

مروری بر امکان‌سنجی استفاده از خردلرزه‌ها برای شناسایی و مطالعه مخازن هیدروکربنی

هادی گریوانی^۱، ناصر حافظی‌مقدس^۲، ابراهیم حق‌شناس^۳ و ایرج عبدالهی‌فرد^۴

^۱ دانشجوی دکترا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

^۴ دکترا، بخش ژئوفیزیک مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۷/۰۹

چکیده

مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی برای شناسایی و اکتشاف منابع هیدروکربنی زیرزمینی هزینه‌های زیادی در پی داشته و علاوه بر این با عدم قطعیت‌هایی نیز همراهند. از این رو محققین درگیر در این صنعت تلاش دارند با بهبود روشهای موجود و یافتن روشهای نوین، هزینه و عدم قطعیت اکتشافات هیدروکربنی را کاهش و سرعت و سهولت آنرا افزایش دهند. در این راستا طی سالهای اخیر (بعد از ۲۰۰۳) بر امکان‌سنجی استفاده از خردلرزه‌ها جهت شناسایی و مطالعه مخازن هیدروکربنی تمرکز شده است. اساس این مطالعات بر مشاهده قله در دامنه خردلرزه‌ها در محدوده فرکانسی ۱ تا ۶ هرتز استوار است که به خردلرزه‌های هیدروکربنی مشهور شده‌اند. برخی از محققین این خردلرزه‌های مشاهده شده را به مخازن هیدروکربنی مرتبط دانسته و از آن به عنوان ابزاری سودمند جهت شناسایی مخازن یاد کرده و این روش اکتشافی جدید را تحت عنوان تکنولوژی HyMas معرفی می‌کنند. در مقابل برخی دیگر این خردلرزه‌ها را به سایر منابع مانند نوفه‌های صنعتی مربوط می‌دانند. با توجه به نفت خیر بودن ایران، آشنایی محققین و مهندسان ایرانی با روشهای نوین اکتشاف ضروری می‌نماید. با این وجود بررسی‌ها نشان داده است که در این خصوص مطالعه‌ای در داخل کشور انجام نشده و در سطح جهانی نیز نوشتاری مدون که آخرین یافته‌ها و بحث‌های مرتبط با این موضوع را به صورت جامع ارائه نماید، در دسترس نیست. از این رو در این مقاله سعی شده است کلیه مطالعات مربوط به این موضوع مرور شده و بصورت دسته‌بندی شده در اختیار محققین قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: مخازن هیدروکربنی، خردلرزه، مایکروترمور، ژئوفیزیک غیرفعال.

*نویسنده مسئول: هادی گریوانی

E-mail: hadi_gerivani@yahoo.com

۱- پیش‌گفتار

بیش از یک صد سال از اکتشاف اولین چاه نفت در میدان مسجد سلیمان می‌گذرد. این چاه در سال ۱۹۰۸ میلادی توسط گروه اکتشافی ویلیام تاکس داریسی به نفت رسید و میزان نفت استخراج شده ۳۶۰۰۰ لیتر، معادل ۲۲۶ بشکه بود که بعدها به عنوان اولین چاه نفتی خاورمیانه معروف شد. از آن زمان تاکنون تحولات عمده‌ای از دید فعالیت‌های اکتشافی در حوضه زاگرس و دیگر نقاط ایران مانند سرخس، حوزة خزر و قم صورت گرفته است.

بر پایه آمار رسمی منتشر شده وزارت نفت در سال ۱۳۸۷، مجموع ذخایر استحصال‌شدنی نفت خام و میعانات گازی ایران بیش از ۱۳۷ میلیارد بشکه برآورد شده است (مصلح و همکاران، ۱۳۸۷) که این میزان ۱۰ درصد میزان نفت موجود در جهان به شمار می‌رود (Saxton, 2006). با وجود این حجم عظیم مخازن نفت و گاز شناخته‌شده، هنوز اکتشافات نفت و گاز در ایران در حال حاضر در جریان بوده و سالانه میلیارد‌ها ریال صرف اکتشاف و گسترش میادین نفت و گاز در کشور می‌شود. اکتشافات نفت و گاز به‌طور کلی با مطالعات زمین‌شناسی سطحی شروع شده

و با مطالعات ژئوفیزیکی و سپس حفاری‌های اکتشافی دنبال می‌شود. روش‌های ژئوفیزیکی که معمولاً در شناسایی و مطالعه مخازن هیدروکربنی مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل روش‌های لرزه‌نگاری، مغناطیس‌سنجی، نقل‌سنجی و روش‌های درون‌چاهی هستند. روش‌های نقل‌سنجی و مغناطیس‌سنجی برای شناسایی مخازنی که ساختارهای مشخص و معینی مانند تاقدیس دارند به کار می‌روند. به دلیل ژرفای شناسایی زیاد، لرزه‌نگاری مورد استفاده در صنعت نفت عموماً لرزه‌نگاری بازتابی است. لرزه‌نگاری به‌صورت ۲بعدی، ۳بعدی و ۴بعدی می‌تواند انجام شود. در روش ۴بعدی بعد زمان نیز در داده‌های مکانی لحاظ می‌شود. در روش‌های درون‌چاهی با حفر چاه‌ها و گمانه‌های اکتشافی انجام شده و متناسب با اهداف مطالعه، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مهندسی لایه‌های مختلف زمین با به کار بردن روش‌های مختلف ژئوفیزیکی به‌دست می‌آیند. مهم‌ترین اطلاعاتی که از چاه‌های اکتشافی به‌دست

می‌آید عبارتند از: ترتیب قرار گرفتن لایه‌های مختلف زمین در ژرفا، ژرفای واقعی مخزن، سبترای مخزن، ویژگی‌های سنگ و سیال‌های درون مخزن، مرز لایه‌های زمین‌شناختی، جنس و شیب هر لایه. در پایان عملیات اکتشاف، همه داده‌های به‌دست آمده تطبیق داده شده و مخزن مدل‌سازی می‌شود. به این ترتیب محل دقیق مخزن و موقعیت‌های مناسب برای چاه‌های بهره‌برداری معین می‌شود. چنین فرایند اکتشافی گسترده، هزینه‌های بسیار زیادی را در بر دارد.

از این رو پژوهشگران و متخصصان درگیر در صنایع نفت و گاز به‌طور دایم در تلاش‌اند تا با بهبود روش‌های موجود اکتشافی و یافتن و گسترش روش‌های نوین، عدم قطعیت‌های موجود در روش‌های اکتشافی را کاهش، دقت شناسایی‌ها را افزایش و هزینه‌های اکتشاف و بهره‌برداری را کاهش دهند. در این زمینه یکی از روش‌های نوینی که در سالان اخیر توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است استفاده از خردلرزه‌ها (Microtremores) برای شناسایی مخازن نفتی است که گاه با نام فناوری تحلیل خردلرزه‌های هیدروکربنی (Hydrocarbon Microtremor Analysis-HyMAS) از آن یاد می‌شود.

پژوهشگران فعال در این زمینه بر این باورند، فناوری تحلیل خردلرزه‌های هیدروکربنی (HyMAS) یک شاخص هیدروکربنی مستقیم برای انتخاب بهینه موقعیت چاه‌ها در طول اکتشاف، ارزیابی و استخراج نفت و گاز را فراهم می‌آورد. برخلاف فناوری‌های لرزه‌ای معمول، این فناوری ژئوفیزیکی جدید به یک منبع لرزه‌ای کنترل‌شده در سطح زمین نیاز ندارد. افزون بر این با توجه به مستقیم بودن این روش، HyMAS برای مطالعه ۲بعدی و ۳بعدی ساختارهای لرزه‌ای فناوری مناسبی به شمار می‌آید. روش HyMAS ارزان، ساده، امن و سریع بوده و از دید زیست‌محیطی غیرمخرب است (Holzner et al., 2006a & b).

در صورت شناخته شدن جوانب این فناوری و فراگیر شدن استفاده از آن، هزینه‌های اکتشافات نفتی می‌تواند به گونه چشمگیری کاهش یابد. در سال‌های اخیر مطالعاتی

روش‌های متعدد دیگری مانند تحلیل جنبش ذرات (Toksoz, 1964) و استفاده از اندازه‌گیری‌های درون‌رگمانه‌ای، گاه همراه با آرایه (Gupta, 1965; Douze, 1964 & 1967) نیز به کار گرفته شد. حاصل این مطالعات متنوع فهم بیشتر منشأ این نوفه‌ها (اقیانوسی، آب‌وهوایی، شهری و غیره) بود.

– **دوره ۱۹۷۰ به بعد:** از این سال تاکنون حجم کارهای انجام شده در رابطه با نوفه‌های لرزه‌ای شتاب سرسام‌آوری به‌خود گرفته است که بیش از ۹۵ درصد آنها در رابطه با کاربردهای نوفه‌های لرزه‌ای و استفاده مستقیم از آنها در اهداف خاص بوده است. استفاده از این نوفه‌ها در مقاصد ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شاید یکی از بیشترین توجهات را به‌خود اختصاص داده است. دو روش اصلی در این رابطه در این مدت گسترش یافته‌اند؛ روش نسبت طیفی ساختگاه به ساختگاه مرجع (Site to Reference) و روش نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم (HVSZ: Horizontal to Vertical Spectral Ratio). از جدیدترین و جامع‌ترین مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است، می‌توان به پروژه‌ای اروپایی با عنوان Site EffectS using Ambient Excitation با عنوان اختصاری SESAME و با شرکت تیم‌های پژوهشی متعددی از دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی اروپا اشاره کرد. این مطالعه منابع تولید خردلرزه‌ها را به شرح زیر دسته‌بندی کرده است:

– بسامدهای کمتر از ۰/۵ هرتز: امواج اقیانوسی و شرایط جوی شدید.

– بسامدهای کمتر از ۱ هرتز: اثرات باد و شرایط جوی محلی.

– بسامدهای بیشتر از ۱ هرتز: فعالیتهای انسانی و منابع ارتعاشات شهری.

افزون بر تعیین بسامد چیره و اثرات ساختگاهی که اشاره شد، از خردلرزه‌ها برای تعیین سرعت موج برشی زمین تا حد چند صد متر و تعیین پاسخ دینامیکی سازه‌ها نیز استفاده شده است. با توجه به آسانی و ارزان بودن برداشت و ثبت خردلرزه‌ها و این نکته بنیادی که بر خلاف دیگر روش‌های ژئوفیزیک فعال (Active Geophysics)، نیازمند چشمه مصنوعی نیست (Passive Geophysics)، پژوهشگران و متخصصان زمین‌شناسی و ژئوفیزیک، مایل به شناسایی زمینه‌های نوین استفاده از این داده‌ها هستند. استفاده از این خردلرزه‌ها برای شناسایی و مطالعه مخازن، از زمینه‌های جدید در این راستاست که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

۳- خردلرزه‌های ثبت‌شده در مخازن هیدروکربنی در نقاط مختلف جهان

بحث استفاده از خردلرزه‌ها در شناسایی مخازن هیدروکربنی با مشاهدات اولیه (Dangel & Saenger (2002) آغاز شد. آنها با مطالعه طیف خردلرزه‌ها، امواجی را شناسایی کردند که بعدها به خردلرزه‌های هیدروکربنی مشهور شدند. در ادامه این مطالعه اولیه، این پژوهشگران، برداشت خردلرزه‌ها برای ۱۵ سایت هیدروکربنی در نقاط مختلف جهان را طرح‌ریزی و طی آن خردلرزه‌ها را بر روی این ۱۵ مخزن و محدوده پیرامونی آنها برداشت کردند. این پژوهشگران نشان دادند، در حالی که خردلرزه‌های هیدروکربنی بر روی مخازن ثبت می‌شوند، این امواج در مناطق بیرون از محدوده مخزن مشاهده نمی‌شوند (Dangel et al., 2003). فهرست مخازن مورد مطالعه توسط Dangel et al. (2003) و خلاصه‌ای از شرایط آنها در جدول ۱ در ردیف‌های ۱ تا ۱۵ ارائه شده است. در سال ۲۰۰۴ مطالعه دیگری توسط شرکت نفتی پتروبراس (Petrobras) روی مخزن پوتیگوار در برزیل انجام شد. در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ مطالعاتی روی مخازن هیدروکربنی کویت، اردن و امارات متحده عربی توسط Bloch & Akrawi (2006) و در جنوب لیبی توسط Holzner et al. (2009) انجام شد. در سال ۲۰۰۷ نیز، مطالعه‌ای روی حوضه گازی بورگوس واقع در مکزیک در محدوده‌ای به وسعت ۲۰۰ کیلومتر مربع، تعداد ۵۰۰ ایستگاه مایکروترموبرداشت شد (Saenger et al., 2007a & b & 2009a, b & c). در مطالعه دیگری روی مخزن گازی Voitsdraff در اتریش، ۶۶ نقطه در طول ۶ خط

چند در این زمینه، در دنیا انجام شده و در حال انجام است ولی به‌رغم نفت‌خیز بودن کشور و ضرورت توجه به روش‌های نوین و دور نماندن از قافله گسترش فناوری‌های نوین، مطالعه‌ای صورت نگرفته است. از سویی دیگر با توجه به نو بودن موضوع و وجود جوانب مبهم در این زمینه، در منابع جهانی موجود نیز منبع جامعی که همه مطالعات انجام‌شده تا این مرحله را دسته‌بندی کند وجود ندارد. از این رو در این مقاله سعی شده است مطالعات انجام شده تاکنون مرور شده و بر پایه یافته‌ها دسته‌بندی شوند. هدف از این مقاله فراهم آوردن زمینه‌آشنایی متخصصان و پژوهشگران، با این فن نوین و در حال گسترش و آغازی برای مطالعات بیشتر در این زمینه در کشور است.

۲- معرفی خردلرزه‌ها و تاریخچه مطالعه آنها

خردلرزه‌ها عبارتند از ارتعاشات محیطی زمین ناشی از چشمه‌های طبیعی و یا مصنوعی که باعث نوسانات دائمی آن در محدوده رفتار خطی محیط با دامنه جابه‌جایی ۰/۱ تا ۱ میکرون و با پریود میان ۰/۳ تا ۱۰ ثانیه می‌شوند. در گذشته (و حتی امروزه) خردلرزه‌ها بیشتر با نام نوفه‌های بدون استفاده پس‌زمینه مورد اشاره قرار می‌گرفته و حذف می‌شدند. با این وجود این نوفه‌ها می‌توانند اطلاعات ارزشمندی را در بر داشته باشند که در ویژگی‌های مشخصه آنها مانند طیف بسامد، ویژگی‌های آماری و رفتار غیرخطی آنها باشد. افزون بر این نوفه‌ها می‌توانند دارای اثراتی از ویژگی‌های طیفی مواد و محیط‌هایی که از درون آن عبور می‌کنند، نهفته باشند (Dangel et al., 2003). از دید تاریخچه، توجه به نوفه‌های محیطی تاریخی به‌نسبت طولانی دارد که شاید بتوان از اولین آنها به مشاهدات (Bertelli (1872) روی رفتار یک آونگ، و بررسی تأثیر شرایط ناحیه‌ای آب‌وهوایی در ارتعاش آن که برخی اوقات برای ساعت‌ها به طول می‌انجامید، اشاره کرد (Bonnfoy-Cluadet et al., 2006). او با این مشاهدات متوجه رابطه میان نوفه‌های بلند دوره (Long Period) و فشار هوای آشفته شد. از آن زمان به بعد مطالعات بسیار زیادی روی نوفه‌های لرزه‌ای انجام شده است. (Bonnefoy-Cluadet (2006) مروری جامع بر مطالعات انجام شده در این زمینه سه برهه زمانی، به شرح زیر را برای آن برشمرده است:

– **دوره پیش از ۱۹۵۰:** که مطالعات بیشتر جنبه کیفی داشته و مرزهای دانش در این زمینه به چگونگی ثبت و پردازش برمی‌گردد. کار جامع (Gutenberg (1911) در رابطه با منشأ خردلرزه‌ها از اولین مطالعات گسترده در این رابطه است. وی فهرستی از ۶۰۰ مرجع مرتبط با خردلرزه‌ها را ارائه کرده است که البته بیشتر آنها به زبان‌های روسی، آلمانی و ایتالیایی هستند. (Banerji (1924 & 1925) ارتباطی بین خردلرزه‌ها و مانسون‌های (Mansoon) اقیانوس هند مشاهده و ادعا کرد که این خردلرزه‌ها ناشی از امواج رایلی ایجادشده در کف اقیانوس در اثر قطار موج‌های آب به‌وجود آمده در مانسون‌ها هستند. در مطالعات (Bernard (1941) و (Languet-Higgins (1950) مشاهده شد که پریود چیره میکروترمورها متناسب با پریود طبیعی امواج اقیانوسی هستند (پریود چیره میکروترمورها برابر با نصف پریود طبیعی امواج دریاست).

– **دوره ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰:** در این دوره هم‌زمان با پیشرفت علم زمین‌لرزه‌شناسی و ارتقای دستگاه‌های اندازه‌گیری، پیشرفت‌های مهمی در فهم پدیده نوفه‌های محیطی حاصل شد. پژوهشگران بسیاری به استفاده از این نوفه‌های لرزه‌ای در کاربردهای مختلف و بررسی منشأ آنها علاقمند شده و روش‌های متنوعی برای نگاشت آنها ابداع شد. روش‌های آرایه‌ای که در ابتدا با هدف تعیین محل انفجارات هسته‌ای ارائه شدند، در این دوره به‌وسیله زمین‌لرزه‌شناسان برای استخراج منحنی پاشیدگی امواج سطحی با استفاده از اندازه‌گیری آرایه‌ای نوفه‌های لرزه‌ای به کار گرفته شدند. دو دسته مهم از این روش‌ها توسعه یافت؛ یکی روش خود همبستگی مکانی (SPAC) به‌وسیله (Aki (1957 & 1965) و دیگری روش تحلیل بسامد- عدد موج (f-k) با کارهای (Capon et al. (1967) ، Capon (1969) و Lacoss et al. (1969).

افقی؛ d) بسامد معادل قله طیف فوریه مؤلفه قائم. لازم به یادآوری است که در این مطالعه در مجموع ۶۶ ایستگاه خردلرزه‌ای در طول ۶ خط موازی ثبت شده است. Lambert et al. (2009a, b & c) این متغیرها را برای ۱۱ پنجره زمانی ۳۰ دقیقه‌ای در نگاشت ثبت شده در هر ایستگاه محاسبه و میانگین‌گیری کرده و در پایان نتایج را برای نیم‌رخ به طول بیش از ۱۲ کیلومتر که دو مخزن شمالی و جنوبی را قطع می‌کرده، رسم کرده‌اند (شکل ۳).

همان‌طوری که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مخزن جنوبی با متغیرهای مختلف به‌جز نسبت طیفی V/H و مخزن شمالی با متغیرهای مربوط به بسامد معادل قله‌های دامنه مؤلفه قائم و افقی به خوبی همخوانی نشان می‌دهند. این پژوهشگران عنوان می‌دارند که استفاده از چند متغیر می‌تواند موفقیت این روش را افزایش دهد.

در مطالعه دیگری که توسط Saenger et al. (2009a, b & c) در مخزن بورگوس در مکزیک انجام دادند، سه متغیر برای پهنه‌بندی پتانسیل هیدروکربن مورد استفاده قرار گرفت: مساحت زیر منحنی طیف PSD مؤلفه قائم در محدوده بسامدی ۱ تا $3/7$ هرتز (PSD-IZ)؛ بسامد معادل حداکثر در مؤلفه قائم در محدوده $1/5$ تا $3/7$ هرتز؛ مساحت زیر منحنی نسبت طیفی مؤلفه قائم به افقی V/H در محدوده بسامدی ۱ تا ۶ هرتز. نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل هیدروکربن در شکل ۴ ارائه شده است. بر اساس این نقشه‌ها مقادیر نسبی بزرگتری از متغیر PSD-IZ و بسامد بیشینه را در محدوده مخازن شناخته شده مشاهده می‌شود. در حالی که متغیر حاصل از نسبت طیفی با مخازن مطابقت مناسبی نشان نمی‌دهد که می‌تواند به دلیل تأثیرپذیری این متغیر از اثرات ساختگاهی محلی باشد.

۴-۴. رفتار زمانی بی‌هنجاری‌های مشاهده‌شده در دامنه خردلرزه‌ها در محدوده بسامدی ۱ تا ۶ هرتز

امواج سازنده خردلرزه‌ها از دو دسته امواج گذرا و امواج ایستا تشکیل شده‌اند. امواج گذرا از پدیده‌های موقتی مانند عبور یک وسیله نقلیه ایجاد می‌شوند و در تاریخچه زمانی خردلرزه‌ها تنها در یک مقطع زمانی کوتاه آشکار می‌شوند. امواج گذرا بیشتر در مراحل اولیه پردازش داده‌ها حذف می‌شوند. امواج ایستا از پدیده‌هایی به‌نسبت پایدار مانند امواج ناشی از اندرکنش موج‌های اقیانوسی با ساحل در بسامدهای پایین و نوفه‌های شهری در بسامدهای بالا ایجاد شده و تاریخچه زمانی خردلرزه‌ها بیشتر از این دسته امواج تشکیل شده است. دامنه و شدت امواج ایستا با زمان تغییر می‌کند و الگوی تغییرات آنها به چشمه آن بستگی دارد. امواج بسامد بالای حاصل از نوفه‌های شهری بیشتر تغییرات شبانه‌روزی و هفتگی دارند یعنی در طول روز و در طول هفته دامنه بالاتر بوده و در طول شب و آخر هفته کاهش می‌یابند اما امواج اقیانوسی الگوی تغییرات مشخصی نداشته و دامنه آنها با توجه به شدت و ضعف توفان‌های جریانات دریایی تغییر می‌کند.

بسته به اینکه رفتار زمانی بی‌هنجاری‌های مشاهده‌شده در محدوده بسامدی ۱ تا ۶ هرتز از الگوی کدام دسته از امواج سازنده خردلرزه‌ها منشأ گرفته باشد می‌توان در مورد منشأ آنها اظهار نظر کرد. بررسی‌ها انجام‌شده نشان‌دهنده وابستگی زمانی رفتار بی‌هنجاری‌های مشاهده شده است ولی در مورد الگوی این رفتار اتفاق نظر وجود ندارد.

Ali et al. (2007, 2009a, b, c, d & e & 2010) نشان دادند که دامنه بی‌هنجاری‌های مورد بحث روی مخزن مورد مطالعه در ابوظبی، همانند نوفه‌های شهری در طول روز و هفته تغییر می‌کنند. آنها نشان دادند که دامنه‌ها در طول روز بیش از شب و در طول هفته بیش از آخر هفته‌هاست (شکل ۵). Lambert et al. (2009a, b & c) در مطالعه انجام‌شده روی مخازن Voitsdrof که برداشت خردلرزه‌ها تنها در طول شب انجام شده نیز تغییرات زمانی دامنه‌های مشاهده‌شده را نشان دادند (شکل ۶).

Holzner et al. (2006e) بر اساس برداشت‌های مایکروتومور انجام‌شده روی مخزن

برداشت موازی که در مجموع طولی بیش از ۱۲ کیلومتر را پوشش می‌دادند برداشت شد. در برابر این مطالعات که خلاصه ویژگی‌های آنها در جدول ۱ نیز ارائه شده است و بر کارایی فناوری HyMas در شناسایی مخازن هیدروکربنی تأکید دارند، مطالعاتی دیگر نیز انجام شده است که ارتباط امواج مشاهده‌شده را با مخازن هیدروکربنی مورد تردید قرار داده‌اند. در این راستا می‌توان به مطالعه (Ali et al. 2007, 2009a, b, c & d & 2010) روی مخزنی در ابوظبی و مناطق پیرامون آن اشاره کرد. از مطالعات دیگر در این زمینه می‌توان به مطالعه انجام‌شده روی مخزنی نفتی در "صحرا" واقع در لیبی اشاره کرد (Hanssen & Bussat, 2008). در ادامه این مقاله، با معرفی ویژگی‌های طیفی امواج مشاهده شده، همه مشاهدات، اعم از مشاهدات تأکید کننده بر کارایی این روش و مشاهداتی که ارتباط این امواج به مخازن را مورد تردید قرار می‌دهند، مورد بحث و بررسی بیشتر قرار گرفته است.

۴- ویژگی‌های طیفی خردلرزه‌های هیدروکربنی

۴-۱. طیف فوریه و توان خردلرزه‌ها

در مشاهدات ثبت شده توسط Dangel et al. (2003) روی منحنی‌های چگالی طیفی توان خردلرزه‌ها (power spectral density, PSD) در محدوده بسامدی ۱ تا ۶ هرتز افزایش غیر معمول دامنه‌ها آشکار شد که مقدار دامنه به‌سوی حواشی مخازن کمتر شده و در بیرون از محدوده مخزن محو می‌شدند. نمونه‌ای از مشاهدات این پژوهشگران که روی مخزنی هیدروکربنی در اردن ثبت شده، در شکل ۱ ارائه شده است. همان‌طوری که در این شکل مشخص است، نگاشت‌های خردلرزه‌ها در محدوده بسامد ۱ تا ۶ هرتز در محل مخزن (شکل ۱-b) در مقایسه با نگاشت‌های به‌دست آمده از مناطق مجاور (شکل ۱-a) یک یا چند قله مشخص نشان می‌دهند. مشاهده این قله‌ها روی طیف فوریه و طیف چگالی توان در محدوده بسامدی مورد اشاره، اساس استفاده از خردلرزه‌ها به عنوان روشی مستقیم برای شناسایی و مطالعه مخازن هیدروکربنی را تشکیل داده و در دیگر مطالعات انجام شده نیز ثبت شده‌اند.

۴-۲. نسبت طیفی مؤلفه قائم به مؤلفه افقی

بنا به پیشنهاد Nakamura (1989) از نسبت طیفی مؤلفه افقی به مؤلفه قائم (H/V) خردلرزه‌ها برای ارزیابی اثرات ساختگاهی ناشی از لایه‌های سست سطحی استفاده می‌شود. بر این اساس بسامدهای معادل قله‌ها در نسبت طیفی یادشده به عنوان بسامد طبیعی زمین در نظر گرفته می‌شود. با وجود اینکه سازوکار این پدیده به خوبی شناخته نشده است ولی مطالعات نشان‌دهنده درستی نتایج حاصل از این روش است. ولی در مطالعه خردلرزه‌های هیدروکربنی مشاهده شده است که نسبت طیفی H/V در محدوده بسامدهای ۱ تا ۶ هرتز عموماً افت نشان می‌دهند. به عبارت دیگر مؤلفه قائم در مقایسه با مؤلفه افقی دامنه‌های بزرگتری دارد (شکل ۲). از این رو پژوهشگران نسبت طیفی مؤلفه V/H را به عنوان شاخص مستقیم در شناسایی مخازن هیدروکربنی معرفی کرده‌اند (Lambert et al., 2007 & 2009a & b; Nguyen et al., 2009; Walker, 2008; Saenger et al., 2007 a & b & 2009 a, b & c).

۴-۳. متغیرهای مختلف استخراج‌شده از خردلرزه‌های هیدروکربنی برای مطالعه مخازن

بر اساس قله‌های مشاهده‌شده در دامنه طیف خردلرزه‌ها و نسبت طیفی مؤلفه قائم به افقی، متغیرهای مختلفی استخراج شده و برای تعیین پتانسیل هیدروکربن و ارتباط خردلرزه‌ها با مخازن به کار رفته است. Lambert et al. (2009a, b & c) در مطالعه‌ای که روی مخازن Voitsdrof در اتریش انجام دادند، تغییرات چهار متغیر را در نیم‌رخ که دو مخزن منطقه را قطع می‌کرده بررسی کردند. این متغیرها عبارتند از: انرژی طیفی مؤلفه قائم با استفاده از انتگرال‌گیری زیرمنحنی چگالی طیفی توان (PSD)؛ (b) قله نسبت طیفی مؤلفه قائم به افقی V/H ؛ (c) بسامد معادل قله طیف فوریه مؤلفه

(شکل ۷). نتایج حاصل از تحلیل جنبش ذره‌ای (Particle Motion) برای خردلرزه‌ها در طول روزهایی که توفان دریایی گونو (Cyclone Gonu) به ساحل دریای عمان نزدیک می‌شده، نیز مؤید مستقل بودن خردلرزه‌های مورد بحث و خردلرزه‌های اقیانوسی در این منطقه است.

با وجود شواهد یادشده، مشاهدات دیگری وجود دارد که این حالت به تنهایی نمی‌تواند توجیه مناسبی برای آنها باشد که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

- به دلیل مشاهدات متعدد از حضور این خردلرزه‌ها روی مخازن هیدروکربن در نقاط مختلف دنیا که در جدول ۱ ارائه شد و به‌ویژه مشاهدات Dangel et al. (2003) که به‌سوی حواشی مخازن از دامنه این خردلرزه‌ها کاسته می‌شده است، بی‌ارتباط دانستن این خردلرزه‌ها با مخازن جای تأمل دارد.

- در مطالعه انجام‌شده روی مخزن Voitsdrof مشاهده شد (شکل ۳) که مجموعه متغیرهای استخراج‌شده از خردلرزه‌های هیدروکربنی به‌طور نسبی توانایی تعیین موفقیت مخازن را داشتند.

- در مطالعه انجام شده روی مخزن بورگوس در مکزیک، پس از تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل هیدروکربن (شکل ۴) تعدادی چاه در مناطق یا پتانسیل بالا حفاری شدند که دو حلقه از چاه‌ها در باختر منطقه، در جایی که پیش‌تر چاه‌گازی وجود نداشت، به لایه‌های گازدار رسید. افزون بر این Bloch & Akrawi (2006) نیز طی مطالعه‌ای که بر اساس خردلرزه‌های هیدروکربنی در امارات متحده عربی، کویت و اردن انجام دادند، بیش از ۱۳ حلقه چاه بر اساس نقشه‌های پتانسیل هیدروکربن حفاری کردند که بیشتر آنها موفقیت‌آمیز بود.

- وجود ارتباط بین ویژگی‌های مخزن مانند ستبرای لایه هیدروکربن دار و فشار مخزن که در بخش‌های بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

- در بخش دیگری از مطالعه انجام‌شده روی مخزن بورگوس توسط Saenger et al. (2009a, b & c) مؤلفه‌های سه‌گانه خردلرزه‌ها را برای تعیین قطبش جنبش ذره‌ای (Particle Motion) بررسی و آزمایش و شیب نگاشت‌های ثبت‌شده را در محدوده بسامدی ۱ تا ۳/۷ هرتز در دو ایستگاه یکی روی مخزن گازی و دیگری بیرون از محدوده مخزن تعیین کردند. شیب قطبش جنبش ذرات در ایستگاه بالای مخزن ۸۰ درجه بوده در حالی که این مقدار برای ایستگاه بیرون از مخزن ۲۰ درجه بوده است. آزمایش برای ایستگاه بالای مخزن ناپایدار و برای ایستگاه بیرون از مخزن به‌نسبت پایدار بوده که احتمالاً یک منبع سطحی برای ایستگاه بیرون از مخزن را پیشنهاد می‌کند. شیب بالا و آزمایش ناپایدار نشان‌دهنده این است که امواج خردلرزه‌ای دریافت‌شده روی مخزن، از جایی از ژرفا و به احتمال زیاد از مخزن گاز منشأ می‌گیرند.

- Steiner et al. (2007) امکان استفاده از مدل‌سازی وارون زمانی (Time Reverse Modeling) سیگنال‌های پیوسته بسامد پایین مانند خردلرزه‌ها را برای شناسایی موقعیت مخازن نفت و گاز، مورد بررسی قرار دادند. در این راستا، این پژوهشگران روش وارون‌سازی را برای داده‌های واقعی خردلرزه‌های برداشت‌شده در مخزنی در اتریش به کار بردند. نتایج نشان داده است که الگوی توزیع سرعت ذره‌ای به‌دست آمده از اطلاعات واقعی با الگوی به‌دست آمده از داده‌های مصنوعی برای مخزنی فرضی در همان ژرفا، همانند است (شکل ۸). نتایج این مدل‌سازی تأکیدی بر این نکته است که مخازن هیدروکربنی می‌توانند منشأ خردلرزه‌های مشاهده‌شده در بسامدهای ۱ تا ۶ هرتز باشند.

اگر چه مشاهدات Ali et al. (2007, 2009a, b, c & d & 2010) و Hanssen & Bussat (2008) نشان می‌دهند که به ترتیب نوبه‌های بسامد بالای شهری و آب‌وهوایی می‌توانند قله‌هایی در محدوده بسامدی ۱ تا ۶ هرتز ایجاد کنند ولی دیگر شواهد مورد اشاره دلایلی مناسب برای اثبات این نظرند که نوبه‌های بسامد بالا تنها منشأ بی‌هنجاری‌های مشاهده‌شده در بسامد مورد بحث نیستند.

پوتیگوار، تکرارپذیری نتایج حاصل از فناوری HyMas را نشان دادند. برای این منظور در ۴۸ نقطه برداشت‌ها را در دو فاصله زمانی ۱ تا چند هفته‌ای تکرار کرده و با یکدیگر به‌صورت آماری مقایسه کردند. نتایج نشان‌دهنده همخوانی ۹۵ درصدی خردلرزه‌ها در این ۴۸ ایستگاه بود.

۵- منشأ و سازوکار تولید خردلرزه‌های هیدروکربنی

گروهی از پژوهشگران قله‌های مشاهده‌شده در طیف خردلرزه‌ها در محدوده بسامدی ۱ تا ۶ هرتز که به خردلرزه‌های هیدروکربنی مشهور شده‌اند را ناشی از مخازن هیدروکربنی دانسته‌اند و بر توانایی این روش برای شناسایی مخازن تأکید دارند (Singer et al., 2002; Dangel et al., 2003; Holzner et al., 2005a & b, 2006a, b & c & 2007a & b; Frehner et al., 2006 & 2007; Rached, 2006 & 2009; Lambert et al., 2007 & 2009a & b; Steiner et al., 2007 & 2008a & b; Graf et al., 2007; Kaya et al., 2007; Saenger et al., 2007b & 2009a, b & c; Van Mastrigt & Al-Dulaijan, 2008; Nguyen et al., 2008 & 2009; Goertz et al., 2009). در برابر آن برخی دیگر وجود این قله‌ها را ناشی از نوبه‌های سطحی و تغییرات آب‌وهوایی و بی‌ارتباط با مخازن دانسته‌اند (Berteussen et al., 2008a & b; Ali et al., 2007, 2009a, b, c & d & 2010; Hanssen & Bussat, 2008). در حقیقت سازوکار جامع و کاملی که به‌صورت علمی همه مشاهدات را توضیح دهد، تاکنون ارائه نشده است. با مرور مطالعات انجام شده ۵ حالت برای منشأ و سازوکار تولید خردلرزه‌های مورد بحث قابل تصور است که در ادامه بررسی می‌شوند:

۵-۱- حالت اول: نوبه‌های شهری و آب‌وهوایی

نوبه‌های شهری ناشی از فعالیت انسان و نوبه‌های ناشی از تغییرات آب‌وهوایی مانند تغییرات در دما و وزش باد بیشتر در بسامدهای بالاتر از ۱ هرتز خودنمایی می‌کنند. بنابراین امکان اینکه خردلرزه‌های مورد بحث نوعی از این نوع نوبه‌ها باشند وجود دارد. (Hanssen & Bussat (2008) با مطالعه خردلرزه‌ها روی مخزنی در صحرای لیبی بیان داشتند که خردلرزه‌های هیدروکربنی از امواج سطحی ناشی از نوبه‌های آب‌وهوایی ایجاد شده‌اند.

(Ali et al. (2007, 2009a, b, c & d & 2010) در مطالعه‌ای در امارت متحده، برداشت‌های مایکروترمور را در سه نقطه متمرکز کردند: یکی روی مخزنی در حال استخراج؛ یکی در منطقه مجاور مخزن (در محدوده مرز بین هیدروکربن و آب) و دیگری در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری مجاور یک حلقه چاه خشک (نشان‌دهنده نبود هیدروکربن). آنها در این مطالعه در بسامدهای مورد بحث (۱ تا ۶ هرتز) در هر سه محل قله‌هایی در دامنه‌ها مشاهده کردند که مشاهده این قله‌ها در مناطق خارج از مخزن چالشی برای قابلیت روش HyMas برای شناسایی مخازن به‌شمار می‌آید. این پژوهشگران تأثیر عوامل آب‌وهوایی را با بررسی اثر سرعت باد و دما بر خردلرزه‌های مورد بحث مورد پژوهش قرار دادند که نتایج نشان‌دهنده عدم تأثیر این دو در ایجاد خردلرزه‌های مورد بحث بوده است. در بخش دیگری از مطالعه، ایشان تحلیل طیفی بسامد- عدد موج را برای تعیین سرعت ظاهری و آزمایش جهت موج برای خردلرزه‌ها در محدوده بسامدی ۱ تا ۶ هرتز و خردلرزه‌های اقیانوسی انجام داده‌اند. نتایج نشان داده است که خردلرزه‌های اقیانوسی از فعالیت امواج اقیانوسی در دریای عمان منشأ گرفته‌اند در حالی که خردلرزه‌های مورد بحث آزیموتی را نشان می‌دهند که به‌سوی جاده مجاور مخزن است و این امر احتمالاً نشان‌دهنده این مطلب است که این خردلرزه‌ها از ترافیک منطقه منشأ گرفته‌اند و نه از خردلرزه‌های اقیانوسی. سرعت ظاهری به‌نسبت پایین خردلرزه‌های مورد بحث (۱۱۵۰ m/s) نیز نشان‌دهنده منشأ سطحی آنهاست چراکه اگر از ژرفای بیشتر عبور کرده بودند با توجه به سنگ‌های آهکی سرعت بالای موجود در ژرفا، باید سرعت بیشتری می‌داشتند

۵-۲. حالت دوم: جریان سیال‌های درون مخزن و لرزه‌خیزی القایی مخازن

در اثر عوامل مختلف طبیعی و مصنوعی مانند استخراج سیال‌ها، رخداد زمین‌لرزه‌ها و غیره، فشار در بخش‌هایی از مخزن می‌تواند دچار تغییر شده و در نتیجه آن، سیال‌های درون مخزن برای جبران این تغییر شروع به جابه‌جایی می‌کنند. این پدیده می‌تواند منشأ امواج لرزه‌ای جدیدی باشد. در این صورت خردلرزه‌های مورد بحث با هندسه و اندازه حفرات مرتبط خواهد بود. (Dangel et al. (2003) این رخداد را به عنوان یک سازوکار ممکن برای تولید خردلرزه‌های هیدروکربنی مورد توجه قرار دادند ولی از آنجایی که خردلرزه‌های مشاهده‌شده در محدوده باریکی از بسامد حضور داشتند، ایشان نتیجه‌گیری کردند که خردلرزه‌های مورد بحث باید مستقل از اندازه و هندسه حفرات و ترک‌ها و نوع سنگ‌های مخزن باشند و در نتیجه نقش این سازوکار در تولید خردلرزه‌های هیدروکربنی توسط این پژوهشگران رد شد. در اینجا باید یادآوری شود که بر اساس مدل‌سازی عددی که توسط Holzner et al. (2007a & b) انجام شد، مشخص شد که خردلرزه‌های هیدروکربنی با هندسه و اندازه حفرات و ترک‌ها مرتبط است و در نتیجه توجه دوباره به این سازوکار ضروری به نظر می‌رسد.

افزون بر پدیده جریان سیال‌ها، لرزه‌خیزی القایی مخازن در اثر استخراج هیدروکربن پدیده‌ای شناخته شده است ولی (Dangel et al. (2003) این سازوکار را نیز به دلیل اینکه این رخدادها کوتاه‌مدت و گذرا هستند رد می‌کنند.

۵-۳. حالت سوم: اندرکنش امواج اقیانوسی بسامد پایین با مخازن

برخورد و عبور امواج اقیانوسی که از ژرفا می‌آیند با مخازن می‌تواند منجر به تغییراتی در این امواج شده یا امواج جدیدی تولید کند که به صورت ویژگی‌های طیفی بحث‌شده خودنمایی کنند. (Graf et al. (2007 سه سازوکار ممکن برای این حالت را مورد بررسی قرار داده‌اند (شکل ۹):

– **امواج ایستاده (Standing Waves)** وقتی موج‌های لرزه‌ای از یک محیط وارد محیط دیگری با آمپدانس پیچیده (Complex Impedance) متفاوت می‌شوند، بخشی از انرژی موج بازتاب می‌شود. از آنجایی که مخازن آمپدانس متفاوتی دارند بنابراین اگر امواج اقیانوسی بین سطح زمین و مخزن به صورت مکرر بازتاب شوند می‌تواند امواج ایستاده را ایجاد کنند. در این صورت ویژگی‌های رفت و برگشتی امواج یا بسامد رزونانس لایه‌های بین سطح زمین و بالای مخزن ویژگی‌های طیفی بی‌هنجاری‌ها در سطح زمین را تعیین خواهد کرد.

– **میرایی انتخابی (Selective Attenuation)**: وقتی امواج لرزه‌ای از یک محیط الاستیک وارد یک محیط شبه‌الاستیک و یا وارد محیطی با ویژگی‌های کاهندگی پراکنشی (Diffusive Attenuation) می‌شود، نحوه بازتاب امواج با بسامدهای مختلف متفاوت خواهد بود. بر اساس این پدیده، اگر مخازن هیدروکربنی باعث میرایی بسامدهای مشخصی از امواج عبوری شوند، امواج میراننده به صورت قله‌ها خودنمایی خواهند کرد.

– **بزرگنمایی حاصل از تشدید (Resonance Amplification)**: در این حالت بخش از خردلرزه‌های پس‌زمینه دچار تشدید شده و در طیف خردلرزه‌ها به صورت قله‌هایی دیده خواهند شد. (Graf et al. (2007 بنا به شواهد زیر این سازوکار را عامل تولید خردلرزه‌های هیدروکربنی ذکر کرده‌اند:

– خردلرزه‌های هیدروکربنی بیشتر در محدوده بسامدی باریکی (۰/۵ تا ۴ هرتز) مشاهده می‌شوند.

– میانگین توان خردلرزه‌های هیدروکربنی به سطح نوفه‌های محیطی بستگی دارد (این شاهد در مورد حالت چهارم نیز صادق است که در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت).

– توان خردلرزه‌های هیدروکربنی با ستبرای لایه هیدروکربن دار در ارتباط است که در بخش‌های بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

– نسبت طیفی H/V به جای قله، افتادگی نشان می‌دهد.

– بررسی جبهه انتشار موج نشان می‌دهد امواج مولد بی‌هنجاری مورد بحث از سوی مخازن می‌آیند (مطالعه Saenger et al. (2009a, b & c) روی مخزن بورگوس).

(Saenger et al. (2009a, b & c) بر اساس سازوکار تشدید، مدلی اولیه برای توجیه مشاهدات ارائه می‌دهند که در شکل ۱۰ به صورت نمادین و خلاصه ارائه شده است. امواج اقیانوسی، موج‌های ریلی با دامنه زیاد و بسامد پایین در حدود ۰/۱۴ هرتز تولید می‌کنند (Friedrich et al., 1998). این امواج ریلی در بسامد حدود ۰/۱۴ هرتز در ژرفایی که مخازن هیدروکربنی (بیش از ۵۰۰ متر) قرار دارند، بیشتر به صورت قائم نوسان می‌کنند (Pujol, 2003) و انتظار می‌رود این امواج هنگام عبور از مخزن تشدید شده و به صورت افزایش دامنه خردلرزه‌ها بر روی مخازن مشاهده شوند. در این مدل سنگ‌های مخزن به صورت نیمه اشباع در نظر گرفته می‌شوند. در حالی که سنگ‌های پیرامون مخزن به صورت کامل اشباع هستند. امواج اقیانوسی باعث تحریک و نوسان سیال‌های درون حفره‌ای شده و الگوی پراکنش (Radiation Pattern) این منبع جدید، منجر به تولید امواج P در سوی قائم و امواج S در سوی افقی می‌شوند. این پژوهشگران بر این باورند که این مدل، مشاهدات پیشین مبنی بر بیشتر بودن نسبی دامنه طیفی مؤلفه‌های قائم به افقی را به خوبی توجیه می‌کند. افزون بر امواج اقیانوسی، امواج ناشی از زمین‌لرزه‌ها نیز می‌تواند مخازن را تحت تأثیر قرار دهند. بررسی اثر زمین‌لرزه روی خردلرزه‌ها هیدروکربنی یکی دیگر از زمینه‌های مورد توجه پژوهشگران بوده است. (Nguyen et al. (2008) خردلرزه‌های ثبت‌شده روی مخزن بورگوس را پیش، پس و در هنگام یک زمین‌لرزه بررسی و گزارش کردند که دامنه خردلرزه‌های هیدروکربنی پس از زمین‌لرزه افزایش یافته است (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). همان‌طوری که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود پس از زمین‌لرزه دامنه خردلرزه‌ها در بسامدهای پیرامون ۳ هرتز افزایش یافته و متغیر PSD-IZ (پیش‌تر تعریف شده است) در پس از زمین‌لرزه در مقایسه با پیش از آن افزایش یافته که اختلاف این دو در محل مخازن بیشینه است. (Ali et al. (2009) در بررسی انجام‌شده روی مخزنی در ابوظبی، اثر زمین‌لرزه بر خردلرزه‌های مورد بحث را در هنگام رخداد زمین‌لرزه رد کرده‌اند.

۵-۴. حالت چهارم: اندرکنش نوفه‌های بسامد بالا با مخازن

(Dangel et al. (2003) در دو مورد از سایت‌های مورد مطالعه خود، از ویراتورهای در سطح زمین که امواجی با بسامدهایی در محدوده ۸ تا ۱۵ هرتز به زمین وارد می‌کردند، برای بررسی اثرات احتمالی نوفه‌های مصنوعی بسامد بالا بر خردلرزه‌های هیدروکربنی استفاده کردند. مقایسه خردلرزه‌های ثبت شده پیش، پس و در هنگام عملیات ویراتورها هیچ‌گونه تغییری را نشان نداد. بر خلاف این مشاهدات (Kouznetsov et al. (2005) و Turuntaev et al. (2006) گزارش دادند که مخازن هیدروکربنی با امواج لرزه‌ای ناشی از ویراتورهای واقع در سطح زمین می‌توانند تحریک شوند.

۵-۵. حالت پنجم: خردلرزه‌های مورد بحث تحت تأثیر امواج اقیانوسی و نوفه‌های سطحی

با توجه به شواهد یادشده که گاه ضد و نقیض نیز به نظر می‌رسند، (Saenger et al. (2009a, b & c) مدلی برای توجیه مشاهدات موجود پیشنهاد کردند. بر اساس این مدل که در شکل ۱۳ نمایش داده شده است، دامنه‌های طیف مشاهده‌شده در محدوده بسامدهای موسوم به خردلرزه‌های هیدروکربنی دو منشأ می‌تواند داشته باشد که عبارتند از امواج اقیانوسی در بسامدهای پایین‌تر و نوفه‌های شهری در بسامدهای بالاتر. زمانی که منطقه از دید نوفه‌های شهری ساکت و آرام باشد، مطابق با شکل ۱۳-الف، خردلرزه‌های هیدروکربنی که در نتیجه اندرکنش امواج اقیانوسی و مخازن هیدروکربنی به وجود آمده‌اند چیرگی خواهد داشت. ولی در شرایطی که سطح نوفه‌های شهری در منطقه بالا باشد، دامنه‌های مشاهده‌شده تحت

سنگ‌های روی مخزن هستند. این رابطه برای مقادیر معمول و متوسط متغیرهای بالا، مقدار حدود 10^{-6} متر بر ثانیه را پیشنهاد می‌کند که با مقادیر مشاهده‌شده قابل مقایسه است.

۷- نتیجه‌گیری

همان‌گونه که بیان شد به منظور استفاده از خردلرزه‌های هیدروکربنی برای شناسایی و مطالعه مخازن هیدروکربنی، پس از مطالعات (Dangel et al., 2003)، چندین مطالعه در مناطق مختلف جهان روی مخازن هیدروکربنی انجام شده است. بر اساس این مطالعات، ارتباط خردلرزه‌های مشاهده‌شده در محدوده بسامدی ۱ تا ۶ هرتز با مخازن هیدروکربنی و ارتباط آنها با برخی مشخصات مخزن مانند ستبرای لایه هیدروکربنی با این روش حفاری شده‌اند، به نفت و گاز رسیده است. با توجه به این موارد و دیگر مشاهداتی که در طی این نوشتار مرور شد، به نظر می‌رسد فناوری HyMas توانایی استفاده در شناسایی و مطالعه مخازن هیدروکربنی را دارد. ولی باید توجه داشت که امواج خردلرزه‌ای ضمن عبور از میان مخزن و از مسیر بین مخزن و سطح زمین تحت تأثیر عوامل بسیاری چون میرایی غیرالاستیک و اثرات ساختگامی قرار می‌گیرند که این عوامل می‌توانند دقت این روش را کاهش دهند و حتی توانایی آن را مخدوش کنند. افزون بر این، عوامل دیگری مانند تغییرات آب‌وهوایی و فعالیت‌های انسانی نیز می‌توانند امواجی هم‌بسامد با خردلرزه‌های هیدروکربنی ایجاد کنند که با خردلرزه‌های هیدروکربنی هم‌پوشانی و تداخل کنند و توانایی روش HyMas را تحت تأثیر قرار دهند. از این رو مطالعه و آشکار شدن سازوکار یا سازوکارهای ایجاد خردلرزه‌های هیدروکربنی می‌تواند به ابداع روش‌هایی برای بهینه‌سازی این فناوری انجامید.

با بررسی منابع و سازوکارهای مختلفی که می‌توانند به ایجاد قله در دامنه خردلرزه‌ها در محدوده بسامدی ۱ تا ۶ هرتز بیانجامد، می‌توان چنین جمع‌بندی کرد که هر موجی که سبب تحریک مخزن و نوسان سیال‌های درون حفره‌ای شود می‌تواند با سازوکار پیشنهادی (Saenger et al., 2009a, b & c) به تولید خردلرزه‌های هیدروکربنی بیانجامد. این امواج می‌توانند در اثر امواج اقیانوسی، نوفه‌های شهری و آب‌وهوایی قوی که به ژرفای زیاد نفوذ می‌کنند، زمین‌لرزه‌ها و هر منبع دیگری ایجاد شوند. خردلرزه‌های هیدروکربنی که با این سازوکار تولید می‌شوند تحت تأثیر دیگر عوامل و خردلرزه‌های محیطی آلوده می‌شوند که انجام مطالعاتی به منظور خالص‌سازی و جدایش خردلرزه هیدروکربنی ضروری و در چشم‌انداز آینده این روش قابل انتظار است.

تأثیر این نوفه‌ها خواهند بود (شکل ۱۳-ب). این پژوهشگران در ادامه بیان داشته‌اند که خردلرزه‌های هیدروکربنی بیش از آنکه توسط نوفه‌ها هم‌پوشانی داده شوند، تشدید می‌شوند.

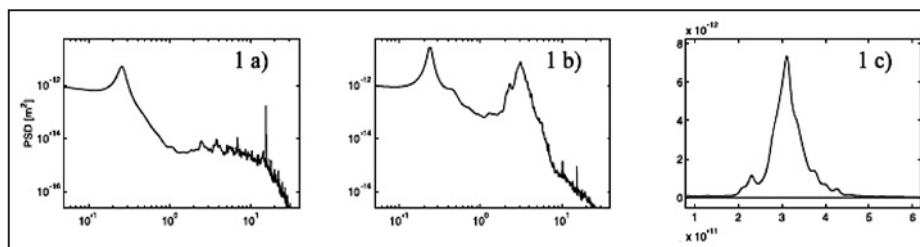
۶- ارتباط خردلرزه‌های هیدروکربنی با ویژگی‌های مخازن

در مطالعه انجام شده توسط (Dangel et al., 2003) با وجود اینکه مخازن ژرفایی، نوع هیدروکربن (گاز یا نفت)، نوع سنگ مخزن و شرایط زمین‌شناسی متفاوتی داشتند، بی‌هنجاری مشاهده‌شده در طیف خردلرزه‌ها در محدوده بسامدی باریکی قرار داشتند. با وجود این مشاهدات، (Dangel et al., 2003) در یکی از سایت‌های مورد مطالعه خود در دبی، سعی کردند رابطه بین ستبرای لایه هیدروکربن دار و توان خردلرزه‌های هیدروکربنی را بررسی کنند (شکل ۱۴-الف). همان‌طوری که در شکل مشاهده می‌شود به‌جز یکی از داده‌ها، بقیه داده‌ها یک رابطه خطی مستقیم نشان می‌دهند. مطالعه (Holzner et al., 2005a, b & c) روی دو مخزن Jandaira و Barreiras نتایج مشابهی را نشان داده است (شکل ۱۴-ب و ج).

مدل‌سازی حفرات نیمه‌اشباع یا پر شده از دو فاز مختلف سیال (هیدروکربن و آب) در مخازن هیدروکربنی می‌تواند از یک سو سازوکارهای پیشنهادی برای تولید خردلرزه‌های هیدروکربنی را مورد بررسی قرار داده و از سوی دیگری عوامل احتمالی موثر و چگونگی تأثیر آنها در ایجاد خردلرزه‌های هیدروکربنی را روشن سازد. در این راستا (Holzner et al., 2007a & b) برای مدل‌سازی خطی، حفرات مخروطی شکل و برای مدل‌سازی غیر خطی، حفرات کروی شکل را به‌عنوان نوسانگر در نظر گرفته و با استفاده از روابط Navier-Stocks، تولید خردلرزه‌های بسامد پایین در اثر نوسان سیالات درون حفره‌ای را مدل‌سازی کرده‌اند. در این مطالعه فرض شده است که حفرات از سیال هیدروکربن و آب پر شده و نیروی لازم برای به نوسان درآوردن سیال درون حفره‌ای از امواج اقیانوسی تأمین می‌شود. نتایج حاصل از این مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد، با افزایش اندازه حفرات، افزایش اشباع‌شدگی حفرات و کاهش گرانیوی سیال، بسامد قله خردلرزه‌های تولیدشده افزایش می‌یابد. این پژوهشگران رابطه‌ای را نیز برای پیش‌بینی دامنه سرعت جنبش قائم زمین در اثر عبور خردلرزه‌های هیدروکربنی در سطح زمین پیشنهاد می‌کنند که به‌صورت زیر است:

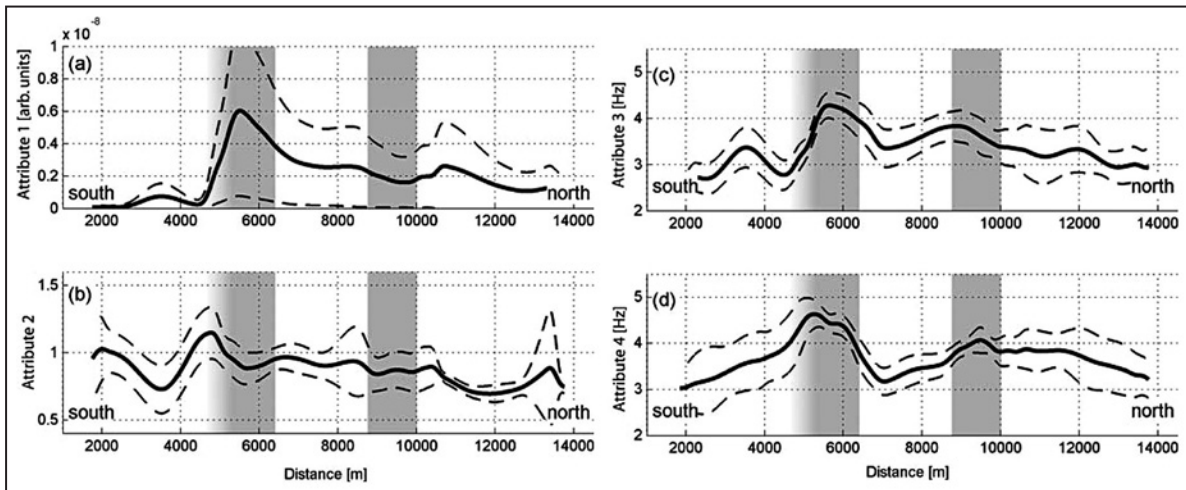
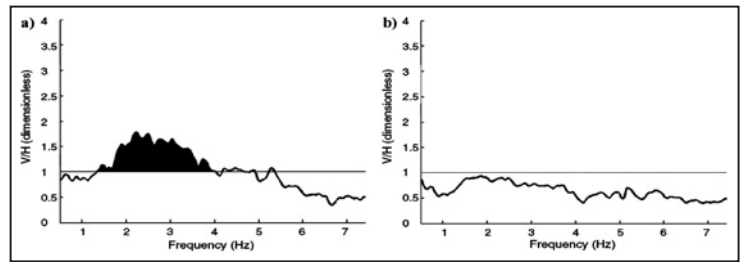
$$v_z = \frac{3\eta d c \gamma}{\rho h D \rho_R}$$

که در این رابطه η میزان تخلخل سنگ مخزن، d ستبرای لایه سنگ مخزن، c نیروی کاپیلارینه در سطح تماس هیدروکربن و آب، γ کشش سطحی نفت و گاز، r شعاع حفره، h نصف ارتفاع سیال هیدروکربن در حفره، D ژرفای مخزن و ρ_R چگالی

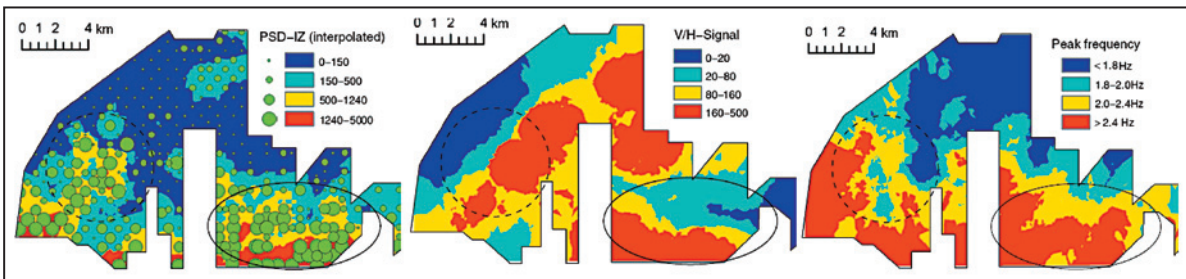


شکل ۱- نمونه‌ای از چگالی طیفی توان (Power Spectral Density, PSD) در مخزنی در اردن؛ (a) مربوط به مناطق مجاور مخازن هیدروکربنی؛ (b) مربوط به مناطق روی مخازن هیدروکربنی؛ (c) ترکیب خطی طیف‌های a و b در محدوده خردلرزه‌های هیدروکربنی است. در شکل c منحنی بالایی مربوط به مخزن هیدروکربنی و منحنی پایینی مربوط به بیرون از محدوده مخزن است. به مقیاس متفاوت محور قائم توجه شود. ویژگی‌های این مخزن در جدول ۱ در ردیف ۱ ارائه شده است (Dangel et al., 2003).

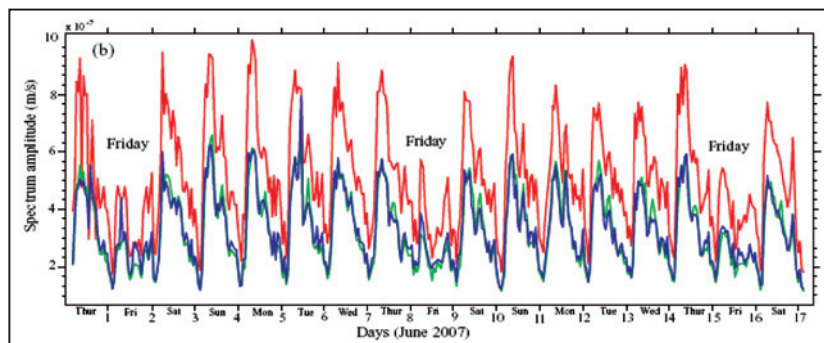
شکل ۲- نسبت طیفی مولفه قائم به افقی V/H در (a) خردلرزه‌های ثبت‌شده بر روی مخزن گازی بورگوس در مکزیک؛ (b) خردلرزه‌های ثبت‌شده در بیرون از محدوده مخزن (Saenger et al., 2007a).



شکل ۳- نیمرخ حاصل از محاسبه متغیرهای ۴ گانه برای ۶ خط برداشت موازی در محل سایت. از هر برداشت ۱۱ پنجره زمانی ۳۰ دقیقه در طول شب مورد استفاده قرار گرفته است. خط تیره میانگین داده‌ها و خط چین میانگین ± 1 انحراف معیار را نشان می‌دهد. مناطق سایه‌دار موقعیت دو مخزن مهم شمالی و جنوبی را مشخص می‌کنند (Lambert et al., 2008a).

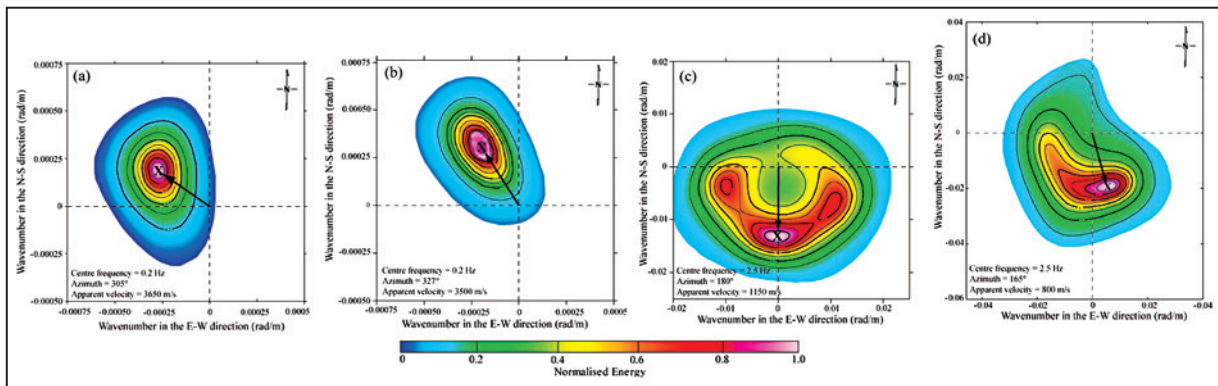
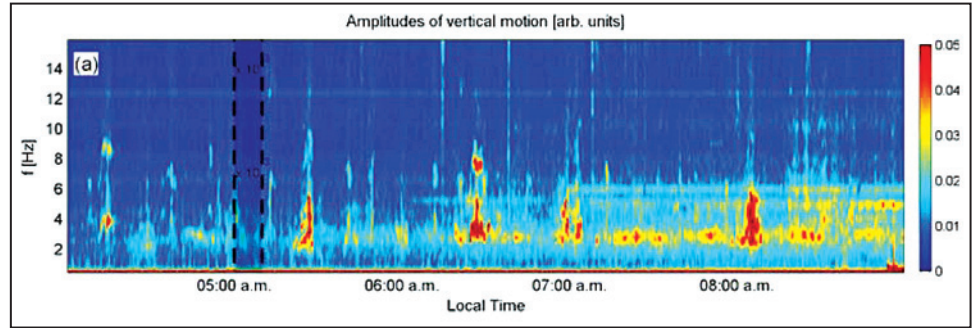


شکل ۴- نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل هیدروکربن در مخازن حوزه نفتی بورگوس در مکزیک بر اساس (چپ) مقادیر متغیر PSD-IZ (وسط) مقادیر مساحت زیر منحنی V/H در محدوده بسامدی ۱ تا ۳/۷ هرتز (و راست) مقادیر بسامد معادل دامنه بیشینه در محدوده بسامدی ۱ تا ۳/۷ هرتز. شکل دایره و بیضی موقعیت مخازن را نشان می‌دهند (Saenger et al., 2009b).

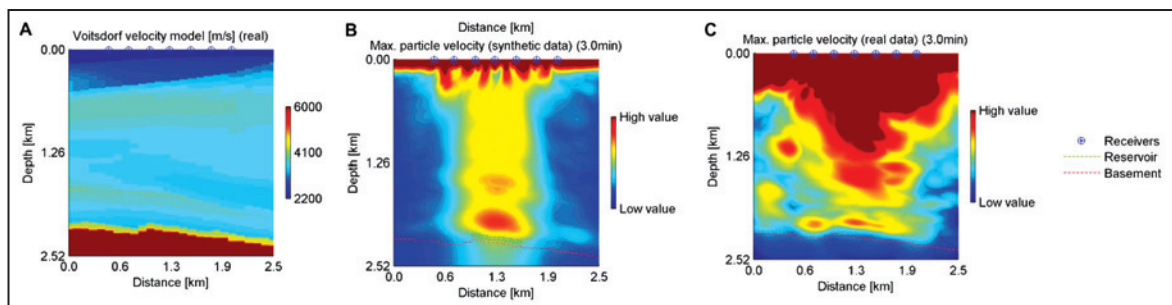


شکل ۵- تغییرات بیشینه دامنه خردلرزه‌ها در محدوده بسامدی ۱ تا ۶ هرتز در طول روز و شب و نیز در طول هفته در ایستگاهی بر مخزنی در ابوظبی (Ali et al., 2009b).

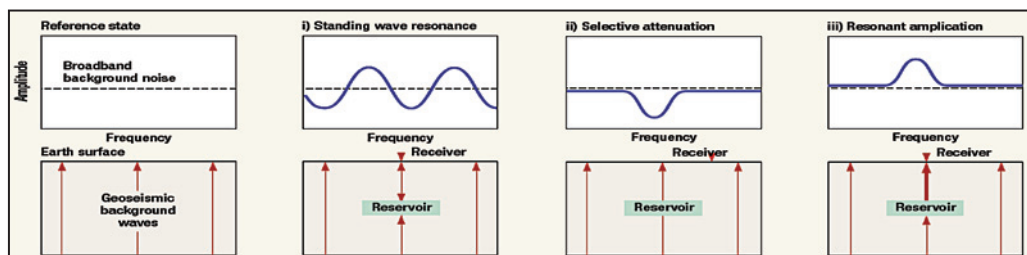
شکل ۶- تحلیل زمان- بسامد خردلرزه‌های ثبت‌شده در Voitsdrof برای فاصله زمانی ۴ تا ۹ صبح نشان‌دهنده تغییرات دامنه خردلرزه‌های هیدروکربنی با زمان است. با وجود اینکه دامنه‌ها در حدود ساعت ۵ در کمترین مقدار خود هستند با این وجود بررسی طیف آنها نشان‌دهنده وجود قله‌های مربوط به خردلرزه‌های هیدروکربنی است (Lambert et al., 2008a).



شکل ۷- انرژی بهنجار شده بر اساس تحلیل طیف بسامد- عدد موج در (a) نقطه A در سایت نفتی، برای بسامد مرکزی ۰/۲ Hz در ۴ ژوئن ۲۰۰۷ از نیمه شب تا ساعت ۱ بامداد؛ (b) نقطه B در سایت نفتی برای بسامد مرکزی ۰/۲ Hz در ۱۶ ژوئن ۲۰۰۷ از نیمه شب تا ساعت ۱ بامداد؛ (c) نقطه A در سایت نفتی برای بسامد مرکزی ۲/۵ Hz با شعاع آرایه‌ای ۲۲۵ متر در ۲۶ می ۲۰۰۹ از نیمه شب تا ۱ بامداد؛ (d) محل چاه خشک برای بسامد مرکزی ۲/۵ Hz با شعاع آرایه‌ای ۱۰۰ متر در ۲۰ ژانویه ۲۰۰۹ از نیمه شب تا ۱ بامداد. در این شکل سوی فلش، جهت انتشار امواج را نمایش می‌دهد (Ali et al., 2009b).

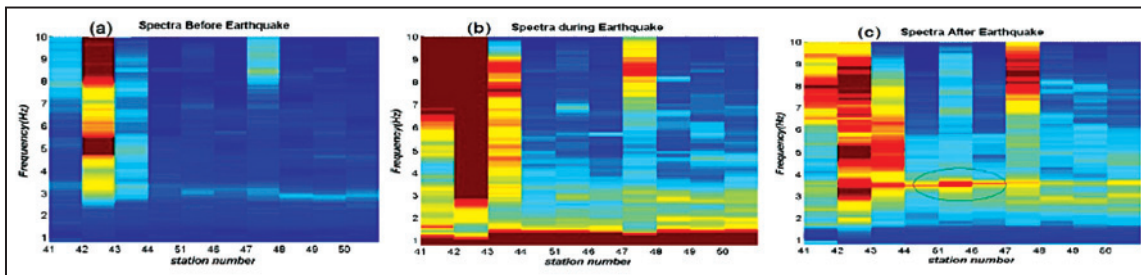
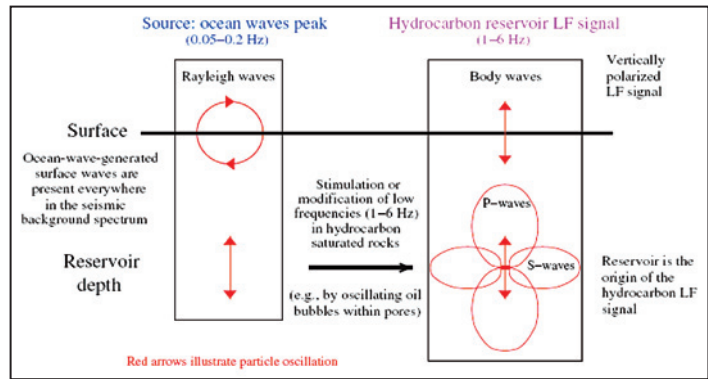


شکل ۸- (A) مدل سرعت واقعی در محل مخزن Voitsdrof در اتریش؛ (B) مدل‌سازی وارون از داده‌های مصنوعی از مخزنی فرضی هم‌ژرفا با مخزن مورد مطالعه؛ (C) مدل‌سازی زمانی وارون بر اساس داده‌های واقعی (Steiner et al., 2007).



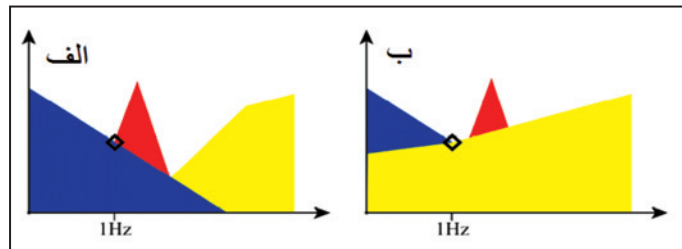
شکل ۹- سه سازوکار ممکن برای تولید خردلرزه‌های هیدروکربنی در اثر اندرکنش امواج اقیانوسی بسامد پایین با مخزن؛ (i) تشدید ناشی از پدیده موج ایستاده (ii) میرایی انتخابی و (iii) تشدید رزونانس (Graf et al., 2007).

شکل ۱۰- یک مدل اولیه برای توضیح منشأ خردلرزه‌های هیدروکربنی مشاهده شده که با ویژگی‌های طیفی این خردلرزه‌ها نیز همخوانی دارد. یکی از مهم‌ترین مشاهدات این است که قطبش قائم امواج اقیانوسی که به تولید امواج ریلی در ژرفای مخزن می‌انجامد، در خردلرزه‌های بسامد پایین (LF) مربوط به مخازن هیدروکربنی نیز مشاهده می‌شود. (Saenger et al., 2009b)

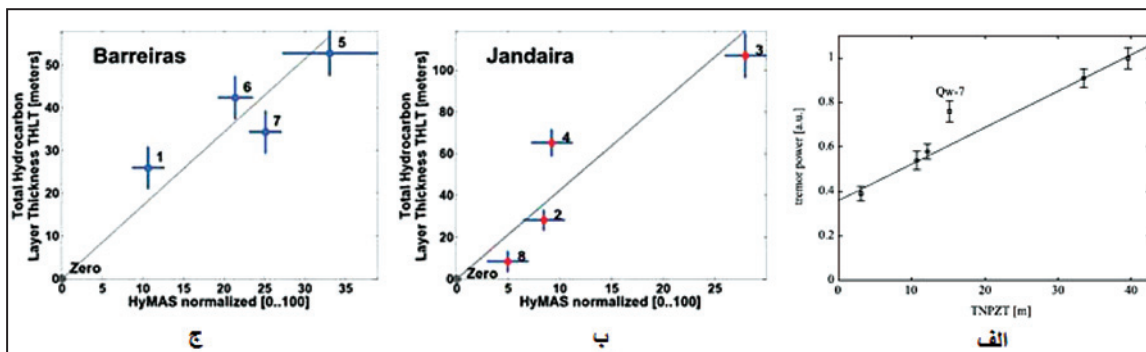
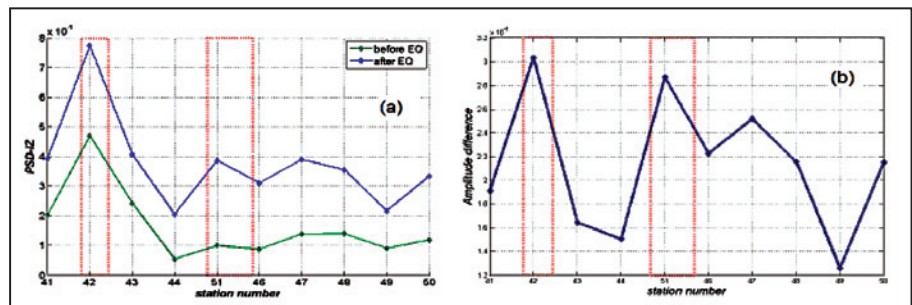


شکل ۱۱- طیف زمان- بسامد خردلرزه‌ها؛ (a) پیش از زمین‌لرزه؛ (b) هنگام زمین‌لرزه؛ (c) پس از زمین‌لرزه. بیضی، محل بی‌هنجاری مشاهده شده در خردلرزه‌های هیدروکربنی را نشان می‌دهد (Nguyen et al., 2008).

شکل ۱۲- (a) مقادیر PSD-IZ پیش و پس از زمین‌لرزه در طول یک نیمرخ که دو مخزن (با رنگ سرخ مشخص شده است) در بورگوس را قطع می‌کند؛ (b) اختلاف مقادیر PSD-IZ در طول نیمرخ پیش و پس از زمین‌لرزه. بیشترین اختلاف در محل مخازن رخ داده است (Nguyen et al., 2008).



شکل ۱۳- مدلی نمادین برای توجیه چشمه‌های انرژی خردلرزه‌های هیدروکربنی. در این شکل رنگ آبی نشان‌دهنده امواج اقیانوسی، رنگ زرد نشان‌دهنده امواج نوفه و رنگ سرخ نشان‌دهنده خردلرزه‌های هیدروکربنی است. علامت لوزی موقعیت اولین افت در دامنه را نشان می‌دهد. توزیع انرژی امواج و منشأ خردلرزه‌ها در حالتی که الف) انرژی امواج اقیانوسی چیرگی دارد و ب) انرژی امواج نوفه چیرگی دارد، دیده می‌شود (Saenger et al., 2009b).



شکل ۱۴- ارتباط خطی مستقیم بین سبترای لایه هیدروکربن‌دار و توان خردلرزه‌های هیدروکربنی؛ الف) در مخزنی در دبی (Dangel et al., 2003)؛ ب و ج) مخازنی در برزیل (Holzner et al., 2005a).

جدول ۱- خلاصه‌ای از مشاهدات خردلرزه‌های هیدروکربنی بر مخازن نفاط مختلف جهان.

ردیف	کشور	موقعیت	نوع سیال	ژرفای مخزن	سنگ مخزن	منبع
۱	اردن	دره کافتی دریای مرده	نفت	۲ تا ۴	کلاستیک	Dangel et al. (2003)
۲	شمال ایتالیا	میلان	نفت	۵	نامشخص	Dangel et al. (2003)
۳	مرکز اکراین	نامشخص	گاز	۳	کلاستیک	Dangel et al. (2003)
۴	امارات متحده عربی	نامشخص	نفت	۲/۵	کربناتی	Dangel et al. (2003)
۵	امارات متحده عربی	ربع خالی	نامشخص	۱/۲	کربناتی	Dangel et al. (2003)
۶	موراکو	نامشخص	نفت	۲-۱/۵	کربناتی	Dangel et al. (2003)
۷	مرکز ایتالیا	نامشخص	گاز	۰/۸	کلاستیک	Dangel et al. (2003)
۸	اکراین	نامشخص	گاز	۴	کلاستیک	Dangel et al. (2003)
۹	جنوب سوئد	نامشخص	گاز	۱	کلاستیک	Dangel et al. (2003)
۱۰	شمال سوئد	نامشخص	گاز	۱	کلاستیک	Dangel et al. (2003)
۱۱	اکراین	نامشخص	گاز	۴-۴/۵	کلاستیک	Dangel et al. (2003)
۱۲	امارات متحده عربی (دبی)	نامشخص	گاز	۳/۵	کربناتی	Dangel et al. (2003)
۱۳	امارات متحده عربی (دبی)	نامشخص	گاز	۲/۵	کربناتی	Dangel et al. (2003)
۱۴	آمریکا	خاور تگزاس	نامشخص	۳-۲	چالک	Dangel et al. (2003)
۱۵	آمریکا	مرکز تگزاس	نامشخص	۰/۸-۰/۶	کلاستیک	Dangel et al. (2003)
۱۶	اتریش	وو ایترس دراف (Voitsdrf)	نفت و گاز	۲-۲/۵	کلاستیک	Lambert et al. (2009a & b)
۱۷	مکزیک	حوضه بورگوس (Burgos Basin)	گاز	۲	کلاستیک	Saenger et al. (2007a & b)
۱۸	برزیل	پوتیگوار (Potiguar)	گاز	نامشخص	نامشخص	Veras et al. (2005); Holzner et al. (2005a, b & c); Holzner et al. (2006a, b, c & d)
۱۹	جنوب لیبی	حوضه مورزوک (Murzuq Basin)	نامشخص	نامشخص	نامشخص	Saenger et al. (2009a & b)
۲۰	کویت	نامشخص	نامشخص	نامشخص	نامشخص	Bloch & Akrawi (2006)
۲۱	اردن	نامشخص	نامشخص	نامشخص	نامشخص	Bloch & Akrawi (2006)

کتابنگاری

مصلح، ک.، دهقانی، ف.، الزامی، م. ر. و میرزاابراهیمی، ر.، ۱۳۸۷- «ذخایر نفتی جهان». استفاده بهینه از منابع گازی در ایران. مؤسسه مدیریت انرژی افق، فیبا، چاپ اول، تهران: مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ISBN ۹۷۸-۹۶۴-۸۴۲۷-۴۸-۶، ۱۰.

References

- Aki, K., 1957- "Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microseisms.," Tokyo University, Bull. Earthquake Res. Inst. 25, 415-457.
- Aki, K., 1965- A note on the use of microseisms in determining the shallow structure of the earth's crust, Geophysics 30, 665-666.
- Ali, M. Y., Berteussen, K. A., Small, J. & Barkat, B., 2007- A low frequency passive seismic experiment over a carbonate reservoir in Abu Dhabi. First Break 25, 71-73.
- Ali, M. Y., Berteussen, K. A., Small, J. & Barkat, B., 2009e- Low-frequency passive seismic experiments in Abu Dhabi, United Arab Emirates: implications for hydrocarbon detection. Geophysical Prospecting. doi: 10.1111/j.1365-2478.2009.00835.x.
- Ali, M. Y., Berteussen, K. A., Small, J. & Barkat, B., 2010- A study of ambient noise over an onshore oil field in Abu Dhabi, United Arab Emirates: Bulletin of the Seismological Society of America, 100, 392-401.
- Ali, M. Y., Berteussen, K. A., Small, J. & Pahlevi, O., 2009d- Microseism and microtremor analyses over an oilfield in Abu Dhabi - Implications for cyclone and hydrocarbon detection. 71st EAGE meeting Amsterdam, The Netherlands, Expanded Abstracts, SO34.
- Ali, M. Y., Berteussen, K. A., Small, J., Anjana, B. T. & Barkat, B., 2009a- Recent passive experiments in Abu Dhabi. EAGE Passive Seismic Workshop - Exploration and Monitoring Applications, Limassol, Cyprus, Expanded Abstracts, A36.
- Ali, M. Y., Berteussen, K. A., Small, J., Anjana, B. T., Barkat, B. & Pahlevi, O., 2009b- Recent low frequency passive seismic experiments in Abu Dhabi. 71st EAGE meeting, Amsterdam, The Netherlands, Expanded Abstracts, S037.
- Ali, M. Y., Berteussen, K. A., Small, J., Barkat, B. & Pahlevi, O., 2009c- Results from a low frequency passive seismic experiment over an oilfield in Abu Dhabi. First Break 27, 91-97.
- Banerji, S. K., 1924- Microseisms associated with the incidence of the south-west monsoon. Nature, 114-2868, 576.
- Banerji, S. K., 1925- Microseisms and the Indian monsoon. Nature, 116-2928, 866.
- Bernard, P. 1941- Sur certaines propriétés de la boule étudiées à l'aide des enregistrements sismographiques, Bull. Inst. Oceanogr. Monaco,

- 00, 1–19.
- Bertelli, T., 1872- Osservazioni sui piccoli movimenti dei pendoli in relazione ad alcuni fenomeni meteorologiche, *Boll. Meteorol.Osserv. Coll. Roma* 9, 10 pp.
- Berteussen, K. A., Ali, M. Y., Small, J. & Barkat, B., 2008b- A low frequency, passive seismic experiment over a carbonate reservoir in Abu Dhabi – Wavefront and particle motion study. 70th EAGE meeting, Rome, Italy, Expanded Abstracts, B046.
- Berteussen, K. A., Ali, M. Y., Small, J., Anjana, B. T. & Barkat, B., 2008a- Analysis of low frequency passive seismic data from an experiment over a carbonate reservoir in Abu Dhabi. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, United Arab Emirates, SPE -117925-MS.
- Bloch, G. & Akrawi, K., 2006- Application of passive seismic (IPDS) surveys in Arabian Peninsula. EAGE passive seismic workshop – Exploration and monitoring applications, Dubai, United Arab Emirates, Expanded Abstracts, A28.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F. & Bard, P., 2006- The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review. *Earth-Science Reviews*, 79, 205–227.
- Capon, J., 1969- High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *IEEE*. 57 1408-1419.
- Capon, J., Greenfield, R. J. & Kolker, R. J., 1967- Multidimensional maximum-likelihood processing of a large-aperture seismic array. *IEEE*. 55 192-211.
- Dangel, S. & Singer, J. M., 2002- Observation of characteristic tremor phenomena over hydrocarbon reservoirs
- Dangel, S., Schaepman, M. E., Stoll, E. P., Carniel, R., Barzandji, O., Rode, E. D. & Singer, J. M., 2003- Phenomenology of tremor-like signals observed over hydrocarbon reservoirs. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 128, 135–158.
- Douze, E. J., 1964- Rayleigh waves in short-period seismic noise. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 54-4, 1197-1212.
- Douze, E. J., 1967- Short-period seismic noise. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 57-1, 55-81.
- Frehner, M., Schmalholz, S. M., Holzner, R. & Podladchikov, Y. Y., 2006- Interpretation of hydrocarbon microtremors as pore fluid oscillations driven by ambient seismic noise. EAGE Passive Seismic Workshop – Exploration and Monitoring Applications, Dubai, United Arab Emirates, Expanded Abstracts, A05.
- Frehner, M., Schmalholz, S. M., Podladchikov, Y., Eth, Z. & Oslo, U., 2007- Interaction of seismic background noise with oscillating pore fluids causes spectral modifications of passive seismic measurements at low frequencies. 77th SEG meeting, San Antonio, Texas, USA, 1307–1311.
- Friedrich, A., Kruger, F. & Klinge, K., 1998- “Ocean-generated microseismic noise located with the Grafenberg array” *Journal of Seismology*, 2,47-64.
- Goertz, A. V., Schechinger, B., Koerbe, M. & Krajewski, P., 2009- A low-frequency passive seismic survey in an urban setting in Germany. 71st EAGE meeting, Amsterdam, The Netherlands, Expanded Abstracts, S039.
- Graf, R., Schmalholz, S. M., Podladchikov, Y. Y. & Saenger, E. H., 2007- Passive low frequency spectral analysis: Exploring a new field in geophysics. *World Oil* 228, 47–52.
- Gupta, I. N., 1965- Standing-wave phenomena in short-period seismic noise. *Geophysics*, 30-6, 1179-1186.
- Gutenberg, B., 1911- Die seismische bodenunruhe. Ph.D. thesis University of Gottigen, Germany. (In German).
- Hanssen, P. & Bussat, S., 2008- Pitfalls in the analysis of low frequency passive seismic data. *First Break* 26, 111–119.
- Holzner, R., Eschle, P., Dangel, S. & Narayanan, C., 2007a- Hydrocarbon related microtremors –Verification of an analytical oscillator model by the Navier-Stokes equations. 69th EAGE meeting, London, UK, Expanded Abstracts, P212.
- Holzner, R., Eschle, P., Dangel, S., Frehner, M., Narayanan, C. & Lakehal, D., 2009- Hydrocarbon microtremors interpreted as nonlinear oscillations driven by oceanic background waves. *Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation* 14, 160–173.
- Holzner, R., Eschle, P., Frehner, M., Schmalholz, S. & Podladchikov, Y., 2006a- Hydrocarbon microtremors interpreted as oscillations driven by oceanic background waves. 68th EAGE meeting, Vienna, Austria, Expanded Abstracts, D036.
- Holzner, R., Eschle, P., Frehner, M., Schmalholz, S. & Podladchikov, Y., 2006b- Interpretation of hydrocarbon microtremors as nonlinear oscillations driven by oceanic background waves. 76th SEG meeting, New Orleans, Louisiana, USA, 2294–2298.
- Holzner, R., Eschle, P., Meier, P. F. & Dangel, S., 2007b- Linear model for low-frequency pore liquid oscillations observed in hydrocarbon microtremor analysis (HyMAS). *GeoArabia* 12, 169.
- Holzner, R., Eschle, P., Zurcher, H., Graf, R., Dangel, S. & Meier, P. F., 2005a- Identification of hydrocarbon reservoirs by microtremor analysis (HyMAS) – Successful and reproducible. 2nd SEG/EGS/EPEX/EPA International Petroleum Conference, Cairo, Egypt, 36.
- Holzner, R., Eschle, P., Zurcher, H., Graf, R., Dangel, S. & Meier, P. F., 2005b- Case study of successful identification of hydrocarbon reservoirs by microtremor analysis (HyMAS). AAPG International Conference, Paris, France.
- Holzner, R., Eschle, P., Zurcher, H., Lambert, M., Graf, R., Dangel, S. & Meier, P. F., 2005c- Applying microtremor analysis to identify hydrocarbon reservoirs. *First Break* 23, 41–46.
- Holzner, R., Eschle, P., Dewarrat, R., Lambert, M. & Graf, R., 2006c- Marine application of hydrocarbon microtremor analysis (Hy-MAS). 76th SEG meeting, New Orleans, Louisiana, USA, 2290–2293.

- Holzner, R., Lambert, M., Graf, R., Dangel, S. & Meier, P. F., 2006d- Reproducibility Test for the Identification of Hydrocarbon Reservoirs by HyMAS. EAGE meeting, Dubai, United Arab Emirates, 10 - 13 December 2006.
- Veras, I. M., Chaves, R. D., Oliveira, A. S. D., Holzner, R. & Graf, R., 2005- Direct hydrocarbon detection experiment in Potiguar basin. 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11 – 14 September 2005
- Kaya, S., Rode, E. D. & Kier, D., 2007- Integrated application of passive seismic technology for trapped oil detection in mature fields and hydrocarbon discoveries in adjacent compartments: 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Kouznetsov, O. L., Chirkin, I. A., Dryagin, V. V., Aroutunov, S. L. & Meltchouk, B. Y., 2005- Induced seismoacoustic emission Basis for new technologies of fluid identification: 67th Ann. Internat. Mtg., Eur. Assn. Geosci. Eng., Expanded Abstracts, page G048.
- Lacoss, R. T., Kelly, E. J. & Nafi, T. M., 1969- Estimation of seismic noise structure using arrays. *Geophysics*, 34-1, 21-38.
- Lambert, M. A., Schmalholz, S. M., Saenger, E. H. & Steiner, B., 2009a- Low-frequency microtremor anomalies at an oil and gas field in Voitsdorf, Austria. *Geophysical Prospecting* 57, 393–411. doi:10.1111/j.1365–2478.2008.00734.x
- Lambert, M. A., Schmalholz, S. M., Saenger, E. H. & Steiner, B., 2009b- Passive seismic study at an oil and gas field in Voitsdorf, Austria EAGE Passive Seismic Workshop – Exploration and Monitoring Applications, Limassol, Cyprus, Expanded Abstracts, A34.
- Lambert, M., Schmalholz, S. M., Saenger, E. H. & Podladchikov, Y. Y. 2007- Low-frequency anomalies in spectral ratios of single-station microtremor measurements: Observations across an oil and gas field in Austria. 77th SEG meeting, San Antonio, Texas, USA, Expanded Abstracts, 1352–1356.
- Longuet-Higgins, M. S., 1950- A theory of the origin of microseisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 243,1–35.
- Nakamura, Y., 1989- A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report Railway Technical Research Institute*, 30, 25–30.
- Nguyen, T. T., Lambert, M., Saenger, E. H., Artman, B. & Schmalholz, S. M. 2009- Reduction of noise effects on low frequency passive seismic data. 71st EAGE meeting, Amsterdam, the Netherlands, Expanded Abstracts, S038.
- Nguyen, T. T., Saenger, E. H., Schmalholz, S. M. & Artman, B., 2008- Earthquake triggered modifications of microtremor signals above and nearby a hydrocarbon reservoir in Voitsdorf, Austria. 70th EAGE meeting, Rome, Italy, Expanded Abstracts, P025.
- Pujol, J., 2003- “Elastic wave propagation and generation in seismology” Cambridge University Press.
- Rached, G. R., 2006- Surface passive seismic in Kuwait. EAGE Passive Seismic Workshop – Exploration and Monitoring Applications, Dubai, United Arab Emirates, Expanded Abstracts, A27.
- Rached, G. R., 2009- The challenge for surface passive seismic measurements in Kuwait. EAGE Passive Seismic Workshop – Exploration and Monitoring Applications, Limassol, Cyprus, Expanded Abstracts, A33.
- Saenger, E. H., Lambert, M. A., Nguyen, T. T. & Schmalholz, S. M., 2009a- Preliminary model of hydrocarbon reservoir related microtremors. 71st EAGE meeting, Amsterdam, the Netherlands, Expanded Abstracts, S035.
- Saenger, E. H., Schmalholz, S. M., Lambert, M. A., Nguyen, T. T., Torres, A. & Metzger, S., 2009b- A passive seismic survey over a gas field: Analysis of low-frequency anomalies. *Geophysics* 74, O29–O40.
- Saenger, E. H., Schmalholz, S. M., Podladchikov, Y. Y., Holzner, R., Lambert, M. & Steiner, B., 2007a- Scientific strategy to explain observed spectral anomalies over hydrocarbon reservoirs generated by microtremors. 69th EAGE meeting, London, UK, Expanded Abstracts, A033.
- Saenger, E. H., Torres, A. & Artman, B., 2009c- A low-frequency passive seismic survey in Libya. EAGE Detective Stories Behind Prospect Generation Workshop – Challenges and The Way Forward, Muscat, Oman, Expanded Abstracts, 5028.
- Saenger, E. H., Torres, A., Rentsch, S., Lambert, M., Schmalholz, S. M. & Mendez, H. E., 2007b- A hydrocarbon microtremor survey over a gas field: Identification of seismic attributes. 77th SEG meeting, San Antonio, Texas, USA.
- Saxton, J., 2006- “Iran’s Oil and Gas Wealth” Joint Economic Committee, research report, 109-31, March 2006.
- Singer, J. M., Barzandji, O., Leu, W., Rode, E. D., Akrawi, K., Linthorst, S. & Dangel, S., 2002- Spectroscopic identification of tremor phenomena over hydrocarbon reservoirs. 64th EAGE meeting, Florence, Italy, Expanded Abstracts, H-46.
- Steiner, B., Saenger, E. H. & Schmalholz, S. M., 2007- Time-reverse modeling of microtremors: A potential method for hydrocarbon reservoir localization. 77th SEG meeting, San Antonio, Texas, USA, Expanded Abstracts, 2115–2119.
- Steiner, B., Saenger, E. H. & Schmalholz, S. M., 2008a- Case studies on 2D- and 3D-time reverse modeling of low-frequency microtremors – Application to reservoir localization. 70th EAGE meeting, Rome, Italy, Expanded Abstracts, B045.
- Steiner, B., Saenger, E. H. & Schmalholz, S. M., 2008b- Time reverse modeling of low-frequency microtremors: Application to hydrocarbon reservoir localization. *Geophysical Research Letters* 35, L03307. doi:10.1029/2007GL032097
- Toksöz, M. N., 1964- Microseisms and an attempted application to exploration. *Geophysics*, 29-2, 154-177.
- Turuntaev, S. B., Burchik, V. N. & Turuntaev, D. S., 2006- Microseismic Background Study for Gas Field Exploration. EAGE Conference, Saint Petersburg, Russia, P245.
- Van Mastrigt, P. & Al-Dulaijan, A., 2008- Seismic spectroscopy using amplified 3C geophones: 70th Ann. Internat. Mtg., Eur. Assn. Geosci. Eng., Expanded Abstracts, page: B047.
- Walker, D., 2008- Recent developments in low frequency spectral analysis of passive seismic data: *First Break*, 26(2), 69-77.

Sustainability Assessment Review of Application of Microtremors for Detecting and Studying Hydrocarbon Reservoirs

H. Gerivani^{1*}, N. Hafezi Moghaddas², E. Haghshenas³ & I. Abdollahi Fard⁴

¹ Ph.D. Student, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Associated Professor, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³ Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

⁴ Ph.D., Geophysical Department, Exploration Directorate of National Iranian Oil Company, Tehran, Iran

Received: 2011 December 31

Accepted: 2012 September 30

Abstract

Notwithstanding geological and geophysical surveys and studies for hydrocarbon reservoir detection cost very much, those have lots of uncertainties. Then, engineers and scientists try to find and use new methods. Recently, some studies have suggested using ambient noise as a tool for hydrocarbon reservoir investigation. This new passive seismic technique, named HyMas, is based on the positive energy anomaly in data spectra between 1 to 6 Hz for microtremor measurements over reservoirs, which are called hydrocarbon microtremors. Despite the acceptable results obtained by the HyMas technique, there are many unknowns, especially concerning the source and generation mechanism of hydrocarbon microtremors and the relations between reservoir characteristics and the attributes of hydrocarbon microtremors. In this study, it has been tried to review the published experiences and studies and conclude the results and findings.

Keywords: Hydrocarbon Reservoir, Ambient Noise, Microtremores, Pasive Geophysics.

For Persian Version see pages 29 to 40

*Corresponding author: H. Gerivani; E-mail: hadi_gerivani@yahoo.com