً مطالعه نشده باقی مانده است. عوارض کارست گچی می‌توانند منشأ مشکلات و مسائل متعددی مانند فرونشست و رخداد ناگهانی فروچاله‌ها^۳ باشند و شناسایی و مطالعه آن‌ها برای احداث و نگهداری سازه‌های مختلف، بخصوص سازه‌های هیدرولیکی و همچنین مدیریت پایدار آب حائز اهمیت است. (کوپر و گوتیرز^۴، ۲۰۱۳). کارست‌های گچی علاوه بر مسائل ذکر شده از دیدگاه هیدروژئولوژی دارای اهمیت می‌باشند. آب آبخوان‌های تشکیل شده در کارست‌های گچی می‌تواند جهت تأمین آب شرب، فعالیت‌های کشاورزی، و صنعتی مورد استفاده قرار گیرد؛ این آب‌ها در مناطق کارستی گچی، ممکن است حاوی مقدار زیادی سولفات کلسیم حل شده باشند (کلیمچاک و آندرچاک^۵، ۱۹۹۶). با توجه به مسائل متعددی که در برخورد با کارست‌های گچی با آن‌ها روبه‌رو هستیم، مطالعه چنین مناطقی می‌تواند برای برنامه‌ریزی محلی و ملی، اقدامات در راستای کاهش خطرات، استفاده از منابع، و در نتیجه توسعه ایمن کارست گچی مفید باشد. بدین منظور در ابتدا بایستی چشم‌اندازها و لندفرم‌های گچی را شناخت، لذا می‌توان گفت اولین مرحله در مطالعه مناطق کارست گچی ژئومورفولوژی است.

تقریباً از دهه ۱۹۹۰ محققین دریافته‌اند که کارست سنگ گچ می‌تواند به دو صورت اپیژن^۶ و هیپوژن^۷ توسعه یابد و مورفولوژی آن، اغلب بیشتر از آنچه که در سنگ‌آهک وجود دارد، قابل توجه می‌باشد (کالافورا و همکاران^۸، ۲۰۰۳). از آن زمان مطالعه پیرامون کارست گچی به صورت جدی در سطح جهانی آغاز شد. در ایران مطالعه پیرامون کارست‌های گچی بسیار جوان می‌باشد، شاید بتوان گفت به ندرت مطالعه‌ای به صورت خاص به کارست گچی پرداخته است و این شاخه از علم کارست در ابتدای راه قرار دارد. با توجه به نو بودن مطالعات کارست گچی در سطح دنیا و همچنین عدم وجود مطالعات مستند پیرامون این موضوع در ایران، در طی مقاله حاضر سعی بر آن است تا با بررسی روایی مطالعات انجام شده پیرامون موضوع ذکر شده با تمرکز بر ژئومورفولوژی، کارست گچی معرفی شده، تفاوت‌هایش با کارست کربناته بیان، لندفرم‌های سطحی ایجاد شده در آن توصیف، و به مشکلات و فوایدی که برای زندگی انسان ایجاد می‌کنند اشاره شود. نبود منبع فارسی مدون در این رابطه انگیزه اصلی را برای نگارش این مقاله ایجاد نموده تا بتواند مقدمه‌ای برای مطالعات مدون کارست گچی در ایران فراهم آورد.

روش‌شناسی

مطالعه حاضر با جستجوی واژه‌های Gypsum karst، در سایت‌های Elsevier و Science direct آغاز شد و با جستجوی عبارت‌هایی چون Gypsum karst landform، Gypsum karren، Gypsum sinkhole، و ادامه یافت و در نهایت با توجه به محدود بودن منابع بخش اعظمی از آن‌ها در نگارش مقاله حاضر مورد استفاده قرار گرفتند. اکثر مقالات ذکر شده در مجلات Environmental Geology، Geomorphology، Carbonates and Evaporates، International Journal of Speleology، Engineering Geology و Earth Surface Processes land Landforms انتشار یافته‌اند. با توجه به عدم تشابه مطالعات موجود امکان انجام مرور سیستماتیک، و فرا تحلیل مقالات وجود نداشت، بنابراین در مقاله حاضر سعی نویسندگان ارائه مروری روایی بر مبانی کارست گچی، زمین ریخت‌ها و پیامدهای آن‌ها می‌باشد.

شاید دقیقاً نتوان گفت اولین مطالعه درباره کارست گچی چه زمانی، کجا، و توسط چه کسی انجام شده، اما مستندات حاکی از آن است که از دهه ۱۹۹۰ مطالعه پیرامون کارست گچی به صورت جدی در سطح جهانی آغاز شده است. مقاله‌های موجود جنبه‌های

¹Ford & Williams

²Klimchouk et al.

³Sinkholes

⁴Cooper&Gutierrez

⁵Klimchouk&Andrejchuk

⁶Epigeal

⁷Hypogean

⁸Calaforra et al.

مختلف کارست گچی را در مناطق جغرافیایی متفاوت پوشش می‌دهند، از جمله می‌توان به مواردی همانند منطقه سورباس اسپانیا (گِز کوئز و کالافورا^۱، ۲۰۱۴)، چند حوضه ترشیری در اسپانیا (آرتیدا^۲، ۲۰۱۳؛ گوتیرز و همکاران^۳، ۲۰۰۱، ۲۰۰۸)، حوضه‌های کربونيفر و پرمین آمریکا (جانسون^۴، ۱۹۹۷؛ جانسون^۳، ۲۰۱۳)، کرانه شمالی کانادا (فورد^۵، ۱۹۹۷)، انگلیس شمالی (کوپر^۶، ۱۹۸۶، ۱۹۸۹)، مناطقی پراکنده با گچ‌های ترشیری و تریاس در فرانسه (چاردن و نیکد^۷، ۱۹۹۶)، مناطق سیسیل و املیا رومنگا در ایتالیا (فورتی و ساورو^۸، ۱۹۹۶؛ مادونیا و واتانو^۹، ۲۰۱۱)، سرزمین بالتیک (پائوکاستایس و ناربوتاس^{۱۰}، ۱۹۹۶)، تبخیری های پرمین-تریاس در آلمان (کمپ^{۱۱}، ۱۹۹۶)، غرب اکراین (کلیمچاک^{۱۲}، ۱۹۹۶)، منطقه پیر-اورال^{۱۳} روسیه (آندرچاک^{۱۴}، ۱۹۹۶)، حوضه سیواس^{۱۵} در ترکیه (دوغان و اوزل^{۱۶}، ۲۰۰۵؛ ییلماز، ۲۰۰۷)، منطقه پلتفرمی عربستان (میمش و همکاران^{۱۷}، ۲۰۰۸)، موصل در عراق (جسیم و همکاران^{۱۸}، ۱۹۹۷)، و بالاخره مناطق کوچکی از کوه‌های زاگرس در ایران (کوکی و زینی^{۱۹}، ۲۰۰۳؛ ترابی و همکاران^{۲۰}، ۲۰۱۲؛ رئیسی و همکاران^{۲۱}، ۲۰۱۳؛ اقدم و همکاران^{۲۲}، ۲۰۱۲) اشاره نمود. البته معدود مقالاتی نیز به زبان فارسی کارست گچی سازند گچساران در استان‌های خوزستان و لرستان (قبادی و همکاران ۱۳۹۲، کریمی، ۱۳۹۰)، سازند قم در تکاب آذربایجان (ناصری و نیک قوجق، ۱۳۹۱)، غارهای تبخیری دشت کرمان- باغین (عباس‌نژاد، ۱۳۸۹)، و مواردی نیز فارغ از منطقه-ای خاص روند انحلال گچ را مطالعه نموده‌اند (بهنام طلب، ۱۳۸۴؛ معظمی، ۱۳۹۱).

بحث

مقالات بررسی شده به جوانب مختلف کارست گچی از جمله ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی، مخاطرات محیطی، مهندسی عمران، و هیدروژئولوژی پرداخته‌اند. با این حال، حتی زمانی که مطالعات پیرامون جنبه‌های کاربردی کارست گچی است، بررسی ژئومورفولوژیکی جزء لاینفک آن‌ها می‌باشد. بنابراین بر اساس مطالعات موردی انجام شده و همچنین مواردی که به صورت خاص به ژئومورفولوژی کارست گچی پرداخته‌اند، در ابتدا به مفهوم کارست گچی، ویژگی‌های آن، و تفاوت‌هایش با کارست کربناته اشاره شده و در ادامه به معرفی لندفرم های سطحی و پیامدهای حاصله پرداخته شده است.

مفهوم کارست گچی (کارست سنگ گچ)

بر اساس انحلال‌پذیری سنگ‌ها و کانی‌ها، عوارض کارستی در سنگ‌های مختلفی توسعه می‌یابند، این عوارض به صورت معمول در سنگ‌های کربناته و گاهی در سازندهای تبخیری مانند ژپس، انیدریت، هالیت و یا حتی در کوارتزیت‌ها هم تحت شرایط ژئوشیمیایی خاص به وجود می‌آیند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷). کارست‌های سلیکاته بسیار نادرند و فرایند کارست‌شدگی در آن‌ها بسیار کند می‌باشد. بر همین اساس در بسیاری از منابع به آن‌ها اشاره نشده است، و به صورت کلی سنگ‌هایی که در آن‌ها سیستم‌های کارستی توسعه می‌یابند را متشکل از کانی‌های کربناته، سولفات‌ها، و کلریدی دانسته‌اند.

¹Gazquez & Calaforra

²Artieda

³Gutierrez et al.

⁴Johnson

⁵Ford

⁶Cooper

⁷Chardon and Nicod

⁸Forti and Sauro,

⁹Madonia and Vattano

¹⁰Paukstys and Narbutas

¹¹Kempe

¹²Klimchouk

¹³pre-Ural

¹⁴Andrejchuk

¹⁵SivasBasin

¹⁶Dogan and Ozel

¹⁷Memesh et al.

¹⁸Jassim et al.

¹⁹Cucchi and Zini

²⁰Torabi et al.

²¹Raeisi et al.

²²Aghdamet al.

کانی‌های سولفات‌ها بسیار متعدد هستند، اما تنها ژیپس و انیدریت توده‌های وسیعی از توالی‌های رسوبی را شکل می‌دهند. سایر کانی‌های سولفات‌ها شامل سولفات‌های سدیم، منیزیم، و پتاسیم معمولاً یا به صورت لایه‌های نازک (۱/۸ تا ۰/۵ متر) مشاهده می‌شوند و یا همراه با کانی‌های کلریدی در سنگ‌ها دیده می‌شوند. از سوی دیگر به علت انحلال‌پذیری بالای سولفات سدیم اشکال و فرایندهای کارستی در چنین سنگ‌هایی شبیه به سنگ نمک است (کلیمچاک و آندرچاک، ۱۹۹۶). بنابراین واژه کارست سولفات‌ها، اگرچه دقیقاً صحیح نیست، اما اساساً برای اشاره به کارست‌هایی که در ژیپس و انیدریت توسعه می‌یابند به کار می‌رود. در اغلب مقالات برای اشاره به کارست توسعه‌یافته در ژیپس و انیدریت واژه "Gypsum karst" به کار رفته است، بر همین اساس در مقاله حاضر نیز از اصطلاح "کارست گچی" استفاده شده است.

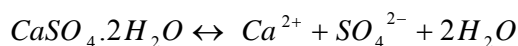
رخنمون کارست گچی در جهان و ایران

کارست‌های گچی به صورت گسترده‌ای در سطح جهان پراکنده شده‌اند. سازندهای تبخیری، که بسیاری از آن‌ها حاوی واحدهای گچی نازک هستند، ۸ درصد از سطح زمین را پوشانده و زیربنای حدود ۲۵ درصد (یعنی مساحتی بیش از ۶۰ میلیون کیلومتر مربع) از سطح قاره‌ای زمین را به خود اختصاص داده‌اند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷). رخنمون گچ و انیدریت در سطح زمین حدود ۷ میلیون کیلومتر مربع برآورد شده است، بزرگ‌ترین پهنه‌های سنگ‌های سولفات‌ها در نیم کره شمالی، بخصوص در ایالات متحده آمریکا، روسیه، و حوضه مدیترانه قرار دارد (گودی، ۲۰۱۳). با توجه به مقالات مختلف می‌توان گفت کشورهای اسپانیا، آمریکا، کانادا، انگلیس، فرانسه، ایتالیا، کشورهای حوضه بالتیک، آلمان، اکراین، روسیه، ترکیه، عربستان، عراق، و ایران با وسعت‌های متفاوت دارای رخنمون‌های گچی هستند. در ایران رخنمون سازندهای گچی حدود ۵ درصد (یعنی هشتاد هزار کیلومتر مربع) از مساحت زمین را به خود اختصاص داده‌اند، از این میان سازند ساچون ۱/۳ درصد، سازند قرمز بالایی حدود ۷۳ درصد، و سازند گچساران حدود ۲۵ درصد از کل رخنمون گچی ایران را تشکیل می‌دهند (رئیسی و همکاران، ۲۰۱۳).

ویژگی‌های گچ و کارست‌شدگی در آن

از لحاظ کانی‌شناسی ژیپس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) با نام سولفات کسیم آبدار شناخته می‌شود. از نظر شیمیایی گچ خالص حاوی ۳۲/۵ درصد CaO و ۴۶/۵ درصد SO_3 و ۲۱ درصد H_2O است. این کانی دارای سختی ۲ و چگالی ۲/۲ تا ۲/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. گچ می‌تواند به صورت بلوری، دانه‌ای، لایه‌ای، پودری، و الیافی ایجاد شود. گچ بلوری معمولاً بیرنگ و شفاف است، اما گاهی رنگ قهوه‌ای مانند نیز دارد. توده‌های متراکم گچ می‌توانند سفید، خاکستری، صورتی، قرمز، قهوه‌ای، زرد کمرنگ و یا آبی کم رنگ باشند. بخش بزرگی از گچ‌ها با نام آلاباستر^۱ شناخته می‌شوند. گچ‌های درشت بلور در بسیاری از منابع با نام سلنیت/سلنیتیک^۲ بیان می‌شود. انیدریت شکل بدون آب سولفات کسیم (CaSO_4) است و از نظر شیمیایی نوع خالص آن حاوی ۴۱/۲ درصد CaO و ۵۸/۸ درصد SO_3 است. سختی انیدریت ۳ تا ۳/۵ و چگالی آن ۲/۸۶ تا ۳/۱۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. انیدریت معمولاً به صورت توده‌ای ریز دانه بسیار متراکم می‌باشد که می‌تواند شکل‌های منشوری، الیافی، و ستونی داشته باشد. رنگ انیدریت معمولاً سفید است و می‌تواند سایه‌های کمرنگی از خاکستری، آبی، سبز، زرد، قهوه‌ای و قرمز نیز داشته باشد. از نظر سنگ‌شناسی سولفات کسیم می‌تواند از ژیپس، انیدریت یا نسبت‌های متغیری از هر دو کانی تشکیل شده باشد. در منابع لاتین برای اشاره به سنگ‌های ترکیبی (ژیپس - انیدریت) از واژه "Gypsiferouse" استفاده شده است.

در بحث انحلال از آنجا که سنگ‌های کارستی تقریباً خالص بوده و تجمعی از یک کانی هستند، بنابراین تفاوت کمی بین انحلال کانی و سنگ مربوط به آن‌ها وجود دارد، از این رو در منابع موجود به جای انحلال سنگ‌ها تمرکز بر انحلال کانی‌ها است. انحلال ژیپس و انیدریت به طور مناسبی از طریق تفکیک‌پذیری^۳ که ساده‌ترین فرایند انحلالی در آب است، توضیح داده می‌شود. انیدریت ممکن است به طور مستقیم در حضور آب تجزیه شود. اما در شرایط میدانی به طور معمول ابتدا انیدریت هیدراته شده، و به سنگ گچ تبدیل شده و گچ به نوبه خود توسط تجزیه حل می‌شود (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷)، فرمول انحلال ژیپس و انیدریت به شکل زیر می‌باشد:



¹ Alabaster

² Selenitic

³ Dissociation

قابلیت انحلال گچ $2/531$ گرم بر لیتر در آب مقطر، در دمای 20 درجه سانتی‌گراد می‌باشد (کلیمچاک، ۱۹۹۶) که عواملی چون فشار، دما، مقدار آب و نحوه‌ی در معرض قرار گرفتن آن، بر این فرایند تأثیرگذارند. اثر تغییرات فشار جزئی را در قابلیت انحلال گچ می‌توان نادیده گرفت، اما تغییر درجه حرارت آب‌های جوی^۱ از صفر تا 30 درجه سانتی‌گراد، حدود 20 درصد قابلیت انحلال سنگ گچ را افزایش می‌دهد. تأثیر مقدار آب و نحوه عرضه آن نیز در انحلال گچ قابل توجه می‌باشد، نرخ انحلال و غلظت‌ها در انحلال گچ در درجه اول توسط مقدار آب در تماس با این ماده معدنی تغییر می‌کند و به‌صورت محدودتری، توسط نحوه در معرض قرار گرفتن گچ در برابر آب کنترل می‌شود، که می‌تواند به‌صورت آرام (ورقه‌های نازک)، جریان‌های آشفته، تأثیر قطرات باران، و یا افشان باشد (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷).

در میان تبخیری‌ها سنگ نمک انحلال‌پذیرترین آن‌ها می‌باشد، بنابراین کمتر در سطح رخنمون دارد، سنگ گچ حدوداً صد برابر انحلال‌پذیری کمتری نسبت به نمک دارد، لذا رخنمون سنگ گچ بسیار فراوان‌تر از نمونه‌های سنگ نمک است. اما در مقایسه با سنگ‌آهک، گچ بسیار انحلال‌پذیرتر است. به‌طور کلی سنگ گچ در مقایسه با آهک از انحلال‌پذیری بیشتر، مقاومت مکانیکی کمتر، و شکل‌پذیری زیادتری برخوردار است (فرامکین^۲، ۲۰۱۳).

متوسط نرخ برهنه‌سازی کارست گچی در مناطق مدیترانه به‌صورت تجربی $0/91$ میلی‌متر برای 1000 میلی‌متر بارندگی اندازه‌گیری شده است. بنابراین در صورتی که سنگ‌های گچی در معرض عوامل اقلیمی باشند ممکن است هیچ رخنمونی از آن‌ها در دوره چندین صد هزار سال باقی نماند. تکامل واقعی مناطق کارست گچی وابسته به تاریخچه خاص زمین‌شناختی منطقه‌ای است، چنان‌که کارست‌های گچی میوسن بالایی و حتی قدیمی‌تر ممکن است تا به امروز حفظ‌شده باشند (گودی^۳، ۲۰۱۳). با توجه به حل‌الیت نسبتاً بالای گچ و سرعت انحلال سریع آن، کارست در گچ می‌تواند در یک مقیاس زمانی سریع توسعه و تکامل یابد.

ازلحاظ ساختاری درزه‌ها (به‌عنوان گذرگاه‌هایی برای چرخش آب درونی) اهمیت ویژه‌ای در کارست‌شدگی سنگ‌های کارستی گچی دارند؛ زیرا که تخلخل مؤثر در چنین سنگ‌هایی نسبتاً پایین است و سطوح جداکننده لایه‌بندی نیز اغلب به‌خوبی حفظ نشده‌اند. درجه و ساختار درزه‌دار شدن در ژئوس و انیدریت بسیار متغیر است (از لایه‌های بسیار کم درزه‌دار تا سنگ‌هایی تقریباً برشی شده^۴)، میزان و نوع درزه‌دار شدن در چنین سنگ‌هایی به سن توالی‌های سنگی، ساختارشان، شرایط تکتونیکی و عمق رخداد آن‌ها وابسته است (کلیمچاک و آندرچاک، ۱۹۹۶).

تفاوت‌های کارست گچی و کارست کربناته

گچ مانند آهک مستعد حل شدن توسط آب‌های سطحی و زیرزمینی و توسعه شکل‌های کارستی، مانند غارها، فروچاله‌ها، و مسیرهای آب زیرزمینی می‌باشد. اگرچه بسیاری از ویژگی‌های کارست گچی (سنگ گچ) شبیه به کارست آهکی (سنگ‌های کربناته) است، اما اصولاً به علت عوامل زیر تفاوت‌هایی نیز بین چشم‌اندازهای کارستی آهکی و گچی وجود دارد که ناشی از عوامل زیر می‌باشد:

انحلال‌پذیری گچ ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) در آب مقطر $2/4$ گرم بر لیتر است، این در حالی است که قابلیت انحلال کلسیت (CaCO_3) و دولومیت ($\text{MgCa} [\text{CO}_3]_2$) در آب‌های متئوریک (جوی) عادی معمولاً کمتر از $0/1$ گرم بر لیتر می‌باشد. نتیجتاً مورفولوژی کارستی در گچ بسیار سریع‌تر از سنگ‌های آهکی شکل‌گرفته و تکامل می‌یابند. بر اساس نظر در پیروت^۵ (۲۰۰۴)، میزان نرخ تخریب سنگ‌بستر انحلالی در آهک و گچ‌هایی که دائماً در برخورد با آب‌های جوی جاری هستند، ممکن است به ترتیب به بیش از $0/1$ تا 1 و 10 میلی‌متر در سال برسد. علاوه بر آن به علت انحلال‌پذیری و فرسایش‌پذیری بالاتر، رخنمون‌های گچی، به‌خصوص در مناطق مرطوب فراوانی کمتری نسبت به رخنمون‌های سنگ‌آهک دارند. به‌طور کلی کارست‌های گچی در مناطق نیمه‌خشک و خشک رخنمون بیشتری دارند.

¹Meteoric

²Frumkin

³Goudie

⁴Brecciated rocks

⁵Dreybrodt

گچ‌ها (سنگ گچ) مقاومت مکانیکی پایین‌تر و شکل‌پذیری^۱ بسیار بیشتری نسبت به سنگ‌های آهکی دارند. علاوه بر آن انحلال سریع ممکن است به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای توده‌ی سنگی شبه گچی^۲ را در یک مقیاس زمانی انسانی سست کند^۳ (گوتیرز و همکاران، ۲۰۰۸ a، ۲۰۰۸c). این دو ویژگی می‌تواند رابطه مکانیسم خمیده شدن^۴ در توسعه‌ی فروچاله‌ها و چاله‌های فرونشستی، و به‌طور کلی فراوانی بالاتر شکست‌های سنگی در صخره‌ها و غارها را شرح دهد.

توالی‌های گچ مانند حاوی سایر نمک‌ها با انحلال‌پذیری بیشتری همراه هستند (برای مثال، هالیت (NaCl)، سیلویت (KCl) و گلابریت (Na₂Ca (SO₄)₂). انحلال میان‌لایه‌ای نمک‌های قرارگرفته در میان چینه‌ها سبب توسعه‌ی شکستگی‌ها (شکاف‌ها) و برش‌ها^۵ در توالی‌های شبه گچی سطحی و میان‌لایه‌ای می‌شود، در این صورت انحلال میان‌لایه‌ای معبری برای جریان آب زیرزمینی و انحلال ترجیحی ایجاد می‌کند.

زمین ریخت‌های سطحی کارست گچی

در مناطق گچی بسیاری از زمین ریخت‌های کارست کربناته از جمله تنوعی از کارن‌ها، فروچاله‌ها، دره‌های کور و پولیه‌ها مشاهده می‌شود، اما دسته‌ای از اشکال نیز مختص کارست‌های گچی هستند. از عوامل مهم در ایجاد زمین ریخت‌های متفاوت کارست گچی موقعیت حضور سازندها/ لایه‌های گچی است. کارست‌های گچی بر اساس محیط حضورشان به سه نوع اصلی دسته‌بندی می‌شوند (Gutierrez & Cooper, 2013):

- کارست میان‌لایه‌ای (Interstratal karst)، که در آن‌ها سنگ گچ با سنگ‌های غیر تبخیری پوشیده شده است.
- کارست پوشیده (Covered karst)، که در آن‌ها سنگ گچ با نهشته‌های تحکیم نیافته پوشیده شده است.
- کارست برهنه (Bare karst)، که در آن‌ها سنگ گچ در معرض سطح می‌باشد.

زمین ریخت‌های سطحی حاصل از کارست گچی میان‌لایه‌ای

کارست شدگی میان‌لایه‌ای تبخیری‌ها ممکن است سبب تغییر شکل‌های گرانشی سنگ‌های قرارگرفته در سطح و توسعه انواع گسترده‌ای از ساختارهای فرونشینی گردد. تأثیر چنین پدیده‌های فرونشستی درجایی که انحلال بر واحدهای نمکی تأثیر می‌گذارد به‌صورت ویژه‌ای قابل‌توجه بوده (وارن^۶، ۲۰۰۶) و تعداد قابل‌توجهی از اشکال ساختاری^۷ مرتبط با کارست‌شدگی میان‌لایه‌ای گچ را تشکیل می‌دهد. انحلال گچ میان‌لایه‌ای می‌تواند به‌صورت گسترده‌ای در سرتاسر واحدهای تبخیری رخ دهد، پیشرفت جانبی از طریق مهاجرت جبهه‌های انحلالی رخ می‌دهد. الگوی توزیع فضایی و زمانی کارست‌شدگی میان‌لایه‌ای و فرونشست می‌تواند توسط عوامل مختلف زیر کنترل شود (گوتیرز و کوپر، ۲۰۱۳):

۱. تغییر در ضخامت، انحلال‌پذیری و عمق سازندهای گچی؛
۲. نفوذپذیری لایه‌های بالایی، زیرین، و میانی (یا نفوذپذیری لایه‌های پوشاننده، لایه‌های در زیر قرارگرفته، و لایه‌های میانی) یا همان هیدرواستراتیگرافی^۸ (آب چینه‌شناختی)؛
۳. هیدروژئولوژی و انتقال (عبور رو به پایین^۹) از ژپس به انیدریت در حوضه‌های عمیقاً مدفون و یا برونزده؛
۴. ساختار زمین‌شناختی و فعالیت تکتونیکی؛
۵. تکامل ژئومورفولوژیکی منطقه، تغییرات سطح اساس، و توزیع مکانی محل‌های تغذیه و تخلیه؛
۶. تغییرپذیری (ناپایداری) اقلیمی^{۱۰}؛

¹Ductile rheology

²Gypsiferous

³Weaken

⁴Sagging

⁵Breccias

⁶Warren

⁷Morphostructures

⁸Hydro stratigraphy

⁹Down-dip

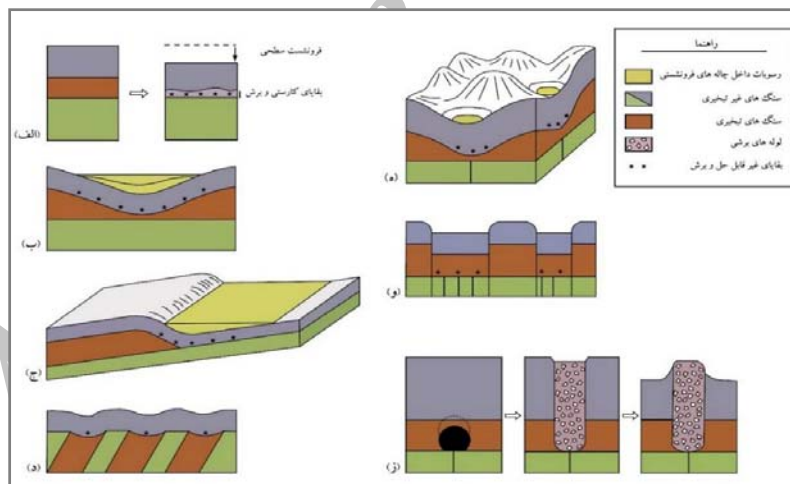
¹⁰Climatevariability

کارست‌شدگی میان‌لایه‌ای می‌تواند سبب کاهش پیشرونده‌ای در ضخامت سازندهای گچی و اضمحلال^۱ نهایی آن‌ها شود و در نهایت تنها بقایای غیرقابل حل برجای می‌مانند. این فرایندهای انحلالی شامل متراکم شدن توالی چینه‌شناختی با فرونشست تدریجی متعاقب سنگ‌های پوشاننده و سطح زمین می‌شود (شکل ۱ الف)).

فرونشست‌های ایجادشده توسط انحلال میان‌لایه‌ای تبخیری می‌تواند ضمن ایجاد فرورفتگی‌های ساختاری بزرگ، به‌عنوان حوضه‌های رسوب‌گذاری نیز عمل کنند. این حوضه‌ها می‌توانند مناطق تخلیه برای جریان‌های آب زیرزمینی ایجاد کرده و میزبان دریاچه‌های نمکی باشند، که در آن‌ها چرخه‌ی بازگشت (شکل‌گیری مجدد) تبخیری‌ها اتفاق می‌افتد (شکل ۱ ب))، در واقع آن‌ها را می‌توان "آبگیر ته‌نشستی و توپوگرافیکی ایجادشده توسط انحلال میان‌لایه‌ای" نامید.

انحلال میان‌لایه‌ای تبخیری‌ها معمولاً توسط مهاجرت جانبی جبهه‌های انحلال به سمت مرکز حوضه و یا در مسیری به سمت پایین^۲ رخ می‌دهد (وارن، ۲۰۰۶). در این‌گونه موارد واحدهای تبخیری نسبت به جبهه انحلال حالت گوه مانند پیدا کرده، جای خود را به باقی‌مانده‌های نامحلول و برش‌های طبقه‌مانند پوشیده شده توسط سازندهای فرونشست کرده، می‌دهند. گسترش رو به پایین کارست‌شدگی میان‌لایه‌ای در توالی‌های کج شده، چین‌های تک‌شیب را در واحدهای فوق تبخیری بالای جبهه انحلالی ایجاد می‌کند (شکل ۱ ج)) این چین‌ها با منشأ کارستی می‌توانند تله‌های خوبی برای هیدروکربن‌ها ایجاد کنند. عقب‌نشینی تک‌شیب‌ها^۳ در سطحی با پرتگاه‌هایی با شیب به سمت بالا^۴ می‌توانند ظاهر شوند، و فرورفتگی‌های فرونشستی مربوط به آن‌ها می‌توانند توسعه دریاچه‌ها و موقعیت و گسترش سیستم‌های رودخانه‌ای را کنترل کنند.

درجایی که کارست‌شدگی میان‌لایه‌ای گچ به‌صورت افتراقی عمل می‌کند، ساختارهای فرونشست و زمین‌ریخت‌های حاصل از آن تا حد زیادی به خاصیت شکل‌پذیری^۵ (رئولوژی) واحدهای فوق تبخیری بستگی دارد. تغییرشکل انعطاف‌پذیر و خمیدگی سبب توسعه تاقدیس‌ها، ناودیس‌ها، و ریخت ساختارهای گنبد و حوضه می‌شود (شکل ۱ د) و (ه)).



شکل ۱- ریخت ساختارهای تولیدشده توسط انحلال میان‌لایه‌ای گچ و فرونشست سنگ‌های پوشاننده (گوتیرز و کوپر، ۲۰۱۳)

- الف. متراکم شدگی توالی چینه‌شناختی و فرونشینی زمین
- ب. آبگیر ته‌نشستی و توپوگرافیکی ایجادشده توسط انحلال میان‌لایه‌ای
- ج. چین تک‌شیب و پرتگاه در واحدهایی که بالای تبخیری‌ها قرار گرفته‌اند، حاصل مهاجرت رو به پایین پیشانی انحلالی در یک توالی کج شده با شیبی آرام.
- د. انحلال میان‌لایه‌ای کنترل شده به‌صورت چینه‌شناختی در توالی پرشیب از گچ و سنگ‌های غیر تبخیری و خمیده شدن (فرورفتگی) سازندهای پوشاننده (سطحی)، ایجاد *synforms*^۱ و *antiforms*^۲.

^۱Reduction

^۲Down-dip direction

^۳Monoclines

^۴Up dip-facing scarps

^۵Rheology

- ه. ساختار آبگیر (حوضه) و گنبد و توپوگرافی *hummocky* تولیدشده توسط انحلال افتراقی میان لایه‌ای و خمیدگی^۴.
- و. ریخت ساختارهای هورست و گرابن مرتبط با کاست‌شدگی افتراقی مرتبط با گسل (کنترل شده با گسل).
- ز. لوله برشی و شکل‌های حاصله از فروچاله ریزشی سنگ‌پوشی^۵ توقف رو به بالای غارزایی ایجادشده توسط انحلال میان لایه‌ای. سرانجام لوله‌های برشی می‌توانند به‌صورت تپه‌های حاصل از فرسایش افتراقی ظاهر شوند.

درجایی که سازوکار فرورفتگی غالب، تغییر شکل شکننده باشد، دو وضعیت شدید ممکن است رخ دهد: (۱) فرورفتگی بلوک‌های محدودشده به سطوح شکست مشخص، که با تغییر شکل‌های داخلی اندک در چینه‌ها همراه است (شکل ۱ و) فرورفتگی همراه با تغییر شکل شدید چینه‌های فروریخته است. این وضعیت معمولاً در سنگ‌های سخت دارای شکستگی‌های قبلی که می‌توانند با بسیاری از تغییر شکل‌های فرورفتگی تطبیق یابند، رخ می‌دهد.

انحلال میان‌لایه‌ای محلی گچ ممکن است حفره‌های بزرگی تولید کند. این حفره‌ها توسط ریزش پیشرونده سقف می‌توانند به سمت بالا گسترش یافته و لوله‌های برشی را ایجاد کنند. این لوله‌های برشی که به‌صورت اریب توالی‌های چینه‌شناختی بالایی را می‌برند (قطع می‌کنند)، برش‌های گذر لایه‌ای^۶ نامیده می‌شوند. در نهایت، حفره ممکن است سطح را قطع کرده و فروچاله ریزشی سنگ پوشی ایجاد کند (شکل ۱ (ز)). این لوله‌های برشی که دودکش‌های برشی و ستون‌های برشی نیز نامیده می‌شوند ممکن است به علت وارونگی ناهمواری ناشی از فرسایش افتراقی، به‌صورت فرورفتگی و یا برآمدگی دیده شوند، ارتفاع آن‌ها ممکن است به چند صد متر برسد. (گوئیرز و کوپر، ۲۰۱۳). به‌طور کلی لوله‌های برشی می‌توانند چهار حالت توپوگرافیکی / دینامیکی زیر را به نمایش بگذارند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷):

۱. فعال و در حال توسعه یافتن به طرف بالا به سمت سطح، اما هنوز در سطح دیده نمی‌شود؛
۲. فعال و یا غیرفعال، در سطح به‌عنوان فرورفتگی (چاله) بسته یا فرورفتگی (چاله) با کانال آب خروجی سطحی؛
۳. غیرفعال، و دفن شده با لایه‌های فوقانی (دیرینه کارست)^۷؛
۴. غیرفعال و در حالت ایستاده (برجسته) به‌عنوان شکل ناهمواری مثبت، به این دلیل که برش (احتمالاً سیمانی شده) مقاومت بیشتری نسبت به لایه‌های پوشش فوقانی دارد.

کارن‌های گچی

زمانی که سنگ در سطح مورد حمله کارست‌شدگی قرار می‌گیرد، اشکال انحلالی سطحی ایجاد می‌شوند که کارن یا لایه^۸ نام دارند. کارن‌ها شکل‌های انحلالی کوچک‌مقیاسی هستند که بر سطح سنگ‌های برهنه^۹ (کارن آزاد^{۱۰}) یا زیرپوششی از خاک (کارن پوشیده^{۱۱}) توسعه می‌یابند. انحلال ساده توسط آب، فرایند اصلی توسعه کارن‌ها بر رخنمون‌های گچی است (ماکالوسو و سائورو^{۱۲}، ۱۹۹۶). این در حالی است که توسعه آن‌ها در سنگ‌آهک تا حد زیادی به حضور دی‌اکسید کربن محلول در آب وابسته است. ظهور

^۱Sinforms: (در زمین‌شناسی) عارضه توپوگرافی مقعری که از لایه‌های رسوبی تشکیل شده است، اما می‌تواند یک ناودیس حقیقی نباشد (یعنی ممکن است جوان‌ترین لایه‌ها در مرکز رخنمون نداشته باشند).

^۲Antiforms: (در زمین‌شناسی) عارضه توپوگرافی مقعری که از لایه‌های رسوبی تشکیل شده است، اما می‌تواند یک ناودیس حقیقی نباشد (یعنی ممکن است قدیمی‌ترین لایه‌ها لزوماً در مرکز رخنمون نداشته باشند).

^۳Hummock: تپه کوچک و یا تپه ماهورهایی که بالاتر از زمین ایجاد می‌شوند. آن‌ها معمولاً کمتر از ۱۵ متر ارتفاع داشته و تمایل دارند که در گروه و یا به‌صورت یک میدان وسیع ظاهر شوند. به علت تنوع در مورفولوژی و رسوب‌شناسی کلی سازی این اشکال دشوار است. به سطوح بسیار نامنظم *hummocky* نامیده می‌شوند.

^۴Sagging

^۵Caprock collapse sinkhole

^۶Transtatal breccias

^۷Palaeokarst

^۸Lapies

^۹Bare

^{۱۰}Free karren

^{۱۱}Covered karren

^{۱۲}Macaluso & Sauro

انواع مشابهی از اشکال انحلالی (کارن‌ها) مثل ریل‌ها، رانل‌ها و مانند آن در سنگ‌آهک، گچ و نمک نشان می‌دهد که الگوی تکاملی چنین اشکالی متأثر از تفاوت‌های فرایندهای انحلالی نیست، بلکه اساساً توسط رفتار هیدرولیک رواناب‌ها کنترل می‌شود (فرارس و همکاران^۱، ۲۰۰۲). اگرچه توسعه کارن در سنگ‌های کربناته و گچی به لحاظ ژئومورفولوژیکی کاملاً یکسان است، اما برخی تفاوت‌های مهم نیز وجود دارد (گوتیرز و کوپر، ۲۰۱۳) که شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. کارن‌ها در سازندهای کربناته تنوع بیشتری دارند؛
۲. اثر کاتالیزوری برخی فرایندهای بیوشیمیایی بر انحلال آهک در اثر اسیدی شدن آب، تأثیری بر توسعه کارن در گچ ندارد؛
۳. خاک‌ها و قشرهای هوازدهی تولیدشده توسط انحلال و چرخه‌های رسوب مجدد^۲ مانع شکل‌گیری کارن در گچ می‌شوند؛

فراوانی کارن‌ها و شکل آن‌ها وابسته به بافت مواد ترکیبی است. در واقع اندازه و جهت‌گیری بلورهای گچ می‌تواند نقش مهمی در توسعه کارن‌ها داشته باشند (فورتیو سائورو^۳، ۱۹۹۶)؛ تفاوت در این شکل‌ها معمولاً نتیجه مستقیم این واقعیت است که اندازه بلورها در رخنمون‌های گچی مختلف می‌تواند محدوده بیش از یک متر تا کسری از میلی‌متر باشد، درحالی‌که در سنگ‌های کربناته اندازه بلورها معمولاً حدود یک میلی‌متر است (گودی، ۲۰۱۳).

۴. برخی از رایج‌ترین انواع کارن در سنگ‌آهک، در سنگ گچ بسیار غیرمعمول هستند، مثل شافت‌ها^۴، گریک‌ها^۵ و پن‌ها^۶. این تفاوت ریشه در ویژگی‌های سنگ‌شناختی سنگ‌های کربناته و گچی دارد.

نوشته‌ها درباره کارن سنگ گچ در مقایسه با کارن‌ها در سنگ‌های کربناته بسیار کمیاب می‌باشد. ماکالوسو و سائورو، ۱۹۹۶ بر اساس تحقیقات جامعی در جنوب غربی سیسیل، جایی که رخنمون گچی مسینین^۷ بیش از ۱۰۰۰ کیلومترمربع را می‌پوشاند، طبقه‌بندی برای کارن‌ها در سنگ‌های گچی پیشنهاد کردند. آن‌ها کارن‌ها را متداول‌ترین فرم‌های هوازدگی در سطوح گچی معرفی کرده و از آنجا که هر نوع کارن مربوط به میکرو محیطی منحصربه‌فرد است و توسط سازوکارهای فیزیکی-شیمیایی خاصی توضیح داده می‌شود، آنالیز آن‌ها را بسیار مهم دانسته‌اند. آن‌ها کارن‌ها را بر اساس اندازه به فرم‌های نانو، فرم‌های میکرو، فرم‌های کوچک و فرم‌های متوسط طبقه‌بندی نموده‌اند.

انواع اصلی کارن گچی که به‌طور خلاصه در ادامه توضیح داده می‌شود، ترکیبی از طبقه‌بندی‌های ماکالوسو و سائورو (۱۹۹۶) و فورد و ویلیامز (۲۰۰۷) است، که توسط گوتیرز و کوپر، (۲۰۱۳) ارائه شده است. محققین اخیر کارن‌ها را به دو دسته میکروکارن (<۱ cm) و کارن (>۱ cm) تفکیک کرده‌اند.

متداول‌ترین میکروکارن‌های گچی شامل میکروریل‌ها^۸ هستند، آن‌ها کانال‌های انحلالی کف گرد^۹ با عرض ۱ تا ۲ میلی‌متر و بیش از چندین سانتیمتر طول می‌باشند و معمولاً در گچ آلاباسترین^{۱۰} ریزدانه توسعه می‌یابند. در سطح‌هایی با شیب ملایم شیارها^{۱۱} عموماً حرکت موجی بیشتری را نشان می‌دهند که میکروریل‌های مئاندری شده یا میکرومئاندرهایی با مقطع عرضی نامتقارن را ایجاد می‌کنند. میکروپیت‌ها^{۱۲} گودال‌های تقریباً دایره‌ای شکلی هستند که معمولاً روی قسمت‌های بالایی بلوک‌های برآمدهی گچ‌ریز بلور توسعه می‌یابند.

^۱Ferrarese et al.

^۲Reprecipitation

^۳Forti & Sauro

^۴Shafts

^۵Grikes

^۶Pans

^۷Messinian

^۸Microrills

^۹Round-bottomed

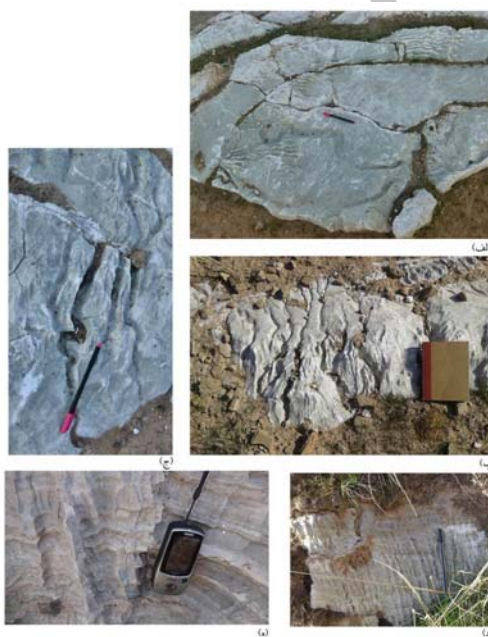
^{۱۰} انواع ریزدانه‌ای از گچ، اغلب سفید و شفاف مورد استفاده برای اشیاء زینتی، مانند پایگاه‌های لامپ، مجسمه، و غیره.

^{۱۱}Rills

^{۱۲} Micropits، pit در لغت به معنی حفره است.

یکی از متداول‌ترین انواع کارن‌ها ($>1\text{cm}$) که بر روی گچ رخ می‌دهند پیت‌ها هستند، که فرورفتگی‌های کوچکی هستند با کف کاو (مقعر)، که اساساً به‌وسیله بارندگی به وجود می‌آیند. آن‌ها معمولاً بر روی گچ آلاباسترین رخ می‌دهند و می‌توانند مجتمع‌هایی شبه لانه‌زنبوری تشکیل دهند. پن‌ها^۱ حوضه‌هایی محصور با کف نسبتاً افقی^۲ و مسطح هستند که قطرشان می‌تواند به چندین متر و عمق‌شان به بیش از یک متر برسد. آن‌ها ممکن است دارای شیارهای فرسایشی اساسی^۳ و کانال‌های سرریز^۴ باشند و در گچ به‌خوبی توسعه می‌یابند. پن‌ها توسط سایر نویسندگان حوضه‌های انحلالی، kamenitze و tinajitas نیز نامیده شده‌اند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷).

ریل کارن‌ها^۵ یا ریلن کارن‌ها^۶ که شیارهای انحلالی نامیده می‌شوند، احتمالاً متداول‌ترین کارن‌ها در گچ هستند. آن‌ها کانال‌هایی به‌شدت موازی با نیم‌رخ عرضی سهمی شکل هستند، که چند میلی‌متر تا چندین سانتی‌متر عرض دارند. ریل‌ها یا ریلن کارن‌ها بر روی شیب‌های ۲۰ تا ۸۰ درجه شکل گرفته، و توسط لبه‌هایی تیز از هم جدا می‌شوند. آن‌ها به‌واسطه‌ی بارش مستقیم ایجاد شده و بر روی دامنه‌های سنگی برهنه دیده می‌شوند (گلو و فورد، ۱۹۸۰؛ ماترشید و لوکاس، ۲۰۰۱) (شکل ۲ الف) و (ب)). عمق آن‌ها به سمت پایین دامنه افزایش می‌یابد تا به حداکثر خود می‌رسد، سپس کاهش می‌یابد تا اینکه خط‌های تقسیم محو شوند. میانگین عرض شیارهای انحلالی گچی به‌طور کلی کوچک‌تر از نمونه‌های توسعه‌یافته در سنگ‌آهک است، به نظر می‌رسد انحلال بالای گچ حامی گودشدن شیارها است، در نتیجه عریض شدن آن‌ها محدود می‌شود. ماترشید و همکاران (۲۰۰۰) در مطالعه گسترده‌ای، میان‌ه‌ی طول و عرض ریل کارن‌ها را در گچ محاسبه کردند، این مقدار به ترتیب ۱۲۰ میلی‌متر و ۱۱ میلی‌متر بود، آن‌ها دریافتند که ریل‌های عریض‌تر در گچ‌هایی با بافت درشت توسعه می‌یابند (کوپر و گوتیرز، ۲۰۱۳).



شکل ۲- الف) و (ب)، ریل کارن‌ها در رخنمون‌های سطحی گچ (ج)، حرکت موجی رانل‌های گچی، (د) و (ه)، وال کارن‌ها روی دیواره عمودی یک فروچاله ریزشی در لایه‌های گچی سازند گچساران، منطقه آسماری، جنوب شرق مسجد سلیمان، استان خوزستان.

¹Pans

²Sub Horizontal

³Basal corrosion notches

⁴Overflow

⁵Rill karren

⁶Rillen karren

⁷Glew & Ford

⁸Mottershead&Lucas

رانل‌ها^۱ یا رینن کارن‌ها^۲ کانال‌هایی با لبه‌های پرشیب و کف گرد می‌باشند که بزرگ‌تر از ریل کارن‌ها هستند و توسط میان‌شیارهایی عریض از هم جدا می‌شوند. آن‌ها توسط جریان آب‌های موجود بر دامنه‌هایی که به‌طور ملایمی شیب‌دار هستند، شکل‌گرفته و حرکت موجی آن‌ها رابطه معکوسی با میزان شیب توپوگرافی دارد. رانل‌ها در گچ‌های درشت‌بلور به‌خوبی توسعه می‌یابند (شکل ۲(ج)). وال کارن‌ها^۳ (یا واندارن^۴) کانال‌هایی هستند که در دیواره‌های عمودی توسعه‌یافته و ممکن است عرض آن‌ها به چندین متر و عمقشان به چندین دسی‌متر برسد (شکل ۲ (د) و (ه)). کارن‌های خطی^۵ که توسط گسترش انحلالی سطوح گسست ایجاد می‌شوند، اگرچه به‌اندازه‌ای که در سنگ‌آهک رخ می‌دهند معمول نیستند، اما در گچ نیز می‌توانند رخ دهند. گرایک^۶ (کلفت کارن‌ها^۷) به‌طور معمول در طول درزه‌های تقریباً عمودی برهنه یا پوشیده توسعه می‌یابند. آن‌ها به سمت پایین باریک می‌شوند و ممکن است بلوک‌های مجزایی را ایجاد کنند که کلینت‌ها^۸ نامیده می‌شوند. پسروی سقف کلینت‌ها توسط پهن شدن فرسایشی گریک‌های احاطه‌کننده‌ی آن‌ها در نهایت منجر به توسعه پیناکل‌ها^۹ (اسپیتزکارن^{۱۰}) می‌شود. فیلدکارن‌هایی که تحت سلطه کلفت کارن‌ها در لایه‌های شیب‌دار شده‌ی تقریباً افقی هستند، سنگ‌فرش^{۱۱} نامیده شده‌اند.

فروچاله‌ها

فروچاله‌ها یا دولین‌ها، فرورفتگی‌های بسته‌ای هستند که علامت مشخصه چشم‌اندازهای کارستی کربناته و تبخیری می‌باشند. آن‌ها می‌توانند طیف وسیعی از ویژگی‌های هندسی^{۱۲} را به نمایش بگذارند و ممکن است قطر و عمق آن‌ها به صدها متر برسد (ویلیامز، ۲۰۰۴). واژه دولین از واژه dolina از زبان اسلاو گرفته شده و عمدتاً توسط ژئومورفولوژیست‌های اروپایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، این در حالی است که استفاده از واژه فروچاله در آمریکای شمالی و ادبیات بین‌المللی مربوط به مسائل مهندسی و محیطی، معمول‌تر است (گوتیرز و همکاران، ۲۰۰۸b). این حوضچه‌ها به‌طور معمول اشکالی را که راه ورود آب به آبخوان‌های کارستی هستند را ایجاد می‌کنند و یا ممکن است به‌عنوان چاله‌های فرورونده (بلعنده) (یعنی: پونورها) عمل کنند. از سویی دیگر فروچاله‌هایی که به سطح آب زیرزمینی برخورد می‌کنند یا در مناطق تخلیه واقع می‌شوند، می‌توانند میزبان دریاچه‌ها باشند (گوتیرز و کوپر، ۲۰۱۳). در سال‌های اخیر چندین طبقه‌بندی ژنتیکی برای فروچاله‌ها انتشار یافته است (گوتیرز و همکاران، ۲۰۰۸ C؛ پک^{۱۳}، ۲۰۰۵؛ ویلیامز، ۲۰۰۴؛ واتمن و همکاران^{۱۴}، ۲۰۰۵) در این طبقه‌بندی‌ها فروچاله‌ها را به دو گروه اصلی فروچاله‌های "انحلالی" و "فرونشستی" تفکیک شده‌اند (شکل ۳).

¹Runnels

²Rinnen karren

³Wallkarren

⁴Wandkarren

⁵Linear karren

⁶Grikes

⁷Kluftkarren

⁸Flachkarren

⁹pinnacles

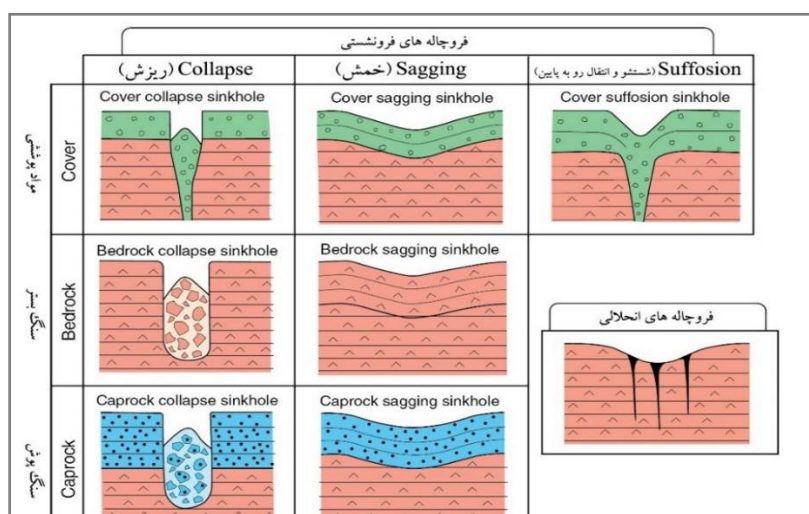
¹⁰Spitzkarren

^{۱۱} به بلوک‌های ایجادشده بین گرایک‌ها کلینت (clint) یا (Flachkarren) گفته می‌شود. نوع خاصی از کارن‌فیلدها که باوجود گرایک‌ها و کلینت-های منظم مشخص می‌شود، سنگ‌فرش آهکی (limestone pavement) نامیده می‌شود.

¹²Cylindrical, conical, bowl or pan-shaped

¹³Beck

¹⁴Waltham et al.



شکل ۳. طبقه‌بندی ژنتیکی فروچاله‌ها (گوتیرز و کوپر، ۲۰۱۳)

گروه اول فروچاله‌های انحلالی هستند، که توسط کاهش یافتن تدریجی و افتراقی سطح زمین، مناطقی که سنگ‌های کارستی بدون پوشش در سطح هستند یا صرفاً با خاک پوشیده شده‌اند (کارست برهنه^۱) ایجاد می‌شوند. توسعه این فروچاله‌ها توسط جریان متمرکز به سمت مناطقی با نفوذپذیری بالاتر (به‌عنوان مثال، مجراهای انحلالی) در آبی‌کارست کنترل می‌شوند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷). فروچاله‌های انحلالی بشدت متراکم در رخنمون‌های گچ برهنه، چشم‌اندازهای پلیگونی قابل توجهی را ایجاد می‌کنند که در کانادا (فورد، ۱۹۹۷)، حوضه سیواس ترکیه (دوغان و اوزل، ۲۰۰۵) و منطقه بایسان-تائو^۲ در ازبکستان-تاجیکستان (سائورو، ۱۹۹۶) گزارش شده‌اند. کارست‌های پلیگونی در کربنات‌ها مشخصه‌ی منطقه‌های بسیار مرطوب هستند، اما پراکندگی جغرافیایی آن‌ها در گچ، حاکی از آن است که آستانه نزولات جوی برای توسعه زمین‌ریخت‌های مذکور در سرزمین‌های گچی بسیار پایین‌تر است.

گروه دوم شامل انواع مختلفی از فروچاله‌ها می‌باشد که نتیجه انحلال سطحی و حرکت گرانشی (جاذبه‌ای) رو به پایین (تغییر شکل و فرسایش درونی) مواد پوشاننده بوده و با نام فروچاله‌های فرونشستی شناخته می‌شوند. گوتیرز و همکاران (۲۰۰۸) بر اساس مطالعاتی که در چهار حوضه ترشیری اسپانیا انجام دادند، یک طبقه‌بندی ژنتیکی از فروچاله‌های فرونشستی در سرزمین کارست گچی ارائه نموده‌اند. بر اساس این طبقه‌بندی فروچاله‌های فرونشستی می‌توانند با استفاده از دو واژه توصیف شوند: اولین توصیف‌کننده مربوط به موادی است که تحت تأثیر فرسایش درونی و/یا فرایندهای تغییر شکل قرار می‌گیرند (یعنی: مواد پوششی، سنگ‌بستر و سنگ‌پوش^۳)، و دومین توصیف‌کننده به نوع اصلی فرایند فرونشست اشاره دارد (یعنی: فروریختگی (ریزش)، زیربری (شسته شدن)، و خمیدگی (خمشی)^۴). به نهشته‌های تحکیم نیافته انتقالی (دگرزا)^۵ و مواد خاکی باقی‌مانده^۶، مواد پوششی^۷ گفته می‌شود، سنگ‌بستر به سنگ‌های کارستی، و سنگ‌پوش به سنگ‌های غیر کارستی پوشاننده سنگ‌های کارستی اشاره دارد. در شرایط کارست تبخیری سنگ‌های کربناته نیز می‌توانند به‌عنوان سنگ‌پوش در نظر گرفته شوند (گوتیرز و کوپر، ۲۰۱۳).

فرایند ریزش تغییر شکل شکننده‌ی مواد خاکی یا سنگی توسط برشی شدن^۸ و توسعه‌ی سطوح شکست به‌خوبی مشخص^۹ است، فرایند انتقال رو به پایین نهشته پوششی از طریق کانال‌ها و نشست پیشرونده آن‌ها است، و فرایند خمشی، خمیدگی انعطاف‌پذیر

^۱Bare karst

^۲Baisun-Tau

^۳(Cover, bedrock, or caprock)

^۴Collapse, suffosion, and sagging

^۵Allogenic

^۶Residual

^۷Cover

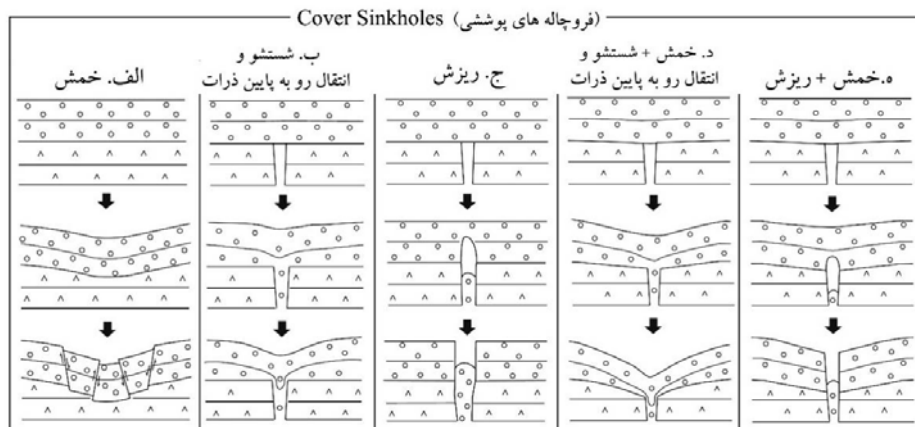
^۸Brecciation

^۹Well-defined

(خمیدگی غیرفعال)^۱ رسوبات، ناشی از عدم حمایت پایه‌ای است (یعنی عدم حمایت لایه‌های زیرین). در عمل بیش از یک نوع ماده، و چندین فرایند می‌توانند در شکل‌گیری فروچاله‌ها نقش داشته باشند. این فروچاله‌های پیچیده با استفاده از ترکیبی از اصطلاحات ارائه‌شده با مواد و فرایندهای غالب و به دنبال آن مواد و فرایند ثانویه شرح داده می‌شوند (به‌عنوان مثال، فروچاله ریزشی مواد پوششی و سنگ‌بستر، فروچاله ریزشی خمشی سنگ‌بستر).

مواد پوششی ممکن است توسط هر یک از سه مکانیسم فرونشست تحت تأثیر قرار بگیرند (شکل ۴). کاهش فرسایشی پیشرونده‌ی سنگ (منظور لایه گچی زیرپوشش تحکیم نیافته است) ممکن است باعث ته‌نشینی تدریجی رسوبات پوشاننده توسط خمش شده، فروچاله‌های خمشی پوششی تولید کند. این فرورفتگی‌ها^۲ معمولاً کم‌عمق هستند، لبه‌هایشان به‌خوبی مشخص نیست، و عرض آن‌ها می‌تواند به چند صدمتر برسد. در صورت عدم وجود اطلاعات زیرسطحی، تشخیص آن‌ها از فروچاله‌های خمشی سنگ‌بستر و پوششی مشکل می‌باشد.

نهشته‌های پوششی می‌توانند توسط عملکرد طیف وسیعی از فرایندها به سمت پایین داخل ترک‌های باریک انتقال یابند، از جمله: شستشوی ذرات توسط آب‌های نفوذی، جریان‌های دانه‌ای بدون چسبندگی^۳، جریان‌های گرانرو^۴، سقوط ذرات، و جریان‌های آبی مملو از رسوب^۵. فرسایش زیرسطحی مواد پوششی می‌تواند بسته به رفتار خمیری^۶ نهشته‌های پوشاننده، دو نوع اصلی فروچاله را ایجاد کند. در جایی که مواد پوششی به‌عنوان موادی شکل‌پذیر یا دانه‌ای سست رفتار می‌کند، پوشش ممکن است به تدریج توسط فرآیندهای شستشو نشست کند، و فروچاله‌های پوششی قیف یا گودال مانند به وجود آورد که به‌طور معمول چندین متر قطر دارند (شکل ۴(ب)). زمانی که رفتار مواد پوششی به‌صورت شکننده باشد، انتقال فضای خالی به سمت بالا توسط شکست‌های پی‌درپی می‌باشد و سرانجام منجر به شکل‌گیری فروچاله ریزشی پوششی می‌شود (شکل ۴(ج)). این فروچاله‌ها عمدتاً عرضی کمتر از ۱۵ متر دارند، معمولاً به‌صورت ناگهانی پدیدار می‌شوند، و در زمان شکل‌گیری دارای دیواره‌های پرتگاهی هستند. فرایندهای اضمحلال توده‌ای^۷ که روی دیواره‌هایشان عمل می‌کند، می‌تواند سبب توسعه سریع آن‌ها و تغییر شکل آن‌ها به گودشدگی‌های قیفی یا چاله مانند گردد. فروچاله‌های ریزشی پوششی و خمشی پوششی، عموماً انواعی از فروچاله‌ها با احتمال رخداد بالا هستند. گوتیز و همکاران (۲۰۰۷) در ناحیه‌ای یک کیلومترمربعی در دره ابرو^۸ (شمال شرق اسپانیا)، که زیربنای گچی داشته و به‌شدت توسط سیلاب ورقه‌ای آبیاری می‌شده، احتمال رخداد سینک‌هول‌های ریزشی پوششی را حداقل ۴۴ عدد در کیلومترمربع در سال، برآورد کرده‌اند.



شکل ۴. مکانیسم‌های اصلی فرونشستی در شکل‌گیری فروچاله‌های پوششی (گوتیز و همکاران، ۲۰۰۸)

¹Passive bending

²Depressions

³Cohesionless

⁴Viscous

⁵Sediment-laden

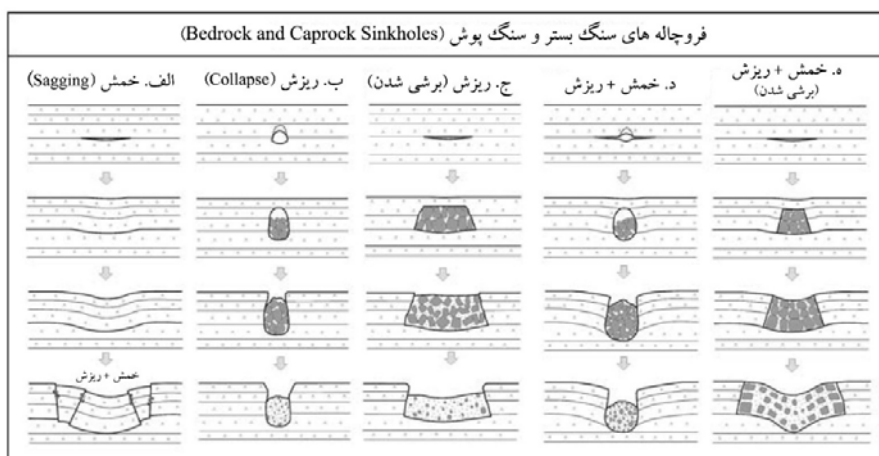
⁶Rheological

⁷Mass-wasting

⁸Ebro

سنگ‌بستر و سنگ پوش نیز می‌توانند توسط هر یک از سه مکانیسم فرونشست ذکر شده تحت تأثیر قرار گیرند (شکل ۵)، ممکن است توسط خمشی نرم (خمیری) یا ریزشی شکننده^۱ تحت تأثیر قرار گیرند. سازوکار فرونشست خمشی به صورت ویژه‌ای در توالی‌هایی با رفتار گچی متداول است، چون گچ دارای مدول الاستیسیته‌ای^۲ کمتر نسبت به سنگ‌های کربناته است و نتیجتاً از جریان‌پذیری^۳ خمیری بیشتری برخوردارند. تست‌های ژئومکانیکی حاکی از آن است که گچ به علت سازمان‌دهی مجدد بلورها، مهاجرت (انتقال) مولکول‌های آب به فضاهای مویرگی و محتوای رسی، دستخوش تغییر شکل پلاستیک-الاستیک-پلاستیک می‌شود (دشنور^۴ و همکاران، ۲۰۰۶).

انحلال افتراقی میان لایه‌ای به همراهی خمش تدریجی سنگ‌هایی رویی، می‌تواند فروچاله‌های خمشی سنگ‌بستر یا سنگ پوش را ایجاد کنند. چنین فرایندهایی سبب ایجاد ساختارهای حوضه‌ای با شیب متمایل به مرکز می‌شود که به طور مبهمی گودشدگی-های لبه‌داری می‌سازند که طول آن‌ها می‌تواند به بیش از یک کیلومتر برسد. فروچاله‌های ریزشی سنگ‌بستر و سنگ پوش، می‌توانند توسط گسترش به سمت بالایی (رو به بالایی) فضاهای خالی از میان فروریختگی پیشرونده سقف توسعه یابند. ریزش عمودی فضاهای خالی (حفره‌ها) سبب ایجاد لوله‌های برشی^۵ می‌شود که ممکن است در عمق چند صدمتری واحدهای تبخیری ریشه داشته باشند (شکل ۵(ب)). این فرایندهای ریزشی منجر به شکل‌گیری ناگهانی فروچاله‌های سنگ‌بستر یا سنگ پوش با دیواره پرتشیب، به طور نمونه چند ده متر عرض می‌شوند (شکل ۵-ج و د) چنین فروچاله‌هایی معمولاً فراوانی زمانی کمی دارند (یک، ۲۰۰۵؛ واتمن و همکاران، ۲۰۰۵؛ گوتیرز و همکاران، ۲۰۰۸).



شکل ۵. مکانیسم‌های اصلی فرونشستی در شکل‌گیری فروچاله‌های سنگ‌پوش و سنگ‌بستر (گوتیرز و همکاران، ۲۰۰۸)

در شکل‌های ۶ و ۷ نمونه‌هایی از فروچاله‌های ایجادشده در لایه‌های گچی سازند گچساران در منطقه آسماری واقع در جنوب شرق مسجد سلیمان مشاهده می‌گردد، بر اساس یافته‌های میدانی و بررسی تصویر ماهواره‌ای، فروچاله‌های گچی منطقه آسماری بر اساس شکل ظاهری به سه نوع تقسیم‌بندی می‌گردد:

نوع اول: فروچاله‌های تسبیح مانند که اندازه آن‌ها متغیر از ۰/۵ تا ۲ متر و از نوع ریزشی سنگ‌بستر بوده و در امتداد یک مجرای کم‌عمق افقی در میان لایه‌های با ریزش سقف مجرا به‌طور خطی و در امتداد آبراهه‌های سطحی رخ می‌دهند و عمدتاً خالی از رسوبات می‌باشند (شکل ۶).

¹Ductile sagging or brittle collapse

²Young's modulus

³Rheology

⁴Dashnor

⁵Breccia pipes



شکل ۶- تصاویری از فروچاله‌های گچی نوع اول (فروچاله‌های خطی تسبیح مانند) و هدایت آب‌های سطحی به زیرزمین نوع دوم: فروچاله‌های متمرکز چندگانه تشکیل دهنده اووالا (Uvala) که اندازه آن‌ها متغیر از ۱ تا ۳ متر می‌باشند و تعداد آن‌ها متغیر از ۵ تا بیش از ۱۰ فروچاله می‌باشد. این فروچاله‌ها عمدتاً حالت فروچاله ریزشی خمشی سنگ‌بستر را دارند که توسط رسوبات و خاک پر شده‌اند.

نوع سوم: فروچاله‌های منفرد و بزرگ که قطر آن‌ها متغیر از ۲ تا بیش از ۳۰ متر است و از نوع ریزشی سنگ‌بستر هستند و دارای شکل سطحی نامنظم می‌باشند. این فروچاله‌ها معمولاً توسط مخلوط قطعات گچ خرد شده و تا حد کمتری رسوبات پر شده‌اند (شکل ۷).



شکل ۷- نمایی از فروچاله‌های منطقه مورد مطالعه (سمت چپ: فروچاله منفرد بزرگ از نوع ریزشی سنگ‌بستر، سمت راست: فروچاله‌های متمرکز چندگانه تشکیل دهنده اووالا (Uvala))

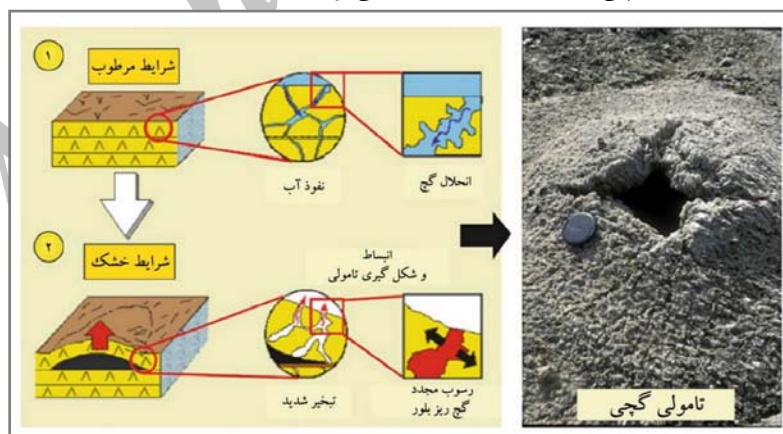
اشکال گنبدی شکل، تامولی‌ها و پلیگون‌های گچی

محققین متعددی با تجزیه و تحلیل زمین‌ریخت‌ها در سرزمین‌های کارستی به این نتیجه رسیده‌اند که اشکال گنبدی شکل، تامولی‌ها و پلیگون‌های گچی را نمی‌توان به‌عنوان لندفرم‌های انحلالی محض به حساب آورد، (ماکالوسو و سائورو، ۱۹۹۶b، فرارس و همکاران، ۲۰۰۲؛ گوئیرز و کوپر، ۲۰۱۳)، بلکه علاوه بر فرایندهای انحلالی، تورم لایه سنگی بیرونی نیز در شکل‌گیری و توسعه این دسته از اشکال سهیم هستند. فرارس و همکاران (۲۰۰۲) فرایندهای فیزیکی - شیمیایی بسیاری را به‌عنوان عوامل مؤثر بر تغییر حجم لایه‌های سنگی بیرونی در چنین مناطقی معرفی کرده‌اند از جمله این موارد می‌توان به: (الف) افزایش تخلخل در نتیجه آزادسازی کششی^۱، (ب) پدیده انبساط و انقباض حرارتی بلورها، (ج) تغییر شکل پلاستیک مرتبط با آرایش مجدد ساختار بلورین، (د)

^۱Tensional relaxation

انبساط و انقباض رس به دام افتاده بین بلورها و داخل شکاف‌ها و (ه) انحلال، تبلور مجدد، و رشد بلورها در ارتباط با رواناب و چرخه آب منفذی^۱، اشاره کرد.

رایج‌ترین شکل‌های تورمی، چندضلعی‌ها و تامولی‌های گچی هستند، که بدون در نظر گرفتن پدیده تبلور مجدد قابل توضیح نمی‌باشند (آرتیدا^۲، ۲۰۱۳). تامولی‌ها یکی از غیرمعمول‌ترین اشکال سطحی توصیف‌شده هستند که اغلب در چشم‌انداز کارست گچی برهنه مشاهده می‌شوند. تامولی‌ها گنبد‌های شبه دایره‌ای توخالی هستند که توسط انبساط و متورم شدن قشرهای (پوسته‌های) هوازده در رخنمون‌های گچی برهنه ایجاد می‌شوند (گوتیرز و کوپر، ۲۰۱۳). آن‌ها همچنین حباب‌های گچی، گنبد‌های گچی و تاول‌های^۵ گچی نامیده شده‌اند و در سیسیل ایتالیا (فرارس و همکاران، ۲۰۰۲)، سورباس اسپانیا (کالافورا و پولایدو- بوش، ۱۹۹۹؛ گزکوئز و کالافورا، ۲۰۱۴)، حوضه ترشیاری ابرو در اسپانیا (گوتیرز-الوزا و گوتیرز-سنتولالا، ۱۹۹۸)، و در حوضه دلاور^۶ در نیومکزیکو و تگزاس (استافورد^۷، ۲۰۰۸) مستند شده‌اند. قطر و ارتفاع این گنبد‌ها معمولاً به چندین سانتی‌متر می‌رسد و لایه‌ی بالآمده ممکن است بیش از ۵۰ سانتی‌متر ضخامت داشته باشد. تامولی گچی با ۱۰ تا ۱۵ متر عرض و بیش از یک متر ارتفاع در رخنمون گچی‌های درشت‌بلور در سورباس و سیسیل شرح داده شده‌اند. منشأ چنین گنبد‌هایی توسط نویسندگان مختلف به افزایش حجم و کماتش (گنبدی شدن / کماتی شدن) در منطقه هوازده گچ بیرونی توسط فرآیندهای انحلال و رسوب مجدد نسبت داده شده است (کالافورا و پولایدو- بوش، ۱۹۹۹؛ فرارس و همکاران، ۲۰۰۲) آب‌های شیرینی که به رخنمون گچ برهنه در خلل و فرج و شکاف‌های بخش بالایی توده سنگ نفوذ می‌کنند، باعث انحلال می‌شوند. سپس، تبخیر و بالآمدگی آب مویینه درون منفذی همراه با آن منجر به مهاجرت محلول به سمت سطح، افزایش اشباع‌شدگی، و رسوب‌گذاری مجدد گچ در منطقه بیرونی توده سنگ می‌شود. افزایش حجم ناشی از رسوب گچ ثانویه، همراه با فشار تبلور، سبب جدا شدن و متورم شدن پوسته‌ی گچ می‌شود. همچنان که گنبد‌ها رشد می‌کنند، با توسعه متعاقب ترک‌های متحدالمرکز و شعاعی ممکن است، وزن پوسته بالآمده از مقاومت مکانیکی آن تجاوز کند. همچنین ممکن است مقاومت مکانیکی پوسته برخاسته توسط انحلال تضعیف شود. در نهایت، بالای تاول فرومی‌ریزد و اشکالی شبیه به دهانه تولید می‌کند (شکل ۸). توسعه تامولی گچی توسط چند چرخه‌ی تر و خشک شدن و آب‌وهوای نیمه خشکی که در آن پتانسیل تبخیر و تعرق بالاتر از بارش باشد، شرح داده می‌شود (گوتیرز و کوپر، ۲۰۱۳). فرارس و همکاران (۲۰۰۲) نشان دادند تامولی گچی ممکن است در دوره‌های زمانی کوتاه (چند سال یا چند دهه) تشکیل شود. در شکل ۹، نمایی از تامولی‌های مشاهده‌شده در لایه‌های گچی منطقه آسماری مشاهده می‌گردد.



شکل ۸. تکامل تامولی گچی (گزکوئز و کالافورا، ۲۰۱۴)

¹Porosity

²Artieda

³Bubbles

⁴Domes

⁵Blisters

⁶Delaware

⁷Stafford

⁸Reprecipitation



شکل ۹. نمونه‌هایی از تامولی‌های مشاهده‌شده در منطقه آسماری

در رخنمون‌های گچی برهنه، همچنین انبساط منطقه هوازده بیرونی به سبب چرخه انحلال و رسوب‌گذاری مجدد، ممکن است مجموعه‌ای از چندضلعی‌های احاطه‌شده توسط لبه‌های تحت فشار، شبیه به آنچه در دریاچه‌های شور موقتی و سبخاها توسعه یافته است، تولید کند. این چندضلعی‌ها و لبه‌ها معمولاً در مقیاس دسی‌متر، بخش‌هایی مقعر از قشر گچی هستند که لبه‌ها به سمت بالا خم شده است. در مستندات، این زمین‌ریخت‌ها در منطقه سیسیل ایتالیا در گچ‌های درشت‌بلور واقع در دامنه‌های رو به جنوب، که تحت تأثیر تعداد زیادی چرخه‌های تر و خشک هستند، به خوبی شرح داده شده‌اند (ماکالوسو و سائورو، ۱۹۹۶؛ فرارسو همکاران، ۲۰۰۲). افزایش حجم ناشی از هیدراتاسیون (آبدار شدن) انیدریت و تبدیل آن به گچ، گنبدها و شبه تاقدیس‌هایی^۱ شبیه به تامولی سنگ گچ تولید می‌کند. علی‌رغم این همگرایی مورفولوژیک، این اشکال می‌توانند ابعاد بزرگ‌تری داشته و روی توده‌های سنگی ضخیم‌تری تأثیر بگذارد. تسوای و کرویدن (۱۹۸۴) شبه تاقدیس‌ها و گنبدهای تولیدشده توسط هیدراتاسیون انیدریت در شمال شرقی آلبرتا، کانادا، را با ابعاد ۶ تا ۶۰۰ متر عرض توصیف کردند. در بعضی منابع از نام مگا-تامولی^۲ برای این اشکال استفاده شده است (فرارس، ۲۰۰۲).

پرتگاه‌ها و زمین لغزه‌های گچی^۳

چنین پرتگاه‌هایی اغلب با کنتراست قوی بین لیتولوژی گچ و سنگ‌های احاطه‌کننده آن مرتبط است. در منطقه سورباس اسپانیا در اثر فرسایش تفریقی لایه‌های گچی و مارن و رس‌های احاطه‌کننده آن‌ها پرتگاه‌های گچی با بیش از ۳۰ متر ارتفاع ایجاد شده است. درحالی‌که گچ تمایل به انحلال و پشتیبانی از ایجاد غارها در عمق دارد، فرسایش سطحی در رخنمون‌های مارن و رس با نرخ بسیار سریع‌تری رخ می‌دهد (گزکوئز و کالافورا، ۲۰۱۴). علاوه بر آن دره‌های رودخانه‌ای حفرشده در سازندهای تبخیری نیز، اغلب هندسه‌ای نامتقارن با پرتگاهی برجسته گچی در یکی از کناره‌ها به نمایش می‌گذارند. بیشتر دره‌های حفرشده در تبخیری‌های ترشیری در اسپانیا یک پرتگاه خطی و ناپایدار در یکی از دامنه‌ها دارند (گوتیرز و همکاران، ۲۰۰۱، ۲۰۰۸). گوتیرز (۱۹۹۶) توسعه پرتگاه گچی در چنین مناطقی را با فرونشست ناشی از انحلال ترجیحی در یکی از کناره‌های دره مرتبط دانسته است. پرتگاه‌های گچی معمولاً دره‌هایی معلق و ضلع‌های سه‌گوش فرسایشی را نمایش می‌دهند که بیانگر سرعت بالای نرخ عقب‌نشینی آن‌ها هستند. عقب‌نشینی^۴ سریع می‌تواند مربوط به قابلیت بالای انحلال گچ باشد، که از زیربری^۵ رودخانه، توسعه حرکات دامنه‌ای، و انتقال (برداشت) سریع توده‌های زمین لغزش توسط فرسایش شیمیایی و مکانیکی، حمایت می‌کند (گوتیرز و کوپر، ۲۰۱۳؛ گوتیرز و همکاران، ۲۰۰۱). سنگ گچ به علت طبیعت انحلال پذیرش، به صورت ویژه‌ای مستعد توسعه زمین لغزش‌ها می‌باشد. گوتیرز و کوپر (۲۰۱۳) عوامل و فرایندهایی که از توسعه حرکات دامنه‌ای در سرزمین‌های گچی حمایت می‌کنند یا محرک آن‌ها هستند، را به صورت زیر شرح داده‌اند:

Antiforms^۱: یکی از شکل‌های توپوگرافی است که از لایه‌های رسوبی در یک فورم محدب تشکیل شده است، اما ممکن است که در

واقع تاقدیسی واقعی ایجاد نکند (به‌عنوان مثال، قدیمی‌ترین سنگ‌ها ممکن است در وسط قرار نگیرند).

^۲Mega- Tumuli

^۳Gypsum Escarpments and Landslides

^۴Recession

^۵Undercutting

۱. بازشدگی انحلالی سطوح ناپیوستگی می‌تواند سبب کاهش قابل توجه در مقاومت مکانیکی دامنه‌های سنگی در طول یک مقیاس زمان انسانی شود.
۲. انحلال اجزای گچی (رگه‌ها، سیمان و ذره‌ها) در سایر لیتولوژی‌ها، ممکن است منجر به ضعیف شدن مکانیکی قابل توجه و از هم پاشیدگی شود.
۳. فضاهای خالی کارستی می‌توانند توسعه سطوح شکست را حمایت و هدایت کنند.
۴. چرخش آب در شبکه‌ی مجرای کارستی، به‌خصوص زمانی که جریان ورودی از ظرفیت تخلیه تجاوز می‌کند، می‌تواند فشار سیال بالایی را تحمیل کند که تنش‌های مؤثر عمودی و مقاومت برشی سطوح شکست بالقوه را کاهش می‌دهد. از دست رفتن حمایت پایه مرتبط با نقب‌زنی چشمه یا فرونشست ناشی از انحلال در پای دامنه می‌تواند به بی‌ثباتی دامنه کمک کند.
۵. کارست شدن عمیق می‌تواند سبب تغییر شکل گرانشی پیشرونده‌ای در دامنه سنگی شود (آلبرتو و همکاران^۱، ۲۰۰۸). فرورفتگی‌های بسته، سکوها، و شکاف‌های تولیدشده توسط تغییر شکل ناشی از انحلال می‌توانند نفوذ آب در دامنه‌ها را تسهیل کنند، که باز خورد کارست شدن زیرسطحی می‌باشد.

پولیه‌ها

پولیه‌ها، افتادگی (گودشدگی) بسته‌ی بزرگی هستند با کف‌های مسطح و پوشیده شده با آبرفت که معمولاً دارای ژئومتری امتداد یافته^۲ به موازات بافت ساختاری هستند. این حوضه‌ها مستعد سیلابی شدن هستند و بیشتر یا بخش قابل توجهی از زهکشی-شان، از طریق استاول‌ها^۳ (چاهک‌هایی که هم به‌صورت فروبرنده آبراهه‌ها (پونورها) و هم به‌طور موقت به‌عنوان چشمه‌ها عمل می‌کنند، رخ می‌دهد. منشأ چنین چاله‌هایی عموماً مرتبط با فرایندهای فرسایشی^۴ و عریض شدن است که توسط وضعیت سطح آب زیرزمینی کنترل شده است. بعضی از پولیه‌ها در مناطق کارست آهکی محدود به گسل‌اند و حاوی انباشتی از رسوبات ضخیم هستند که نشان‌دهنده‌ی منشایی تکتونیک و کارستی است (برای مثال گراشیا^۵ و همکاران، ۲۰۰۲). مراجعی که در آن‌ها پولیه در گچ مطالعه شده باشد کمیاب هستند. دوغان و اوزل (۲۰۰۵) پولیه‌های سطح اساس^۶ که به لحاظ ساختاری با دریاچه‌های دائمی و موقت کنترل شده‌اند، را در کارست گچی سیواس ترکیه توصیف کرده‌اند. تا به امروز، تحقیقات اندکی درباره منشأ پولیه‌ها در مناطق کارست گچی و نقش فرایندهایی همچون کاهش یافتن فرسایشی^۷، فرونشست بزرگ مقیاس ناشی از انحلال میان‌لایه‌ای، فعالیت نئوتکتونیک، یا فرونشینی ایجادشده در اثر جریان نمک عمقی (هالوکینسیس^۸) انجام شده است (گوتیرز و کوپر، ۲۰۱۳).

دره‌های کور و چشمه‌ها

دره‌های کور به دره‌هایی گفته می‌شود که آب آن‌ها در انتها یا در طول مسیر توسط فروچاله‌ها و پونورها تخلیه و ناپدید می‌گردد. این اشکال در مناطق گچی در سیواس ترکیه و همچنین در سورباس اسپانیا (گِز کوئز و کالافورا، ۲۰۱۴) گزارش شده‌اند. گودی (۲۰۱۳) نیز در کتاب دایره المعارف ژئومورفولوژی به دره‌های کور به‌عنوان زمین‌ریخت‌های کارست گچی متوسط تا بزرگ مقیاس اشاره کرده است. از چشمه‌ها به‌عنوان نقاط طبیعی تخلیه آب زیرزمینی به سطح یاد می‌شود، این اشکال عوارض کارستی تخلیه‌ای هستند. چشمه‌ها از اهمیت بالایی برخوردارند، چرا که مطالعه خصوصیات مختلف آن‌ها همواره نقش مهمی در شناسایی سیستم‌های کارستی ایفا می‌کند. در مستندات موجود در مناطق کارست گچی چشمه‌هایی با دبی‌ها و کیفیت‌های متفاوت گزارش شده‌اند، از این میان می‌توان به چشمه‌هایی با نرخ تخلیه بالا و کیفیت نامناسب آب (EC: ۱۳۰۰۰ mho/cm) در سازندهای گچی مربوط به میوسن منطقه سیواس ترکیه (گانی^۹، ۲۰۰۲) و نیز چشمه‌ای با متوسط جریان ۷۰ لیتر بر ثانیه با تیپ کلسیمی-سولفات در سورباس اسپانیا (کالافورا و بوش، ۲۰۰۳) اشاره کرد. در ایران نیز اقدام و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی هیدروژئولوژی سازند گچساران

¹Alberto et al.

²Elongated

³Estavelles

⁴Corrosional lowering معمولاً در مقالات برای فرسایش شیمیایی به کار می‌رود.

⁵Gracia

⁶Base-level poljes

⁷Corrosional lowering

⁸Halokinesis

⁹Gunay

در دره تنگ سرخ چندین چشمه واقع در کارست گچی را مطالعه نموده‌اند که متوسط نرخ تخلیه آن‌ها ۰/۵ تا ۰/۷۵ لیتر بر ثانیه و تیپ آبی آن‌ها سولفات-کلسیک بوده است.

مخاطرات زمین‌ریخت‌های کارست گچی

لندفرم‌های کارست گچی می‌توانند منشأ مشکلات و مسائل متعددی باشند و شناسایی و مطالعه آن‌ها برای احداث و نگهداری سازه‌های مختلف، بخصوص سازه‌های هیدرولیکی و همچنین مدیریت پایدار آب حائز اهمیت است. فروچاله‌ها یکی از مخاطرات متداول کارست‌های گچی هستند، آن‌ها در مناطقی که کارست پیشرفته است، مشاهده می‌گردند و آب‌های جاری در سطح زمین را به سیستم زهکشی زیرزمینی انتقال می‌دهند. فروچاله‌ها در الگوهای زهکشی آب‌های سطحی تغییر ایجاد کرده و نقش مؤثری در هدایت آب به زیرزمین ایفا می‌کنند. بررسی فروچاله‌ها در مناطق کارست گچی از نظر زیست‌محیطی بسیار مهم می‌باشد، چرا که چنین آب‌هایی نسبت به آلودگی به شدت آسیب‌پذیر می‌باشند، بنابراین حفاظت دقیق از این سیستم‌های کارستی ضروری است. در مناطق کارست گچی، تعداد فروچاله‌هایی که به‌طور مستقیم مرتبط کننده‌ی سطح زمین به آبخوان‌ها هستند، می‌تواند نشان‌دهنده آسیب‌پذیری آبخوان در مقابل آلودگی باشد. در نتیجه، می‌توان از مطالعه فروچاله‌ها برای شناسایی مناطق تغذیه و همچنین جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی استفاده نمود. در مناطق کارست گچی بررسی تعداد فروچاله‌ها و طبقه‌بندی آن‌ها، می‌تواند باهدف شناخت محدودیت‌های کشاورزی صورت گیرد و در مناطقی که در معرض احتمال رخداد فروچاله‌های بیشتری هستند، کنترل‌هایی شامل کشاورزی ارگانیک، محدودیت در استفاده از کود، ساخت‌وساز موانع زمینی، و همچنین مناطق ممنوعه در اطراف فروچاله‌ها اعمال شود. از سویی دیگر رخداد فروچاله‌ها می‌تواند آسیبی جدی برای سازه‌های انسانی از جمله ساختمان‌ها و زیرساخت‌های خطی از جمله جاده‌ها، راه‌آهن، پل‌ها، کانال‌ها، خطوط انتقال، و سازه‌های هیدرولیکی ایجاد کند. از این‌رو در مطالعات متعدد به بررسی مخاطره فروچاله‌های کارستی پرداخته شده است، از جمله می‌توان به کارهای انجام‌شده توسط بنیتو و همکاران^۱ (۱۹۹۵) در شمال شرق اسپانیا، گوتیرز و همکاران (۲۰۰۷ و ۲۰۰۸b) در اسپانیا، کوپر و همکاران (۲۰۱۱) در انگلستان، و ایلماز و همکاران^۲ (۲۰۰۷، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۵) در ترکیه اشاره نمود.

یکی دیگر از مخاطره‌های رایج مرتبط با کارست گچی انحلال و فرونشست می‌باشد، که می‌تواند در طیف‌های وسیع و یا محدود رخ دهد و گاه آثار فاجعه باری داشته باشد، فرونشست‌ها عموماً ناشی از انحلال میان لایه‌ای سطحی می‌باشند. این حرکات زمینی می‌تواند به‌ویژه به ساختمان‌ها و زیرساخت‌های خطی از جمله جاده‌ها، راه‌آهن، پل‌ها، کانال‌ها، و خطوط انتقال آسیب برسانند. سدها و کانال‌ها نیز بسیار مستعد به انحلال گچ در پایه‌های خود هستند. استحصال آب، مانند آبیگری در مناطق معدنی، نیز با کاهش دادن سطح آب‌های زیرزمینی ممکن است منجر به فرونشست شوند (کوپر و گوتیرز، ۲۰۱۳). در مورد مطالعات مرتبط با فرونشست در سطح جهان می‌توان به مقالات ارائه‌شده توسط کوپر و گوتیرز (۲۰۱۳)، جنسون و همکاران در آمریکا (۲۰۱۳)، کوپر و ساندرس (۲۰۰۲)، کوپر (۱۹۸۹)، کوپر (۲۰۰۸) در انگلستان، و جانسون (۲۰۰۸) در آمریکا اشاره نمود.

در مناطقی که سازه‌های گچی در سطح رخمون دارند، بحث کیفیت و آلودگی آب‌های زیرزمینی نیز طرح می‌شود. چرا که علاوه بر انحلال بسیار بالای گچ و حضور میان لایه‌هایی از سایر نمک‌ها در چنین سازه‌هایی، که سبب پایین آمدن کیفیت آب آبخوان-های کارستی یا آبرفتی که در زیر آن‌ها قرار گرفته‌اند، می‌شود؛ در کارست گچی زهکشی زیرزمینی از طریق کانال‌های انحلالی به‌هم‌پیوسته متداول است و اجازه می‌دهد که آب‌های زیرزمینی و آلودگی‌ها بسیار سریع‌تر از سایر سفره‌های آب زیرزمینی انتشار یابند.

کارست‌های گچی علاوه بر مسائل ذکر شده می‌توانند مفید نیز باشند، آب آبخوان‌های تشکیل شده در کارست‌های گچی علاوه بر تأمین آب شرب، می‌تواند در فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی نیز مورد استفاده قرار گیرد؛ این آب‌ها در مناطق کارستی گچی، ممکن است حاوی مقدار زیادی سولفات کلسیم حل شده باشند (کلیمچاک و آندرچاک، ۱۹۹۶)، این مقدار می‌تواند به بیش از ۲۴۰۰ میلی-گرم بر لیتر برسد. سازمان بهداشت جهانی (۲۰۰۸) پیشنهاد داده است که غلظت سولفات کلسیم برای آب آشامیدنی نباید بیش از ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر باشد و تأکید کرده است، اگر غلظت آن بیش از ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر باشد، مقامات بهداشتی باید آگاه شوند، هرچند برای حیوانات غلظت بسیار بالاتر مقدار مذکور نیز مجاز می‌باشد. البته آب حتی با غلظت‌های بالای سولفات کلسیم برای

¹Benitoet al.

²Yilmazet al.

کشاورزی قابل استفاده است. با وجود پایین بودن کیفیت آب کارست گچی گاهی ممکن است به صورت محلی تنها منبع قابل شرب باشد. این وضعیت در منطقه بریزایی^۱ از لیتوانی وجود دارد، در این منطقه در آبخوان محلی، آبی با غلظت سولفات بسیار بالا (تا ۱۶۵۵ میلی‌گرم بر لیتر) یافت می‌شود (کوپر و گوتیرز، ۲۰۱۳).

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

کارست در سنگ گچ و انیدریت که عموماً "کارست گچی" نامیده می‌شود، نسبت به کارست معمولی (کربناته) کمتر از سوی ژئومورفولوژیست‌ها مورد توجه واقع شده است. این در حالی است که کارست‌های گچی به طور گسترده‌ای در سطح جهان (با مساحت رخنمون حدود هفت میلیون کیلومتر مربع) بخصوص در ایالات متحده آمریکا، روسیه، و حوضه مدیترانه پراکنده شده‌اند. به دلیل حلالیت و سرعت انحلال بالای گچ، بنابراین چرخه کارست گچی معمولاً بسیار کوتاه‌تر از کارست کربناته است و توسعه عوارض کارستی در آن بسیار سریع‌تر از سنگ‌آهک رخ می‌دهد. توجه به این موضوع چند نکته مهم را گوشزد می‌کند. یکی اینکه اساساً رخداد سازندهای گچی در سطح یا زیربنای یک منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است چرا که حتی اگر هم‌اکنون عوارض کارست گچی خاصی در آن وجود نداشته باشد، در اندک زمانی در اثر عوامل انسانی مانند آبیاری، برداشت آب، احداث و آبیگری سدها، معدن‌کاری، یا حتی تغییر کمی در شرایط اقلیمی به سرعت می‌تواند مستعد ایجاد زمین ریخت‌های کارستی شود. نکته دوم اینکه بررسی عوارض کارست گچی در طول زمان نیز بسیار مهم است، چرا که آن‌ها می‌توانند حتی در بازه‌های زمانی کوتاه نیز تغییرات قابل توجهی را نشان دهند. نکته دیگر اینکه فارغ از شکل‌های سطحی کارست گچی، کارست‌شدگی میان‌لایه‌ای که به صورت ویژه‌ای و به سرعت در گچ‌ها رخ می‌دهد می‌تواند از سویی آبخوان‌های مناسبی را در چنین مناطقی ایجاد کنند و از سویی دیگر مقدمه‌ای برای ایجاد فرونشست باشد.

بررسی زمین‌ریخت‌های گچی حاکی از آن است که انواع متفاوت آن‌ها و طیف گسترده اندازه‌هایشان نتیجه‌ی ترکیب و مداخله فرایندهای مختلفی از جمله انحلال، رسوب‌گذاری، تبلور مجدد، تغییر حجم لایه بیرونی سنگ و همچنین سایر پدیده‌های هوازدگی به همراه ویژگی‌های لیتولوژی و چینه‌شناختی سازندهای گچی می‌باشد. این بدان معنی است که علیرغم غالب بودن فرایند انحلال در چشم‌اندازهای کارست گچی سایر فرایندها نیز می‌توانند نقش قابل توجهی در شکل‌گیری زمین ریخت‌ها داشته باشند. در این میان نبایست از تکامل تکنیکی منطقه و شرایط اقلیمی غافل ماند، چرا که آن‌ها نیز نقش مؤثری در ایجاد انواع زمین ریخت‌ها و توسعه کارست‌شدگی در چنین مناطقی ایفا می‌کنند.

درباره مقایسه چشم‌اندازهای کارست آهکی و گچی می‌توان گفت علی‌رغم وجود شباهت‌ها تفاوت‌هایی نیز دارند. تمامی این تفاوت‌ها ریشه در نوع لیتولوژی و ویژگی‌های چینه‌شناختی سازندها (محیط رسوب‌گذاری اولیه آن‌ها) دارد. خصوصیات لیتولوژیکی شامل اندازه بلورها، انحلال‌پذیری، مقاومت مکانیکی، و ویژگی‌های شکل‌پذیری است، در گچ اندازه بلورها می‌تواند در محدوده بیش از یک متر تا کسری از میلی‌متر باشد، در حالی که در سنگ‌های کربناته اندازه بلورها معمولاً حدود یک میلی‌متر است. گچ‌ها از مقاومت مکانیکی پایین (فرسایش‌پذیری بیشتر) و شکل‌پذیری بالایی برخوردارند در حالی که سنگ‌های کربناته بسیار مقاوم و شکننده هستند. از لحاظ چینه‌شناختی سازندهای گچی اغلب لایه‌های ستبری ایجاد نمی‌کنند و همواره بامیان لایه‌هایی از نمک‌ها و همچنین میان لایه‌های مارنی دیده می‌شوند. یکسان بودن محیط رسوب‌گذاری ژیبس و انیدریت با سایر سولفات‌های کلسیم و نمک‌ها که از انحلال‌پذیری بسیار بالاتری (حدود صد برابر بیشتر) نسبت به گچ‌ها برخوردارند، سبب تسریع انحلال میان‌لایه‌ای در گچ‌ها می‌شود که خود معبری برای جریان آب زیرزمینی ایجاد می‌کنند. علاوه بر آن حضور میان لایه‌های مارنی در سازندهای گچی نیز می‌تواند بسیار تأثیرگذار باشد؛ چرا که مارن‌ها بسیار سست بوده و به‌آسانی با جریان آب شسته شده و انتقال می‌یابند، و می‌توانند فضاهای خالی زیرسطحی را افزایش دهند، این در حالی است که آهک‌ها معمولاً به صورت لایه‌های ستبر و مترکم رخنمون دارند.

زمین‌ریخت‌های سطحی کارست گچی را از نظر مدیریت محیطی، می‌توان به دو دسته کلی تفکیک کرد، دسته اول زمین‌ریخت‌هایی که پیامدهای مخاطره‌آمیز به دنبال دارند و دسته دوم سایر زمین‌ریخت‌های سطحی (زمین ریخت‌های سطحی بدون مخاطره) می‌باشند. فروچاله‌ها، فرو نشست‌ها، پرتگاه‌ها و زمین‌لغزه‌های گچی در دسته اول جای دارند، چرا که می‌توانند مخاطرات متعددی را

¹Birzai

برای سازه‌های انسان‌ساز و زندگی انسان‌ها ایجاد کنند. دسته دوم شامل کارن‌ها، تامولی‌ها، پلیگون‌های گچی، پولیه‌ها، دره‌های کور، چشمه‌ها، و لوله‌های برشی که نه تنها منشأ مشکل‌ساز نیستند، بلکه گاهاً می‌توانند مفید نیز باشند، برای مثال چشمه‌های کارستی به‌عنوان منابع آب زیرزمینی و لوله‌های برشی به‌عنوان مصالح می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند، البته آن دسته از فروچاله‌هایی که با برخورد با سطح آب زیرزمینی دریاچه‌های دائمی و یا فصلی را ایجاد می‌کنند نیز می‌تواند در دسته دوم قرار گیرند.

با توجه به آنچه ذکر شد در درجه اول، تهیه نقشه‌ای که نشان‌دهنده رخداد سطحی و زیربنایی سازندهای گچی در کل کشور باشد ضروری است، چرا که با توجه به سرعت انحلال بالای گچ چنین مناطقی مستعد کارست شدگی هستند. مرحله بعد شناسایی زمین ریخت‌های کارست گچی (به‌خصوص فروچاله‌ها و فرونشست‌ها) و نقشه‌برداری از آن‌ها است. تجزیه تحلیل چنین داده‌هایی برای تهیه نقشه‌های استعداد ابتلا به پدیده‌هایی از این دست و همچنین نقشه‌های خطر مربوط به آن‌ها در راستای برنامه‌ریزی و مدیریت مناطق گچی بسیار مهم می‌باشد. تهیه چنین اطلاعاتی می‌تواند کمک بزرگی برای جلوگیری از ایجاد مشکل در انواع پروژه‌های عمرانی (به‌ویژه راه‌ها، خطوط انتقال، سدها، ساختمان‌ها، توربین‌های بادی، صفحات خورشیدی، دکل‌های برق و غیره) باشد. همچنین بررسی هیدروژئولوژی محلی چنین مناطقی نیز از دو جنبه مورد توجه است، یکی توجه به آبخوان‌های گچی به‌عنوان منابع آب زیرزمینی که تاکنون کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند (که البته با توجه به کم‌آب بودن کشورمان و همچنین خشک‌سالی‌های اخیر بسیار مهم است)، و دیگری در راستای حفاظت از منابع آب زیرزمینی در آبخوان‌های آبرفتی و آهکی که عموماً در ارتباط با کارست گچی قرار دارند، چراکه در کارست گچی، زهکشی زیرزمینی از طریق کانال‌های انحلالی اجازه انتقال سریع آب‌های زیرزمینی را می‌دهد و در نتیجه آلودگی‌ها به‌سرعت انتشار می‌یابند. در نهایت می‌توان گفت با توجه به اینکه حدود هشتاد هزار کیلومترمربع از مساحت زمینی کشور ما ایران را رخنمون‌های گچی به خود اختصاص داده‌اند (هرچند که اطلاع دقیقی از مساحتی که زیربنای گچی دارند در دست نیست) شناخت زمین‌ریخت‌های کارست گچی، نقشه‌برداری از شکل‌های ایجاد شده در این مناطق و تولید نقشه حساسیت و خطر فروچاله‌ها و فرونشست‌ها و همچنین بررسی هیدروژئولوژی محلی چنین مناطقی برای توسعه و امنیت عمومی بسیار ضروری می‌باشد.

این مقاله مروری برگرفته از رساله دکتری با عنوان "مدل‌سازی ژئومورفولوژیکی منابع آب زیرزمینی در کارست گچی منطقه آسماری، جنوب شرق مسجد سلیمان" می‌باشد.

منابع:

- بهنام طلب، احسان، ۱۳۸۴، بررسی میزان انحلال کارست گچی و روش‌های بهسازی آن‌ها در پی سدهای خاکی و سنگ‌ریز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد (سازه‌های هیدرولیکی)، مهندسی عمران، صنعتی شریف، استاد راهنما، محسن حائری.
- قبادی، محمدحسین و محمد محمدیان و حسن محسنی و رامین کرمی، ۱۳۹۲، بررسی تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی ژئیس‌های سازند گچساران در گسترش اشکال انحلالی (منطقه رامهرمز، استان خوزستان)، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد ششم، شماره ۳ و ۴، صص. ۱-۱۶.
- کریمی، حاجی، ۱۳۹۰، بررسی سازوکار تشکیل فروچاله‌های دشت جابر در جنوب شرق استان ایلام، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۲، جلد ۱، صص. ۱۲۶-۱۳۹.
- معظمی، علی‌رضا، ۱۳۹۱، تأثیر سرعت جریان آب بر روند انحلال لایه‌های ژیبسی وانیدریتی در پی سازه‌های هیدرولیکی، نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۹-۲۱، اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۱.
- ناصری، حمیدرضا و یعقوب نیک قوجق، ۱۳۹۱، نقش کارست ژیبسی در انتقال آلاینده‌ها از سد باطله معدنی آق‌دره- تکاب، مجله محیط‌شناسی، شماره ۶۱، صص. ۴۱-۴۸.
- Aghdam, J.A., Raeisi, E., Zare, M., Forti, P., Capaccioni, B., 2012, Hydrogeology of non-salt Gachsaran Formation in Iran: an example from the Zagros Range-Tang sorkh Valley, Carbonates Evaporites, Vol. 28 No. 3, pp. 309-319. DOI 10.1007/s13146-012-0113-6.
- Alberto, W., Giardino, M., Martinotti, G., Tiranti, D., 2008, Geomorphological hazards related to deep dissolution phenomena in the Western Italian Alps: distribution, assessment and interaction with human activities, Engineering Geology, Vol. 99, pp. 147-159.
- Artieda, O., 2013, Morphology and micro-fabrics of weathering features on gyprock exposures in a semiarid environment (Ebro Tertiary Basin, NE Spain), Geomorphology, Vol.196, pp. 198-210.

- Beck, B.F., 2005, *Soil piping and sinkhole failures*. In: Culver, D.C., White, W.B.(Eds.), *Encyclopedia of Caves*, Elsevier, New York, NY, pp. 523–528.
- Benito, G.Perez del Campo, P., Gutierrez-Elorza, M., Sancho, C., 1995. *Natural and human-induced sinkholes in gypsum terrain and associated environmental problems in NE Spain*, *Environmental Geology*, Vol. 25, No. 3, pp. 156–164.
- Calaforra, J.M., Pulido-Bosch, A., 1999, *Genesis and evolution of gypsum tumuli*, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 24, No., pp. 919–930.
- Calaforra, J.M., Pulido-Bosch, A., 2003, *Evolution of the gypsum karst of Sorbas (SE Spain)*, *Geomorphology*, Vol. 50, No., pp. 173–180.
- Chardon, M., Nicod, J., 1996, *Gypsum karst of France*, *International Journal of Speleology*, Vol. 25, No 3–4, pp. 203–208.
- Cooper, A.H., 1989, *Airborne multispectral scanning of subsidence caused by Permian gypsum dissolution at Ripon, North Yorkshire*. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 22, pp. 219–229.
- Cooper, A.H., 2008, *The GIS approach to evaporite-karst geohazards in Great Britain*, *Environmental Geology*, Vol. 53, pp. 981–992, <http://dx.doi.org/10.1007/s00254-008-1292-2>.
- Cooper, A.H., Gutiérrez, F., 2013, *Dealing with gypsum karst problems: hazards, environmental issues, and planning*, *Treatise on Geomorphology*, Academic Press, San Diego, CA, vol. 6, pp. 451–462.
- Cooper, A.H., Gutiérrez, F., 2013, *Dealing with gypsum karst problems: hazards, environmental issues, and planning*, *Treatise on Geomorphology*, Academic Press, San Diego, CA, Vol. 6, pp. 451–462.
- Cooper, A.H., Saunders, J.M., 2002, *Road and bridge construction across gypsum karst in England*, *Engineering Geology*, Vol. 65, pp. 217–223.
- Cooper, A. H., Farrant, A. R., Price, S.J., 2011, *The use of karst geomorphology for planning, hazard avoidance and development in Great Britain*, *Geomorphology*, Vol. 134, No. 1–2, pp. 118–131.
- Cucchi, F., Zini, L., 2003, *Gypsum karst of Zagros Mountains (I.R. IRAN)*, *Acta carsologica*, Vol. 32, No. 1, pp. 69–82.
- Dashnour, H., Homand, F., Auvray, C., 2006, *Deformation of natural gypsum rock: mechanisms and questions*, *Engineering Geology*, Vol. 86, pp. 1–17.
- Dogan, U., Yesilyurt, S., 2004, *Gypsum karst south of Imranli, Sivas, Turkey*, *Cave and Karst Science*, Vol. 31, No. 1, pp. 7–14.
- Dogan, U., Ozel, S., 2005, *Gypsum karst and its evolution east of Hafik (Sivas, Turkey)*, *Geomorphology*, Vol. 71, No. 3–4, pp. 373–388.
- Dreybrodt, W., 2004. *Dissolution: evaporite and carbonate rocks*, in: Gunn, J. (Ed.), *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, Fitzroy Dearborn, New York, NY, pp. 295–300.
- Ferrarese, F., Macaluso, T., Madonia, G., Palmeri, A., Sauro, U., 2002, *Solution and recrystallisation processes and associated landforms in gypsum outcrops of Sicily*, *Geomorphology*, Vol. 49, pp. 25–43.
- Ford, D. C., 1997. *Principal features of evaporate karst in Canada*, *Carbonates and Evaporites*, Vol. 13, No. 1, pp. 15–23.
- Ford, D.C., Williams, P.W., 2007, *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, Wiley, Chichester, 562 pp.
- Forti, P., Sauro, U., 1996, *The gypsum karst of Italy*, *International Journal of Speleology*, Vol. 25, No. 3–4, pp. 239–250.
- Frumkin, A., 2013. *New Developments of Karst Geomorphology Concepts*, *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, *Karst Geomorphology*, Vol. 6, pp. 1–13.
- Gazquez, F., Calaforra, J.M., 2014, *the Gypsum Karst of Sorbas, Betic Chain*, In: Gutiérrez, F., Gutiérrez, M., (Ed.), *Landscapes and Landforms of Spain*, Springer Science & Business, pp. 127–135.
- Glew, J.R., Ford, D.C., 1980. *A simulation study of the development of rillen karren*. *Earth Surface Processes and Landforms* 5, pp. 25–36.
- Goudie, A., 2013, *Encyclopedia of Geomorphology*, Routledge, London, 1200 pp.
- Gracia, F.J., Gutiérrez, F., Gutiérrez, M., 2002, *The Jiloca karst polje-tectonic graben (Iberian Range, NE Spain)*, *Geomorphology*, Vol. 52, pp. 215–231.
- Gunay, G., 2002, *Gypsum Karst, Sivas, Turkey*, *Environmental Geology*, Vol. 42, pp. 387–398.
- Gutierrez-Elorza, M., Gutierrez- Santolalla, F., 1998, *Geomorphology of the Tertiary gypsum formations in the Ebro Depression (Spain)*, *Geoderma*, Vol. 87, pp. 1–29.
- Gutierrez, F., 1996, *Gypsum karstification induced subsidence: effects on alluvial systems and derived geohazards (Calatayud Graben, Iberian Range, Spain)*, *Geomorphology*, Vol. 16, pp. 277–293.
- Gutierrez, F., Calaforra, J.M., Cardona, F., Orti, F., Duran, J.J., Garay, P., 2008a, *Geological and environmental implications of evaporite karst in Spain*, *Environmental Geology*, Vol. 53, pp. 951–965.
- Gutierrez, F., Cooper, A.H., Johnson, K.S., 2008b, *Identification, prediction and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas*, *Environmental Geology*, Vol. 53, pp. 1007–1022.
- Gutierrez, F., Guerrero, J., Lucha, P., 2008c, *A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain*, *Environmental Geology*, Vol. 53, pp. 993–1006.

- Gutierrez, F., Galve, J.P., Guerrero, J., 2007, *The origin, typology, spatial distribution, and detrimental effects of the sinkholes developed in the alluvial evaporite karst of the Ebro River valley downstream Zaragoza city (NE Spain)*, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.32, pp. 912–928.
- Gutierrez, F., Galve, J.P., Lucha, P., Bonachea, L., Jorda, L., Jorda, R., 2009, *Investigation of a large collapse sinkhole affecting a multi-storey building by means of geophysics and the trenching technique (Zaragoza city, NE Spain)*, *Environmental Geology*, Vol.58, pp. 1107–1122.
- Gutierrez, F., Guerrero, J., Lucha, P., 2008c, *A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain*, *Environmental Geology*, Vol.53, pp. 993–1006.
- Gutierrez, F., Ortu, F., Gutierrez-Elorza, M., Perez-Gonzalez, A., Benito, G., Gracia-Prieto, J., Durañ, J.J., 2001, *The stratigraphical record and activity of evaporate dissolution subsidence in Spain*, *Carbonates and Evaporites*, Vol.16, No.1, pp. 46–70.
- Gutierrez, F., Cooper, A.H., 2013, *Surface morphology of gypsum karst*, *Treatise on Geomorphology*, Academic Press, San Diego, CA, *Karst, Geomorphology*, Vol. 6, pp. 425–437.
- Jassim, S.Z., Jibril, A.S., Numan, N.M.S., 1997, *Gypsum karstification in the Middle Miocene Fatha Formation, Mosul area, northern Iraq*, *Geomorphology*, Vol. 18, pp. 137–149.
- Johnson, K.S., 2008, *Gypsum-karst problems in constructing dams in the USA*, *Environmental Geology*, Vol.53, pp. 945–950.
- Kempe, S., 1996, *Gypsum karst of Germany*, *International Journal of Speleology*, Vol. 25, No. 3–4, pp. 209–224.
- Klimchouk, A., 1996, *Hydrogeology of gypsum formations*, *International Journal of Speleology*, Vol.25, No.3-4, pp. 83- 89.
- Klimchouk, A., Andrejchuk, V., 1996, *Sulphate rocks as an arena for karst development*, *International Journal of Speleology*, Vol. 25, No. 3-4, pp. 9- 20.
- Klimchouk A., Forti P., Cooper A., 1996, *Gypsum karst of the World: a brief overview*, *International Journal of Speleology*, Vol. 25, No. 3–4, pp. 159 - 181.
- Madonia, G., and Vattano, M., 2011, *New knowledge on the Monte Conca gypsum karst system (central-western Sicily, Italy)*, *Acta Carsologica*, Vol. 40, No. 1, pp. 53–64.
- Memesh, A., Dini, S., Gutierrez, F., Wallace, C.A., 2008, *Evidence of large-scale subsidence caused by interstratal karstification of evaporites in the Interior Homocline of Central Saudi Arabia*, *European Geosciences Union General Assembly. Geophysical Research Abstracts 10, A-02276*.
- Macaluso, T., Sauro, U., 1996, *Weathering crust and karren on exposed gypsum surfaces*, *International Journal of Speleology*, Vol. 25, No. 3–4, pp. 115–126.
- Mottershead, D.N., Lucas, G.R., 2001, *Field testing of Glew and Ford's model of solution flute evolution*, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 26, No. 8, pp. 839–846.
- Mottershead, D.N., Moses, C.A., Lucas, G.R., 2000, *Lithological control of solution flute from: a comparative study*, *Zeitschrift für Geomorphologie*, Vol. 44, No. 4, pp. 491–512.
- Paukstys, B., Narbutas, V., 1996, *Gypsum karst of the Baltic Republics*, *International Journal of Speleology*, Vol. 25, No. 3–4, pp. 279–284.
- Raeisi, E., Zare, M., Aghdam, J.A., 2013, *Hydrogeology of gypsum formations in Iran*, *Journal of Cave and Karst Studies*, Vol. 75, No. 1, pp. 68– 80.
- Sauro, U., 1996, *Geomorphological aspects of gypsum karst areas with special emphasis on exposed karst*, *International Journal of Speleology*, Vol. 25, No. 3–4, pp. 105–114.
- Stafford, K.W., Nance, R., Rosales-Lagrade, L., Boston, P.J., 2008, *Epigene and hypogene gypsum karst manifestations of the Castile Formation: Eddy County, New Mexico and Culberson County, Texas, USA*, *International Journal of Speleology*, Vol. 37, No. 2, pp. 83–98.
- Torabi-Kaveh, M., Heidari, M., Miri, M., 2012, *Karstic features in gypsum of Gachsaran Formation (case study; hamshir Dam reservoir, Iran)*, *Carbonates and Evaporites*, Vol. 27, No. 3, pp. 291–297.
- Waltham, T., Bell, F., Culshaw, M., 2005, *Sinkholes and Subsidence*. Springer, Chichester, 382 pp.
- Warren, J.K., 2006, *Evaporites Sediments, Resources and Hydrocarbons*, Springer, Berlin, 1035 pp.
- Williams, P., 2004, *Dolines*. In: Gunn, J. (Ed.), *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, Fitzroy Dearborn, New York, NY, pp. 304–310.
- Yilmaz, I., 2007, *GIS based susceptibility mapping of karst depression in gypsum: a case study from Sivas basin (Turkey)*, *Engineering Geology*, Vol. 90, pp. 89–103.
- Yilmaz, I., Keskin, I., Marschalko, M., 2015, *Rock mass parameters based doline susceptibility mapping in gypsum terrain*, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 48, pp. 124–134.
- Yilmaz, I., Marschalko, M., Bednarik, M. 2011, *Gypsum collapse hazards and Importance of hazard mapping*, *Carbonates and Evaporites*, Vol. 26, pp. 193–209.