هشتمین همایش ملی انجمن رسوب‌شناسی ایران
8th Symposium of Sedimentological Society of Iran / 31 Jan - 1 Feb 2024
University of Hormozgan
۱۱ و ۱۲ بهمن ماه ۱۴۰۲
دانشگاه هرمزگان

هایپرپیکنیت یا توربیدایت؟ اشاره‌ای بر سیستم رسوبی نهشته‌های اردویسین البرز (سازندهای لشکرک و قلی)

نارام بایت گل*[۱]، محمود شرفی[۲]

۱. دانشیار گروه رسوب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان

۲. استادیار دانشکده علوم پایه، گروه زمین شناسی، دانشگاه هرمزگان

*ایمیل نویسنده مسئول:bayetgoll@iasbs.ac.ir

چکیده: جریانات گراویته‌ای یکی از مکانیسم‌های اصلی برای انتقال رسوبات ساحلی به حوضه‌های عمیق است، بنابراین، تحقیق در مورد منشأ، فرآیند حمل و نقل و نهشته‌های رسوبی برای درک فرایند حمل و نقل رسوبات، بازسازی پالئواقلیم و پالئومحیط و اکتشاف و توسعه نفت و گاز حیاتی است. این مطالعه پارامترهایی را جهت تفکیک نهشته‌های توربیدایتی و هایپرپیکنال معرفی می‌نماید. بخش بالایی سازند لشکرک در بسیاری از تحقیقات و مطالعات به اشتباه به‌عنوان توالی توربیدایتی دریای عمیق به همراه سکانس توالی بوما معرفی شده است. سه نوع اصلی جریان در نهشته‌های بخش بالایی سازند لشکرک به سن اردویسین میانی-بالایی (معادل سازند قلی) در البرز مرکزی و سازند قلی در مقطع تیپ در دره قلی شناسایی شده است. ۱) جریان‌های هایپرپیکنال با hyperpycnites ، ۲) جریان‌های توربیدایتی از نوع آشفته با توربیدایت‌ها ، و ۳) جریان‌های گراویته‌ای هیبرید با طبقات حادثه ای هیبرید. وجود قاعده‌های فرسایشی، دانه بندی تدریجی معکوس و نرمال طبقات غالب ماسه‌ای، فراوانی ریپل‌های جریانی نشان می‌دهد که بخش بالایی سازند لشکرک به سن اردویسین میانی-بالایی تحت تاثیر جریانات هایپرپیکنال در یک دلتای میکس رودخانه-امواج ته‌نشین شده‌اند و رسوب غالب در این بخش هایپرپیکنیت‌ها می‌باشد. وجود غالب دانه بندی تدریجی معکوس و نرمال در این طبقات در نتیجه تغییرات در میزان تامین رسوب از منشاء رودخانه‌ای ایجاد می‌شود.

واژگان کلیدی: اردویسین، دلتا، توربیدایت، جریان‌های هایپرپیکنال، هایپرپیکنیت، طبقات حادثه‌ای هیبرید.

۱-مقدمه

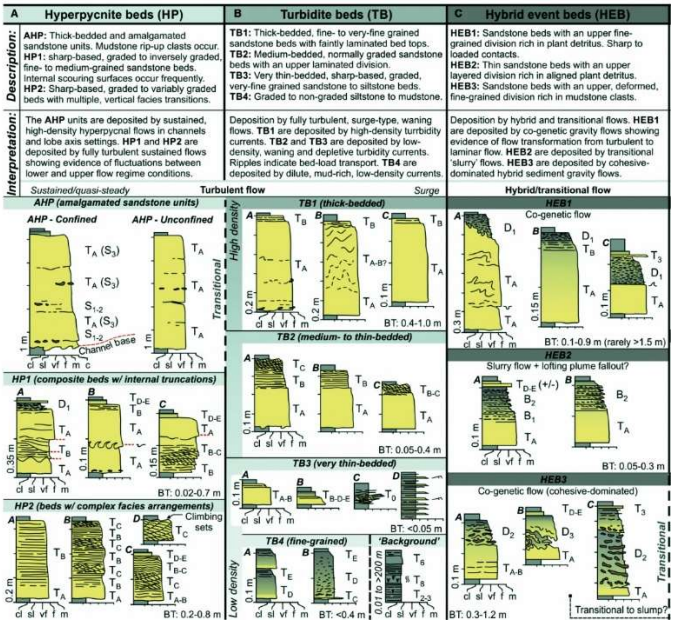
بخش بالایی سازند لشکرک به سن اردویسین میانی-بالایی (معادل سازند قلی) در البرز مرکزی و سازند قلی در مقطع تیپ در دره قلی از البرز شرقی در ناحیه کپه داغ، از توالی‌های رسوبی مورد توجه رسوب‌شناسان و چینه‌شناسان است. در این

مطالعه ما با توجه به فراوانی لایه‌های رسوبی به همراه ساختارهای متعدد به بررسی معیارهای تفکیک بین جریانات توربیدایتی از جریانات هایپرپیکنال می‌پردازیم. این مطالعه توزیع فضایی و چینه شناسی، همچنین تغییرات مختلف سنگ‌های رسوبی توربیدایتی، هیبرید و هایپرپیکنیت را در توالی های سازند لشکرک و قلی مورد بررسی قرار می‌دهد. سه نوع اصلی جریان در این نهشته‌ها شناسایی شده است: ۱) جریان‌های هایپرپیکنال که hyperpycnites ماسه‌ای را رسوب می‌کنند، ۲) جریان‌های توربیدایتی از نوع آشفته که توربیدایت‌ها را رسوب می‌کنند، و ۳) جریان‌های انتقالی که طبقات حادثه ای هیبرید (hybrid event beds)را ایجاد می‌کنند (شکل ۱). فراوانی وجود شواهد رسوبات هایپرپیکنیت، طبقات حادثه ای هیبرید و توربیدایت در سازندهای لشکرک و قلی، آنها را ایده‌آل برای بررسی خصوصیات هایپرپیکنیت‌ها و نحوه تفکیک آن از نهشته‌های توربیدایتی کرده است.

۲-زمین‌شناسی منطقه و تکامل حوضه البرز در طول اردویسین

در طول دوره ادیاکاران تا اردویسین، پوسته قاره‌ای ایران، از جمله منطقه البرز، توسط دریای کم عمق و اپی‌کانتیننتال، به نام پروتوتتیس پوشانده شده بود. این پلتفرم یک سیستم سیلیسی-کربناتی را ثبت می‌کند، که شامل واحدهای لیتواستراتیگرافیکی است که توسط کربنات‌ها (سازندهای ده-ملا و ده-سوفیان) و واحدهای سیلیسی‌کلاستیک (سازندهای لشکرک و قلی) غالب می‌شوند (Geyer et al., 2014). سازند لشکرک (در البرز مرکزی شکل ۲) بالاترین بخش گروه کامبرین-اردویسین میلا را تشکیل می‌دهد. به سمت شمال شرقی البرز (کوه‌های بینالود)، اردویسین عمدتاً توسط سازند قلی نمایان می‌شود (شکل ۲). در منطقه کپه‌داغ و سایر مناطق البرز، توده های آذرین به صورت سیل و دایک همزمان با رسوب‌گذاری در بخش میانی و همچنین نزدیک به بالای سازند قلی وجود دارد. در نتیجه شروع شکستن پوسته پالئوزوئیک ایران و گسترش فعالیت گسل‌های نرمال همزمان با رسوب‌گذاری در طول اردویسین میانی و بالایی (Floian–Darriwilian) حاشیه قاره‌ای غیرفعال به یک حاشیه قاره‌ای فعال تبدیل می‌شود (شکل ۳). بر طبق Alvaro et al. (2022)، و Bayet-Goll et al., (2022) وجود بالاآمدگی متوالی در بخش‌های غربی حوضه البرز عمدتاً مرتبط با بالاآمدگی تدریجی لیتوسفر و حوادث ریفتی مرتبط با پلوم‌های ماگمایی است. توپوگرافی‌های ناهموار حاصل از این بالاآمدگی در بخش غربی حوضه با ارتفاع تقریبی بیش از ۲ کیلومتر و کج‌شدگی آن به سمت شرق البرز عامل مهمی برای پایین آمدن سطح آب دریا و شیفت به سمت حوضه سواحل البرز شده است (شکل ۳). در بخش البرز مرکزی با سازند لشکرک چنین تغییرات توپوگرافی در امتداد ساحل در نتیجه فعالیت تکتونیکی کششی موجب نوعی فرونشینی تفریقی قابل ملاحظه شود و باعث بالاآمدگی بلوک‌های غربی با توالی‌های دریایی کم عمق تا حدواسط اردویسین زیرین تا میانی شود، در این نواحی به دلیل بالاآمدگی

توالی‌های اردویسین میانی-بالایی نهشته نمی‌شود. بهرحال به سمت ناحیه ده-ملا در نتیجه فعالیت‌گسل‌ها نواحی رسوبی عمیق یا hanging-wall depocenters ایجاد می‌شود و برخلاف غرب حوضه این بخش از حوضه همراه با ته‌نشینی توالی‌های اردویسین میانی-بالایی است. به سمت نواحی کپه‌داغ، مواد حاصل از فرسایش بلوک‌های بالا آمده غرب البرز مواد لازم را برای ته‌نشینی توربیدایت‌های سازند قلی را فراهم می‌کند (Bayet-Goll et al., 2022).

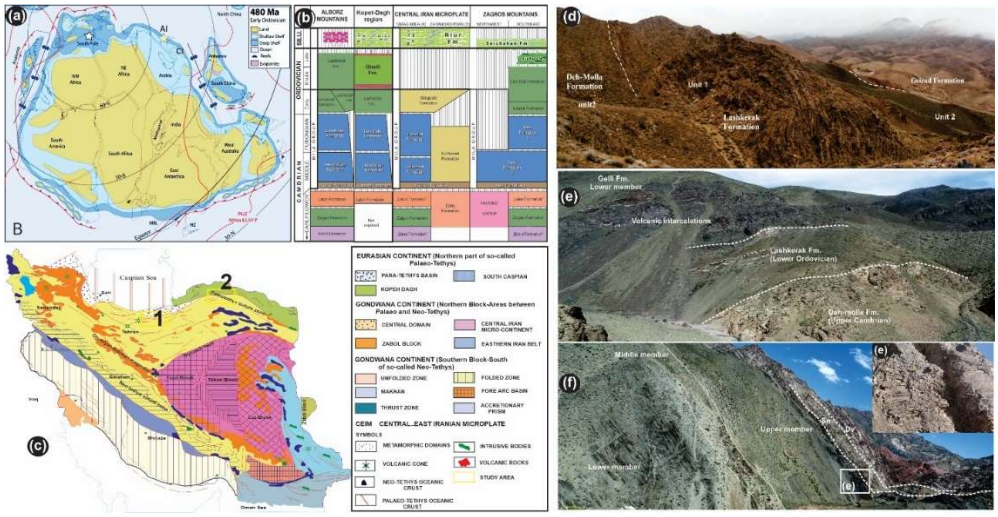


شکل ۱: شماتیک هایپرپیکنیت، طبقات حادثه ای هیبرید و توربیدایت در سازندهای لشکرک و قلی (اقتباس از Grundvag et al.., 2023).

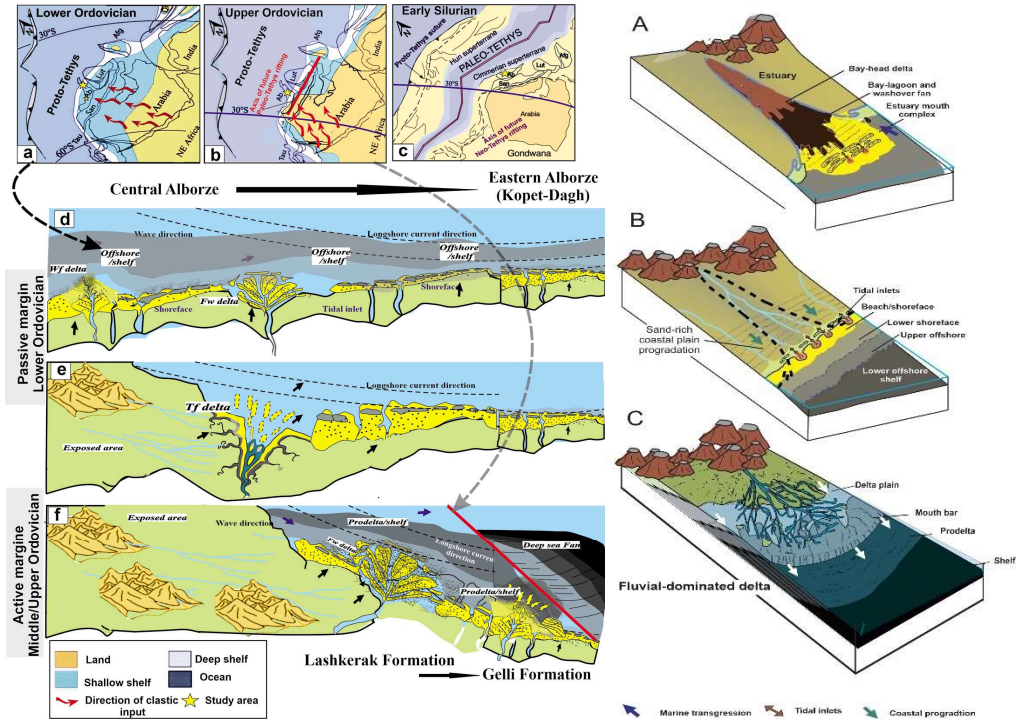
۳- رخساره‌ها محیط رسوبی

واحد یک از سازند لشکرک دو گروه توالی رخساره‌ای عمده مشاهده می‌شود (شکل ۴) که شامل ۱) کمپلکس حاشیه ساحلی-دور از ساحل تحت تاثیر امواج (wave-dominated shoreface-offshore complex). ۲) خلیج دهانه‌ای تحت تاثیر امواج (wave-dominated estuary). چهار توالی رخساره‌ای در کمپلکس حاشیه ساحلی-دور از ساحل تشخیص داده شده‌اند که شامل: (A1) offshore, (A2) offshore transition, (A3) lower/middle shoreface, and (A4) upper shoreface. در سیستم خلیج دهانه‌ای نیز ۴ توالی رخساره‌ای قابل شناسایی است که شامل: (B1) fluvial channel, (B2) bay-head delta, (B3) central bay or lagoon, and (B4) estuary-mouth complexes. واحد سازند لشکرک که در برش ده‌ملا مشاهده می‌شود از ۵ توالی رخساره‌ای تشکیل شده است که شامل: (C1) shelf, (C2) distal prodelta, (C3)

proximal prodelta, (C4) distal mouth bar, and (C5) proximal mouth bar. نهشته‌های سازند قلی نیز به دو مجموعه توالی رخساره‌ای تقسیم می‌شود: ۱) سیستم دلتای جزرومدی (tide-influenced delta) و ۲) سیستم مخروط توربیدایتی (deep-water turbidite fan system). سه تولی رخساره‌ای شامل (D1) prodelta, (D2) delta front and (D3) lower distributary channels در سیستم دلتای جزرمدی این سازند شناسایی شده است که متعلق به بخش واحد میانی سازند قلی می باشد. واحد پایینی و بالایی سازند قلی از ۶ مجموعه توالی رخساره‌ای تشکیل شده است که شامل: (E1) channel–lobe transition, (E2) lobe axis-off-axis, (E3) lobe fringe-distal fringe, (E4) co-genetic debrite–turbidite, (E5) basin floor, and (E6) heterolithic slope deposits می‌باشد. در مجموعه رخساره های شناسایی شده سه نوع جریان اصلی هایپیپیکنال در رخساره‌های دلتایی بخش بالایی سازند لشکرک، و جریانات توربیدایتی با هیبرید سه نوع اصلی صبقات هایپرپیکنیت، حادثه ای هیبرید و توربیدایت را در این سازندها تشکیل داده اند.



شکل ۲. چارچوب زمین شناسی و جغرافیایی. (A) چارچوب پالئوژئوگرافیک و تکتونیکی گندوانا در زمان اردویسین (Torsvik & Cocks, 2013). Ab . ترن‌های البرز؛Cl ، ایران مرکزی یا بلوک لوت. B. انطباق سازندهای پالئوزوئیک زیرین در حوضه البرز مرکزی (۱)، البرز شرقی (کپه‌داغ، ۲)، زاگرس، و میکروپلیت ایران مرکزی-شرقی (Geyer et al., 2014). C. نقشه زمین ساختاری ایران و محدوده های مورد مطالعه، D-F. عکس‌های صحرائی از توالی‌های پالئوزوئیک زیرین در رشته کوه البرز شمال شرقی ایران. D. توالی‌های سیلیسی‌کلاستیک سازند لشکرک، بخش ده-ملا، کوه‌های البرز. E-F. کربنات‌های سازند ده-ملا، سازند لشکرک، و ممبرهای سازند قلی، که توسط سازند نیور سیلورین(Sn) با بازالت ها در مرز سازندها (e) و سازند پادها دونین(Dv) پوشانده شده است.



شکل چپ ۳) موقعیت تکتونیکی و جغرافیایی دیرینه توالی‌های اردویسین ایران (Torsvik and Cocks, 2013) حوضه مورد مطالعه با روند NE–SW و حمل رسوبات از جنوب به شمال (a) در حاشیه پروتتیس که با فاز ریفتینگ در b تغییر مسیر حمل رسوبات از SW به NE صورت می‌گیرد (Bayet-Goll et al., 20222) گسترش و شروع تکامل اقیانوس پالئوتتیس در c. شکل‌های d تا f نشان دهنده مدل گسترش محیطی دیرینه حوضه البرز در طول اردویسین نشان دهنده تغییر از موقعیت حاشیه قاره غیرفعال (d, e) به حاشیه فعال (f). مدل نشان دهنده بالامدن بخش‌های غربی حوضه البرز و تبدیل شدن به مکانی برای تولید رسوب و حمل به سمت مناطق شرقی حوضه.

شکل راست ۴) شکل شماتیک تکامل رسوبی سازند لشکرک با استفاده از مدل‌های رسوب‌شناسی .A :خلیج دهانه‌ای تحت تاثیر امواج . B کمپلکس دورازساحل–حاشیه ساحلی .C سیستم‌های دلتای رودخانه‌ای با جریان‌های هایپرپیکنال.

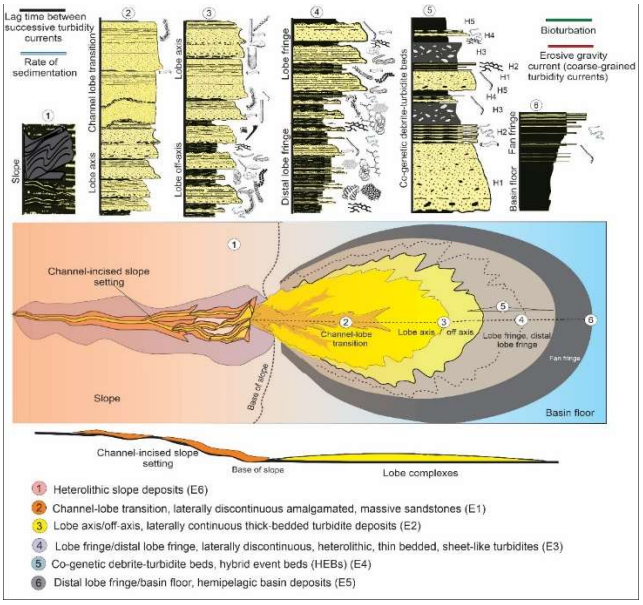
توربیدایت: اصطلاح جریان توربیدایتی به معنای تعلیق رسوبات آشفته است که در آن دانه‌های بزرگتر تمایل دارند به صورت تفضیلی جدا شده و رسوب کنند، که یک توربیدایت را تشکیل دهند. آن‌ها معمولاً تراکم رسوب کمتری نسبت به جریان‌های دبریس دارند. آشفتگی جریان مکانیزم اصلی نگهداری و حمل رسوب در یک جریان توربیداتی است. جریان‌های توربیداتی بر اساس اینکه آیا چگالی بالا یا چگالی پایین دارند، تقسیم‌بندی می‌شوند که در نهشته‌های سازند قلی جریانات

توربیدایتی کم چگال در بخش‌های حاشیه لوب و بخش دیستال لوب مشاهده می‌شوند اما جریانات توربیداتی پرچگال در بخش محوری لوب و کانال‌های مجاور با لوب های پروکسیمال مشاهده می‌شوند. جریانات توربیدایتی کم چگال در آن‌ها رسوبگذاری متوقف نمی‌شود، به این معنی که رسوبات می‌توانند به راحتی به بستر رسوبی رسوب کنند. آشفتگی، یا حرکت سیال آشفته، در نزدیکی بستر به طور قابل توجهی بالا می‌باشد، که چنین شرایط منجر به تشکیل اشکال لایه‌ای همچون لامیناسیون ریپی یا دون می‌شود. این جریان‌ها توسط یک توالی از ساختارهای رسوبی شناخته شده به عنوان دنباله بوما مشخص می‌شوند، که نتیجه کاهش انرژی جریاندر جرکت به سمت پایین‌شیب است. در مقابل، جریانات توربیداتی پرچگال به جریان‌های با تراکم بالا، معمولاً غیرآشفته، جریان‌های سیال که در آن رسوب عمدتاً توسط قدرت ماتریکس، فشار پراکنده، و قدرت شناوری پشتیبانی می‌شود. آن‌ها توسط تراکم‌های رسوبی بالای نزدیک به بستر رسوبی مشخص می‌شوند که به دلیل بالا بودن این تراکم میزان آشفتگی کاهش می‌یابد و منجر به کاهش رسوب‌گذاری می‌شود. جریانات توربیداتی پرچگال معمولا ماسه‌سنگی‌های مسیو و یا با لامیناسیون ضعیف را ایجاد می‌کنند.

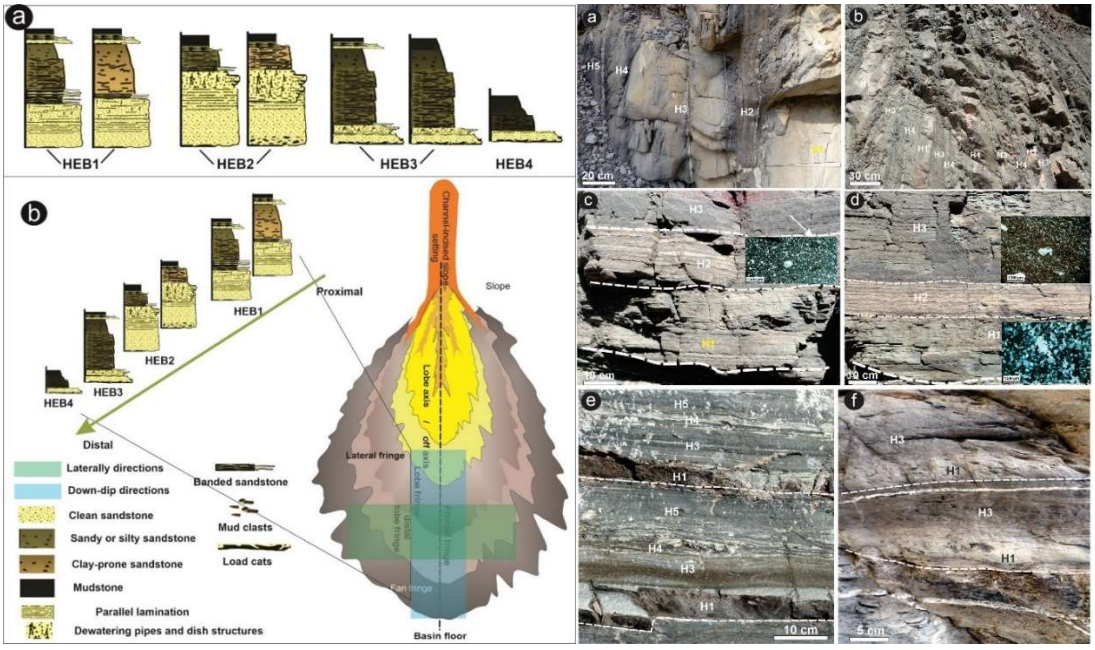
ویژگی برجسته‌ترین E1 برتری بسترهای ماسه سنگ ضخیم با قاعده‌های فرسایشی است که با گرانول و لاگ‌های پبلی پوشیده شده‌اند، و درجه بالایی از برهم‌افزایندگی طبقات را در یک توالی نازک شونده به بالا را تشکیل می‌دهد. E2 عمدتاً از مجموعه طبقات ضخیم و درشت‌شونده به بالا با سطوح محدود کننده صاف تشکیل شده است که هندسه صفحه ای یا sheet-likeرا نشان می‌دهد. این توالی رخساره‌ای در بخش محوری لوب و دور شدن از محور اصلی مبه دلیل کاهش قدرت جریان و حمل رسوب نسبت برهم‌افزایندگی طبقات در ان کاهش می یابد و ماسه‌سنگ متوسط تا ریز دانه در واحدهای هترولیک در همراهی با مادستون و سیلتستون را تشکیل می‌دهد. E3 شامل واحدهای پیوسته جانبی در روندهای ضخیم و درشت‌شونده به بالا از ماسه سنگ بسیار ریز و siltstone/mudstone است. این توالی رخساره‌ای تشکیل دهنده بسترهای نازک تا بسیار نازک توربیدایت صفحه‌ای شکل است. شواهد رسوب‌شناسی، مانند روندهای ضخیم شونده به سمت بالا، هندسه صفحه‌ای توالی با پیوستگی جانبی گسترده، وجود غالب مادستون-سیلتستون، و حضور سطوح محدود کننده صاف، نشان‌دهنده رسوب‌گذاری در دبخش دیستال لوب ها به دور از محور لوب است. E4 به‌صورت افقی و عمودی به E2 و E3 می‌رسد. این عمدتاً از طبقات هیبرید تشکیل شده است. E5 با وجود فراوانی بالای مادستون‌ها و خصوصیت هترولیک نازک لایه لامینه‌ای مشخص می شود که در راستای جانبی گسترده به صورت هندسه صفحه‌ای دیده می‌شوند. این تفسیر می‌شود که رسوب‌گذاری توسط جریان‌های توربیدایت unconfined در بخش‌های خارجی از لوب‌های پیشرونده بر روی دشت حوضچه صورت گرفته است. E6 به دلیل وجود ارتباط نزدیک با توده‌های ماسه‌ای جلوی دلتا (D1) با طبقه‌بندی

مورب تراف و شواهد جزرومدی، و همچنین ویژگی‌های رسوب‌شناسی ان از جمله هترولیک بودن با فراوانی بالای مادستون، و شکل هندسی نامنظم و پیچ‌خورده به نهشته‌های اسلوپ گلی نسبت داده شده است (شکل ۵).

طبقات حادثه‌ای هیبرید یا HEBs (Hybrid Event Beds): این نوع طبقات در رخساره های حاشیه لوب (lobe fringe)، و به مقدار کمتر در بخش دیستال حاشیه لب (distal lobe fringe) و بخش محور لب (lobe off-axis) مشاهده می‌شوند. توالی رسوبی استاندارد پنج بخشی ایده‌آل در HEBs شناسایی شده است (Haughton et al., 2009; Fonnesu et al., 2018) که از قاعده تا بالا شامل: بخش قاعده‌ای، ماسه‌سنگی مسیو بدون ساختار گریدد نرمال یا بدون گریدد (H1) در برخی موارد با mudclasts پراکنده(H1b) ، ماسه سنگ باندی شامل ماسه‌های تمیزتر و روشن‌تر و باندهای ماسه سنگ تیره و آرژیلی(H2) ، ماسه سنگ آرژیلی آشفته و debritic با mud clasts فراوان، یا ماتریکس گلی فراوان(H3) ، ماسه‌سنگ ریز دانه، نازک لایه، لامینه‌ای (H4) و یک بخش بالایی شیلی/مادستونی (H5). انواع HEBs به چهار نوع اصلی بر اساس دو معیار نسبت ساختارهای رسوبی داخلی یا تعداد تقسیمات و نسبت رخساره‌های ماسه‌سنگی به آرژیلی طبقه‌بندی می‌شوند. نسبت اشاره شده در این دو عامل نشان‌دهنده تغییرات گسترده در هر دو جهت distally و laterally بخش‌های لوب (lobe) مخروط توربیدایتی است. انواع HEBs ارائه شده در اینجا نشان‌دهنده تغییرات گسترده در ضخامت، اندازه دانه، و ساختارهای رسوبی است (شکل های ۶ و ۷). چنین تغییراتی بیشتر بستگی به روندهای proximality–distality در مجموعه رخساره‌های حاشیه لوب و لبه دور لوب دارند. انطباق HEBs در هر دو گذار جانبی و بخش پایین شیب نشان‌دهنده تغییرات در انواع بستر با ماسه سنگ ضخیم (HEB-1 and HEB-2) در موقعیت لوب جلویی (frontal lobe) و گذر پایین شیب و جانبی به طبقات هیبریدی گل-غالب (HEB-3 and HEB-4). HEBs از فرآیندهای مختلف حمل و نقل و رسوب، مانند روهمپوشانی توربیدایت‌ها توسط دبرایت‌ها یا تغییر از جریان‌های توربیداتی به جریان‌های خرده‌دار (debris)توسط فرسایش بسترهای گلی نشأت می‌گیرند. فرسایش بستر گلی تحت تاثیر این جریانات موجب افزایش ماتریکس گلی و قطعات اینتراکلاست گلی در زمینه جریانات توربیدایتی انرژی بالا شود که با افزایش تدریجی محصولات فرسایشی، جریانات توربیدایتی به جریان دبریس یا خرده‌دار تبدیل می‌شود (Bayet-Goll et al., 2023). در بازه مورد مطالعه، وجود بخش‌های مختلف H1 تا H5 پیشنهاد می‌کند که رسوب و منشأ آن‌ها از جریان‌های گرانشی رسوبی هیبرید است، که رسوبات حاصله به عنوان "طبقات co-genetic turbidite–debrite" نامیده می‌شوند. وجود انواع HEBs در مجموعه رخساره‌های حاشیه لوب و بخش دیستال لوب نشان‌دهنده حضور جریان‌های گرانشی هیبرید در این مناطق است، که اغلب از جریان non-cohesiveبه جریان cohesive تبدیل می‌شوند.



شکل=۵. مدل محیطی نهشته‌های توربیداتی عمیق (کمپلکس لوب) سازند قلی با طرح برانبارش رخساره‌های مختلف در کمپلکس لوب.

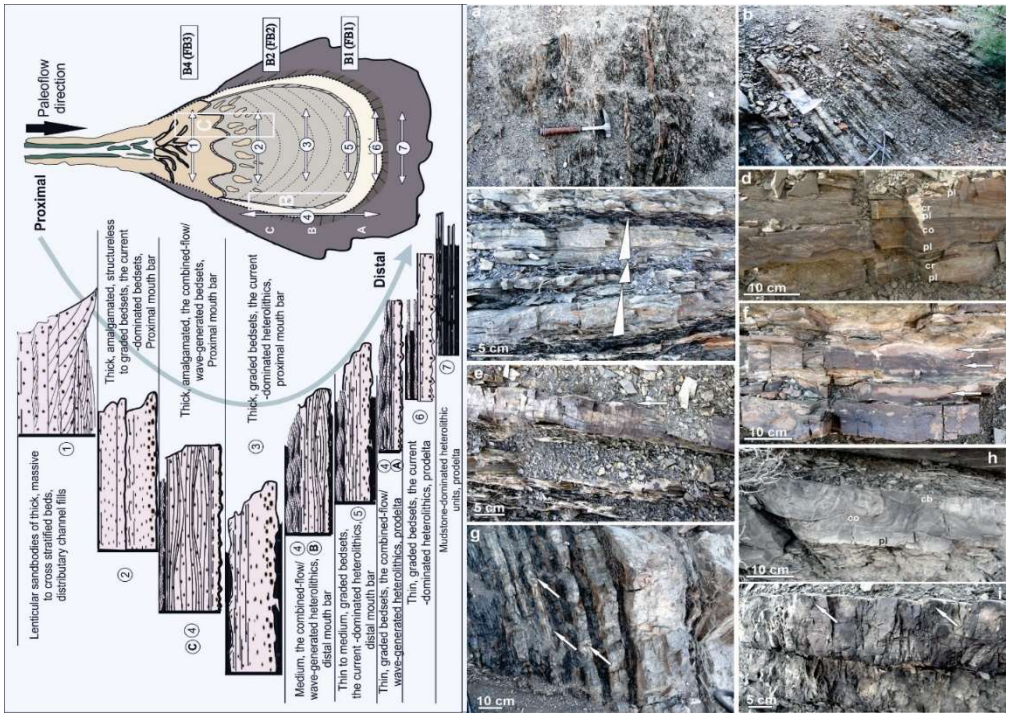


شکل چپ ۶. طرح طبقه‌بندی HEBs سازند قلی بر اساس ساختارهای رسوبی داخلی و نسبت رخساره‌های ماسه‌سنگی به آرژیلی شامل: ماسه سنگ ضخیم (HEB-1 and HEB-2) در موقعیت لوب جلویی (frontal lobe) و گذر down-dip و laterally به طبقات هیبریدی گل-غالب (HEB-3 and HEB-4). مدل رسوب‌شناسی ارائه شده از توزیع فضایی انواع HEBs وابسته به روندهای proximality–distality در توالی‌های رخساره‌های مخروط توربیدایتی سازند قلی است. شکل ۷ راست. A تا D. تصاویر صحرائی و پتروگرافی HEBs (thick-bedded HEBs; HEB-1 and HEB-2). E و F. تصاویر صحرائی HEBs (mud-dominated, thin-bedded HEBs; HEB-3 and HEB-4).

هایپرپیکنیت‌ها: در بخش قاعده‌ای نهشته‌های اردویسین بالایی سازند لشکرک بر اساس شواهدی نظیر تورق پذیری لایه‌ها، عدم وجود آشفتگی زیستی و لامیناسیون موازی ریز، نهشته‌های رسوبی بعنوان رخساره شلف تفسیر می شود؛ که نشان دهنده رسوبگذاری ذرات معلق با انرژی کم در غیاب امواج و جریان‌ها است (شکل ۸) که در شرایط کم اکسیژن تا بدون اکسیژن تشکیل می‌شوند. در یک روند پروگردیشنال به سمت بالا وجود طبقات تدریجی نرمال و معکوس (inversely and normally graded beds) را می توان به جریان‌های زیرین منشاء گرفته از تغییرات چگالی (density-driven underflows) نسبت داد که احتمالاً توسط جریان‌های هایپرپیکنال در تناوب با ته‌نشینی از حالت معلق بوسیله دانه‌های ریزتر ناشی می‌شوند (Bhattacharya and McEachern 2009). ویژگی‌های رسوب‌شناختی توالی‌ها نشان می‌دهد که مجموعه‌های هترولیتیک در محیط‌های پرودلتای دیستال و پروکسیمال یک دلتای تحت تأثیر رودخانه و امواج ته‌نشست یافته‌اند. همچنین، نشان می‌دهد که این نوع رسوبگذاری در مجاورت کانال‌های انشعابی رخ داده است. به طور کلی، رخساره‌ها بر اساس ویژگی‌های رسوبی (به عنوان مثال، شواهدی از جریان‌های یک جهته رودخانه به صورت جریانات کاهنده و افزاینده، توالی‌های شبه-بوما (waning and/or waxing flows such as Bouma-like sequences)، را می‌توان به جریان‌های هایپرپیکنال و یا هایپوپیکنال در سیستم‌های دلتایی- رودخانه‌ای تحت تأثیر سیلاب نسبت داد. (Mulder et al. 2003; Bayet-Goll and Neto De Carvalho, 2020). معمولاً وجود برخی شواهد نظیر لایه‌هایی با دانه‌بندی تدرجی نرمال و یا معکوس، رابطه نزدیک بین لایه‌های تغییر شکل رسوب نرم و لایه‌های دانه‌بندی تدریجی مرکب، پوشش‌های گلی، توزیع پراکنده حفرات به همراه کمبود عمده آشفتگی زیستی به عنوان فاکتورهایی برای جریان‌های هایپرپیکنال و یا هایپوپیکنال رایج در سیستم‌های دلتایی- رودخانه‌ای تحت تأثیر سیلاب در نظر گرفته می‌شود (Bayet-Goll and Neto De Carvalho, 2020) (شکل های ۸ و ۹). رخساره‌های با واحدهای غنی از گل در این سازند به دوره‌های تجمع بسیار سریع گل در مناطق پرودلتا، در نتیجه جریان‌های گراویته‌ای-گلی (هایپرپیکنال) یا ته‌نشینی گل از توده‌های گلی هایپوپیکنال (شناور) نسبت داده می‌شوند. با این حال، در یک روند ضخیم‌شوندگی به سمت بالا با الگوی برانبارش پیش-نشینی، با افزایش ضخامت و فراوانی بسترهای ماسه‌سنگی و شواهدی از کاهش جریان‌های یک طرفه کاهنده و افزاینده

ناشی از رودخانه را نشان می‌دهند (به عنوان مثال، توالی شبه بوما) که به عنوان جریان‌های با غلظت بالا یا جریان های هایپرپیکنال ماسه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. در واحدهای هترولیتیک غنی از ماسه‌سنگ، ارتباط نزدیک بین طبقات هترولیک ناشی از جریان امواج (combined-flow/wave-generated heterolithics) با هترولیتیک‌های تحت تأثیر جریان (current-dominated heterolithics) را می‌توان به ارتباط بین سیلاب رودخانه‌ها و طوفان‌ها یا هایپرپیکنیت‌های متاثر از موج نسبت داد (Bayet-Goll and Neto De Carvalho, 2020).

طبقات ماسه سنگی و گل سنگی که به صورت هترولیک در نهشته‌های سازند لشکرک در بخش بالایی این سازند معادل قلی دیده می‌شوند دارای خصوصیاتی هستند که مشابه هایپرپیکنیت‌های توصیف شده بوسیله Mulder et al., 2003 و Bhattacharya and MacEachern, 2009 در دلتاهای میکس رودخانه-امواج است. آنها دارای شباهت‌های زیادی با مدل رخسار های هایپرپیکنیت Mulder et al., 2003 دارند. وجود گسترده ریپل‌های موجی و مرکب یک جهته در بسیاری از هایپرپیکنیت‌های مشاهده شده، می‌تواند دلالت بر ارتباط بین طوفان و رودخانه و تاثیر آن‌ها بر روی دلتا باشند. فراوانی میان لایه‌های نازک تا متوسط لایه از طبقات ماسه‌سنگی، گلسنگی و سیلتستونی با وجود طبقه‌بندی نرمال و معکوس دلالت بر وجود جریانات هایپرپیکنال کاهنده- افزاینده منشاء گرفته از رودخانه دارد. عدم وجود یا فراوانی کم آشفتگی زیستی و همچنین وجود فراوانی بالای ساختارهای تغییر شکل نرم دلالت بر ته‌نشینی سریع رسوبات به احتمال زیاد ده‌ها سانتیمتر در هر سال دارد. در طبقات مورد مطالعه، به سمت بخش بالایی طبقات وجود فراوانی بالا دانه‌بندی تدریجی نرمال همچون سیلتستون و مادستون با میان لایه‌های هترولیک و محتوای کم مواد آلی نشان می دهد که شرایط کم اکسیژنه در محیط‌های دلتایی این سازند بویژه در بخش پرو دلتا غالب می‌باشد. بهرحال به سمت بخش‌های بالایی دلتا در رخساره‌های mouth bar در نتیجه جریانات ورودی از رودخانه‌ها میزان تبادل اکسیژن با بستر بالا رفته است و چنین مواردی موجب افزایش در وجود اثرفسیل‌ها می‌شوند. در کل امواج و جریانات گراویته ای قابلیت حمل آب‌های اکسیژن دار به چنین محیط‌هایی را دارند. معمولاً وجود سیلاب‌های رودخانه‌ای بصورت فصلی یا دوره‌ای با توده‌های هایپرپیکنال بر روی کف دریا موجب نوسانات شوری می‌شود که جانداران سازنده اثر فسیل‌ها توانایی سازگاری با چنین نوسانات را ندارند. از شواهد این نوسانات همچنین وجود ترک‌های سین‌آرسیس می‌باشد. کاهش شوری در نزدیکی طبقات می‌تواند منجر به ایجاد چنین ترک‌هایی شود.



شکل چپ ۸. مدل توزیع محیطی انواع هایپرپیکنیت های شناسایی شده در محیط‌های دلتای رودخانه-امواج سازند لشکرک (بخش بالایی).
شکل راست ۹.

a. Vertical section of heterolithic bedding in fine-grained sandstone and mudstone of C1, with normally graded features in sandstone beds illustrating planar bedding passing upwards into ripple lamination. **b.** Thickening-upward units of mudstone-dominated heterolithic units in C2. **c.** Normally graded beds in C2 showing massive to horizontally stratified covered by combined-flow ripples. **d.** Current-dominated heterolithics in C3 showing normally graded beds with Bouma-like sequences; scoured bases, ripple lamination (Cr), parallel lamination (Pl), and convolute laminations (Co). **e.** Current-dominated heterolithics in C3 illustrating planar lamination passing upwards into ripple lamination and combined-flow ripples. **f.** Combined-flow/wave-generated heterolithics with scoured bases, HCS, combined-flow ripples, and parallel lamination. **g.** Gradationally based successions in C4, massive to normally graded beds Bouma-like sequences passing from massive to horizontally stratified and capped by combined-flow ripples. **h.** Bouma-like sequences in C4 with convolute lamination and ball and pillow structures (Co) in close association with parallel lamination (Pl) and combined-flow ripples (Cb). **i.** Current-dominated heterolithics in C4, the sandstone beds show Bouma-like sequences passing from massive to horizontally stratified and capped by combined-flow ripple cross-lamination.

۴- نتیجه‌گیری

بررسی نهشته‌های بخش بالایی سازند لشکرک (معادل سازند قلی) به سن اردویسین در البرز مرکزی، برش ده-ملا و مقایسه آن با نهشته‌های توربیدایتی سازند قلی در مقطع تیپ نشان می‌دهد که توالی ساختارهای رسوبی موجود در این سازند تحت تاثیر جریانات هایپرپیکنال کاهنده- افزاینده در یک دلتای میکس رودخانه-امواج تشکیل شده است. طبقات تدریجی نرمال و معکوس فاقد

خصوصیات توربیدایت می‌باشند. و در واقع آن‌ها نهشته‌های هایپرپیکنیت هستند. مهم‌ترین معیارها برای تعیین هایپرپیکنیت‌های تحت تاثیر جریانات هایپرپیکنال منشاء گرفته از سیلاب‌های رودخانه‌ای وجود هر دوی طبقات تدریجی نرمال و معکوس است که چنین شرایطی از ماهیت مداوم جریان حکایت دارد معمولاً در چنین طبقاتی مرز بین طبقات به صورت تدریجی است و کمتر به حالت مرزهای ناگهانی دیده می شود.

مراجع

Alvaro, J.J., Ghobadi Pour, M., Sanchez-Garcıa, T., Kebriaee Zadeh, M.R., Hairapetian, V. and Popov, L.E. (2022) Stratigraphic and volcanic signatures of Miaolingian-late Ordovician rift pulses in the Alborz Mountains, northern Iran. J. Asian Earth Sci., 233, 105240.

Bayet-Goll, A., Neto de Carvalho, C., 2020. Architectural evolution of a mixed-influenced deltaic succession: Lower-to-Middle Ordovician Armorican Quartzite in the southwest Central Iberian Zone, Penha Garcia Formation (Portugal). Int J Earth Sci (Geol Rundsch) 109, 2495–2526.

Bayet-Goll, A., Sharafi, M., Jazimagh, N. and Brandano, M. (2022) Understanding along-strike variability in controlling mechanisms of paleoenvironmental conditions and stratigraphic architecture: Ordovician successions in the Alborz Mountains of Iran at the northern Gondwana margin. Mar. Petrol. Geol., 140, 105654.

Bayet-Goll, A., Sharafi, M., Daraei, M. and Nasiri, Y. (2023), The influence of hybrid sediment gravity flows on distribution and composition of trace-fossil assemblages: Ordovician succession of the north-eastern Alborz Range of Iran. Sedimentology, 70: 783-827.

Bhattacharya, J.P. and MacEachern, J.A., 2009. Hyperpycnal rivers and prodeltaic shelves in the Cretaceous Seaway of North America. Journal of Sedimentary Research, 79, 184–209.

Fonnesu, M., Felletti, F., Haughton, P.D.W., Patacci, M. and McCaffrey, W.D. (2018) Hybrid event bed character and distribution linked to turbidite system sub-environments: the north Appenine Gottero sandstone (north-West Italy). Sedimentology, 65, 151–190.

Geyer, G., Bayet-Goll, A., Wilmsen, M., Mahboubi, A. and Moussavi-Harami, R. (2014) Lithostratigraphic revision of the middle and upper Cambrian (Furongian) in northern and Central Iran. Newsl. Stratigr., 47, 21–59.

Haughton, P.D.W., Davis, C.E., McCaffrey, W.D. and Barker, S. (2009) Hybrid sediment gravity flow deposits–classification, origin and significance. Mar. Petrol. Geol., 26, 1900–1918.

Mulder, T., Syvitski, J.P.M., Migeon, S., Faugeres, J.-C. and Savoye, B., 2003. Marine hyperpycnal flows; initiation, behavior and related deposits; a review. Mar. Pet. Geol., 20, 861–882.