

## ارزیابی ژئومتریک ترک‌های گلی در شکل‌گیری یکی از رخساره‌های رسوبی رسوبات ریزدانه عهد حاضر (مطالعه موردی: رسوبات مخازن سد وشمگیر گرگان)

حامد رضایی\*، آرش امینی

استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گلستان، ایران

\*پست الکترونیک: h.rezaei@gu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۴/۲/۱۷

تاریخ دریافت: ۹۳/۶/۳

### چکیده

طی فرآیند خشک شدن رسوبات ریزدانه خصوصاً رسوبات گلی، با ایجاد تنش‌های انقباضی در آن‌ها، ترک با فرم‌ها و ابعاد مختلف در زمان‌های گذشته و عهد حاضر زمین به وجود می‌آیند. ترک‌های گلی با شکل دادن رخساره‌های رسوبی مشخص و ساخت‌های رسوبی ثانویه تا حدود زیادی شرایط رسوب‌گذاری را مشخص می‌نمایند. با مطالعه فرم، هندسه، بافت سطحی و سایر خصوصیات می‌توان به پیش‌بینی مسیر انتشار ترک و تهیه مدل‌های ریاضی تشکیل آن‌ها پرداخت و ژئومتریک ترک‌های گلی از مباحث بنیادی در بررسی فرآیند علم انتشار ترک است. در این تحقیق با انتخاب ۵۰ نمونه از چهار منطقه مطالعاتی از مخازن سد وشمگیر در شمال گرگان، ویژگی‌های هندسی ترک‌ها از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بررسی تعداد اضلاع چند ضلعی‌های بین ترک‌ها، طول اضلاع، محیط، مساحت، زوایای داخلی و خارجی، عمق ترک و بافت سطحی ترک‌ها، عوامل ژئومتریک ترک‌ها معرفی و تجزیه و تحلیل شدند. بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که در این چهار منطقه دو دسته ترک با ویژگی‌های هندسی متفاوت تشکیل شده‌اند. ترک‌های مورد مطالعه از لحاظ مساحت و زوایای داخلی همبستگی بالایی با ویژگی‌های هندسی یک چند ضلعی منتظم نشان می‌دهد که مؤید همگنی رسوبات ریزدانه و فرآیند ایجاد ترک در منطقه مورد مطالعه است.

**واژه‌های کلیدی:** ترک گلی؛ رخساره ریزدانه؛ ژئومتریک؛ مخزن سد وشمگیر؛ گلستان.

### مقدمه

رسوبی، ضمن بر شمردن عوامل مؤثر بر آرایش ترک‌ها و ژئومتریک آن‌ها، پرسش اساسی این است که آیا می‌توان تفاوت‌هایی بین ژئومتریک ترک‌ها در محیط‌های رسوبی طبیعی و یا آزمایشگاهی قائل شد؟ معمولاً نرخ خشک شدن گل‌ها نسبت به عمق کم می‌شود. به همین دلیل گل با اختلاف فاز در ایجاد تنش انقباضی مواجه می‌شود و هنگامی که مقدار این تنش در سطح به حد بحرانی رسید، به ایجاد ترک منجر می‌گردد و توسعه ترک‌ها باعث به

ترک‌های گلی، ساختارهای رسوبی ثانویه‌اند که در اثر خشک شدن رسوبات گلی به وجود می‌آیند. فرآیند خشک شدن باعث ایجاد تنش‌های انقباضی در گل رسی می‌شود. عوامل عمده در انتشار ترک‌های گلی شامل میزان و نوع کانی رسی، توپوگرافی، اندازه ذرات تشکیل دهنده ترک، عمق آن، شوری آب و آشفستگی زیستی بوده و می‌تواند در الگوی انتشار ترک گلی نیز مؤثر باشد (Zhao et al., 2014). با مقایسه محیط‌های مختلف

وجود آمدن شبکه‌ای از شکستگی‌ها می‌گردد و در بین آن‌ها چند ضلعی‌هایی به وجود می‌آید که مجموعه‌ای از این شکل‌ها به ترک‌های گلی معروف است.

مطالعات زیادی در خصوص ساز و کار ایجاد ترک در مواد مختلف (خوشروان آذر و صالحی، ۱۳۸۶؛ میرزایی نصیرآباد و همکاران، ۱۳۸۸) انجام شده است. مبحث ایجاد ترک مواد زمین در زمین‌شناسی مهندسی بسیار مهم است به طوری که در عملیات آتش‌باری، شکست هیدرولیکی (پاک و صمیمی، ۱۳۹۱)، تعیین تنش‌های برجا، خردایش مکانیکی مته‌های حفاری و سرمته‌های ماشین‌های حفاری، تحلیل پایداری شیب، استحصال انرژی زمین گرمایی، خواص انتقال سیال در توده سنگ، معیار شکست سنگ (خوشروان آذر و صالحی، ۱۳۸۶) و ایجاد ترک کاربردهای فراوانی دارد.

در ارزیابی الگوهای شکست در درزه‌های ستونی، ترک‌های گلی با الگوی چند وجهی در مواد زمین (Goehring, 2013)، تلاش شده است تا معیارهای شکست مورد بررسی قرار گیرد (Bohn, 2005). به طور کلی سه معیار شامل حداکثر تنش مماسی، حداکثر نرخ رهایی انرژی کرنشی، حداقل دانسیته انرژی کرنشی (Oda, 1986؛ Zafosnik et al., 2007؛ میرزایی نصیرآباد و همکاران، ۸۸) برای ارزیابی و بررسی الگوهای شکست در مواد وجود دارد. در بررسی الگوهای ایجاد ترک در ترک‌های گلی معیار حداکثر تنش مماسی رایج‌تر است.

مطالعات آزمایشگاهی فراوانی (میرزایی نصیرآباد و همکاران، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۱؛ قزوینیان و نوروزی، ۱۳۹۲) در ارزیابی الگوی شکست، سازوکار ایجاد ترک در مواد همچون سنگ (Goehring, 2005؛ Desbenoit et al., 2005؛ Pugno et al., 2013)، سرامیک (Bohn, 2005)، فلز (Pugno et al., 2006؛ Goehring, 2013)، چوب (Desbenoit et al., 2005)، سفال (Le et al., 2009)، گل (Morgan, 1959) و

تلاش گردید تا با همگن سازی مواد، بر مکانیک آن‌ها روابط ریاضی حاکم گردد. در کنار آن هنر شبیه سازی با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و نرم افزارهای شبیه ساز محیط مواد، مورد ارزیابی دقیق‌تر قرار گیرد (Gobron & Chiba, 2001؛ Jones et al., 2006). امروزه روش المان محدود، کاربرد وسیعی را در شبیه سازی محیط مواد و ارزیابی آن‌ها پیدا کرده است و در پیش بینی انتشار ترک به عنوان یک روش دقیق، توسط محققان به کار گرفته می‌شود (Wang & Gobron & Chiba, 2001؛ Nakamura, 2004؛ Zafosnik et al., 2007؛ Vikram & Behal & Solodyankin, 2012؛ Kumar, 2013). برای بررسی ژئومتریک ترک‌ها مطالعات آزمایشگاهی بر روی مواد ساخته شده (Fisher & Beltz, 1999؛ Oda, 1986؛ Bohn, 2005؛ همکاران، ۱۳۹۱؛ قزوینیان و نوروزی، ۱۳۹۲) و گل رسی (Selen & Turer, 2011؛ Goehring et al., 2010) و بررسی‌ها و مشاهدات صحرایی بر روی درزه‌های ستونی و ترک‌های گلی (Goehring et al., 2010) انجام شده است. عامل اصلی ایجاد ترک در مواد زمین، حرارت و رطوبت است که در ترک‌های گلی عامل رطوبت در ایجاد و انتشار ترک نقش مهمی دارد. ضخامت گل، جنس مواد تشکیل دهنده، غلظت رسوب، شرایط مرزی و نرخ خشک شدن، عوامل اصلی کنترل‌کننده آرایش ترک‌ها در رسوبات گلی است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در مناطق با شیب ملایم ترک‌های گلی بیشتر از نوع شبکه‌ای است. در حالی که در اراضی با شیب تندتر بیشتر ترک‌های گلی نوع مستطیلی گسترش دارد. فرآیند انتشار ترک‌های گلی در دوره تکامل زمین‌شناسی در سه مرحله سین دیاژنتیکی، دیاژنتیک دفنی و اپی دیاژنتیکی صورت می‌گیرد. طول و عرض ترک، اندازه ذرات تشکیل دهنده و

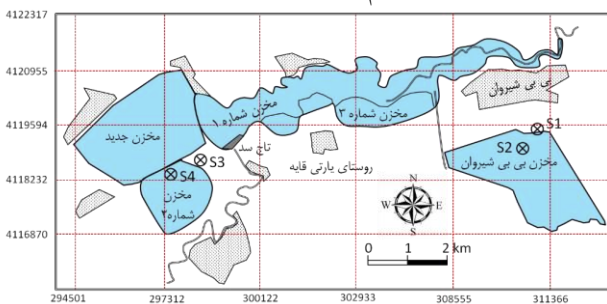
وجود آمدن شبکه‌ای از شکستگی‌ها می‌گردد و در بین آن‌ها چند ضلعی‌هایی به وجود می‌آید که مجموعه‌ای از این شکل‌ها به ترک‌های گلی معروف است.

مطالعات زیادی در خصوص ساز و کار ایجاد ترک در مواد مختلف (خوشروان آذر و صالحی، ۱۳۸۶؛ میرزایی نصیرآباد و همکاران، ۱۳۸۸) انجام شده است. مبحث ایجاد ترک مواد زمین در زمین‌شناسی مهندسی بسیار مهم است به طوری که در عملیات آتش‌باری، شکست هیدرولیکی (پاک و صمیمی، ۱۳۹۱)، تعیین تنش‌های برجا، خردایش مکانیکی مته‌های حفاری و سرمته‌های ماشین‌های حفاری، تحلیل پایداری شیب، استحصال انرژی زمین گرمایی، خواص انتقال سیال در توده سنگ، معیار شکست سنگ (خوشروان آذر و صالحی، ۱۳۸۶) و ایجاد ترک کاربردهای فراوانی دارد.

در ارزیابی الگوهای شکست در درزه‌های ستونی، ترک‌های گلی با الگوی چند وجهی در مواد زمین (Goehring, 2013)، تلاش شده است تا معیارهای شکست مورد بررسی قرار گیرد (Bohn, 2005). به طور کلی سه معیار شامل حداکثر تنش مماسی، حداکثر نرخ رهایی انرژی کرنشی، حداقل دانسیته انرژی کرنشی (Oda, 1986؛ Zafosnik et al., 2007؛ میرزایی نصیرآباد و همکاران، ۸۸) برای ارزیابی و بررسی الگوهای شکست در مواد وجود دارد. در بررسی الگوهای ایجاد ترک در ترک‌های گلی معیار حداکثر تنش مماسی رایج‌تر است.

مطالعات آزمایشگاهی فراوانی (میرزایی نصیرآباد و همکاران، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۱؛ قزوینیان و نوروزی، ۱۳۹۲) در ارزیابی الگوی شکست، سازوکار ایجاد ترک در مواد همچون سنگ (Goehring, 2005؛ Desbenoit et al., 2005؛ Pugno et al., 2013)، سرامیک (Bohn, 2005)، فلز (Pugno et al., 2006؛ Goehring, 2013)، چوب (Desbenoit et al., 2005)، سفال (Le et al., 2009)، گل (Morgan, 1959) و

و به ترک‌های سین آرسیس<sup>۱</sup> شهرت دارد. در این تحقیق نمونه برداری از چهار ایستگاه S<sub>1</sub>، S<sub>2</sub>، S<sub>3</sub> و S<sub>4</sub> واقع در مخازن سد وشمگیر از ترک‌های گلی خارج از آب انجام شده است و اندازه‌گیری صحرایی و بررسی و تجزیه و تحلیل‌های بعدی در این نمونه‌ها متمرکز شده است (شکل ۱). انتخاب نقاط دیگر نمونه‌برداری به علت پر بودن مخازن سد از آب امکان پذیر نبوده است. نمونه‌ها پس از ارسال به آزمایشگاه تحت آزمون‌های دانه‌سنجی به روش هیدرومتری و آزمون‌های تعیین حد روانی و خمیری قرار گرفته است (جدول ۱). سد وشمگیر از قدیمی‌ترین و پربسوب‌ترین سدهای کشور است که ساخت آن به سال ۱۳۴۹ باز می‌گردد. این سد دارای دریاچه‌ای اصلی و مخازن متعدد است. یکی از اصلی‌ترین مشکلات این سد انباشت رسوبات و کاهش حجم ذخیره است و در حال حاضر طرح و عملیات علاج بخشی رسوب زدایی از این سد در حال اجرا است. همچنین در ایجاد ارتفاع آزاد<sup>۲</sup> بدنه سد خاکی عمق ترک‌ها و آرایش آن‌ها می‌تواند نقش مهمی ایفا کند و با لحاظ نمودن آن‌ها در طراحی ایمن بدنه سد و کاهش هزینه تمام شده پروژه بهره‌جست.



شکل ۱: موقعیت مکان نقاط مورد مطالعه در ساختگاه سد وشمگیر

با قرار دادن میانگین نمونه‌ها در نمودار مثلثی (شکل ۲) مشخص می‌شود نوع رسوب رس و رس سیلتی است. بر اساس طبقه‌بندی متحد خاک، رسوبات مورد مطالعه در رده رس لاغر (CL) قرار دارند (جدول ۱). بررسی‌های

خواص فراکتال ترک می‌تواند در شکل‌گیری الگوی ترک تأثیر داشته باشد (Velde, 1999; Preston et al., 1997). برای اندازه‌گیری خصوصیات دینامیکی ترک‌های گلی و طراحی آزمایش‌های ساده، استفاده از مخلوط ماسه و بتونیت کاملاً مرسوم است (Vogel et al., 2005). انجام آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی در مدل‌سازی سازوکار ایجاد ترک و پیش‌بینی انتشار آن‌ها در مواد معمولاً دارای هزینه زیاد و وقت‌گیر است و همچنین اختلاط مواد در آزمایشگاه با محدودیت‌های اجرایی و تئوریک مواجه می‌شود؛ لذا بررسی روند ایجاد ترک‌های گلی و ژئومتریک آن‌ها جهت پیش‌بینی مسیر انتشار ترک و تهیه مدل‌های ریاضی بسیار مناسب است. ضمن این که با آنالیز ترکیب کانی‌شناسی و توزیع دانه‌بندی می‌توان شرایط مطلوبی را برای شبیه‌سازی ایجاد نمود. لذا با بررسی ترک‌های گلی می‌توان به عوامل محیطی و ذاتی مؤثر بر ایجاد آن‌ها پی برد.

در مهندسی نفت هدف از بررسی ژئومتریک ترک و مدل سه بعدی آن، تعیین نیم‌رخ بازشدگی ترک، طول و ارتفاع ترک و نحوه توزیع فشار سیال داخل ترک است. علم مطالعه انتشار و ژئومتریک ترک، در بررسی توزیع تنش سیال در محیط متخلخل و تراوش سیال و گاز از درون ترک به درون پیکره سنگ و یا خاک بسیار مهم است. از الگوی ترک برای تعیین ضریب شدت تنش برای مدل‌سازی انتشار ترک استفاده می‌شود (پاک و صمیمی، ۱۳۹۱).

## روش مطالعه

معمولاً ترک گلی به دو نوع ترک‌های گلی زیر آب و ترک‌های گلی خارج از آب (خشکی) قابل تقسیم است. ترک‌های زیرآبی به علت انقباض رس‌ها در اثر تغییر درجه شوری آب به وجود می‌آید و ابعاد خیلی کوچکتري دارند

1- Syneresis crack  
2- Freeboard

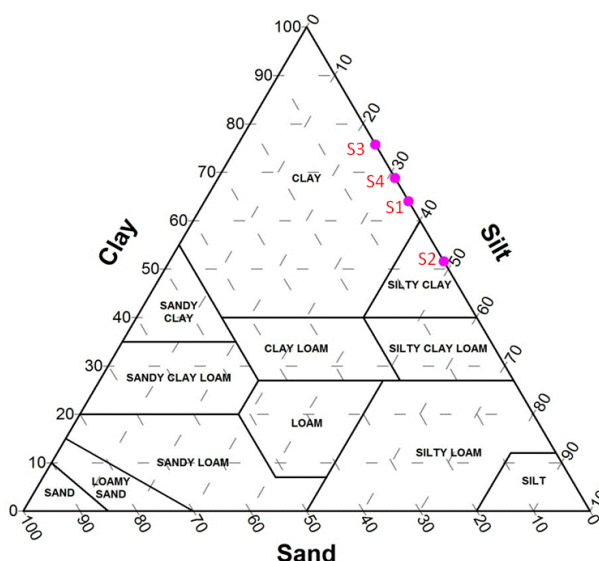
صحرائی و نمونه برداری در شرایط آب و هوایی یکسان انجام شده است. با توجه به این که عامل رطوبت کنترل کننده توسعه ترک است (Goehring & Oda, 1986) در چهار منطقه رطوبت نمونه‌ها متفاوت از هم انتخاب گردید تا ژئومتریکی آن‌ها نسبت به تغییرات رطوبت سنجیده شود.

جدول ۱: ویژگی‌های دانه‌بندی و خمیری رسوبات مورد مطالعه.

شماره نمونه	نام محل	ماسه Sand	لای Silt	رس Clay	حد روانی LL	نشانه خمیری PI
S <sub>1</sub>	بی‌بی شیروان (۱)	۰	۳۵/۹	۶۴/۱	۳۸/۲	۱۷/۱
S <sub>2</sub>	بی‌بی شیروان (۲)	۰	۴۸/۴	۵۱/۶	۳۸/۶	۱۶/۸
S <sub>3</sub>	مخزن شماره ۲	۰	۷۵/۸	۲۴/۲	۳۲/۳	۸/۷
S <sub>4</sub>	مخزن شماره ۲	۰	۶۸/۹	۳۱/۱	۲۷/۵	۵/۸

چند ضلعی‌ها به مساحت میانگین استفاده شده است. معیارهای هندسی ترک‌ها از جمله زاویه بین ترک‌های متقاطع در مدت بلوغ ترک‌ها تغییر می‌کند. در فرآیند خشک شدن چندین نسل ترک در گل ایجاد می‌شود که ساز و کار انتشار ترک‌ها و ژئومتریکی آن‌ها متفاوت است (Goehring, 2013). در طول مدت زمان ایجاد و توسعه ترک، نسل‌های ترک ایجاد می‌شوند. ابتدا ترک‌های نسل اول به وجود می‌آیند و سپس ترک‌های نسل دوم با تأثیرپذیری از ترک‌های نسل اول ایجاد می‌شوند. در این تحقیق فقط به ویژگی ترک‌های نسل اول پرداخته شده است (شکل ۶).

چهار منطقه مورد مطالعه از ۴۵ نقطه از ترک‌های گلی عکس برداری شده است و برای تصاویر تهیه شده مقیاس مناسب انتخاب گردید تا اندازه معیارهای هندسی واقعی شوند. سپس با استفاده از نرم‌افزار Image Tool Version 3 ویژگی‌های هندسی هر یک از ترک‌ها اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها محاسبه گردید (جدول ۲). همچنین هیستوگرام فراوانی و منحنی نرمال هر یک از ویژگی‌ها در نرم‌افزار SPSS محاسبه و ترسیم گردید (شکل ۷). تحقیقات نشان می‌دهد عامل نوع و میزان رس نقش تعیین کننده روی ژئومتری ترک‌ها دارد (El-Maarry *et al.*, 2014). به طور کلی از نظر کانی‌شناسی رسی، اسمکتیت‌های غنی از



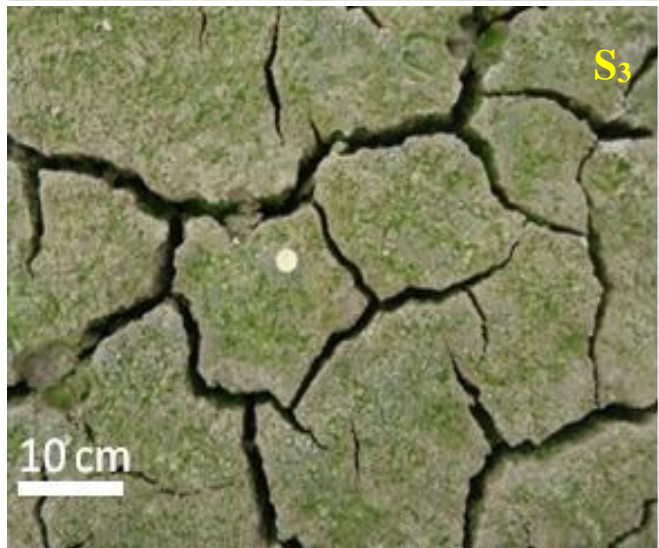
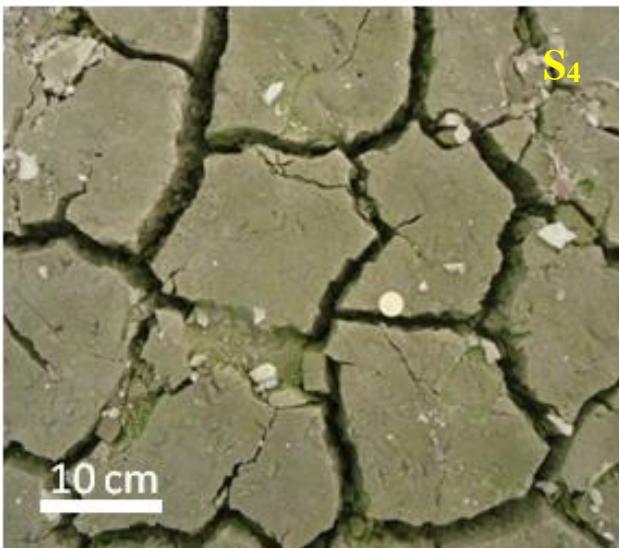
شکل ۲: موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار مثلثی.

با تهیه تصاویر از ترک‌های گلی (شکل ۳) و پردازش آن‌ها (Bohn, 2005; Oda, 1986; Fischer & Beltz, 1999)؛ (Trombetta, 2011)، عوامل هندسی نظیر ترسیم چند ضلعی‌های تشکیل دهنده بین ترک‌ها (شکل ۴)، تعداد اضلاع چند ضلعی‌های بین ترک‌ها، مساحت چند ضلعی‌ها، زوایای داخلی آن‌ها و همچنین زوایای بین ترک‌های متقاطع (شکل ۵)، اندازه‌گیری و محاسبه گردید و سپس تحلیل‌های آماری بر روی آن‌ها (Oda, 1986)، مقایسه معیارهای هندسی مربوط به چهار منطقه و مناطق دیگر انجام یافته است. در مطالعات Goehring *et al.* (2010) از نسبت فاصله بین ترک‌ها و ضخامت گل، نسبت مساحت

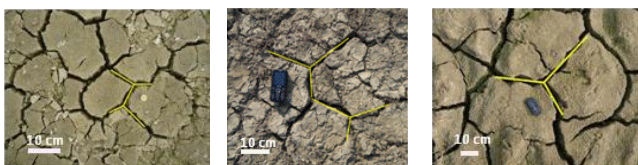


هر چه میزان رس رسوب بیشتر باشد، تعداد ترک‌ها در واحد سطح در فرآیند خشک شدن بیشتر است (Selen & Turer, 2011).

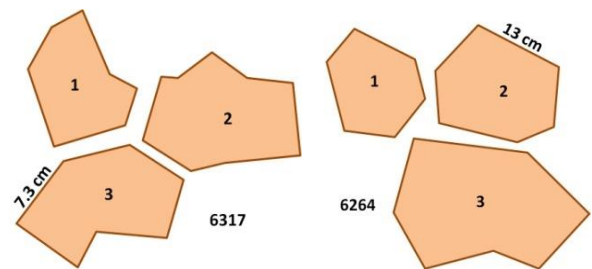
منیزیم/آهن و اسمکتیت‌های غنی از آلومینیوم در نقش‌گیری ترک‌های گلی بیشتر از سایر کانی‌های رسی مؤثر هستند.



شکل ۳: نمونه‌هایی از ترک‌های گلی مناطق چهار گانه مورد مطالعه.



شکل ۵: نحوه اندازه‌گیری و نمایش زوایای بین ترک‌های متقاطع



شکل ۴: دو نمونه از چند ضلعی‌های منتخب برای تعیین معیارهای هندسی

جدول ۲: میانگین پارامترهای هندسی مناطق چهارگانه

نام مناطق ویژگی های هندسی	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	میانگین کل
تعداد اضلاع	۶/۳	۶/۳	۶/۲	۷/۷	۶/۶
طول هر ضلع (سانتی متر)	۹/۶	۱۳/۲	۱۱/۱	۷/۱	۱۰
مساحت چندضلعی (سانتی مترمربع)	۲۲۳	۵۳۲	۳۴۸	۲۱۰/۴	۳۰۶/۷
زاویه داخلی (درجه)	۱۲۶	۱۱۸	۱۲۱	۱۲۳	۱۲۴/۶
مجموع زوایای داخلی (درجه)	۸۰۵/۷	۷۵۱	۷۵۳	۱۰۴۰	۸۲۶/۳
محیط چندضلعی (سانتی متر)	۵۹	۸۳/۶	۶۸	۵۵/۸	۶۴/۵
زوایای بین چندضلعی ها (درجه)	۱۱۴	۱۱۱	۱۱۹	۱۱۱	۱۱۳/۷



شکل ۶: نمایش ترکهای نسل اول و دوم (اعداد چهار رقمی کد تصاویر ترکهای گلی)

کائولینیت است. به علت تک منشأ بودن رسوبات سد و شمشگیر و شرایط محیط رسوب گذاری و نزدیکی مناطق نمونه برداری به نظر می آید عامل کانی شناسی (کانی های رسی) تغییر چندانی نداشته باشد. منشأ کانی های رسی رسوبات مورد مطالعه از لس های منطقه شرق استان گلستان می باشد. بررسی درصد اکسیدهای تشکیل دهنده رسوبات سد و شمشگیر نشان می دهد که رسوبات مذکور عمدتاً از اکسیدهای  $CaO$ ،  $Al_2O_3$ ،  $SiO_2$  و  $Fe_2O_3$  تشکیل شده اند (جدول ۳).

مطالعات ترک های گلی بیش از ۳۹ دریاچه و پلایای خشک در آمریکا نشان می دهند اغلب رسوبات شکل دهنده ترک های گلی در اندازه رس و سیلت و کانی رسی به طور عمده از مونت مورینیت، ایلیت، ورمیکولیت می باشد (Harris, 2004). جالب توجه این که ترک های گلی ایجاد شده در مریخ دارای اتصال های از نوع T و Y می باشد (ElMaarry et al., 2014).

آنالیزهای انجام شده روی رسوبات سد و شمشگیر (امینی و همکاران، ۱۳۸۵) نشان می دهد که ترکیب کانی های رسی آن شامل ۱۰٪ کلریت، ۴۰٪ ایلیت، ۳۰٪ ورمیکولیت و ۲۰٪

جدول ۳: اکسیدهای تشکیل دهنده رسوبات سد و شمشگیر (امینی و همکاران، ۱۳۸۵).

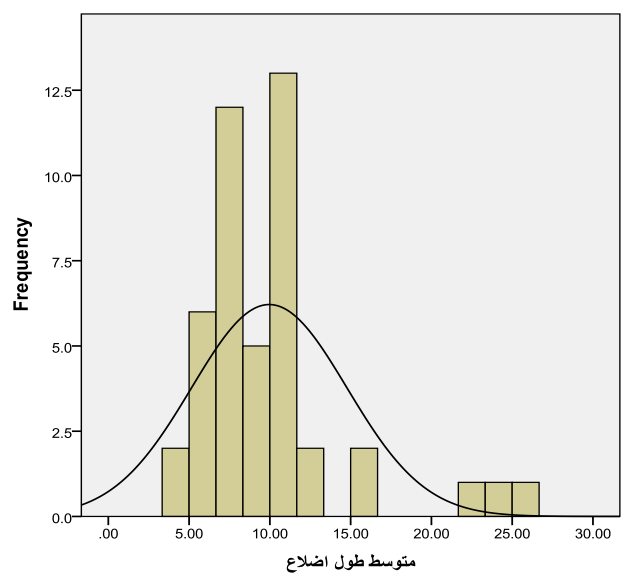
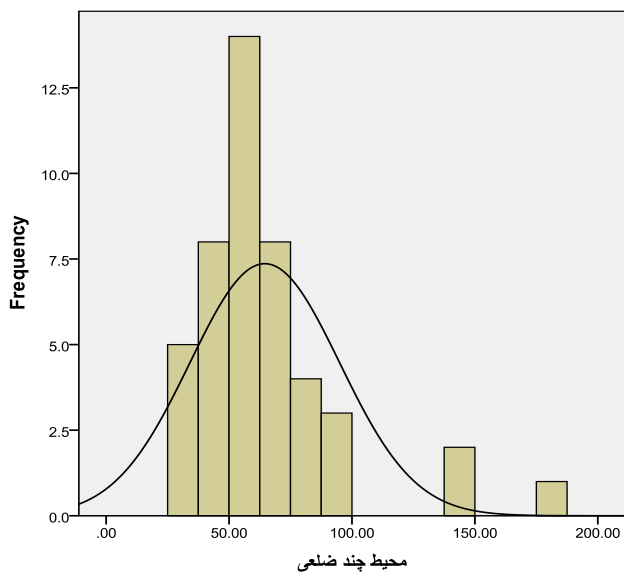
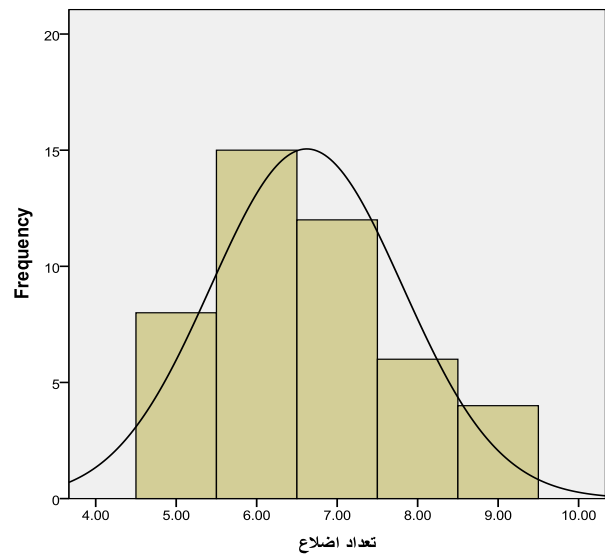
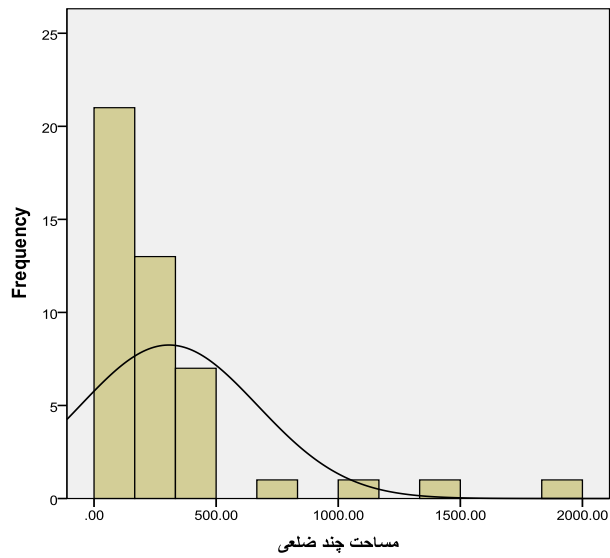
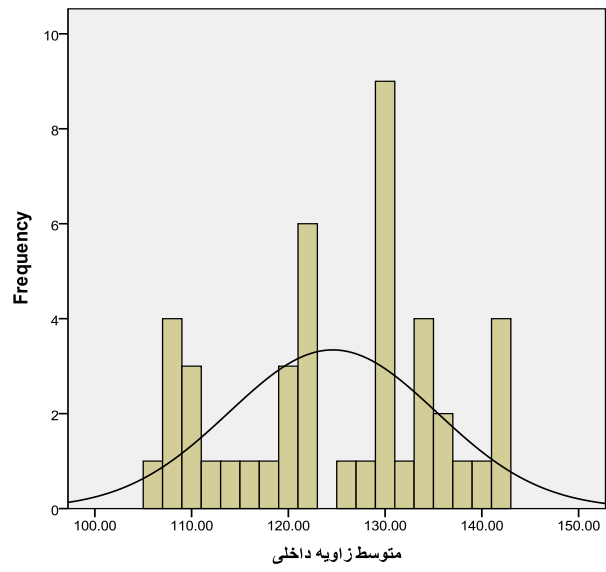
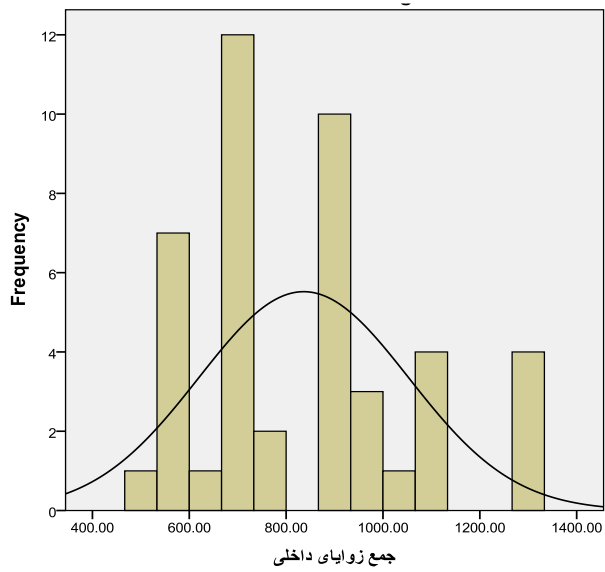
SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	L.O.I
۴۰/۹	۱۳/۷	۱۳	۶/۵	۳	۲/۷	۰/۵۶	۰/۴۷	۰/۱۴	۰/۱	۱۸/۵

واقعی آن یکی است. هرچه عمر ترک بیشتر باشد، ترک ها از حالت خط راست خارج شده و به سمت منحنی پیش می روند و در نتیجه طول اضلاع و زوایای بین چند ضلعی ها با تقریب به دست می آید و نسبت زوایا  $(\frac{\sum \beta_i}{\sum \alpha_i})$  از عدد یک فاصله می گیرد. بررسی نتایج نشان می دهد که متوسط نسبت زوایا در مناطق چهارگانه برابر ۱/۰۱ بوده (شکل ۹) و معرف تطابق بالای چند ضلعی با یک چندضلعی منظم دارد.

### بحث

بر اساس اصول هندسه، مجموع زوایای داخلی یک چند ضلعی  $(\sum \alpha_i)$  به صورت زیر بیان می شود:  

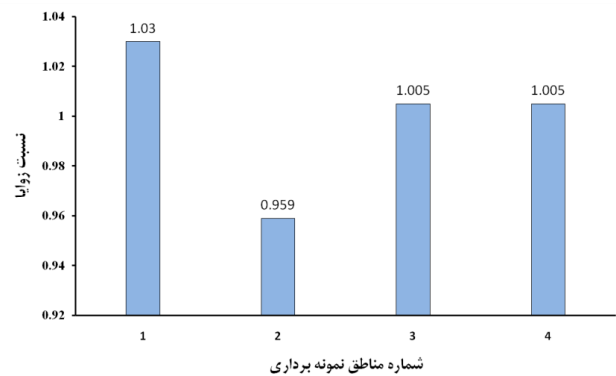
$$(\sum \alpha_i) = (n-2) \times 180$$
 (n تعداد اضلاع است)  
 با اندازه گیری زوایای داخلی چند ضلعی ها  $(\sum \beta_i)$  و مقایسه آن با  $\sum \alpha_i$  در چهار منطقه مطالعاتی تغییرات نسبت مجموع زوایای داخلی به دست آمده به واقعی  $(\frac{\sum \beta_i}{\sum \alpha_i})$  محاسبه گردید (شکل ۸). اگر این نسبت برابر واحد گردد، به این مفهوم است که مجموع زوایای به دست آمده با مقدار



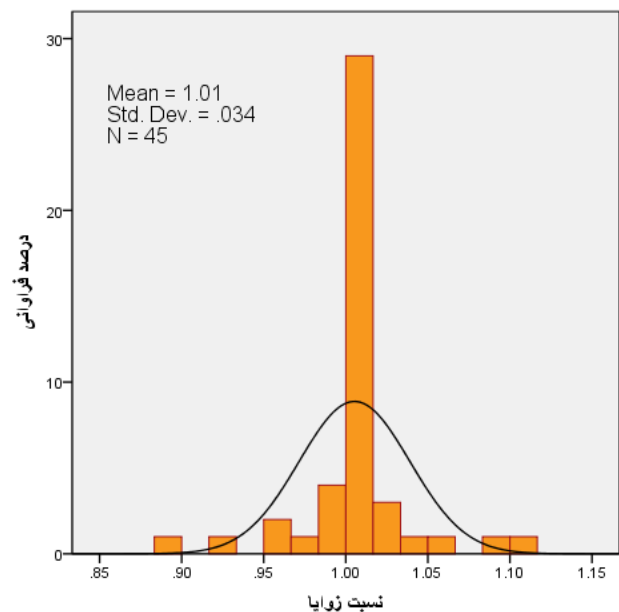
شکل ۷: هیستوگرام و منحنی توزیع نرمال معیارهای هندسی ترک‌های گلی

هر چه چند ضلعی منتظم تر باشد، دایره محاطی تماس بیشتری با اضلاع آن خواهد داشت و دقت محاسبه مساحت چند ضلعی با فرمول بالا، بیشتر می شود. از این تعریف می توان میزان تطابق چند ضلعی ها با یک چند ضلعی منتظم را بررسی نمود. با انتخاب تعدادی از چند ضلعی ها و محاط کردن بزرگترین دایره (شکل ۱۱) مساحت واقعی چند ضلعی ها اندازه گیری و با فرمول بالا مقایسه شدند و میزان همبستگی بالای بین نتایج این دو روش ژئومتریکی منتظم ترک ها را نشان می دهد (شکل ۱۲).

معمولاً اندازه گیری عمق دقیق ترک، مشکل است؛ چرا که با افزایش عمق، میزان بازشدگی ترک کم شده و تا این که محو می شود (شکل ۱۳). عمق ترک تابع عمق گل، اندازه تنش و شرایط محیطی است (Preston et al., 1997; Selen & Turer, 2011). سطح ترک در امتداد عمق ناصاف است و به همگنی اندازه دانه های رسوب بستگی دارد (Volde, 1999)، اما تقارن دو سمت ترک بسیار بالا است (شکل ۱۳). مقطع عرضی ترک ها V شکل است. لایه بندی رسوب شکل عرضی ترک را دچار تغییر می کند (Zhao et al., 2014). عرض ترک ها از چند میلی متر تا حدود ۱۰ سانتی متر در نمونه های مورد مطالعه در تغییر است. در نمونه های تازه عرض ترک ها به وضوح دیده می شود (شکل ۱۴). در ترک های بالغ عرض ترک ها در طول آن ثابت است و دارای مقداری به اندازه a است (شکل ۱۴)، اما در ترک های نابالغ عرض آن در طول آن دچار تغییر می شود به طوری که با نزدیک شدن به انتهای ترک عرض آن به حداقل ممکن می رسد و دارای عرض های a، b و c است (شکل ۱۵).

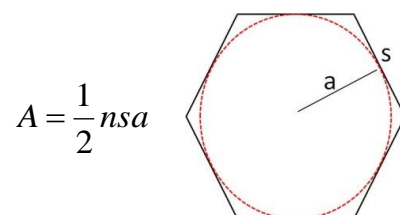


شکل ۸: میانگین نسبت زوایا برای ۴ منطقه نمونه برداری شده



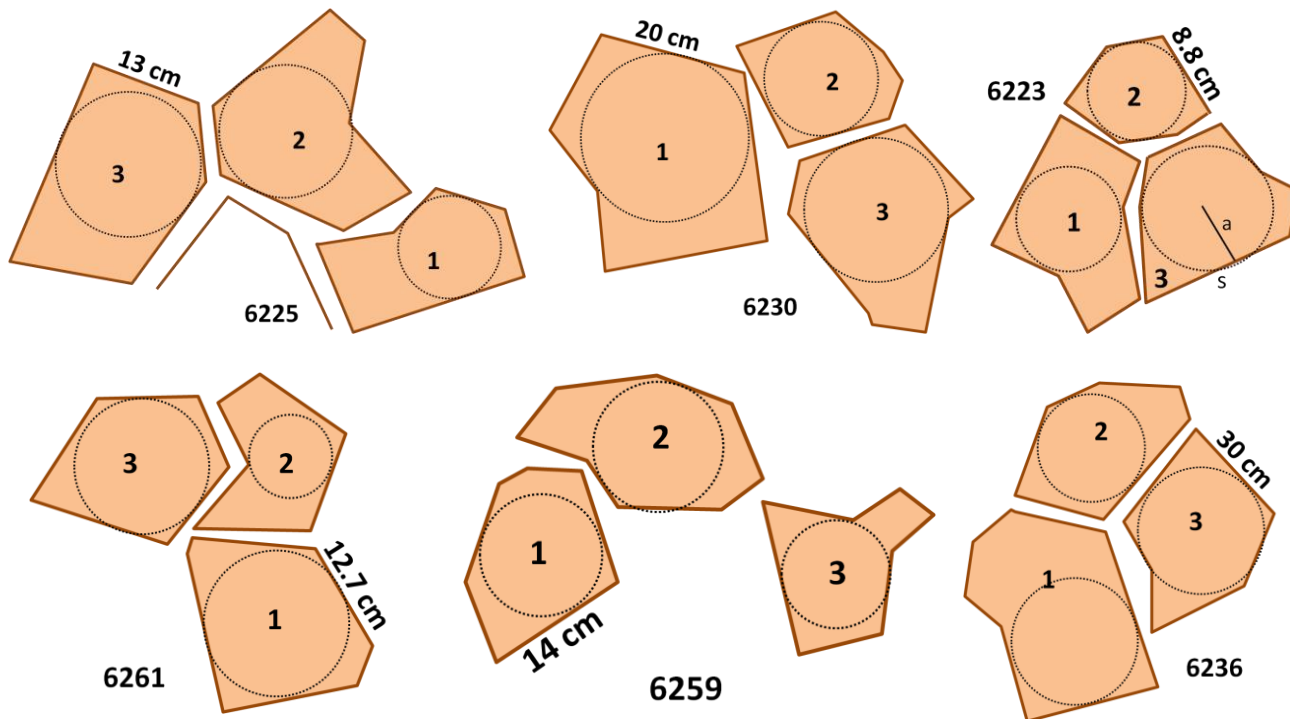
شکل ۹: فراوانی نسبت زوایا (برای کل نمونه های مطالعه شده)

بررسی ترک های گلی در مناطق مختلف دنیا نشان می دهد که ترک های گلی در ابعاد ۶ ضلعی دارای بیشترین فراوانی اند (Goehring, 2013). بررسی این تحقیق تعداد اضلاع را به طور متوسط ۶/۷ نشان می دهد. در علم هندسه ثابت شده است که مساحت یک n ضلعی منتظم با اندازه ضلع (s) و شعاع دایره محاطی (a) در ارتباط است (شکل ۱۰).

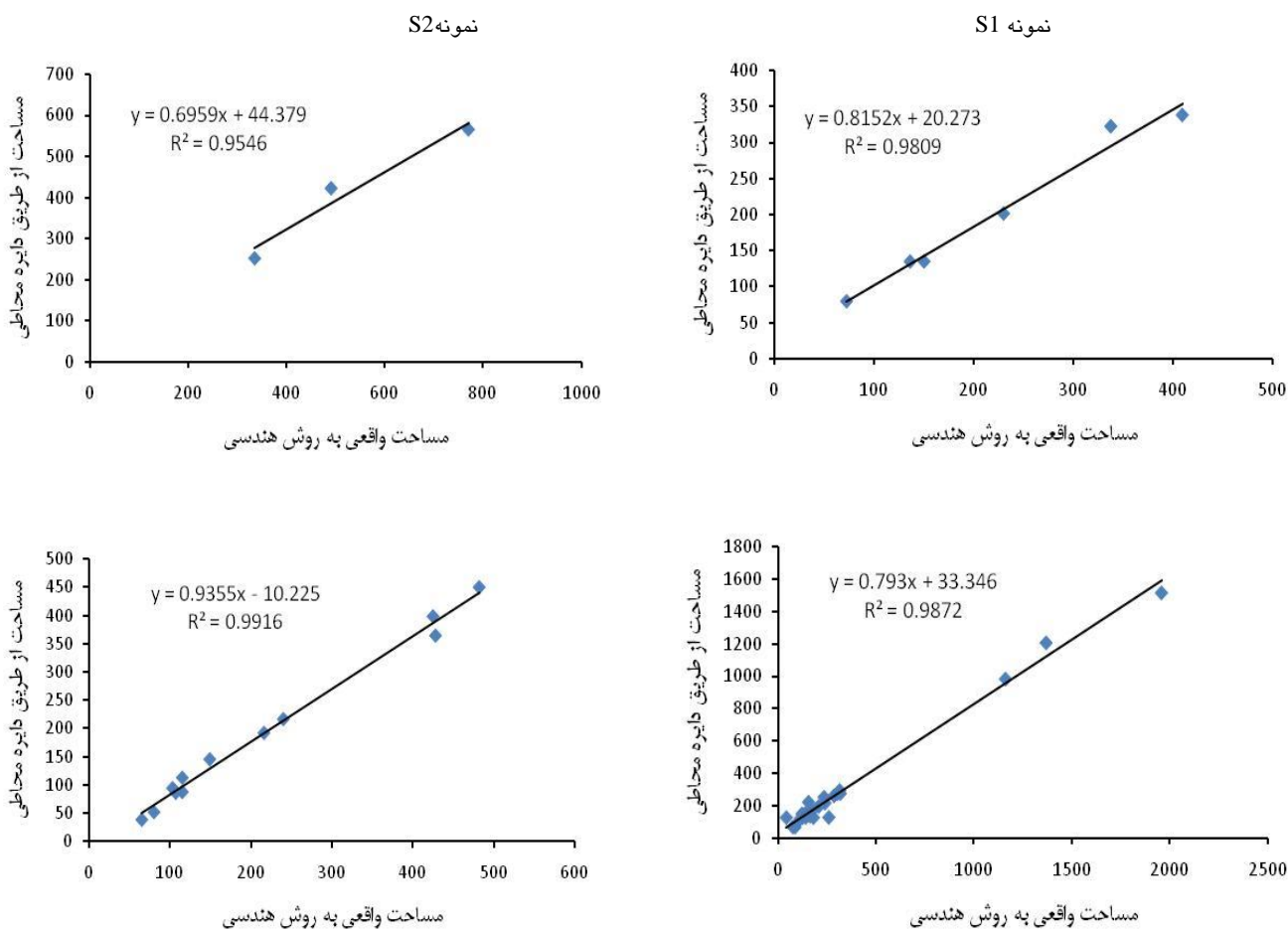


شکل ۱۰: اندازه گیری مساحت چند ضلعی به روش دایره محاطی.

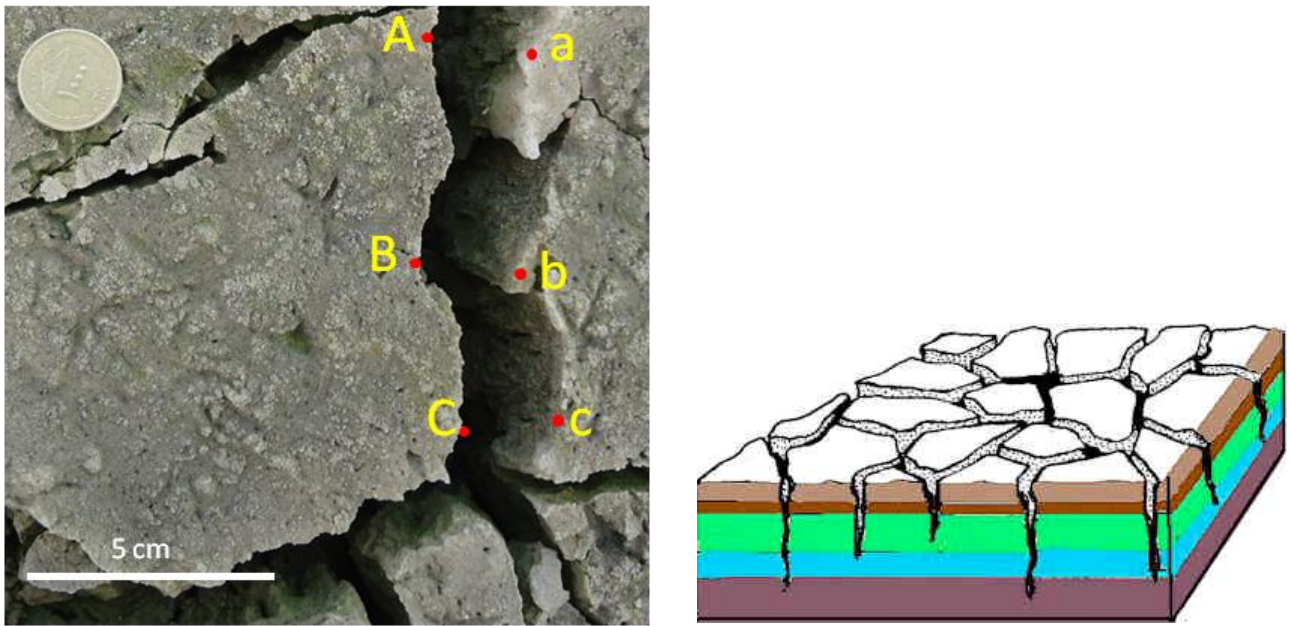




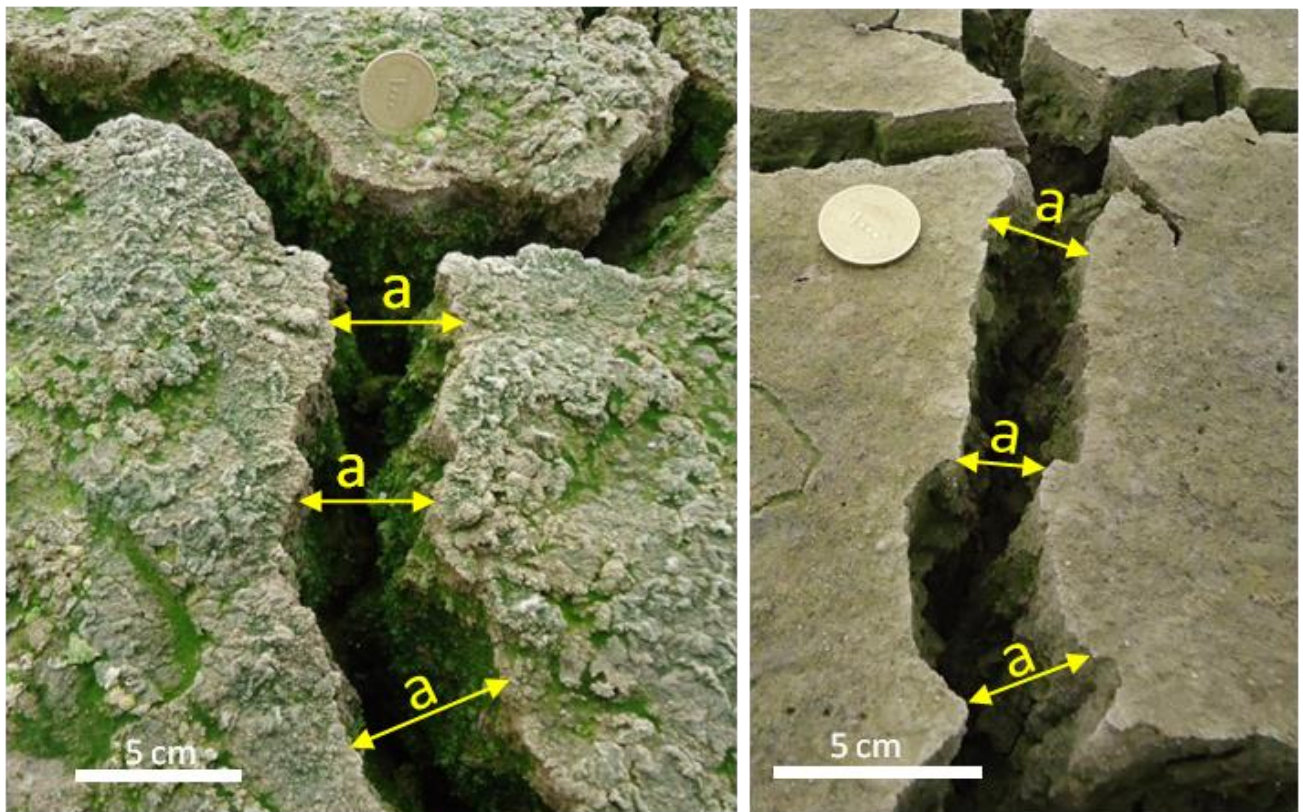
شکل ۱۱: دایره محاطی در تعدادی از چند ضلعی‌های بین ترک‌های گلی (اعداد چهار رقمی کد تصاویر ترک‌های گلی است).



شکل ۱۲: همبستگی مساحت چند ضلعی‌ها با دو روش مساحت واقعی و مساحت دایره محاطی.



شکل ۱۳: نمای سه بعدی از ترک‌های گلی و روند بازشدگی ترک نسبت به عمق (سمت راست) و تقارن دو سوی ترک در نقاط A-a، B-b، C-c (سمت چپ).



شکل ۱۴: نمایش عرض ترک و بافت سطحی آن در نمونه‌های مناطق S3 (سمت راست) و S4 (سمت چپ).

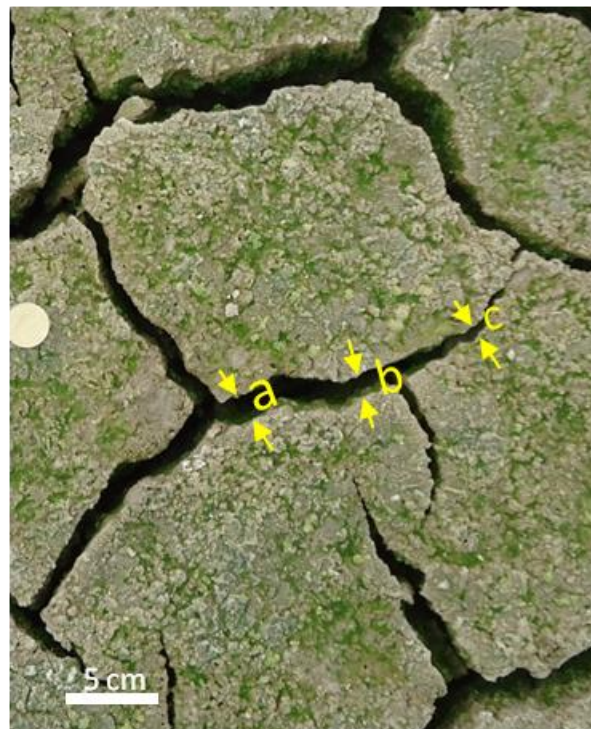


خاک (یونیفاید) از نوع رس لاغر (CL) معرفی شدند و نشان از همگنی نمونه‌ها از لحاظ ترکیب دانه‌بندی رسوبات و خواص خمیری دارد.

از لحاظ معیارهای هندسی باید گفت که ترک‌های مورد مطالعه به طور میانگین دارای تعداد  $6/7$  ضلع با طول متوسط هر ضلع  $10$  سانتی‌متر و مساحت  $307$  سانتی‌متر است. متوسط زاویه داخلی  $125$  درجه و مجموع زوایای داخلی آن‌ها  $836$  درجه است. از لحاظ مساحت همبستگی بالایی ( $r$  نزدیک به یک) بین چند ضلعی‌های ترک‌های گلی مورد مطالعه با یک چند ضلعی منظم وجود دارد و از لحاظ همبستگی زوایا با زوایای داخلی یک چند ضلعی منظم نمونه‌های مناطق  $S_1$  و  $S_2$  با نسبت زوایای  $1/03$  و  $0/96$  دارای کمترین همبستگی و برای نمونه‌های مناطق  $S_3$  و  $S_4$  این همبستگی بالا بوده و شاخص نسبت زوایا نزدیک به واحد است. علت ناهمگنی در نسبت زوایا، ایجاد انحنا در محل تلاقی بین اضلاع است که در اثر فرآیندهای بعد از ایجاد ترک که با قدمت ترک ارتباط داشته، به وجود می‌آید. لذا هرچه عمر ترک‌ها بیشتر شود زاویه بین اضلاع به منحنی نزدیکتر می‌شود.

عرض ترک‌های بالغ به علت اتمام تنش‌های انقباضی ثابت است و هیچ‌گونه کششی در دو سوی سطح ترک‌ها به وجود نمی‌آید، اما در ترک‌های نابالغ به علت وجود تنش‌های انقباضی عرض ترک دائم تغییر می‌کند تا این که به یک حد معینی می‌رسد و متوقف می‌شود. همچنین بافت سطحی ترک نسبت به عمق ناصاف بوده و به جنس رسوب، میزان همگنی رسوب و نرخ خشک شدن در امتداد عمق ترک بستگی دارد. در اثر عوامل فوق توزیع تنش انقباضی در امتداد عمقی ترک یکنواخت نبوده و سطح ناصافی را به وجود می‌آورد.

مقایسه میانگین معیارهای هندسی مناطق چهارگانه نشان می‌دهد که ترک‌های نسل اول این نمونه‌ها ژئومتریک



شکل ۱۵: نمایش عرض ترک نابالغ در منطقه  $S_3$

از دیدگاه رسوب شناسی با توجه به این که در رخساره‌های ریزدانه، ترک‌های گلی می‌توانند در سه مرحله همزمان با دیاژنز، دیاژنز دفنی و مرحله اپی دیاژنتیکی مشاهده شوند (Zhao et al., 2014)، عمده ترک‌های گلی ایجاد شده مانند ترک‌های گلی محدوده مطالعه در مخازن سد در مرحله همزمان با دیاژنز شکل می‌گیرند و ثابت شده که نوع و میزان رس و درصد شوری در ریخت‌شناسی و هندسه ترک‌ها بسیار مؤثر است و در مقیاس میکروسکوپی نیروی مؤینگی در شکل‌گیری ترک‌ها نباید نادیده انگاشته شود.

### نتیجه‌گیری

ویژگی‌های بافتی ترک‌های گلی چهار منطقه نمونه برداری شده در مخازن سد و شمگیر نشان می‌دهد که در نمودار بافتی مثلثی رسوبات در محدوده رس و رس سیلتی قرار دارند. میزان رس آن‌ها بین  $24$  تا  $64$  درصد است و مابقی آن‌ها در اندازه سیلت بوده و تمامی نمونه‌ها فاقد ماسه است. بر اساس نشانه خمیری، نمونه‌ها در سیستم طبقه‌بندی متحد

است و از الگوی Y مانند تبعیت می‌کند. کاربرد مستقیم استفاده از ترک‌های گلی در رسوب شناسی است. با توجه به این که گل‌سنگ‌ها به عنوان یکی از فراوان‌ترین سنگ‌های رسوبی در طول تاریخ زمین‌شناسی بیش از ۵۰ درصد توالی‌های رسوبی را شکل می‌دهند؛ بررسی رخساره ترک‌های گلی قدیمی شرایط محیط رسوبی منطقه را در زمان تشکیل نشان می‌دهد. از سوی دیگر در مکانیک خاک، آب شناسی و علم مواد می‌توان رفتار ترک‌های گلی را در شرایط مختلف مدل‌سازی کرد. جزئیات و ابهامات مختلفی از دیدگاه رسوب‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی برای شناسایی فرآیند تشکیل و ارزیابی ژئومتریک و تحلیل الگوهای شکل‌گیری ترک‌های گلی قدیمی و عهد حاضر وجود دارد که با بررسی‌های بیشتر در آینده مشخص خواهد گردید.

متفاوتی نسبت به هم دارند، اما با انجام آزمون فرض همگن بودن واریانس‌ها و فرض برابری میانگین‌ها (توزیع P-F Value و نمودار میانگین‌ها) مشخص شد که ویژگی‌های ترک‌ها و چند ضلعی‌های مناطق  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  با هم برابر بوده و گواهی بر عدم تفاوت دارد، ولی ویژگی‌های منطقه  $S_4$  خصوصاً تعداد اضلاع، مجموع زوایای داخلی و طول هر ضلع تفاوت معنی‌داری را با دیگر مناطق نشان می‌دهد. این تفاوت را می‌توان به خاصیت خمیری کم و عمق زیاد رسوب در منطقه  $S_4$  نسبت داد. با بررسی زاویه بین ترک‌های گلی، به طور کلی دو دسته از الگوی ترک‌های گلی وجود دارد. گروهی از آن‌ها T شکل هستند که زاویه تقاطع بین آن‌ها نزدیک به ۹۰ درجه است. گروهی دیگر با ایجاد شش ضلعی دارای تقاطع Y مانند می‌باشند و زاویه بین آن‌ها حدود ۱۲۰ درجه است. در نمونه‌های مورد مطالعه به طور متوسط میانگین زاویه بین ترک‌ها برابر ۱۱۴ درجه

## منابع

- امینی، آ.، رضایی، ح.، پارسایی، ر.، تیموری، ج.، ۱۳۸۵. امکان‌سنجی استفاده از مصالح رسی در ساخت کانال‌های آبیاری درجه ۱ و ۲ استان گلستان. شرکت توزیع و بهره‌برداری از آب گلستان.
- پاک، ع.، صمیمی، س.، ۱۳۹۱. ارزیابی رویکردهای مختلف در پیش‌بینی الگوهای ترک در عملیات ایجاد شکاف هیدرولیکی در مخازن نفتی و ارائه یک رویکرد جدید. *مجله پژوهش نفت*، ۷۲: ۵۸ - ۷۳.
- خوشروان آذر، م. ر.، صالحی، و.، ۱۳۸۶. تعیین ابعاد ترک سطحی بر مبنای معیار LBB در مواد ناهمسان. *پانزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک*.
- قزوینیان، ع.، نوروزی، پ.، ۱۳۹۲. مطالعه آزمایشگاهی انتشار ترک در نمونه‌های با درزه بسته و باز تحت بارگذاری تک‌محوری. *مجله عمران مدرس*، ۱۳: ۷۵ - ۸۷.
- میرزایی نصیرآباد، ح.، کاکایی، ر.، حسنی، ب.، جلالی، س.، ۱۳۸۸. ارزیابی دو معیار شکست مبتنی بر ضرایب تمرکز تنش و مؤلفه‌های تنش برای پیش‌بینی جهت انتشار ترک در محیط‌های شبه سنگی. *مهندسی معدن*، ۴ (۸): ۱-۱۲.
- میرزایی نصیرآباد، ح.، کاکایی، ر.، حسنی، ب.، جلالی، س.، ۱۳۹۱. مطالعه آزمایشگاهی تأثیر آرایش ترک‌ها در رفتار شکست نمونه‌های شبه سنگی تحت بارگذاری فشاری تک‌محوری. *مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها*، ۲ (۱): ۲۳ - ۳۴.

- Behal, J., & Solodyankin, K., 2012. Crack growth simulation in the course of industrial equipment life extension. *20th SVSFEM ANSYS Users Group Meeting and Conference*, 9 p.
- Bohn, S., 2005. Hierarchical crack pattern as formed by successive domain divisions. II. From disordered to deterministic behavior. *Physical Review*, 71: 046215-1 -046215-7.
- Carter, B.J., Wawrzynek, P.A., & Ingraffea, A.R., 2003. Automated 3D Crack Growth Simulation. *NASA (NAG-1-1184)*: 1-40.
- Desbenoit, B., Galin, E., & Akkouche, S., 2005. Modeling cracks and fractures. *Visual Computer*, 21: 717-726.
- El-Maarry, M.R., Watters, W., MckKeown, N., Carter, J., Noe Dobra, E., Bishope, J., Pommerol, A., & Tomas, N., 2014. Potential desiccation cracks on Mars: A synthesis from modeling, Analog-field studies and global observations. *Icarus*, 241: 268-448.
- Fischer, L.L., & Beltz, G.L., 1999. Effect of crack geometry on dislocation nucleation and cleavage thresholds. *Materials Research Society Symposium*, 539: 57-62.
- Gobron, S., & Chiba, N., 2001. Crack pattern simulation based on 3D surface cellular automata. *Visual Computer*, 17: 287-309.
- Goehring, L., 2013. Evolving fracture patterns: columnar joints, mud cracks, and polygonal terrain. *Applied Clay Science*, 40 (3):103-118.
- Goehring, L., Conroy, R., Akhter, A., William, J., Clegg, W.J., & Routh, A.F., 2010. Evolution of mud-crack patterns during repeated drying cycles. *Applied Clay Sciences*, 37: 89-97.
- Harris, R.C., 2004. Giant desiccation cracks in Arizona, Arizona geological survey. *Open file report*, 93p.
- Jones, R., Wallbrink, C., Molent, L., & Pitt, S., 2006. A Multiscale approach to crack growth. *Monash University, Air Vehicles Division, DSTO*, 84p.
- Le, J.L., Bazant, Z.P., & Bazant, M.Z., 2009. Subcritical crack growth law and its consequences for life time statistics and size effect of quasi brittle structures. *Journal Physics D: Applied Physics*, 42: 2140-2148.
- Morgan, P.G., 1959. The geometry of surface cracks. *Applied Science Research*, 9: 148- 152.
- Oda, M., 1986. Stereology on crack geometry. *In: Research of pattern Formation*. Tokyo, Japan: *KTK Scientific Publishers*, p.517-553
- Preston S., Griffiths B.S., & Young, I.M., 1997. An investigation into sources of soil crack heterogeneity using fractal geometry. *Journal of Soil Science*, 48: 31-37.
- Pugno, N., Ciavarella, M., Cornetti, P., & Carpinteri, A., 2006. A generalized Paris law for fatigue crack growth. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 54: 1333-1349.
- Ritchie, R.O., 2005. Incomplete self-similarity and fatigue-crack growth. *International Journal of Fracture*, 132: 197-203.
- Selen, F., & Turer, D., 2011. Factors Effecting Mud Crack Formation in Ankara Clay, World Academy of Science, *Engineering and Technology*, 56: 166- 167.
- Trombetta, G.L., 2011. Facies analysis, geometry and architecture of a Carnian carbonate platform: The Settsass/Rechitecture reef system (Dolomites, Southern Alps, Northern Italy). *Geological of Application*, 8: 56-75.
- Velde, M., 1999. Structure of surface cracks in soil and muds. *Geoderma*, 93: 101-124.
- Vethe, S., 2012. Numerical simulation of fatigue crack growth, The Norwegian university of Science and technology department of engineering design and materials. *Unpublished thesis*, 36 p.
- Vikram, N., & Kumar, R., 2013. Review on Fatigue-Crack Growth and Finite Element Method. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 4 (4): 833- 843.
- Vogel, H.J., Hoffmann, H., Leopold, A., & Roth, K., 2005. Studies of crack dynamics in clay soil: II. A physically based model for crack formation. *Geoderma*, 125: 213-223.
- Wang, Z., & Nakamura, T., 2004. Simulations of crack propagation in elastic-plastic graded materials. *Mechanics of Materials*, 36: 601- 622.



- Zafosnik, B., Ren, Z., Ulbin, M & Flaker, J., 2007. Evaluation of stress intensity factors using finite elements. *Engineering Geology*, 32: 134-145.
- Zhao, Z., Guo, Y., Wang, Y., Liu, H., & Zhang, Q., 2014. Growth patterns and dynamics of mud cracks at different diagenetic stages and its geological significance. *International Journal of Sediment Research*, 29: 82-98.

## Evaluation of mud crack geometry in sedimentary facies of Holocene fine grain sediments (Case Study; Voshmgir dam reservoirs in Gorgan)

Rezaei, H. \*, Amini, A.

Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Golestan University

\*E-mail: h.rezaei@gu.ac.ir

### Introduction

Mud cracks are primary polygonal structures that are formed by extension strains during drying period. Major factor in the formation of cracks are humidity and temperature. Quality and quantity of clay minerals, topography, sediments size, depth of cracks, water salinity and bioturbation are also important in cracks distribution patterns. Studies have shown that cracks are lattice type in gentle slope areas and rectangular type in elevated slopes. Crack's width and length, components size, and fractal characteristics are environmental factors in cracks distribution patterns.

### Materials and Methods

Fifty samples were collected from four studied regions of Voshmgir dam reservoir, north of Gorgan (S1-S4). Geometrical characteristics of cracks were determined. Samples analyzed for granulometry aspect, using hydrometry method, liquid limit identifying and plastic limit identifying in the lab. After identification of mud cracks and processing, geometrical parameters such as drawing polygonal geometrical shapes between cracks, number of polygonal shapes between cracks, polygonal shapes area and their internal angles and angles between crossed cracks were measured and analysed statistically in four studied regions and other regions. In general, photos were taken in 45 spots in 4 studied regions from mud cracks and suitable scale were dedicated to the photos in order to determine geometrical parameters. Then, using image's analysis software, geometrical parameters of each crack were measured and the average were computed

### Discussion and Conclusion

Textural characteristics of samples collected from four regions in Voshmgir dam reservoirs have shown that sediments are classified in clay and silty clay zones in triangular textural diagram and CL clay in unified classification of soils and were formed in diagenetic phase. Clay mineralogy of sediments include 10% chlorite, 40% illite, 30% vermiculite and 20% kaolinite. Clay minerals of samples were originated in east of Golestan loesses.

From geometric point of view, cracks had an average of 6.7 sides, 10 cm length of each sides and 307 cm<sup>2</sup> area. Mean internal angle was 125 ° and total internal angles 836 °. From superficial aspect, there is a good correlation between studied mud cracks polygons and an ordered polygon. Heterogeneity in angles relations was due to curve forming in sides crossed areas after forming cracks which were related to crack age so the older the cracks become, the angle between sides is more similar to a curve.

Comparing mean geometric parameters in four studied regions have shown that first generation cracks are different from each other in geometric aspects. Due to F.distribution, P.Value and means diagram, cracks parameters and polygons in S1, S2 and S3 areas were the same but S4 characteristic parameters especially total internal angle and each side's length have meaningful difference to the other regions due to low plastic limit and high depth of sediments in S4 area.

Studies of angles between mud cracks have shown that there are two patterns of mud cracks. Some of them are T- shaped in which the crossed angle is approximately 90°. The other group, by creating hexagonal shapes, are Y- shaped and the angle between them are approximately 120°. Studied samples are more similar to Y- shaped pattern with a mean angle of 114°.

**Keywords:** Mud crack; Fine grain facies; Geometric; Voshmgir Dam reservoir; Golestan.

---

**References**

- Amini, A., Rezaei, H., Parsaee, R., Teymori, J., 2006. Possibility of clay materials in produce of type 1 and 2 irrigation channel in Golestan province, Golestan water distribution co.
- Desbenoit, B., Galin, E., & Akkouche, S., 2005. Modeling cracks and fractures. *Visual Computer*, 21: 717-726.
- Goehring, L., 2013. Evolving fracture patterns: columnar joints, mud cracks, and polygonal terrain. *Applied Clay Science*, 40 (3):103-118.
- Goehring, L., Conroy, R., Akhter, A., William, J., Clegg, W.J., & Routh, A.F., 2010. Evolution of mud-crack patterns during repeated drying cycles. *Applied Clay Sciences*, 37: 89-97.
- Velde, M., 1999. Structure of surface cracks in soil and muds. *Geoderma*, 93: 101-124.
- Vogel, H.J., Hoffmann, H., Leopold, A., & Roth, K., 2005. Studies of crack dynamics in clay soil: II. A physically based model for crack formation. *Geoderma*, 125: 213–223.
- Zhao, Z., Guo, Y., Wang, Y., Liu, H., & Zhang, Q., 2014. Growth patterns and dynamics of mud cracks at different diagenetic stages and its geological significance. *International Journal of Sediment Research*, 29: 82-98.