

## معرفی و مکانیزم تشکیل انواع ساخت‌های تغییر شکل یافته رسوبات نرم در توالی کلوت‌های شهداد، جنوب باختر بیابان لوت

حامد زندمقدم<sup>۱\*</sup> و هدا باوی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران  
۲- دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

نویسنده مسئول: zand1883@uk.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۶

نوع مقاله: پژوهشی

### چکیده

کلوت‌های شهداد شامل مجموعه‌ای از تپه‌های طولی با روند شمال باختری- جنوب خاوری بوده که در شمال شهداد (خاور کرمان) و جنوب باختر بیابان لوت قرار دارند. توالی عمودی کلوت‌ها عمدتاً از زوج لایه‌های ماسه‌ای و گل‌سنگی تشکیل شده که در یک محیط دریاچه‌ای موقت رسوب‌گذاری کرده‌اند. علاوه بر ساخت‌های رسوبی فیزیکی، در این مجموعه انواع ساخت‌های تغییر شکل یافته رسوبات نرم مشاهده می‌شود که تحت تاثیر فرایند مایع‌شدن و اغلب در دو مرحله مایع‌گونی و سیال‌شدن رسوبات تشکیل شده‌اند. از مهم‌ترین ساخت‌های تغییر شکل یافته در زمان مایع‌گونی می‌توان به ساخت‌های وزنی و شعله‌ای، چین‌خوردگی‌ها و طبقات پیچیده و ساخت‌های تی‌پی اشاره کرد. در مرحله سیال‌شدن ساخت‌های توپی و بالشی و ساخت‌های فرار آب و تزریق رسوب تشکیل شده‌اند. برش‌های اتوکلاستی و ریزگسل‌ها نیز اندکی پس از سفت شدن رسوبات شکل گرفته‌اند. منشاء و عامل اصلی تشکیل این ساخت‌ها در دو دسته اندوژنیک (فرایندهای رسوبی و محیط رسوبی) و اگزوژنیک (حرکات ناشی از زمین‌لرزه) تقسیم می‌شود.

**واژگان کلیدی:** ساخت‌های تغییر شکل یافته رسوبات نرم، مایع‌گونی، سیال‌شدن، کلوت‌های شهداد

### ۱- پیشگفتار

اشباع از آب است که باعث کاهش چشمگیر مقاومت برشی شده است (وسنیک و همکاران، ۲۰۲۱؛ منگ و همکاران، ۲۰۲۱). از این رو، مهم‌ترین فرایند رسوبی در تشکیل این ساخت‌ها، اختلاف وزن بین لایه‌های نرم و اشباع از آب است. علاوه بر فرایندهای رسوبی، تنش‌های لرزه‌ای ناگهانی و یا دوره‌ای حاصل از زمین‌لرزه‌ها، حرکات تکتونیکی و فرایندهای ولکانیکی نیز می‌تواند در شکل‌گیری SSDS ها موثر باشند (شانموگام، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷؛ زو و همکاران، ۲۰۱۷؛ فنگ، ۲۰۱۷). ساخت‌های تغییر شکل یافته رسوبات نرم در تمامی محیط‌های رسوبی تشکیل و قابل شناسایی هستند با این حال به نظر می‌رسد در رسوبات دانه‌ریز محیط‌های آبی و مخصوصاً در محیط‌های عمیق دریایی بیشتر مشاهده می‌شوند (برای مثال، شانموگام، ۲۰۱۷، ۲۰۲۱). هر چند که مطالعات زیادی در ارتباط با

به طور کلی ساخت‌های تغییر شکل یافته رسوبات نرم<sup>۱</sup> به مجموعه‌ای از ساخت‌های رسوبی اطلاق می‌شود که در هنگام یا بعد از رسوب‌گذاری اما قبل از فرایند سنگی شدن یا سفت شدن رسوبات اتفاق افتاده و سبب تغییر شکل در لایه‌های رسوبی می‌شود (ون لون، ۲۰۰۹). این ساخت‌ها در رسوباتی که هنوز تحت تاثیر فرایندهای اصلی دیاژنز قرار نگرفته‌اند، به وجود آمده (اون و همکاران، ۲۰۱۱) و لذا ساخت‌های تغییر شکل یافته‌ای که در اثر فرایندهای دیاژنتیکی تشکیل می‌شوند را نمی‌توان جزو این دسته قرار داد. به عقیده شانموگام (۲۰۲۱) این ساخت‌ها در دو شرایط قبل از سنگی شدن<sup>۲</sup> و مایع‌شدن<sup>۳</sup> رسوبات تشکیل می‌شوند. به عبارتی دیگر، عامل بدیهی در تشکیل و گسترش SSDS ها، مایع‌گونی<sup>۴</sup> و سیال شدن<sup>۵</sup> در رسوبات

<sup>۴</sup> liquefaction

<sup>۵</sup> fluidization

<sup>۱</sup> soft-sediment deformation structures or SSDS

<sup>۲</sup> perlitification

<sup>۳</sup> liquification

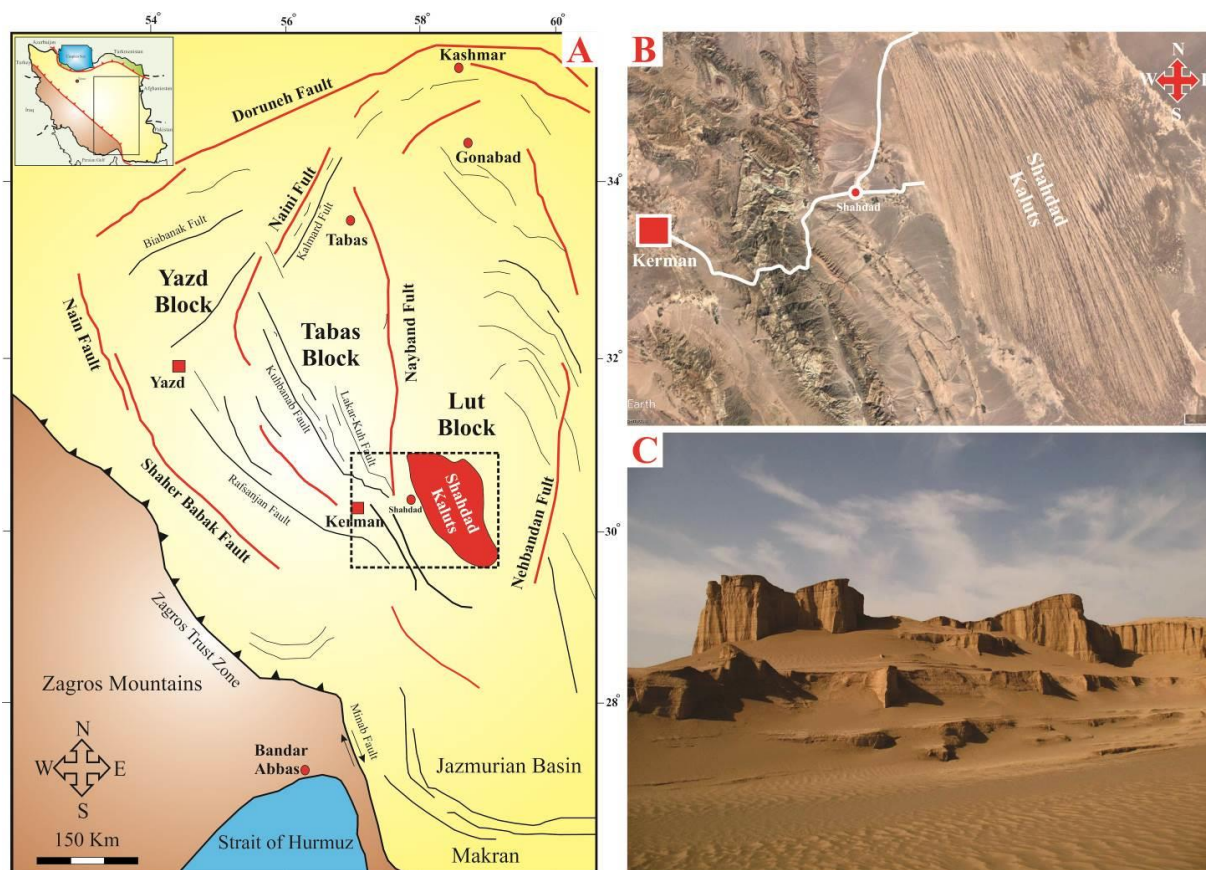
دسته از ساخت‌ها در نظر می‌گیرند. در پژوهش حاضر سعی شده که بر اساس خصوصیات شکل‌شناسی در مطالعات صحرایی، انواع ساخت‌های تغییر شکل یافته در رسوبات نرم کلوتهای شهداد (توالی عمودی تپه‌ها) معرفی شوند و با توجه به دیدگاه‌های افراد مختلف در تقسیم‌بندی این ساخت‌ها (موارد ذکر شده در فوق) و همچنین با استفاده از مطالعات موردی، در ارتباط با مکانیزم تشکیل ساخت‌های شناسایی شده مباحثی ارائه شود.

## ۲- منطقه مورد مطالعه و روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه از لحاظ جغرافیایی در خاور استان کرمان و در بخش جنوب باختری بیابان لوت و از دیدگاه زمین‌شناسی نیز در جنوب باختر بلوک لوت و در نزدیکی گسل نابند (خاور گسل) قرار دارد. کلوتهای شهداد شامل مجموعه‌ای از تپه‌های طولی و دلفینی شکل با روند شمال باختری-جنوب‌خاوری و به مساحت بیش از ۱۰ هزار کیلومتر مربع بوده (شکل ۱) که به عنوان یکی از پدیده‌های زیبا و منحصر به فرد در ایران و جهان محسوب شده و عمدتاً از ذراتی در اندازه ماسه ریز و سیلت با جورشدگی خوب تشکیل شده است (زندمقدم، ۱۳۹۵). این تپه‌ها حاصل فرسایش مشترک آبی-بادی بوده (احسانی و کیل، ۲۰۰۸) و بنظر می‌رسد در یک محیطی قاره‌ای (دریاچه‌ای-صحرایی) تشکیل شده‌اند (ابراهیمی میمند، ۱۳۹۷). راه‌های دسترسی به این منطقه، جاده آسفالتی کرمان-شهداد و جاده شهداد-نهبندان است. در فاصله ۲۰ تا ۴۰ کیلومتری شهداد، جاده مذکور بخش‌های شمال باختری کلوتهای را قطع کرده که همواره پذیرای گردشگران مختلفی است. با توجه به حجم بالای ماسه‌های بادی، لذا رسیدن به قسمت‌های مرکزی کلوتهای به تجهیزات خاص بیابان‌گردی نیاز است از این رو، مطالعات در این پژوهش حداکثر در فواصل ۱۰ کیلومتری خاور و باختر جاده شهداد-نهبندان انجام شده است. در توالی عمودی (بدنه) کلوتهای و همچنین نهشته‌های بینی آن‌ها انواع ساخت‌های رسوبی فیزیکی از قبیل ریپل‌مارک‌ها و طبقات موازی و مورب ریپلی مشاهده می‌شود. علاوه بر این ساخت‌های فیزیکی، تعداد قابل‌ملاحظه‌ای از ساخت‌های تغییرشکل یافته رسوبات نرم نیز مشاهده می‌شود که شناسایی و تفکیک آن‌ها می‌تواند به تفسیر شرایط رسوب‌گذاری و پس از رسوب‌گذاری کمک شایانی کند.

ساخت‌های تغییر شکل یافته انجام شده است اما همچنان در مورد ساز و کار تشکیل این ساخت‌ها اتفاق نظر وجود ندارد و پژوهشگران مختلف تفاسیر گوناگونی در مورد تشکیل یک ساخت رسوبی تغییر شکل یافته انجام داده‌اند به طوری که برخی از پژوهشگران عوامل تکتونیکی (فشار و کشش تکتونیکی در مجموعه رسوبات و تنش‌های زمین لرزه)، و برخی فرایندهای فیزیکی رسوبی (توزیع متفاوت فشار بین لایه‌های رسوبی، فشار حاصل از خروج آب در بین رسوبات و لایه‌های رویی، فشار حاصل از خروج آب در بین رسوبات و تغییرات شیب کف بستر) را موثرتر دانسته‌اند (برای مثال، شانموگام، ۲۰۱۷). مالتمن (۱۹۸۴) برای اولین بار ادعان داشت که عنوان ساخت‌های تغییر شکل یافته به شکل گمراه کننده‌ای استفاده می‌شود و نمی‌تواند ماهیت فرایند تشکیل را منتقل کند زیرا برای تشکیل این ساخت‌ها طیف گسترده‌ای از فرایندها می‌تواند حائز اهمیت باشد. از این رو، اخیراً در مقالات علمی پیشنهاد می‌شود که نام مشخص شده برای یک ساخت تغییر شکل یافته ذکر شود تا در ارتباط با مکانیزم تشکیل آن بتوان بحث بهتری کرد.

ساخت‌های تغییر شکل یافته رسوبات نرم توسط افراد مختلف و از نقطه نظرهای مختلف مورد تقسیم‌بندی قرار گرفته‌اند. برخی از پژوهشگران (برای مثال، آلن، ۱۹۸۲؛ کولینسون، ۱۹۹۴؛ ون‌لون، ۲۰۰۹) فرایندهای رسوبی را معیار تقسیم‌بندی قرار داده‌اند به طوری که فرایندهای رسوبی فیزیکی و شیمیایی را مهم‌ترین عامل تشکیل این ساخت‌های رسوبی به شمار آورده‌اند. از آنجایی که زمین‌لرزه و حرکات لرزه‌ای نیز در تشکیل این ساخت‌ها موثر است لذا برخی از پژوهشگران (برای مثال، گرب و همکاران ۲۰۰۲؛ سو و سون، ۲۰۱۲) این ساخت‌ها را با این دیدگاه تقسیم‌بندی کرده و افرادی نیز (برای مثال، والدرون و گاگون، ۲۰۱۱) از نقطه نظر محیط‌های تکتونیکی این تقسیم‌بندی را انجام داده‌اند. علاوه بر موارد فوق، تقسیم‌بندی‌هایی از دیدگاه شکل‌شناسی، محل قرارگیری در توالی و زمان تشکیل ساختار نیز صورت گرفته است (توپال و ازکول، ۲۰۱۴؛ هی و کیاوو، ۲۰۱۵). از طرف دیگر، در این تقسیم‌بندی‌ها بعضاً ساخت‌هایی جدید و یا نام‌هایی متفاوت برای انواع ساخت‌های تغییر شکل یافته انجام شده است (نگاه کنید به شانموگام، ۲۰۱۷) و یا ساخت‌هایی که از دیدگاه برخی افراد جزو SSDS ها محسوب نمی‌شوند، برخی دیگر آن‌ها را جزو این



شکل ۱. (A) موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی کلوتهای شهداد در خرد قاره‌های ایران مرکزی و در حاشیه جنوب باختری بلوک لوت. (B) تصویر ماهواره‌ای از مجموعه کلوتهای شهداد و موقعیت و راه‌های دسترسی آن نسبت به شهر کرمان. (C) تصویر صحرایی از یک کلوته.

ساخت‌های وزنی بوده اغلب در اندازه ماسه متوسط دانه هستند که بر روی لایه گلی قرار گرفته است (شکل A, C). همچنین رسوبات دانه درشت گراولی که بر روی لایه‌های ماسه‌ای یا گلی نیز قرار گرفته باشند در برخی موارد همراه با آثار وزنی هستند (شکل B-2). ساخت‌های شعله‌ای نیز که دارای شکل‌ها و اندازه‌های مختلفی بوده، تنها در حدفاصل لایه‌های ماسه‌ای و گلی مشاهده می‌شوند به طوری که لایه‌های گلی به شکل استوانه‌ای و شعله مانند در بین ماسه‌ها گسترش یافته است (شکل D-2). فراوانی این ساخت‌ها نسبت به ساخت‌های وزنی کمتر بوده اما به طور پراکنده در برخی از کلوته‌ها مشاهده می‌شوند.

تفسیر: ساختارهای وزنی معمولاً در مجموعه‌ای از لایه‌هایی با چگالی متفاوت مشاهده می‌گردد که این اختلاف چگالی سبب ناپایداری‌های گرانشی ناشی از گرادپان چگالی معکوس می‌شود (اون، ۲۰۰۳). چگالی معکوس معمولاً از تفاوت در ترکیب سنگ‌شناسی لایه‌ها حاصل

۳- ساخت‌های شناسایی شده و مکانیزم تشکیل  
ساخت‌های شناسایی شده در این پژوهش صرفاً مربوط به بدنه (توالی عمودی) کلوته‌ها بوده و ساخت‌های عهد حاضر بین کلوته‌ها را شامل نمی‌شود. این ساخت‌ها اغلب بین لایه‌های ماسه‌ای و گلی تشکیل شده و به ندرت در حدفاصل لایه‌های گراولی با لایه‌های ماسه‌ای - گلی نیز مشاهده می‌شوند.

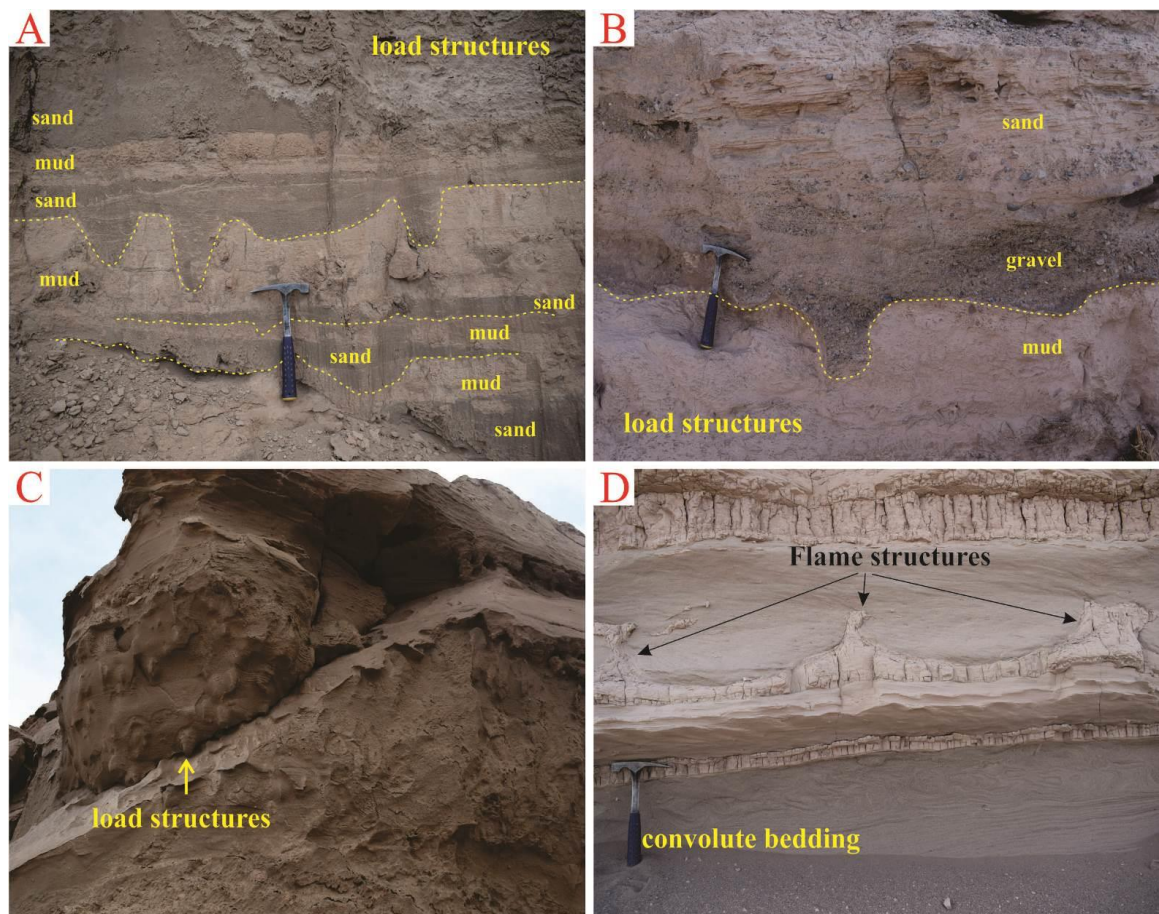
### ۳-۱- ساخت‌های وزنی و شعله‌ای<sup>۱</sup>

توصیف: ساخت‌ها یا قالب‌های وزنی شامل برجستگی‌های نامنظمی بوده که در سطح زیرین لایه‌های ماسه‌ای و بعضاً لایه‌های گراولی مشاهده شده است (شکل ۲). میزان فرورفتگی لایه‌های بالایی در داخل لایه‌های زیرین سبب شده که این ساخت‌ها در اندازه‌ها و تعداد مختلفی یافت شوند (شکل A-2). در امتداد و سطح زیرین لایه، بعضاً یک و یا چندین قالب وزنی مشاهده می‌شود. لایه‌هایی که دارای

<sup>1</sup> load and flam structures

می‌شوند. چنین ناپایداری رسوبی توسط وارونگی چگالی ظاهری ایجاد می‌شود و در مقابل ویسکوزیته جنبشی بین لایه‌های متناوب ماسه و گل را سبب می‌شوند. لازم به ذکر است که ساخت‌های وزنی و شعله‌ای به تنش‌های لرزه‌ای نیز نسبت داده شده‌اند (برای مثال، توپال و ازکول، ۲۰۱۴؛ رنا و همکاران ۲۰۱۶) به طوری که در حین بارگذاری سیکی روانگرایی ناشی از زلزله، ساخت‌های وزنی و شعله‌ای در نتیجه اختلاف فشار ناشی از ته‌نشست یک لایه ماسه متراکم بر روی یک لایه گل با تراکم کمتر که مانند یک مایع رفتار می‌کند، در نظر گرفته می‌شود. با این وجود، این ساخت‌ها ممکن است در دوره‌هایی از فشار هیدرولیکی رو به بالا در هنگام زلزله نیز تشکیل شوند (باتس و همکاران، ۱۹۹۷).

می‌شود به طوری که یک لایه با چگالی بیشتر (معمولاً ماسه‌ها) که بر روی یک لایه با چگالی کمتر (معمولاً گل) قرار می‌گیرد باعث ایجاد ساختارهای وزنی می‌شود (منگ، ۲۰۲۱). ساخت‌های وزنی معمولاً در مقیاس سانتی‌متری مشاهده می‌شوند که این امر احتمالاً به این دلیل است که هر دو بستر تغییر شکل یافته نازک هستند (به طور متوسط چندین سانتی‌متر) و به راحتی قدرت حرکت در طی روان‌شدگی به دست می‌آورند و سبب تشکیل ساختارهای وزنی در اندازه محدود می‌شود (اون، ۲۰۰۳). مطالعات مختلفی نشان داده که ساخت‌های وزنی و شعله‌ای در ارتباط نزدیک با یکدیگر شکل می‌گیرند و داری منشاء پیچیده‌ای از فرایندهای رسوبی هستند (کولینسون، ۱۹۹۴؛ داسگپتا، ۱۹۹۸). این امر به گونه‌ای است که این ساختارها معمولاً به ناپایداری مکانیکی رسوبات نسبت داده



شکل ۲. تصاویری از قالب‌های وزنی و ساخت‌های شعله‌ای در مجموعه کلوت‌ها. (A) قالب‌های وزنی در قاعده طبقات ماسه‌سنگی که در نهشته‌های گلی فرور رفته است. (B) قالب وزنی در قاعده لایه گراولی که در نهشته‌های گلی فرور رفته است. (C) آثار قالب‌های وزنی در زیر سطح لایه ماسه‌سنگی. (D) ساختمان‌های شعله‌ای که در لایه گلی مابین طبقات ماسه‌ای مشاهده می‌شود. طبقات ماسه‌ای زیرین دارای ساختمان‌های پیچیده هستند.

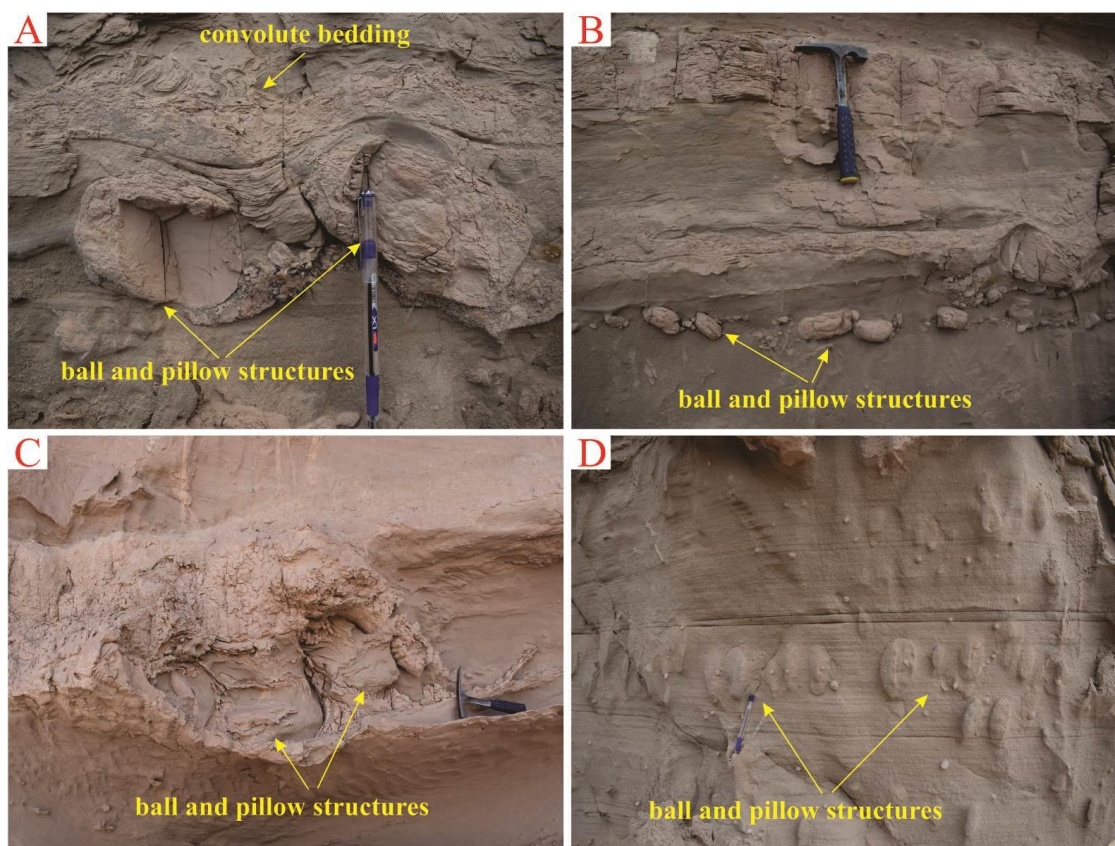


۳-۲- ساخت‌های توپیی و بالشی<sup>۱</sup>

توصیف: ساخت‌های توپیی و بالشی در هر دو مجموعه رسوبات ماسه‌ای و گلی مشاهده می‌شوند (شکل ۳). این امر به گونه‌ای است که قطعات گرد شده‌ای از جنس ماسه یا گل در اندازه‌های مختلف در داخل لایه‌های ماسه‌ای یا گلی فرورفته‌اند. برخلاف امر رایج، جنس قطعات در نهشته‌های کلویت اغلب گلی است که در بین رسوبات ماسه‌ای قرار گرفته‌اند (شکل ۳-A, B) با این وجود، حضور قطعات ماسه‌ای به شکل توپیی و بالشی نیز در داخل نهشته‌های گلی مشاهده شده است که بعضاً سبب پیش‌پیش در لایه‌های گلی نیز شده است (شکل ۳-C). معمولاً اندازه قطعات توپیی و بالشی بین ۵ تا ۳۰ سانتی‌متر در تغییر است با این حال قطعات بزرگ‌تر از ۳۰ سانتی‌متری نیز مشاهده شده است. در برخی موارد، ساخت‌های توپیی و بالشی در لایه‌های با ترکیب مشابه (ماسه‌ای) نیز مشاهده شده به طوری که توده‌ها و قطعاتی از جنس ماسه در داخل

رسوبات ماسه‌ای قرار گرفته‌اند (شکل ۳-D). در حالت اخیر، تفکیک ساخت‌های توپیی و بالشی از نهشته‌های میزبان به سختی همراه بوده و در اغلب موارد قطعات از اندازه‌های کوچک‌تری (بین ۲ تا ۱۰ سانتی‌متر) برخوردار هستند.

تفسیر: به طور کلی ساخت‌های توپیی و بالشی یک مرحله پیشرفته‌تر از ساخت‌های وزنی تعبیر و تفسیر می‌شوند (اون ۲۰۰۳) به طوری که اختلاف چگالی بین لایه‌ها سبب حرکت قطعاتی از لایه رویی به سمت لایه زیرین شده است. مایع شدن (آبگونی) و روان شدن لایه زیرین که باعث از بین رفتن قدرت نگه داشتن لایه رویی می‌شود، برای تشکیل ساخت‌های توپیی و بالشی حتی برای دو لایه با ترکیب سنگ‌شناسی مشابه بسیار لازم و ضروری است (برای مثال، تورو و پرات، ۲۰۱۵؛ روزتی و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۳. انواع ساخت‌های توپیی بالشی در نهشته‌های مورد مطالعه. (A) ساخت‌های توپیی بالشی از نوع گل در نهشته‌های ماسه‌سنگی که سبب خمش لایه‌ها نیز شده است. (B) ساخت‌های توپیی و بالشی گلی در میان طبقات ماسه‌سنگی. (C) ساخت‌های توپیی و بالشی ماسه‌ای در میان نهشته‌های گلی. (D) ساخت‌های توپیی بالشی ماسه‌ای در میان طبقات ماسه‌سنگی (هم اندازه و هم جنس).

<sup>1</sup> ball and pillow structures

۳-۳- چین خوردگی‌ها و طبقات پیچیده<sup>۱</sup>

توصیف: طبقات پیچیده و چین خوردگی‌ها یکی از فراوان‌ترین ساخت‌ها در مجموعه کلوته‌ها به شمار می‌روند. چین خوردگی‌ها در مقیاس وسیع و بعضاً در حد یک طبقه مشاهده می‌شود (شکل ۴). چین خوردگی‌ها اغلب در رخساره‌های ماسه ریز تا متوسط دانه مشاهده می‌شوند. چین خوردگی‌ها اغلب حالت نامنظم داشته اما در برخی موارد روند منظمی نیز به خود گرفته‌اند. چین خوردگی‌های نامنظم منطبق بر ساخت‌های پیچیده بوده و در اغلب در یک واحد چین‌های (رخساره‌ای) قرار داشته و از گسترش جانبی و عمودی اندکی برخوردار است (شکل ۴-A, B). این در حالی است که چین خوردگی‌های منظم در مقیاس بزرگ‌تر و از گسترش جانبی و عمودی بیشتری برخوردار هستند (شکل ۴-C, E). طبقات پیچیده متشکل از مجموعه‌ای از لامیناسیون‌هایی با چین‌های خوابیده و کوچک مقیاس بوده که در برخی از موارد همراه با ساخت‌های توپی و بالشی مشاهده می‌شوند (شکل ۴-D). هر چقدر که چین خوردگی‌ها حالت منظم به خود می‌گیرند از لحاظ اندازه و گسترش جانبی و عمودی نیز بزرگ‌تر می‌شوند (شکل ۴-E). ضخامت عمودی مجموعه‌های چین خورده نامنظم (طبقات پیچیده) بین ۱۰ تا ۷۰ سانتی‌متر در تغییر است و این درحالی است که ضخامت مجموعه چین‌های منظم ممکن است به بیش از ۵ متر نیز بالغ شود. در اکثر موارد مشاهده شده، لایه‌های چین خورده در بین دو مجموعه با لایه‌ها و لامیناسیون موازی قرار گرفته‌اند اما در برخی موارد چند مجموعه از چین خوردگی‌ها به صورت عمودی در کنار یکدیگر قرار گرفته که از لحاظ اندازه و شدت چین خوردگی از یکدیگر قابل تفکیک هستند (شکل ۴-C). لازم به ذکر است که در برخی موارد شکستگی‌هایی همراه با چین خوردگی‌ها مشاهده می‌شود که این امر بیشتر در لایه‌های دانه ریزتر (مقدار بالای گل) مشهود است.

تفسیر: انواع چین خوردگی‌های در زوج لایه‌های گلسنگی - سیلتستونی (ماسه‌سنگی)، لایه‌های متناوب غنی از ماسه یا سیلت و یا غنی از رس و رویهم قرار گرفتن چین‌ها در این لایه‌ها توسط افراد مختلفی گزارش شده است (برای

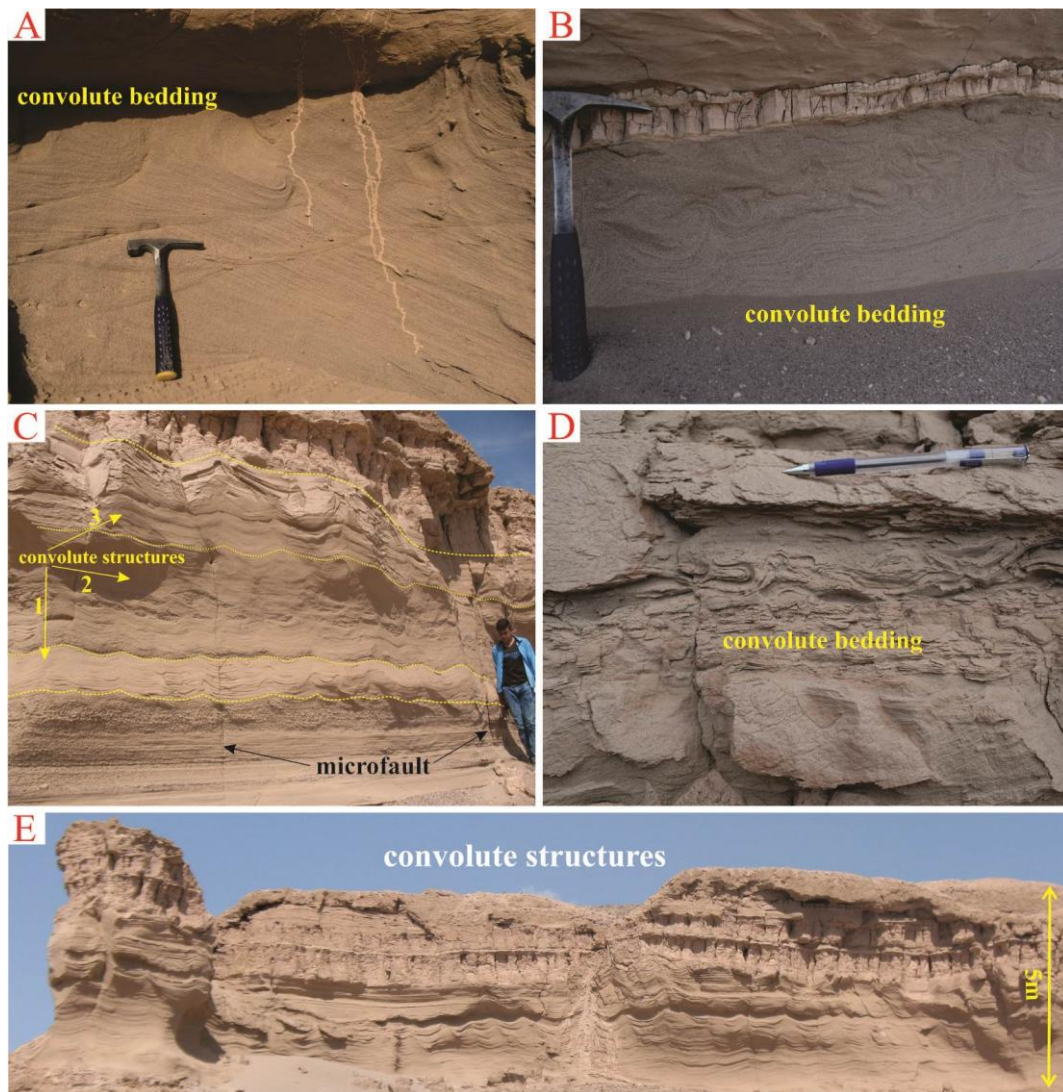
مثال، نوورت و همکاران، ۲۰۰۶؛ مورتی و ساباتو، ۲۰۰۷؛ بررا و فلتی، ۲۰۱۱؛ تورو و پرات، ۲۰۱۶). به طور کلی چنین تصور می‌شود که چین خوردگی‌ها در نهشته‌های نرم حاصل تغییر شکل پلاستیکی ناشی از تنش فشاری اعمال شده بر رسوبات و مواد نیمه سفت شده در مقیاس تغییر شکل یافته است (تورو و پرات، ۲۰۱۶). به نظر می‌رسد که رفتارهای متفاوتی بین لایه‌ها با مقدار مواد رسی مشخص رخ داده است به طوری که لایه‌های غنی از سیلت و ماسه به صورت مایع مانند تغییر شکل داده‌اند، در حالی که نهشته‌های غنی از رس به عنوان موانعی در برابر نفوذپذیری عمل کرده و به دلیل خاصیت شکل‌پذیری، در معرض تغییر شکل هیدروپلاستیک با شکستگی موضعی قرار گرفته‌اند. این فرایندها ممکن است در رسوبات اشباع شده از آب (حالت آبگونی) نزدیک به فصل مشترک رسوب-آب ایجاد شوند (لی و همکاران، ۲۰۲۰). از این رو چنین تصور می‌شود که آبگونی و سیال‌شدن موضعی در رسوبات مسبب اصلی چین خوردگی در لایه‌ها بوده که این امر با فشارهای حاصله از رسوبات رویی و فشار ناشی از اختلاف چگالی بین رسوبات تشدید شده است. چنین چین خوردگی‌هایی در سیلت‌ها یا ماسه‌ها احتمالاً ناشی از مایع‌شدگی و چگالی ظاهری ناهمگن ایجاد شده که منجر به گرادیان ناپایدار و نهایتاً چین خوردگی شده است (ساتر و همکاران، ۲۰۱۱). پیچش‌ها و چین خوردگی‌های مایل تا خوابیده ممکن است به علت وجود تنش برشی جانبی، در قسمت‌های پایینی لایه‌ها ایجاد شده باشند. چین‌ها و لایه‌بندی پیچیده معمولاً شامل چندین لایه یا مجموعه‌ای از طبقات می‌شوند و به تدریج به سمت بالا و پایین به لایه‌های تغییرشکل‌نیافته بدون هیچ سطح فرسایشی منتقل می‌شوند که این امر به تغییر شکل درون لایه‌ای و اتوکتون تعبیر و تفسیر می‌شود (منگ و همکاران، ۲۰۲۱). عملکردهای مختلف تغییر شکل شکل‌پذیر و شکننده در چین‌های پیچیده به موادی با خواص رئولوژیکی متفاوت (محتوای آلی، اندازه دانه، سیمان‌شدن، ترکیب سنگ‌شناسی، نفوذپذیری و/یا محتوای آب) نسبت داده شده است که در طول تغییر شکل‌ها واکنش‌های مختلفی دارند (مورتی و ساباتو، ۲۰۰۷؛ تورو و پرات، ۲۰۱۶).

<sup>1</sup> folding and convolute structures

۳-۴- ساخت‌های فرار آب و تزریق رسوب<sup>۱</sup>

شده که مجموع ساخت‌های فرار آب و دایک‌های کلاستیکی را در مجموعه ساخت‌های تزریق رسوب دسته‌بندی کنیم (شکل A, B-۵). این ساخت‌ها اغلب در تناوب‌های نازک ماسه‌سنگ ریزدانه و گل‌سنگ مشاهده می‌شوند. دایک‌های کلاستیکی در مقیاس‌های میلی‌متری تا سانتی‌متری و به صورت لوله‌ای تا مخروطی شکل مشاهده می‌شوند و احتمالاً منشأ تزریق داخل لایه‌ای دارند به طوری که لامینه‌ها یا لایه‌های نازک را کات کرده و باعث خم شدن لایه‌ها به سمت بالا یا پایین شده‌اند (شکل C, D-۵).

توصیف: این ساخت‌ها می‌توانند در قالب دایک‌های کلاستیکی (ماسه‌ای یا گلی) و یا ساخت‌های فرار آب توصیف شوند که سبب بهم ریختگی لایه‌بندی توسط مجراهایی شود که رسوبات عمدتاً ماسه‌ای لایه‌های بالا را قطع کرده و به سمت بالا حرکت کرده است (شکل ۵). هرچند که در مطالعات مختلف بین ساخت‌های فوق تفاوت‌هایی قائل هستند اما بهم ریختگی رسوبات و همراهی این ساخت‌ها در مجموعه‌هایی تقریباً مشابه سبب



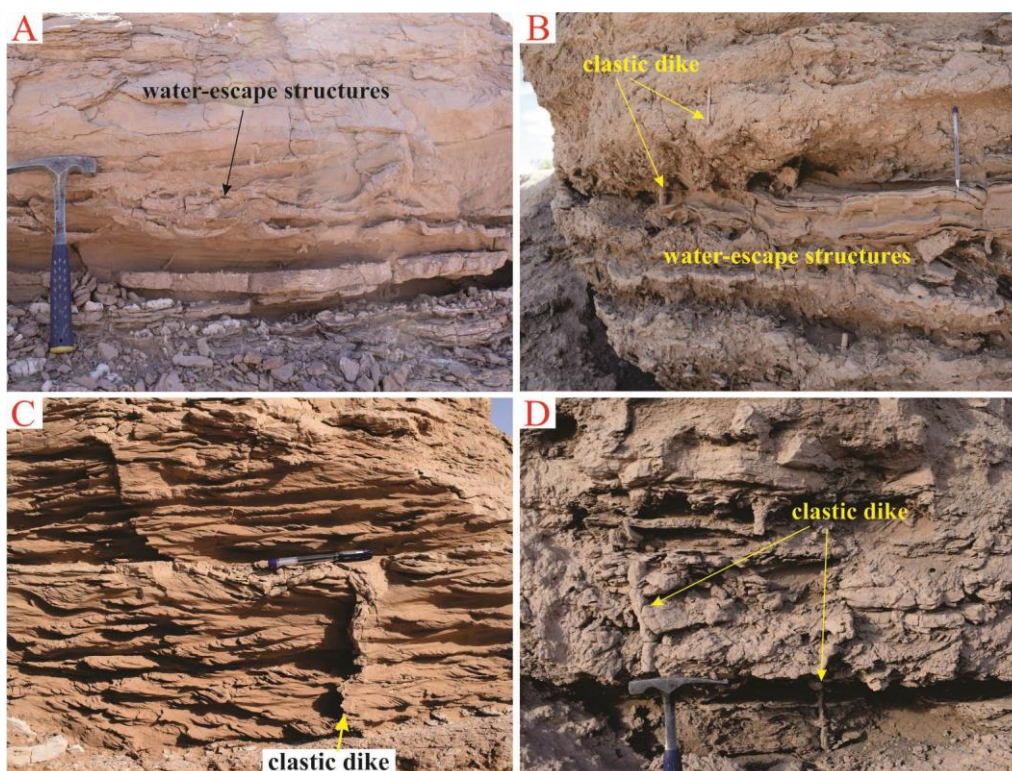
شکل ۴. انواع طبقات و ساختمان‌های پیچیده در کلوته‌های شهداد. (A و B) انواع طبقات پیچیده نامنظم در نهشته‌های ماسه‌سنگی. (C) تناوب طبقات با الگوی متفاوت چین‌خوردگی (منظم و نامنظم) به طوری که طبقات ۱ و ۳ دارای چین‌خوردگی‌های منظم بوده اما طبقه ۲ به صورت پیچیده و نامنظم است. ریزگسل‌ها نیز عمود بر طبقات تشکیل شده و تا انتهای طبقات چین‌خورده پیشروی کرده‌اند. (D) چین‌خوردگی‌های خوابیده در نهشته‌های ماسه‌ای که اغلب همراه با ساخت‌های تویی و بالشی مشاهده می‌شوند. (E) تصویری از گسترش جانبی زیاد طبقات چین‌خورده در کلوته‌های شهداد.

<sup>1</sup> water-escape and sediment-injection structures



نازک‌تر می‌شود. برای دایک‌های ماسه‌ای با مسیره‌های خطی و فاصله نفوذی طولانی، یک سری فرایندها منجر به تشکیل آن‌ها شده است. این دایک‌ها اغلب از لایه‌های پایینی به سمت بالا نفوذ کرده است به طوری که فشار منفذی ممکن است به طور ناگهانی به دلیل روان‌گرایی در لایه اصلی افزایش یابد، و باعث شروع هیدروشکستگی در لایه‌های گلی با نفوذپذیری کم شود و سپس مواد ماسه‌ای سیال به طور همزمان به شکستگی‌ها تزریق شده و به سمت بالا قرار می‌گیرند (هورست و همکاران، ۲۰۱۱؛ مازومدر و همکاران، ۲۰۱۶). مورفولوژی‌های تاخوردگی و خمیدگی در دایک‌های در مقیاس کوچک به احتمال زیاد به رویدادهای تغییر شکل مکرر مربوط می‌شوند به طوری که این دایک‌ها چندین نسل از تزریق مواد سیال را تایید می‌کنند (سورلیک و همکاران، ۲۰۰۷؛ منگ و همکاران، ۲۰۲۱).

تفسیر: این ساختارها نشان‌دهنده شدت بالای مایع شدن و سیال شدن کامل است (لوو، ۱۹۷۵) که باز بین بردن کامل لایه‌بندی یا لامیناسیون بدون ایجاد سطوح فرسایشی یا قطع‌شدگی در رسوب‌گذاری است (برای مثال، منگ و همکاران، ۲۰۲۱). مایع شدن و سیال شدن زیاد سبب افزایش فشار سیال منفذی شده که بر فشار حاصل از بار رویی فائق می‌آید. لایه گلی پوشاننده با درجه روان‌گرایی کمتر و نفوذپذیری کم به عنوان یک مانع عمل کرده و باعث افزایش فشار سیال منفذی می‌شود. سیالات منفذی فراری تحت فشارهای منفذی بالا به سمت بالا نفوذ می‌کنند و شاید ترجیحاً در امتداد مسیره‌های نسبتاً نفوذپذیر درون رسوبات پوشاننده جریان داشته باشند که منجر به تشکیل ستون‌ها و دایک‌ها شود. کاسه‌های ماسه‌ای محلی و لایه‌های بین لایه‌های سیال بدون ساختار



شکل ۵. انواع ساخت‌های فرار آب و دایک‌های کلاستیکی در کلوت‌ها. A و B) ساخت‌های فرار آب که باعث بهم ریختگی در لایه‌ها و لامیناسیون-های ماسه‌ای-گلی شده است. C و D) دایک‌های کلاستیکی لوله‌ای شکل که رسوبات را عمود بر لایه‌ها بالا آورده است.

و ارتفاع این حفرات می‌تواند بزرگ‌تر و یا کوچک‌تر نیز باشد. این ساخت‌ها در نهشته‌های گلی که همراه با کانی‌های تبخیری (اغلب ژپیس) می‌باشند، تشکیل شده‌اند (شکل A-۶). لازم به ذکر است که این ساخت‌ها در

### ۳-۵- ساخت‌های تی‌پی<sup>۱</sup>

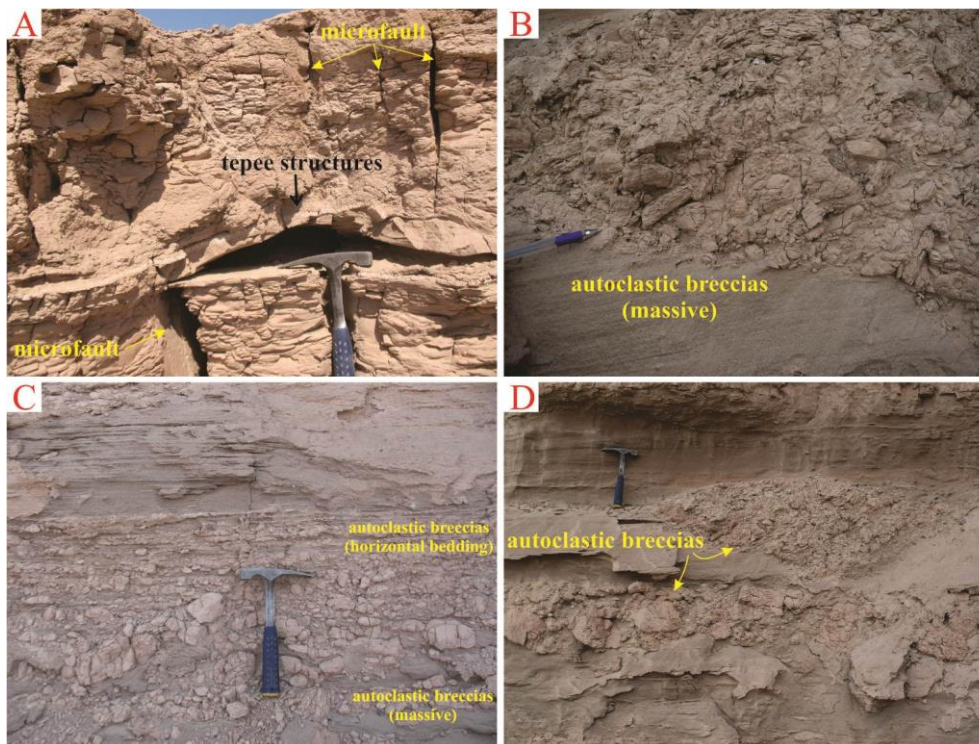
توصیف: ساخت‌های تی‌پی در نهشته‌های کلوت معمولاً به صورت حفرات عدسی شکلی به طول ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری مشاهده می‌شوند هر چند که طول

<sup>1</sup> tepee structures



دیگر، زمانی که بخار آب ناشی از تبخیر درون طبقات نمی‌تواند از لایه‌های نفوذناپذیر گلی عبور کند لذا سبب برآمدگی لایه گلی منعطف می‌شود. از طرف دیگر، رشد کانی‌های تبخیری نیز سبب افزایش فشار به لایه گلی شده و به برآمدگی و گنبدی شدن بیشتر لایه‌ها کمک می‌کند (برای مثال، هی و کیاو، ۲۰۱۵).

نهشته‌های عهد حاضر بین کلوته‌ها و ترک‌های گلی هالوکلاستی به خوبی گسترش یافته‌اند اما در نهشته‌های بدنه کلوته‌ها به ندرت مشاهده می‌شوند. تفسیر: حضور لایه‌های گلی نفوذناپذیر همراه با رشد کانی‌های تبخیری سبب برآمدگی لایه‌های نرم شده و در نهایت ساخت‌های تی‌پی تشکیل می‌شوند. به عبارت



شکل ۶: (A) ساخت تی پی در نهشته‌های گلی که سبب ایجاد فضاهای خالی شده است. این ساختها اغلب با رشد کانیهای تبخیری (بالاخص ژپس) همراه هستند. (B) نمایی نزدیک از یک برش اتوکلاستیکی توده‌ای که در نهشته‌های گلی تشکیل شده است. (C) نمایی از برش‌های اتوکلاستیکی که در راستای لایه بندی مرتب شده‌اند که این امر نشان دهنده برشی شدن لایه‌های نازک گلی در بین لایه‌های ماسه‌ای است. (D) نمایی دور از لایه‌های گلی برشی شده که به صورت قطعات بزرگی در بین نهشته‌های ماسه‌ای مشاهده می‌شوند.

### ۳-۶- برش‌های اتوکلاستیک<sup>۱</sup>

مشاهده شده در کلوته‌ها به شمار می‌رود (شکل D-۶). ماتریکس بین قطعات برشی اغلب ماسه ریز تا متوسط دانه است. لایه‌های برشی بر اساس میزان ماتریکس به دو صورت دانه‌پشتیبان و ماتریکس پشتیبان وجود دارند اما نوع دانه‌پشتیبان از فراوانی بیشتری برخوردار است. تفسیر: قطعات برشی حفظ شده در لایه‌های رسوبی نشان دهنده خردشدگی لایه‌های سفت شده یا جابجایی قطعاتی از رسوب میزبان گلی است لذا نشان می‌دهد که نهشته‌های تغییر شکل یافته در زمان برشی شدن تا حدی سفت شده‌اند. مورفولوژی‌های چند ضلعی قطعات برشی، تناسب خوب بین قطعات برش و لایه گلی میزبان شکسته شده، و

توصیف: برش‌های اتوکلاستیک در مجموعه کلوته‌ها شامل مجموعه‌ای از قطعات گلی تقریباً کشیده و در اندازه‌های مختلف (اغلب در اندازه پیل هستند) بوده که در یک لایه گلی متناوب با لایه‌های ماسه‌ای مشاهده می‌شوند. در اغلب موارد قطعات برشی حالت توده‌ای داشته و قطعات در اندازه‌های مختلف در کنار یکدیگر مشاهده می‌شوند (شکل B-۶)، اما در برخی موارد نوعی جهت‌یافتگی در قطعات برشی به موازات سطح لایه‌بندی مشاهده می‌شود (شکل C-۶). حضور قطعات بزرگ برشی شده (با اندازه بزرگ‌تر از ۵۰ سانتی‌متری) مابین لایه‌های ماسه‌ای از سایر موارد

<sup>1</sup> autoclastic breccias

رئولوژیکی در همان بازه تغییر شکل یافته کمک کند، که ممکن است منجر به تغییر در مورفولوژی گسل (فرریل و موریس، ۲۰۰۳) و همراهی رفتار شکننده (گسل‌شدن) و تغییر شکل شکل‌پذیر (تاخوردگی) شود (برای مثال، اجالا و همکاران، ۲۰۱۸). از این‌رو، ویژگی‌های شکل‌پذیر و شکننده توام با یکدیگر ناشی از انتقال میدان شکل‌پذیر به شکننده در رسوباتی است که به خوبی سفت نشده‌اند (کاهل، ۲۰۰۲). با توجه به اینکه ریزگسل‌ها اغلب در نهشته‌های گل‌سنگی ایجاد شده و از طرفی لایه‌های گلی خاصیت انعطاف‌پذیری بیشتری را نسبت به لایه‌های ماسه سنگی دارند (برای مثال، روزتی و همکاران، ۲۰۱۷) لذا چنین استنباط می‌شود که لایه‌های گل‌سنگی در زمان گسل‌خوردگی سفت شده‌اند و خاصیت انعطاف‌پذیری و پلاستیکی آن‌ها کاهش یافته است.

#### ۴- بحث (فرایندهای تشکیل)

کلوت‌های شهادت اغلب از رسوبات دانه ریز (ماسه ریز، سیلت و رس) تشکیل شده و به مقدار کمتر لایه‌های ماسه‌ای دانه درشت و گراول مشاهده می‌شود. از ویژگی‌های بارز در رخساره‌های کلوت‌ها می‌توان تناوب‌های مکرر لایه‌های گل‌سنگی و ماسه‌سنگی اشاره کرد که بعضاً دارای لایه‌هایی از جنس کانی‌های تبخیری (ژپیس و هالیت) نیز هستند. از مهم‌ترین ساخت‌های فیزیکی در این نهشته‌ها می‌توان به لایه‌بندی موازی، مورب مسطح، مورب عدسی، مورب ریپلی و ریپل‌مارک‌ها اشاره کرد. آنالیز رخساره‌ها نشان می‌دهد که این نهشته‌ها عمدتاً در یک محیط دریاچه‌ای موقت (پلایا) تحت تأثیر جریان‌های آبی موقت و بادی تشکیل شده‌اند (ابراهیمی میمند، ۱۳۹۷). علاوه بر ساخت‌های فیزیکی، در توالی کلوت‌ها انواع ساخت‌های تغییر شکل یافته‌ای مشاهده می‌شود که عمدتاً در زمان نرم بودن رسوبات تشکیل شده‌اند. مورتی و همکاران (۲۰۱۶) اذعان داشتند که ساخت‌های تغییر شکل یافته رسوبات نرم یا SSDS ها به شدت تحت تأثیر محیط رسوبی هستند. هر چند که داده‌های تجربی نشان می‌دهد که SSDS ها از محیط‌های مختلف قاره‌ای تا دریای عمیق گزارش شده است (شانمگام، ۲۰۱۷)، اما تحلیل تأثیر محیط‌های رسوبی بر منشاء و سازو کار تشکیل SSDS ها چندان ساده به نظر نمی‌رسد. بسیاری از SSDS ها دارای

سنگ‌شناسی مشابه آن‌ها نشان می‌دهد که برش در محل و بدون حمل و نقل از راه دور ایجاد شده است (منگ و همکاران، ۲۰۲۱). حضور قطعات بزرگ برشی شده به صورت لنزی شکل در لایه‌های ماسه‌ای نشان از سیال بودن لایه‌های ماسه‌ای بعد از برشی‌شدن است و با توجه به چگالی بالای قطعات گلی، این قطعات به صورت ساخت‌های توپی و بالشی به درون لایه‌های ماسه‌ای وارد شده‌اند. ناهمگونی در روانگرایی و سیال‌شدن معمولاً به ماهیت‌های رئولوژیکی مختلف رسوبات نسبت داده می‌شود به طوری که رسوبات گلی (همراه مواد رسی با چسبندگی بیشتر)، احتمال برشی شدن بیشتری دارند و این در حالی است که رسوبات اشباع از آب ماسه‌ای متخلخل و نفوذپذیر، راحت‌تر سیال می‌شوند و احتمال برشی‌شدن در آن‌ها کمتر می‌باشد (برای مثال، گرسزکا و ون لون، ۲۰۰۷؛ بررا و فلتی، ۲۰۱۱، منگ و همکاران، ۲۰۲۱).

#### ۳-۷- ریزگسل‌ها<sup>۲</sup>

توصیف: به طور کلی ریزگسل‌ها در تمامی لایه‌ها و بالاخص لایه‌های گل‌سنگی مشاهده می‌شوند. طول این گسل‌ها در حد چندین سانتی‌متر بوده و به ندرت به یک متر می‌رسد (شکل‌های C-۴ و A-۶). فضای حاصل از گسل‌خوردگی عمدتاً خالی بوده اما در برخی موارد این فضا توسط رسوبات رویی پر شده‌اند. در برخی موارد، گسل خوردگی همراه با خمش لایه‌ها عمل کرده است اما در بیشتر موارد هیچگونه خمشی و تاب‌خوردگی حاصل از گسل‌خوردگی مشاهده نمی‌شود و ریزگسل‌ها تنها سبب شکستگی در لایه‌ها شده‌اند. لازم به ذکر است که ریزگسل‌ها همراه با تمامی ساخت‌های تغییر شکل یافته نرم مشاهده می‌شوند.

تفسیر: ریزگسل‌ها معمولاً در لایه‌های رسوبی تا حدی سخت شده ایجاد می‌شوند و در زمانی رخ می‌دهد که میزان فشار از نیروی موجود در رسوب بیشتر می‌شود و در نهایت باعث شکست شکننده می‌شود (اون، ۱۹۷۸). روانگرایی و سیال شدن موضعی سبب نفوذ رسوبات در امتداد صفحات گسل می‌شود که احتمالاً از لایه‌های ماسه‌ای مایع‌گون با فشار منفذی بالا یا لایه‌های گلی سیال شده ناشی می‌شود (پالادینو و همکاران، ۲۰۱۸). ناهمگنی در سفتی رسوبات همچنین می‌تواند به ناهمگنی‌های

<sup>2</sup> microfaults

تغییرات ناشی از زمین‌لرزه هستند (مررتی، ۲۰۰۷؛ تورو و همکاران، ۲۰۱۳). حرکات زمین‌لرزه در زمان نرم بودن رسوبات می‌تواند سبب تشکیل انواع ساخت‌های تغییر شکل یافته شود که هیچ ارتباطی به فرایندهای رسوبی یا دیاژنتیکی اولیه ندارد (برای مثال، فنگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ علی و علی، ۲۰۱۸؛ لیانگ و همکاران، ۲۰۲۱). در محیط‌های خشکی و آب‌های کم عمق (دریایی کم عمق یا دریاچه‌ای) که از نظر لرزه‌ای فعال هستند، SSDS ها معمولاً به لرزه‌خیزی متغیر نسبت داده می‌شود (برای مثال، پیسارسکا-جامروزی و همکاران، ۲۰۱۸؛ لیانگ و همکاران، ۲۰۲۱). از آنجایی که نهشته‌های کلوتهای شهداد در یک محیط دریاچه‌ای تشکیل شده‌اند لذا این نهشته‌ها نیز می‌توانند به شدت مستعد تشکیل انواع ساخت‌های تغییر شکل یافته باشند. هر چند که در تفسیر ساخت‌های رسوبی تغییر شکل یافته در کلوتهای شهداد نقش محیط رسوبی و فرایندهای رسوبی غیرقابل انکار است اما قرارگیری مجموعه کلوتهای در مجاورت گسل بزرگ نایبند و همچنین توان بالای لرزه‌خیزی منطقه از گذشته تاکنون می‌تواند یکی از عوامل تاثیرگذار خارجی (اگزوژنتیک) در تشکیل ساخت‌های رسوبی تغییر شکل یافته تعریف شود که جهت بررسی نقش واقعی آن، مطالعات جامعی در این خصوص طلب می‌کند.

آنچه که در اغلب مطالعات به آن تاکید شده است نقش مایع‌شدن<sup>۳</sup> در تشکیل انواع SSDS ها است با این حال در تشکیل برخی ساخت‌ها که تعدادی از پژوهشگران جزو SSDS ها می‌دانند (برای مثال پوک‌مارک‌ها، آثار قطرات باران، ساختارهای انترولیتی در تبخیرها، برش‌های فروپاشی مرتبط با کارست، برش‌های آتشفشانی و تغییر شکل مارن‌ها)، نقش مایع‌گونی در تشکیل آن‌ها همچنان نامشخص است. از این رو، شانمگام (۲۰۱۷) پیشنهاد می‌کند که استفاده از عبارت SSDS ها را فقط به آن دسته از ویژگی‌هایی که محصول مایع‌گونی (مایع‌شدن یا روان‌شدگی) هستند، محدود کنیم. اصطلاح Liquidization برای اولین بار توسط آلن (۱۹۸۲) معرفی شد و شامل ترکیبی از مایع‌گون و سیال‌شدن به صورت همزمان را شامل می‌شود. به عبارت دیگر، مایع‌گونی/سیال‌شدن<sup>۴</sup> رایج‌ترین نظریه مکانیسم تغییر شکل در رسوبات نرم محسوب می‌شود. بر اساس تعریف اون

یک منشاء نبوده و طی فرایندهای مختلفی تشکیل می‌شوند که این مورد به عنوان یکی از مشکلات اساسی برای تحلیل ساز و کار تشکیل این ساخت‌ها محسوب می‌شود. این امر زمانی مشکل‌تر می‌شود که با توالی‌های قدیمه نیز روبه‌رو باشیم. در واقع اگر تشکیل یک ساخت تغییر شکل یافته را تنها به یک فرایند نسبت بدهیم، تحلیل اشتباهی انجام داده‌ایم. شانمگام (۲۰۱۷) با ارزیابی ۱۴۰ مطالعه موردی اذعان داشت که حداقل ۱۲۰ نوع ساختار تغییر شکل رسوب نرم (SSDS) به دلیل تعاریف مبهم و طبقه‌بندی‌های نامتجانس وجود دارد. همچنین این مطالعات نشان می‌دهد حداقل ۳۱ منشاء و یا مکانیزم تشکیل مختلف برای SSDS ها وجود دارد که از مهمترین آن‌ها می‌توان به فرایندهای همزمان با رسوب‌گذاری، فعالیت همزمان تکتونیک و فرایندهای رسوبی، فعالیت‌های تکتونیک، فعالیت‌های ولکانیک، ریزش، خزش و لغزش‌ها، روان شدن در اثر زلزله، فرایندهای آب و هوایی، فرایندهای یخچالی، فرایندهای در محیط‌های بادی، خروج مایع و گاز و فرایندهای دیاژنتیکی اولیه اشاره کرد. از این رو، ترکیب پیچیده‌ای از مسایل نام‌گذاری، مفهومی، مشاهده‌ای، روش شناختی و تفسیری هنگام تحلیل منشأ SSDS ها وجود دارد که در طی سالیان مختلف توسط پژوهشگران ارایه شده است (برای مثال، ون لون و برودزیکووسکی، ۱۹۸۷، مورتی و ون لون، ۲۰۱۴، شانمگام، ۲۰۱۷، ۲۰۲۱؛ منگ و همکاران، ۲۰۲۱). از طرف دیگر، تعریف نامشخص از انواع ساخت‌های تغییر شکل یافته رسوبات نرم نیز یکی دیگر از مشکلات اساسی در تحلیل ساز و کار تشکیل آن‌ها محسوب می‌شود زیرا اغلب تقسیم‌بندی‌ها بر مبنای منشاء و چگونگی تشکیل آن‌ها استوار بوده و از آنجایی که منشاء تشکیل برخی از ساخت‌های تغییر شکل یافته چندگانه است لذا استفاده از یک تقسیم‌بندی نمی‌تواند پاسخگوی تفکیک و تحلیل انواع SSDS ها باشد.

به نظر می‌رسد که رسوبات ته‌نشین شده در محیط‌های دریاچه‌ای شرایط بسیار خوبی برای حفظ و مطالعه ساختارهای تغییر شکل یافته در رسوبات نرم را نشان می‌دهند به طوری که رسوب‌گذاری در یک محیط کم شیب و کم انرژی، عوامل محرک تغییر شکل رسوبی را به خوبی حذف می‌کند و پتانسیل حفظ ساخت‌ها را نیز افزایش می‌دهد. نهشته‌های دریاچه‌ای به شدت مستعد

<sup>۴</sup> liquefaction/fluidization

<sup>۳</sup>liquidization



دریاچه‌ای و توالی غالباً هترولیتیکی (زوج لایه) مشاهده می‌شوند. ساخت‌هایی همچون دایک‌های کلاستیکی و ساختارهای فرار آب، توسط فشار سیال منفذی بالارونده ناشی از سیال‌شدن در لایه زیرین حاصل می‌شوند و هر دو احتمالاً به طور همزمان با ساختارهای توپ و بالشی و اندکی بعد از رسوب لایه رویی شکل گرفته‌اند. در برخی موارد، شکستگی در لایه‌های اولیه، برشی‌شدن جزئی و از بین رفتن قالب‌های وزنی لایه بالایی نشان می‌دهد که ممکن است مقاومت کافی در برابر تغییر شکل پلاستیکی در هنگام تولید ساختارهای توپی و بالشی وجود داشته، به طوری که رسوبات احتمالاً اندکی دچار سفت‌شدگی شده‌اند.

#### ۵- نتیجه‌گیری

کلوت‌های شهداد مجموعه‌ای از تپه‌های طولی نیمه سخت شده‌ای هستند که به موازات بادهای غالب منطقه (شمال باختری-جنوب خاوری) منظم شده‌اند. این مجموعه در جنوب باختری بیابان لوت و در خاور استان کرمان قرار داشته و به عنوان یکی از منحصر به فردترین پدیده‌های زمین‌شناسی محسوب می‌شوند. کلوت‌های شهداد اغلب از زوج لایه‌های ماسه (ماسه‌سنگ) و گل (گل‌سنگ) تشکیل شده‌اند و در توالی (بدنه) آن‌ها ساخت‌های مختلف فیزیکی اولیه و ثانویه‌ای مشاهده می‌شود که نشان از رسوب‌گذاری در یک محیطی دریاچه‌ای موقت تا بادی است. فراوان‌ترین ساخت‌ها در مجموعه کلوت‌ها شامل ساخت‌های تغییر شکل یافته رسوبات نرم است. این ساخت‌ها بعد از رسوب‌گذاری و قبل از سفت شدن رسوبات (قبل از اثرات شدید دیژنتیکی) تشکیل شده‌اند. تشکیل این ساخت‌ها، در شرایط مایع‌گونی و سیال‌شدن رسوبات اتفاق افتاده و جزو مهم‌ترین عوامل تشکیل انواع ساخت‌های رسوبی تغییر شکل یافته محسوب می‌شوند. ساختارهای تغییر شکل یافته در کلوت‌ها در توالی غالباً هترولیتیکی (زوج لایه) مشاهده می‌شوند که در حالت نرم بودن رسوبات شکل گرفته‌اند. مطالعات شکل‌شناسی، ارتباطات بین انواع ساخت‌ها در توالی رسوبی، میزان تخلخل و نفوذپذیری و خاصیت پلاستیکی متفاوت بین زوج لایه‌ها نشان می‌دهد که قالب‌های وزنی، ساخت‌های شعله‌ای، چین‌خوردگی‌ها و طبقات پیچیده، ساخت‌های تی‌پی نیز در مرحله مایع‌گونی تشکیل شده‌اند. با افزایش آب بین دانه‌ها و در شرایط سیال

(۱۹۸۷) مایع‌گونی به از دست رفتن موقت یا ناگهانی چسبندگی رسوب به دلیل افزایش فشار منفذی اطلاق می‌شود و این درحالی است که سیال‌شدن نیاز به جریان سیالات از میان رسوبات دارد. در تشکیل تمامی ساخت‌های تغییر شکل یافته در کلوت‌های شهداد هر دو فرایند مایع‌گونی و سیال‌شدن تاثیرگذار بوده است به طوری که در تشکیل برخی از ساخت‌ها همچون قالب‌های وزنی نقش مایع‌گون بودن رسوبات مهم‌تر است در حالی که برای ساخت‌های تزریق رسوب تاثیر سیال شدن مهم‌تر جلوه می‌کند. ویژگی‌های تغییر شکل رسوب نرم در رسوبات تحکیم‌نشده با مقاومت برشی کم یا صفر رخ می‌دهد. هترولیتیکی لایه‌ها و لامینه‌ها در یک توالی رسوبی سبب تغییر در میزان چگالی، تخلخل و نفوذپذیری و در مجموع خواص رئولوژیکی مختلف در زوج لایه‌ها می‌شود. در هنگامی که رسوبات نرم بوده و آب بین دانه‌ها را فراگرفته است، این خواص رئولوژیکی متفاوت سبب تشکیل انواع ساخت‌های تغییر شکل یافته می‌شود (برای مثال، منگ و همکاران، ۲۰۲۱). مورفولوژی و اندازه نهایی ساختار تغییر شکل یافته به سیستم نیروی محرکه (به عنوان مثال اختلاف چگالی، بارگذاری نابرابر، تنش مماسی) و وسعت و ضخامت منطقه‌ای رسوبات حساس رئولوژیکی بستگی دارد. بر این اساس، تعیین مکانیسم اصلی تشکیل بر مبنای معیارهایی است که هنوز به خوبی مشخص نشده‌اند. عوامل متعددی همچون زمان (تغییر شکل قبل از سنگی شدن رسوبات)، حالت مایع مانند، فشار منفذی، سطح آب، لغزش در مرز دانه، اندازه دانه، شکل دانه و تمایز بین فرایند رسوب‌گذاری و تغییر شکل رسوب، منشا و چگونگی تشکیل SSDS ها را تعیین می‌کنند. با توجه به موارد مذکور و همچنین مکانیزم تشکیل انواع ساخت‌های رسوبی تغییر شکل یافته در کلوت‌های شهداد به نظر می‌رسد که ساخت‌های توپی و بالشی، ساخت‌های تزریق رسوب و فرار آب در شرایط سیال‌شدن و ساخت‌هایی همچون قالب‌های وزنی، ساخت‌های شعله‌ای، چین‌خوردگی‌ها و طبقات پیچیده، ساخت‌های تی‌پی در مرحله مایع‌گونی در رسوبات کلوت‌ها شکل گرفته‌اند. برش‌های اتوکلاستیکی و ریزگسل‌ها نیز جزو آن دسته از ساخت‌های تغییر شکل یافته‌ای محسوب می‌شوند که در مراحل اولیه سفت شدن رسوبات اتفاق افتاده‌اند. بنابراین، ساختارهای تغییر شکل یافته در کلوت‌ها در محیطی

- Geological Deformation of Sediments. Springer, Dordrecht, 95–125.
- Dasgupta, P (1998) Recumbent flame structures in the Lower Gondwana rocks of the Jharia Basin, India: a plausible origin. *Sedimentary Geology*, 119, 253-261.
- Ehsani, A. H., and Quiel, F (2008) Application of Self Organizing Map and SRTM data to characterize yardangs in the Lut desert, Iran, *Remote Sensing of Environment*, 112: 3284-3294.
- Feng, Z. Z (2017) A successful symposium of Multi-origin of soft-sediment deformation structures and seismites, *Journal of Palaeogeography*, 6(1): 1-6.
- Feng, Z. Z., Bao, Z. D., Zheng, X. J., Wang, Y (2016) Researches of soft-sediment deformation structures and seismites in Chinada brief review. *Journal of Palaeogeography*, 5(4): 311-317.
- Ferrill, D. A., and Morris, A. P (2003) Dilational normal faults. *Journal of Structural Geology*, 25: 183–196.
- Greb, S. F., Etensohn, F. R., Obermeier, S. F (2002) Developing a classification scheme for seismites. In: *GSA North-central and Southeastern Section Annual Meeting Abstracts with Programs*, Session No. 42.
- Gruszka, B., and van Loon, A. J. T (2007) Pleistocene glaciolacustrine breccias of seismic origin in an active graben (central Poland). *Sedimentary Geology*, 193: 93–104.
- He, B. Z., and Qiao, X. F (2015) Advances and overview of the study on paleo-earthquake events: a review of seismites. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89: 1702-1746.
- Hurst, A., Scott, A., Vigorito, M (2011) Physical characteristics of sand injectites. *Earth- Science Reviews*, 106: 215–246.
- Kahle, C. F (2002) Seismogenic deformation structures in microbialites and mudstones, Silurian Lockport Dolomite, northwestern Ohio, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, 72: 201–216.
- Lee, D. C., Byun, U. H., Kwon, Y. K., Keehm, Y., Jeong, G. Y., Yi, K (2020) Manchuriophycuslike elliptical cracks in thin mudstones intercalated with lacustrine sandstone: intrastratal crack formation in water-saturated sediments. *Sedimentary Geology*, 408: 105769.
- Liang, L., Qiao, X., Dai, F., Zhong, N., Jiang, H (2021) Seismically triggered soft-sediment deformation structures in Tashkorgan lacustrine sediments, northeastern Pamir, China. *Quaternary International*, 604: 82-92.
- Lowe, D. R (1975) Water escape structures in coarse-grained sediments. *Sedimentology*, 22: 157–204.
- شدن، ساخت‌های توپی و بالشی، ساخت‌های تزریق رسوب و فرار آب شکل گرفته‌اند. بنابراین، ساخت‌هایی همچون دایک‌های کلاستیکی و ساختارهای فرار آب، توسط فشار سیال منفذی بالارونده ناشی از سیال‌شدن در لایه زیرین حاصل می‌شوند و هر دو احتمالاً به طور همزمان با ساختارهای توپ و بالشی و اندکی بعد از رسوب لایه رویی شکل گرفته‌اند. برش‌های اتوکلاستیک و ریزگسل‌ها نیز جزو آن دسته از ساخت‌های تغییر شکل یافته‌ای محسوب می‌شوند که در مراحل اولیه سفت شدن رسوبات اتفاق افتاده‌اند. به طور کلی عوامل تشکیل‌دهنده ساخت‌های رسوبی به دو دسته اندوژنیک (عوامل داخلی مربوط به فرایندهای رسوبی) و اگزوژنیک (عوامل خارجی غیرمربوط به فرایندهای رسوبی) تقسیم می‌شوند. همانطور که مشخص شده است در تشکیل ساخت‌های رسوبی مورد مطالعه عوامل اندوژنیک موثرتر بوده اما قرارگیری مجموعه کلوته‌ها در مجاورت گسل بزرگ نایبند و همچنین توان بالای فرایندهای لرزه‌ای منطقه نیز می‌تواند در تشکیل این ساخت‌ها نیز موثر بوده باشد که مطالعات بیشتر در این زمینه را طلب می‌کند.

## منابع

- ابراهیمی میمند، س (۱۳۹۷) رسوب‌شناسی، ژئوشیمی و منشا کلوته‌ها و تپه‌های ماسه‌ای دشت شهداد، شرق کرمان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- زندمقدم، ح (۱۳۹۵) پهنه‌بندی دشت شهداد از دیدگاه رسوب‌شناسی و ژئومورفولوژی. مجموعه مقالات دومین همایش انجمن رسوب‌شناسی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۱۸۸–۱۹۳.
- Ali, U., and Ali, A (2018) Seismically induced soft-sediment deformation structures in an active seismogenic setting: The Plio-Pleistocene Karewa deposits, Kashmir Basin (NW Himalaya). *Journal of Structural Geology*, 115: 28-46.
- Allen, J. R. L (1982) *Sedimentary Structures: Their Character and Physical Basis*. vol. II. Elsevier, Amsterdam, 663p.
- Berra, F., and Felletti, F (2011) Syndepositional tectonics recorded by soft-sediment deformation and liquefaction structures (continental Lower Permian sediments, Southern Alps, Northern Italy): stratigraphic significance. *Sedimentary Geology*, 235: 249 263.
- Collinson, J (1994) Sedimentary deformational structures. In: Maltman, A. (Ed.), *The*

- the recognition of subenvironments in delta deposits. *Sedimentology*, 60: 637–665.
- Rana, N., Prakash Sati, S., Sundriyal, Y., Juyal, N (2016) Genesis and implication of soft sediment deformation structures in high energy fluvial deposits of the Alaknanda valley, Garhwal Himalaya, India. *Sedimentary Geology*, 344: 263-276.
- Rossetti, D. F., Alves, F. C., Valeriano, M. M (2017) A tectonically-triggered late Holocene seismite in the southern Amazonian lowlands, Brazil. *Sedimentary Geology*, 358: 70–83.
- Shanmugam, G (2016) The contourite problem. In: Mazumder, R. (Ed.), *Sediment Provenance*, Chapter 9. Elsevier, 183-254.
- Shanmugam, G (2017) The fallacy of interpreting SSDS with different types of breccias as seismites amid the multifarious origins of earthquakes: implications. *Journal of Palaeogeography*, 6(1): 12-44.
- Shanmugam, G (2021) Mass Transport, Gravity Flows, and Bottom Currents. Chapter 9 Soft-sediment deformation structures. Elsevier, 377-439
- Su, D. C., Sun, A. P (2012) Typical earthquake-induced soft sediment deformation structures in the Mesoproterozoic Wumishan Formation, Yongding River Valley, Beijing, China and interpreted earthquake frequency. *Journal of Palaeogeography*, 1: 71-89.
- Surlyk, F., Gjelberg, J., Noe-Nygaard, N (2007) The Upper Jurassic Hareelv Formation of East Greenland: a giant sedimentary injection complex. In: Hurst, A., Cartwright, J. (Eds.), *Sand Injectites: Implications for Hydrocarbon Exploration and Production*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 56, 141–149.
- Suter, F., Martínez, J. I., Vélez, M. I (2011) Holocene soft-sediment deformation of the Santa Fe–Sopetrán Basin, northern Colombian Andes: evidence for pre-Hispanic seismic activity? *Sedimentary Geology*, 235, 188–199.
- Topal, S., and Ozkul, M (2014) Soft-Sediment deformation Structures interpreted as Seismites in the Kolankaya Formation, Denizli Basin (SW Turkey). *The Scientific World Journal*, 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/3526>. Article ID 352654.
- Törő, B., and Pratt, B. R (2015) Eocene paleoseismic record of the Green River Formation, Fossil Basin, Wyoming, U.S.A.: implications of synsedimentary deformation structures in lacustrine carbonate mudstones. *Journal of Sedimentary Research*, 85: 855–884.
- Törő, B., Pratt, B. R., Renaut, R. W (2013) Seismically induced soft-sediment deformation structures in the Eocene lacustrine Green River Formation (Wyoming, Utah, Colorado, USA) – Maltman, A (1984) On the term soft-sediment deformation. *Journal of Structural Geology*, 6: 589-592.
- Mazumder, R., van Loon, A. J. T., Malviya, V. P., Arima, M., Ogawa, Y (2016) Soft-sediment deformation structures in the Mio-Pliocene Misaki Formation within alternating deep-sea clays and volcanic ashes (Miura Peninsula, Japan). *Sedimentary Geology*, 344: 323–335.
- Meng, J., Jiang, Z., Yang, Y., Nian, T (2021) Soft-sediment deformation structures in a lacustrine depositional context: An example from the Eocene Dongying Depression in the Bohai Bay Basin, East China. *Sedimentary Geology*, 426: 106039.
- Moretti, M., and Sabato, L (2007) Recognition of trigger mechanisms for soft-sediment deformation in the Pleistocene lacustrine deposits of the Sant'Arcangelo Basin (Southern Italy): seismic shock vs. overloading. *Sedimentary Geology*, 196: 31–45.
- Moretti, M., Alfaro, P., Owen, G (2016) The environmental significance of soft-sediment deformation structures: key signatures for sedimentary and tectonic processes. *Sedimentary Geology*, 344: 1–4.
- Neuwerth, R., Suter, F., Guzman, C. A., Gorin, G. E (2006) Soft-sediment deformation in a tectonically active area: the Plio-Pleistocene Zarzal Formation in the Cauca Valley (Western Colombia). *Sedimentary Geology*, 186: 67–88.
- Ojala, A. E. K., Mattila, J., Virtasalo, J., Kuva, J., Luoto, T. P (2018) Seismic deformation of varved sediments in southern Fennoscandia at 7400 cal BP. *Tectonophysics*, 744, 58–71.
- Owen, G, (1987) Deformation processes in unconsolidated sands. In: Jones, M. E., Preston, R. M. F. (Eds.), *Deformation of Sediments and Sedimentary Rocks*. Geological Society of London Special Publication, 29: 11–24.
- Owen, G (2003) Load structures: gravity-driven sediment mobilization in the shallow subsurface. In: Van Rensbergen, P., Hillis, R. R., Maltman, A. J., Morley, C. K. (Eds.), *Subsurface Sediment Mobilization*. Geological Society of London Special Publication, 216: 21–34.
- Owen, G., Moretti, M., Alfaro, P (2011) Recognising triggers for soft-sediment deformation: current understanding and future directions. *Sedimentary Geology*, 235: 133–140.
- Palladino, G., Alsop, G. I., Grippa, A., Zvirtes, G., Phillip, R. P., Hurst, A (2018) Sandstone-filled normal faults: a case study from central California. *Journal of Structural Geology*, 110: 86–101.
- Pisarska-Jamro, M., Weckwerth, P (2013) Soft-sediment deformation structures in a Pleistocene glaciolacustrine delta and their implications for



- a preliminary study. GeoConvention 2013: Integration.
- Van Loon, A. J. T (2009) Soft-sediment deformation structures in siliciclastic sediments: an overview. *Geologos*, 15: 3–55.
- Van Loon, A. J., and Brodzikowski, K (1987) Problems and progress in the research on soft-sediment deformations. *Sedimentary Geology*, 50: 167-193.
- Villegas, P. M., Umazano, A. M., Melchor, R. N., Kataoka, K (2019) Soft-sediment deformation structures in gravelly fluvial deposits: A record of Cretaceous seismic activity in Patagonia?. *Journal of South American Earth Sciences*, 90: 325–337.
- Waldron, J. W. F., and Gagnon, J. F (2011) Recognizing softsediment structures in deformed rocks of orogens. *Journal of Structural Geology*, 33: 271-279.
- Woźniak, P. P., Belzyt, S., Pisarska-Jamroży, M., Woronko, B., Lamsters, K., Nartišs, M., Bitinas, A (2021) Liquefaction and re-liquefaction of sediments induced by uneven loading and glacial earthquakes: implications of results from the Latvian Baltic Sea coast. *Sedimentary Geology*, 421: 105944.
- Yeats, R. S., Sieh, K., Allen, C. R (1997) *The Geology of Earthquakes*. Oxford University Press, Oxford, New York, p. 568.
- Zhou, Y. Q., Peng, T. M., Zhou, T. F., Zhang, Z. K., Tian, H., Liang, W. D., Yu, T., Sun, L. F (2017) Soft-sediment deformation structures related to volcanic earthquakes of the Lower Cretaceous Qingshan Group in Lingshan Island, Shandong Province, East China. *Journal of Palaeogeography*, 6(2): 162-181.