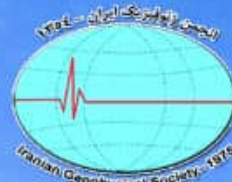


انجمن ژئوفیزیک ایران با همکاری مدیریت اکتشاف برقرار می کند



شرکت ملی نفت ایران
مدیریت اکتشاف
اداره ژئوفیزیک

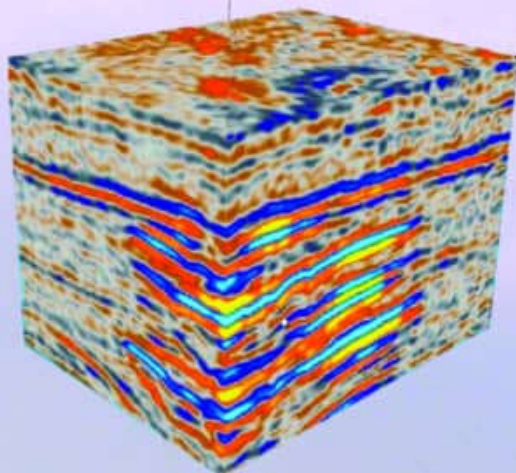


ششمین همایش

ژئوفیزیک کاربردی در اکتشاف نفت

6th Seminar

Applied Geophysics in Petroleum Exploration



Seismic Acquisition, Imaging & Interpretation of complex structures
Reservoir Geophysics
New advances in non-seismic techniques

عملیات لرزه ای، تصویر سازی و تفسیر ساختارهای پیچیده، ژئوفیزیک مغز
تکنیک های جدید روشهای غیر لرزه ای

زمان: ۱۲ بهمن ماه ۱۴۰۲

آخرین مهلت ارسال مقالات: پایان ۱۵ دی ماه ۱۴۰۲ سایت ثبت مقالات: www.nigsconference.ir

مکان: ضلع شمال شرقی میدان شیخ بهایی، ابتدای خیابان سنول، خیابان خدای

مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کتابچه مقالات

ششمین همایش ژئوفیزیک کاربردی در اکتشاف نفت

زمان برگزاری:

۱۲ بهمن ماه ۱۴۰۲

برگزارکننده:

انجمن ملی ژئوفیزیک ایران

مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران

مکان برگزاری:

مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران

نمایه شده در ISC



فهرست مطالب

| | |
|-------|--|
| | معرفی کنفرانس |
| | حامیان مادی و معنوی ششمین همایش ژئوفیزیک کاربردی در اکتشاف نفت |
| | سازمان همایش |

فهرست مقالات فارسی

| | |
|-----------|---|
| ۱ | شناسایی خطواره‌های مغناطیسی با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشنال، مطالعه موردی شرق ایران |
| ۵ | عمق پی‌سنگ با روش پارکر- اولدنبرگ: کویر مرکزی ایران |
| ۹ | New advances in Geophysics and Geotechnical investigations in Deepwater environment |
| ۱۵ | جدایش سیال با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای پیش از برانبارش؛ مطالعه موردی در یکی از مخازن کربناته ایران |
| ۱۹ | RockMat: A Comprehensive MATLAB Toolbox for Rock Physics Modeling |
| ۲۳ | تشخیص و تحلیل ساختمانی دی‌پایر نمک با استفاده از تحلیل نشانگرهای لرزه‌ای |
| ۲۸ | تحلیل ساختاری لایه‌های منفصل (بویژه نمک هرمز) و تاثیر آنها بر هندسه چین خوردگی ناحیه فارس با استفاده از مدل تجربی، اطلاعات زمین شناسی و ژئوفیزیکی |
| ۴۶ | A Hybrid CNN-LSTM Deep Learning Framework for Porosity Prediction in Carbonate Reservoirs |
| ۵۲ | Automated Seismic Velocity Picking via Deep Semantic Segmentation |
| ۵۶ | Application of Deep Neural Networks for Spatial Relation Learning in Seismic Object Detection |
| ۶۰ | Advances in Oil Spill Cleanup Methods: A Comprehensive Review |
| ۶۴ | Application of D-PATV method to determine the first arrival time in seismic refraction tomography |
| ۶۸ | کاربرد مدارهای کوانتومی در مطالعات ژئوفیزیکی |
| ۷۳ | بررسی فناوری‌های جدید ژئوفیزیکی و تاثیر آن بر اکتشاف منابع هیدروکربنی |
| ۷۸ | ژئوفون اپتیکال |
| ۸۲ | تعیین عمق موهو به روش پارکر- اولدنبرگ بهبود یافته در منطقه زاگرس |
| ۸۶ | آنالیز سرعت روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل |
| ۹۰ | وارون‌سازی داده‌های مغناطیس با استفاده از روش یادگیری عمیق |
| ۹۴ | Sub-pixel channel boundary delineation based on partial area effect |
| ۹۸ | استفاده از ماشین بردار پشتیبان و یادگیری عمیق در دسته‌بندی رخساره‌ها براساس نشانگرهای وارون‌سازی پیش از برانبارش |
| ۱۰۳ | طبقه‌بندی رخساره‌های لرزه‌ای بر اساس الگوریتم شبکه‌های عصبی در دشت گرگان، ایران |
| ۱۰۷ | شناسایی روند گسلش به کمک پروفیل لرزه‌ای قائم‌افست دور |
| ۱۱۲ | تحلیل رخساره مخزنی براساس مدل‌سازی فیزیک سنگی با استفاده از نگارهای چاه |

معرفی کنفرانس

انجمن ملی ژئوفیزیک ایران در راستای هویت بخشی به اهداف و فعالیت های دانشمندان و پژوهشگران حوزه ژئوفیزیک ایران در سال ۱۳۵۴ تأسیس گردیده است.

ششمین همایش ژئوفیزیک کاربردی در اکتشاف نفت به منظور آشنایی هرچه بیشتر پژوهشگران ژئوفیزیک اکتشافی نفت با آخرین دستاوردهای علمی، گسترش و تقویت ارتباط علمی بین مراکز تحقیقاتی، دانشگاهی و صنعتی با همکاری مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران برگزار می شود. این همایش در تاریخ ۱۲ بهمن ۱۴۰۲ در محل مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران برگزار گردید. محورهای اصلی این همایش عبارتند از:

- **Seismic Acquisition, Imaging & Interpretation of complex structures**
- **Reservoir Geophysics**
- **New advances in non-seismic techniques**

حامیان مادی و معنوی مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران



سازمان کنفرانس

ریاست کمیته برگزاری - دکتر محمدرضا حاتمی
mrhatami@ut.ac.ir



دبیر کمیته علمی - دکتر محمدعلی ریاحی
mariahi@ut.ac.ir



دبیر کمیته اجرایی - محمدرضا بختیاری
r_bakhteari@yahoo.com



روابط عمومی و دبیرخانه - مهندس پریسا مهدی
mahdi.geo.1381@gmail.com



شناسایی خطواره‌های مغناطیسی با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشنال،

مطالعه موردی شرق ایران

مصطفی موسی‌پور یاسوری^۱، سیده‌حانی متولی عنبران^۲، رازییه صفیان بلداجی^۱، احمد الوندی^۱، روشنگ رجب‌لو^۱

^۱ موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

از خطواره‌های مغناطیسی برای شناسایی و تشخیص ساختارهای زمین شناسی استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی برای شناسایی خطواره وجود دارد که عموماً برپایه گرادیان افقی و قائم هستند که به نوبه حساس‌اند. در سال‌های اخیر روش‌های یادگیری ماشین در حل مسائل ژئوفیزیکی توسعه پیدا کرده و کاربرد آن در حال افزایش است. در این پژوهش از روش شبکه عصبی کانولوشنال (CNN) که زیرمجموعه‌ای از روش‌های یادگیری ماشین است برای تعیین خطواره مغناطیسی شرق ایران استفاده می‌شود. این روش توسط اسمیت و ناپرستک (۲۰۲۲) توسعه داده شده است. با ترکیب اطلاعات حاصل از خطواره‌های مغناطیسی و اطلاعات زمین شناسی، گسل‌ها و مرزهای تکتونیکی شرق ایران تفسیر شده است. خطواره‌های مغناطیسی استخراج شده با ساختارهای خطی منطقه از جمله گسل‌های درونه، نه‌بندان، نایبندان، ازبک کوه، بیابانک، زردن تطابق خوبی داشته است و نیز باتوجه به گسل‌ها محدوده بلوک لوت، بلوک طبس، بلوک یزد، زون تکتونیکی کاشمر-کرمان مشخص شده است.

واژه‌های کلیدی: مغناطیس هوابرد، خطواره مغناطیسی، یادگیری ماشین، شبکه عصبی کانولوشنال، تکتونیک ایران، زون ساختاری.

Identification of magnetic lineaments using convolutional neural networks, Case study of eastern Iran

Moustafa Mousapour Yasoori¹, Seyed-hani Motavalli-anbaran², Raziye Saftan Boldaji¹, Ahmad Alvandi¹, Roshanak Rajablou¹

¹ Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

² Associate Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Aeromagnetic lineaments are used to identify and recognize geological structures. There are Different methods to identify magnetic lineaments which are generally based on horizontal and vertical gradients. These methods are sensitive to noise. Nowadays, machine learning methods for solving geophysical problems have been developed and Its application is increasing. In this research, the Convolutional Neural Network (CNN) method, which is a subset of machine learning methods, is used to determine the aeromagnetic lineaments of eastern Iran. This method was developed by Smith and Naprstek (2022). From the information obtained by lineaments and geological information, The faults and tectonic boundaries of eastern Iran have been interpreted. The extracted magnetic lineaments have a good match with the linear structures of the region, including Doruneh, Nehbandan, Naybandan, Uzbak-Kuh, Biabanak, Zarand faults. In addition, according to the faults, the boundaries of Lut block, Tabas block, Yazd block, Kashmar-Kerman tectonic zone have been determined.

Keywords: aeromagnetic, magnetic lineaments, machine learning, convolutional neural network, Iranian tectonic, tectonic zone

۱ مقدمه

روش‌های متعددی برای شناسایی و برجسته‌سازی خطواره‌های مغناطیسی وجود دارد. این روش‌ها معمولاً بر پایه گرادین‌های افقی و قائم قرار دارند بنابراین وجود نوفه در خروجی این روش‌ها محتمل است. روش‌های جدید برای غلبه بر این محدودیت در حال توسعه است. یکی از این روش‌ها، هوش مصنوعی است که در سال‌های اخیر استفاده از آن در علوم مختلف رواج یافته است. کاربرد روش‌های هوش مصنوعی در حل مسائل ژئوفیزیک با توجه به در دسترس بودن منابع آنلاین و کتابخانه‌های زبان‌های برنامه‌نویسی از جمله پایتون در حال افزایش است. از هوش مصنوعی در داده‌های لرزه‌ای برای تشخیص گسل (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹)، ردیابی افق لرزه‌ای (یانگ و سان، ۲۰۲۰)، در داده‌های گرانی برای تشخیص ساختارهای نمکی (چن و همکاران، ۲۰۲۰) و در داده‌های مغناطیس برای تشخیص خطواره (آقایی راد، ۲۰۱۹) استفاده شده است. در این پژوهش از روش شبکه عصبی کانولوشنال (CNN) توسعه داده شده توسط اسمیت و ناپرستک (۲۰۲۲) برای تعیین خطواره مغناطیسی شرق ایران استفاده می‌شود.

۲ روش تحقیق

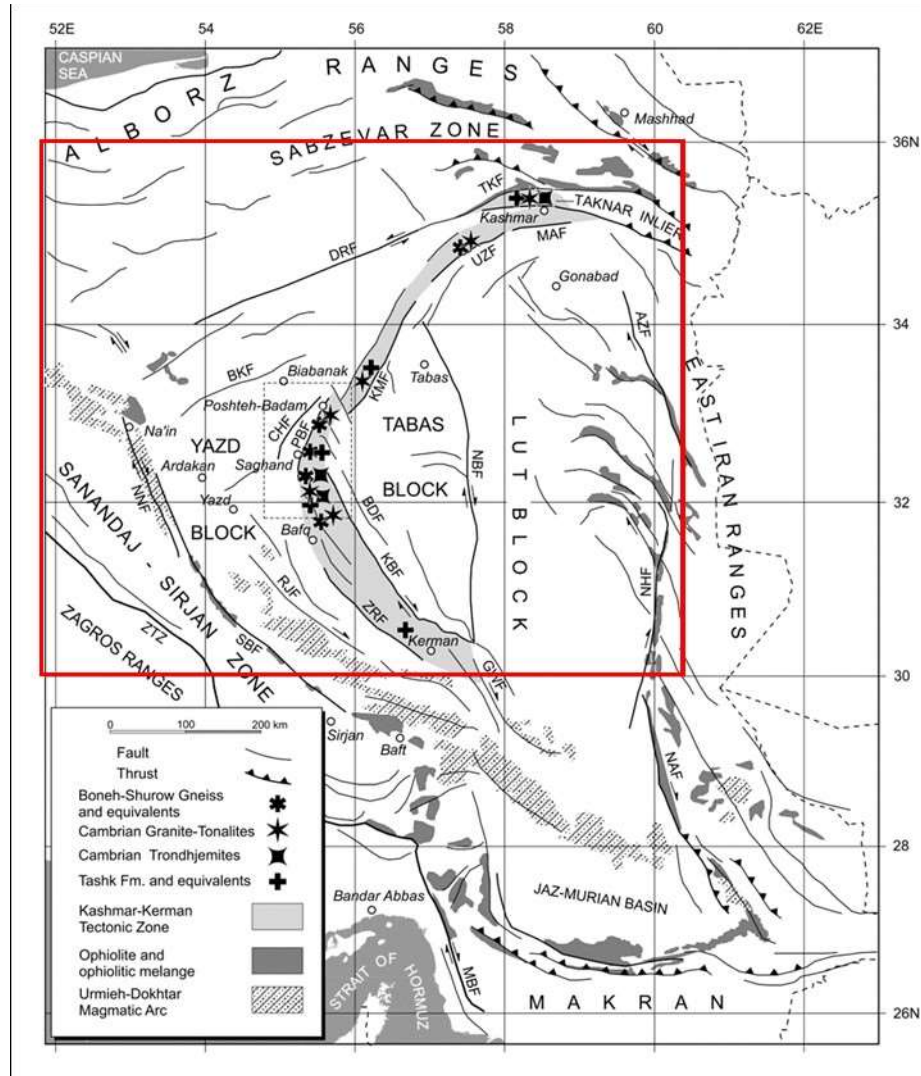
روش CNN یک کلاس از یادگیری عمیق است که برای پردازش تصویر مناسب است و یکی از محبوب‌ترین روش‌ها برای تفسیر و پردازش تعداد زیادی داده است. در یادگیری نظارت شده، سیستم با استفاده از داده‌های برچسب گذاری شده و وزن دادن به لایه‌های پنهان، خروجی را به نتیجه مورد انتظار نزدیک می‌کند. به این فرآیند آموزش سیستم گفته می‌شود. برای آموزش سیستم معمولاً تعداد زیادی داده لازم است. پس از آموزش، سیستم حاوی مجموعه‌ای از وزن‌های آموخته شده است که برای پیش‌بینی داده جدید از آن استفاده می‌شود. معماری مدل CNN شامل چندین مؤلفه خاص مانند لایه‌های کانولوشن، لایه‌های ادغام (Pooling layers)، لایه‌های حذفی (Dropout layers)، لایه‌های متراکم (Dens layers)، توابع فعال‌سازی (Activation functions) و الگوریتم بهینه‌سازی است. در اکثر مدل‌های CNN، از چندین لایه کانولوشن استفاده می‌شود. لایه‌های کانولوشن وزن‌هایی را ایجاد می‌کنند که با روش تکرار خروجی نهایی را بهبود می‌بخشند. در این لایه‌ها اندازه کرنل مانند یک فیلتر کانولوشن عمل می‌کند که روی ماتریس ورودی اعمال می‌شود. لایه‌های ادغام یک پنجره متحرک کوچک را به خروجی لایه کانولوشن قبلی اعمال می‌کنند تا اندازه فضایی (و در نتیجه زمان پردازش) را کاهش دهند و در عین حال اطلاعات مورد نیاز را حفظ کنند. از لایه‌های حذفی برای کاهش تطابق بیش از حد مدل CNN با داده‌های آموزشی (که یک مشکل رایج در یادگیری عمیق است) استفاده می‌شود. با حذف مجموعه‌ای از گره‌های تصادفی در یک لایه، مدل CNN بهبود می‌یابد و برای تجزیه و تحلیل کل مجموعه داده یا تصویر به چند ویژگی منتخب تکیه نمی‌کند. هدف توابع فعال‌سازی، نرمال کردن نورون‌ها و معرفی غیرخطی بودن CNN است که بعد از هر لایه اعمال می‌شوند. الگوریتم بهینه‌سازی، یادگیری کلی را در شبکه عصبی کنترل می‌کند و چگونگی کاهش خطا به کمترین میزان را در طول آموزش تعیین می‌کند. برای این کار تابع ضرر (Loss function) بین مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل CNN و مقادیر واقعی داده‌های آموزشی محاسبه می‌شود.

در این پژوهش از مدل CNN آموزش داده شده توسط اسمیت و ناپرستک (۲۰۲۲) برای تعیین محل خطواره‌های مغناطیسی استفاده شده است. برای آموزش این مدل از ۱/۴ میلیون داده استفاده شده و در پایان فرآیند یادگیری بیش از ۹۵ درصد دقت در داده‌های آموزشی داشته است. از این مدل آموزش دیده شده برای پیش‌بینی خطواره داده مغناطیسی هوارد شرق ایران استفاده شده است.

۳ بررسی داده مغناطیسی هوارد شرق ایران

محدوده مورد بررسی در شرق ایران، از ۵۲ تا ۶۰ درجه طول شرقی و ۳۰ تا ۳۶ درجه عرض شمالی قرار دارد. در تقسیم بندی ساختاری آقابات (۱۳۸۳) این منطقه خرد قاره ایران مرکزی و بخشی از ایران میانی است. رضانی و تاکر (۲۰۰۳) این منطقه را به بلوک لوت، بلوک طبس، بلوک یزد و زون تکنونیک کاشمر-کرمان تقسیم می‌کنند (شکل ۱). این محدوده از شمال و شمال غربی بوسیله گسل درونه (گسل کویر بزرگ) از شرق بوسیله گسل نهبندان و از جنوب غربی

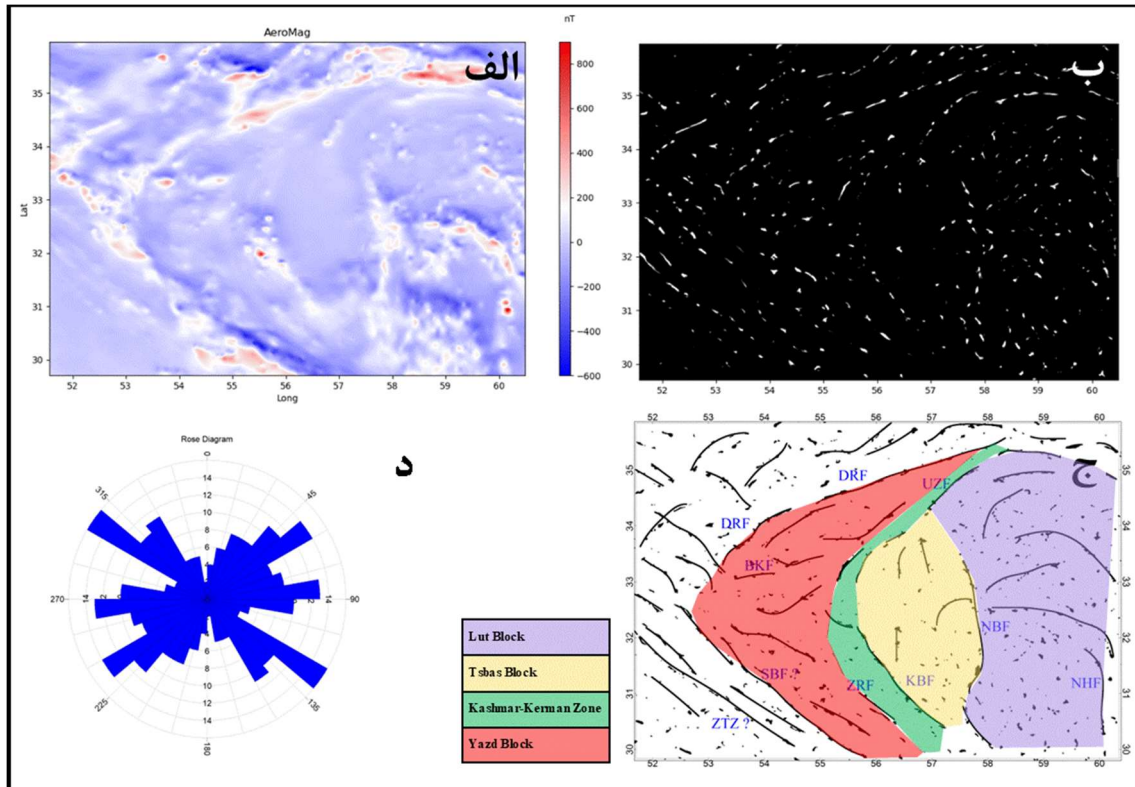
بوسیله گسل نائین و گسل شهر بابک محدود می‌شود. گسل نایبندان مرز بین بلوک لوت و بلوک طبس است. بلوک طبس نیز با وسیله زون تکتونیکی کاشمر-کرمان از بلوک یزد جدا می‌شود. افیولیت‌ها در شرق محدوده مورد مطالعه توسط گسل‌ها رخمون پیدا کرده است.



شکل ۱. نقشه ساختاری شرق ایران برگرفته از رضایی و تاکر (۲۰۰۳) که زون‌های ساختاری و گسل‌های شرق ایران و نیز محدوده مورد مطالعه با کادر قرمز روی این نقشه مشخص شده است. در این نقشه AZF گسل آبیز، BDF گسل بهاباد، BKF گسل بیابانک، CHF گسل چاپدونی، DRF گسل درونه، GWF گسل گنوگ، KBF گسل کوهبنان، KMF گسل کلمرد، MAF گسل مهدی آباد، MBF گسل میناب، NBF گسل نایبندان، NHF گسل نهبندان، NNF گسل نائین، RJF گسل رفسنجان، SBF گسل شهر بابک، TKF گسل تکنار، UZF گسل ازبک کوه، ZRF گسل زرنند، ZZT زون تراستی زاگرس است.

نقشه مغناطیس هوابرد محدوده، در شکل ۲-الف نمایش داده شده است. روش CNN بر روی این داده اعمال شده و نتایج آن در شکل ۲-ب آمده است. با توجه به نقشه ساختاری و گسل‌های موجود در شکل ۱، نتایج روش CNN تفسیر شده که در شکل ۲-ج نشان داده شده است. بزرگترین ساختار خطی منطقه، گسل درونه است که با دقت خوبی برآورد شده، همچنین گسل کوهبنان، نهبندان، نایبندان، ازبک کوه، بیابانک و گسل زرنند نیز در نقشه تفکیک شده‌اند. دو خطواره با گسل شهر بابک و زون تراستی زاگرس با اندک تغییراتی همراستا هستند. با توجه به خطواره گسل‌ها محدوده بلوک لوت، بلوک طبس، بلوک یزد و زون تکتونیکی کاشمر-کرمان بر روی این نقشه مشخص شده است. در بلوک لوت خطواره‌هایی در راستای تقریبی شرقی-غربی وجود دارد که احتمالاً به دلیل وجود افیولیت در منطقه است. در بلوک طبس خطواره‌هایی در راستای شمال و جنوب مشاهده می‌شود. در زون تکتونیکی کاشمر-کرمان خطواره‌ای همراستا با

گسل بهاباد مشاهده می‌شود که این زون را قطع می‌کند و محل این خطواره با موقعیت گسل بهاباد متفاوت است. در بلوک یزد نیز در قسمت انتهایی گسل درونه خطواره‌هایی شرقی-غربی همراستا با گسل بیابانک مشاهده می‌شود.



شکل ۱. الف) نقشه مغناطیس هوابرد محدوده مورد مطالعه. ب) نتایج تعیین خطواره با استفاده از روش CNN. ج) تفسیر نتایج روش CNN و مشخص کردن خطواره‌های مغناطیسی. د) نمودار گل سرخی خطواره‌های مغناطیسی.

منابع

- آقانیاتی، س.ع.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی‌کشور، تهران.
- Aghaee Rad, M.A., 2019. Machine learning of lineaments from magnetic, gravity and elevation maps (*Doctoral dissertation, University of British Columbia*).
- Chen, J., Schiek-Stewart, C., Lu, L., Witte, S., Eres Guardia, K., Menapace, F., Devarakota, P. and Sidahmed, M., 2020, October. Machine learning method to determine salt structures from gravity data. *In SPE Annual Technical Conference and Exhibition?* (p. D041S046R007). SPE
- Naprstek, T. and Smith, R.S., 2022. Convolutional neural networks applied to the interpretation of lineaments in aeromagnetic data. *Geophysics*, 87(1), pp.JM1-JM13.
- Ramezani, J. and Tucker, R.D., 2003. The Saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics. *American journal of science*, 303(7), pp.622-665.
- Yang, L. and Sun, S.Z., 2020. Seismic horizon tracking using a deep convolutional neural network. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 187, p.106709.
- Zhang, Q., Yusifov, A., Joy, C., Shi, Y. and Wu, X., 2019, September. FaultNet: A deep CNN model for 3D automated fault picking. *In SEG International Exposition and Annual Meeting* (p. D043S136R003). SEG.

عمق پی سنگ با روش پارکر- اولدنبرگ: کویر مرکزی ایران

سمیرا بایرام زاده کلخوران^۱، سیده‌هانی متولی عنبران^۲، وحید ابراهیم زاده اردستانی^۳

^۱دانشجوی ارشد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران، s.bayramzadeh@ut.ac.ir

^۲دانشیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران، motavalli@ut.ac.ir

^۳استاد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران، ebrahimz@ut.ac.ir

چکیده

در این مقاله به بررسی روش پارکر-اولدنبرگ یا روش تعمیم یافته‌ی پارکر در یافتن عمق پی سنگ، می‌پردازیم. بیشتر مقالات از این روش برای تخمین عمق موهو در زیر زمین برای یافتن زمینساخت، محل زمین لرزه ها و یا اکتشافات معدنی استفاده کرده‌اند. برای درک بهتر روش، جواب های به دست آمده را اعتبارسنجی کرده و بر روی داده های واقعی منطقه ای از کویر مرکزی ایران اعمال می‌کنیم تا از طریق آن به مدلسازی و سپس تخمین عمق پی سنگ این منطقه دست یابیم و تحلیلی بر روی داده های آن داشته باشیم همچنین خطای rms و شواهد زمین‌شناسی نیز تأیید کننده‌ی نتایج خواهند بود.

واژه‌های کلیدی: گرانی سنجی، پی سنگ، تخمین عمق، میدان پتانسیل

bedrock depth by Parker-Oldenberg: study central desert of Iran

Samira Bayramzadeh kalkhoran¹, Seyed-Hani Motavalli-Anbaran², Vahid Ebrahimzadeh Ardestani³

¹Senior student, Geophysics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²Associate Professor, Geophysics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³Professor, Geophysics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

Abstract

In this study, the Parker Oldenburg method, also known as Parker's generalized method, is utilized to ascertain the depth of the basement. This specific approach has been extensively employed in numerous studies to determine the depth of the Moho boundary, which in turn aids in the identification of tectonic activities, occurrences of earthquakes, and various other phenomena. In order to obtain a comprehensive understanding of this method, Ultimately, the method is applied to actual data from a region located in the central desert of Iran. This endeavor allows us to construct a model and subsequently determine the depth of the basement within this specific region, while concurrently analyzing the data Also, rms error and geological evidence will confirm the results.

Keywords: Gravimetry, basement, depth estimation, potential field

۱ مقدمه

گرانی سنجی روش موثر و نسبتاً ارزان برای برآورد مشخصات پی سنگ و حوضه های رسوبی است. پی سنگ در زمین‌شناسی درواقع سطحی که زیر آن، تغییرات خواص سنگ تاثیر زیادی بر مشاهدات نداشته و پایین‌ترین سطح

موردنظر یا نزدیک به لایه های زیرین پوسته زمین و حتی ما قبل آن باشد تعریف می شود ولی اکثرا در نزدیکی سطح زمین یا لایه های عمدتا فوقانی پوسته قرار می گیرد.

در اینجا با استفاده از مدل سازی داده های گرانی سنجی موجود در کویر مرکزی و روش وارون تکراری صفحه نامحدود از طریق روش پارکر اولدنبورگ، عمق پی سنگ برآورد می شود. الگوریتم های تهیه شده بر اساس روش مذکور، طی تکرارهای متفاوت تا رسیدن به مقدار همگرایی، مدل اولیه را بهبود می بخشد و شامل برنامه پیشرو و مشتق گیری هایی در برنامه اصلی معکوس سازی بیان می شوند. برای آزمایش صحت روش، اول درستی الگوریتم بر روی داده های تولیدی از یک مدل مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت که به لحاظ زمین شناسی و ژئومورفولوژی مورد تایید بود؛ در نهایت، وارون سازی داده های واقعی گرانی سنجی انجام شد و با مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج مطالعات، عملکرد مناسب آن مشخص شد. در صورت استفاده از داده های واقعی علاوه بر توابع ریاضی مانند خطای RMS، شواهد زمین شناسی نیز تایید کننده نتایج هستند.

۲ روش تحقیق

روش های متفاوتی برای جداسازی آنومالی های پوسته ای وجود دارد که هدف بیشتر آن ها تهیه هندسه پی سنگ است. مثلا کوردل و هندرسون (۱۹۶۸)، دیریلوس و ووگل (۱۹۷۲) و بهاسکارا رالو ورامشبابو (۱۹۹۱) از تخمین منبع آنومالی با یک سری منشورهای راست گوشه با تباین چگالی ثابت و یا تسوبوی (۱۹۸۳) با لایه های هم سایز فرض را انجام دادند. اولدنبورگ در سال ۱۹۷۴ الگوریتمی با یک سری دوباره سازی های پی در پی توسط الگوریتم مستقیم پارکر (۱۹۷۳) که یک روش کاربردی براساس روش گرانی سنجی شبیه به روش "وینینگ منز" بود، براساس تبدیل فوریه آنومالی گرانی، نتیجه ای از جمع تبدیل فوریه های توانی را به شکل سطحی که باعث آنومالی شده است فرض کرد. در واقع روش پارکر- اولدنبورگ یک روش تکرار شونده در فضای فرکانسی طبق یک رابطه تبدیل فوریه است. در این روش تعیین ۵ پارامتر مهم است: سطر و ستون شبکه، متوسط عمق سطح، تباین چگالی بین پوسته و پی سنگ، مشخص کردن پارامترهای فیلتر پایین گذر، مقیاس همگرایی.

اولدنبورگ برای محاسبه آنومالی گرانی به جای ρ ، Δg قرارداد و از معادله برای محاسبه عمق و مرز لبه ها با چگالی متفاوت استفاده کرد:

$$\Delta \rho = \Delta \rho_0 e^{-\alpha z} = \rho_{z=0} - \rho_{z=Z_0} \quad (1)$$

Δg تباین چگالی بین سنگ های سطحی و زیر فصل مشترک چگالی، α ثابت کاهش با ابعاد عکس طول است.

$$F[\Delta g] = -2\pi\rho G e^{-(\alpha+|k|Z_0)} \sum_{n=1}^{\infty} (\alpha+|k|^{n-1})/n! F[h^n(r)] \quad (2)$$

حال با در نظر گرفتن حالت یک بعدی و تغییر حد پایین سیگما، مدل سازی توپوگرافی سطح تغییر چگالی در یک معکوس سازی بازگشتی را بیان می کند:

$$F[h(r)] = \frac{-F[\Delta g] e^{|k|Z_0}}{2\pi\rho G} - \sum_{n=2}^{\infty} |k|^{n-1}/n! F[h^n(r)] \quad (3)$$

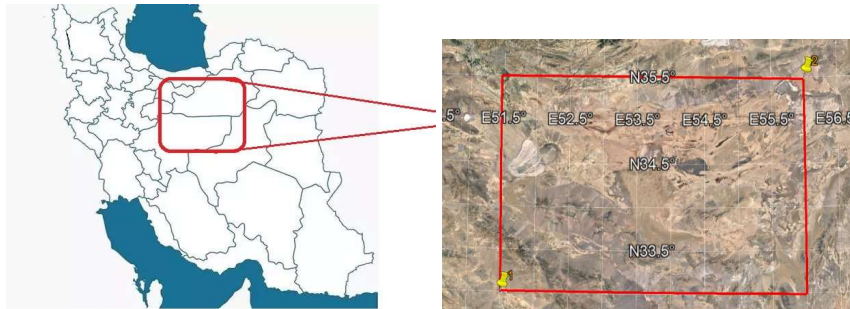
تعمیم فرمول قبل درحالتی که در مرز پایین و مسطح نبودن لایه قرارداد، آسان است. با قراردادن $Z=g(r)$ و چگالی های مختلف برای تعداد زیادی لایه انجام داد:

$$f[\Delta g] = -2\pi\rho G e^{-|k|Z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|k|^{n-1}}{n!} f[\rho(\vec{r})\{h^n(\vec{r}) - g^n(\vec{r})\}] \quad (4)$$

مشکل طرح پارکر جدا از واگراشدن داده ها در تکرارها، یافتن مدل در یک فرایند به شدت ناپایدار است که اولدنبرگ برای رفع آن یک فیلتر پایین گذر جهت اطمینان از همگرایی سری ها استفاده کرده همزمان، حذف نویز و اغتشاشات تصویر و کاهش جزئیات آن را به همراه داشت. [Oldenburg DW, 1974]

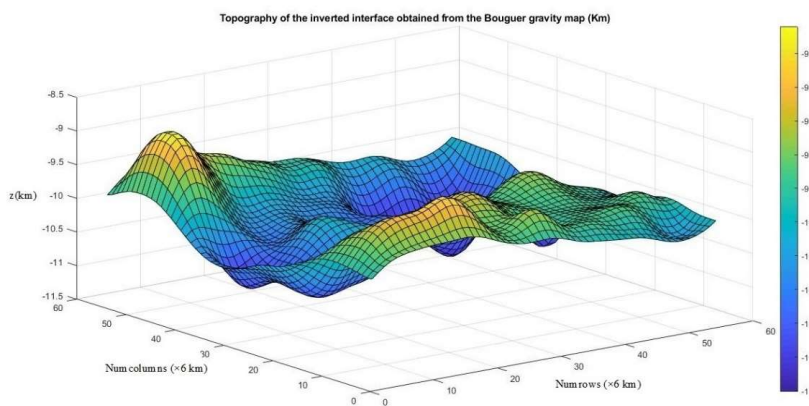
$$B(K) = \begin{cases} 1 & WH > \left| \frac{K}{2\pi} \right| \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{K - 2\pi WH}{2(SH - WH)} \right) \right] & WH \leq \left| \frac{K}{2\pi} \right| \leq SH \\ 0 & SH < \left| \frac{K}{2\pi} \right| \end{cases} \quad (5)$$

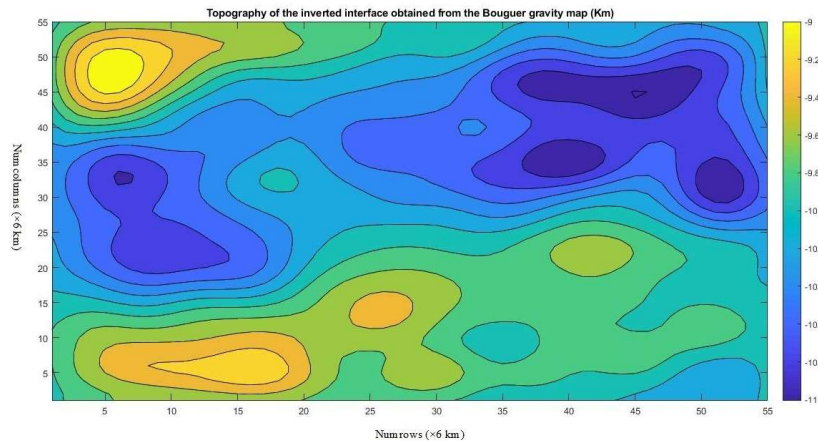
منطقه‌ی مورد مطالعه بخشی از کویر مرکزی که برگرفته از ۳۰۲۵ نقطه و طول جغرافیایی ۳۱ تا ۳۵/۵ درجه و عرض جغرافیایی ۵۱/۵ تا ۵۶ درجه است و شامل روستاهای ترو، معلمان، کلاته، سرخه محله، کوهان‌آباد، گرمسار، ورامین، دولاشی، جندق، کوه گوگرد، کوه نخجیر، سایه کوه، دریاچه نمک، پیرحاجت، عروسان، کویر مصر، نخلک، سرخ شاد، قلعه سردار، کوه یخ‌آب، مرنجاب، خور، فرخی، چوپانان، کوه دام، لطیف، نطنز، پشت بادام، بیاضه، اردیب، کبودان، انارک، افشین، زواره، اردستان، ساه است.



شکل ۱. محدوده ی جغرافیایی کویر مرکزی ایران

محدوده‌ی x داده های گرانی حاصل از اندازه گیری ماهواره‌ای از ۱۸۰- کیلومتر تا ۴۸۶ کیلومتر با شبکه بندی ۵۵ در ۵۵ در فاصله‌ی ایستگاه ۶ کیلومتر با تباین چگالی $0.5 g/cm^3$ در نظر گرفته شد. طبق بررسی های مختلف در عمق ها و محدوده‌ی پارامترهای فرکانسی در فیلتر پایین گذر با $rms = 0.063$ با فرآیند ۱۰ تکرار، عمق متوسط تقریبی ۱۰ کیلومتر، بهترین پاسخ برای تخمین عمق پی سنگ منطقه مورد مطالعه است که تطابق خوبی بین داده های مشاهده‌ای و محاسباتی رخ می‌دهد.





شکل ۲. توپوگرافی پی سنگ منطقه کویر مرکزی ایران با روش پارکر - اولدنبورگ

۳ نتیجه‌گیری

در این پژوهش با به‌کارگیری روش پارکر - اولدنبورگ در کویر مرکزی که یکی از مناطق زمین‌شناسی مهم و منحصر به فرد و پهناورترین کویر ایران است، در محدوده جغرافیایی ۵۱ تا ۵۶ درجه شرقی و ۳۳ تا ۳۵/۵ درجه شمالی در مرکز فلات ایران با طول ۸۰۰ کیلومتر و عرض تقریبی ۳۲۰ (۵۰۰ تا ۶۰۰ هم ذکر شده) کیلومتر و مساحتی حدود ۷۷۶۰۰ کیلومتر مربع انجام گرفت. هر دو داده مصنوعی (داده مصنوعی بیشاپ به علت محدودیت صفحات مقاله در این متن ارائه نشده است) و ماهواره‌ای بازیابی شدند. داده‌های گرانی استفاده شده جهت تخمین عمق پی‌سنگ، به دلیل گسترش تعداد و تجزیه و تحلیلی که در آن‌ها انجام گرفت، یکنواختی و پراکندگی مناسبی دارند. مدل عمق سازگار ۱۰ کیلومتر است و از این عمق به بعد، وضوح کم تصاویر و جزئیات را در زیرزمین خواهیم داشت.

منابع

- نوروزی، غ، ۱۳۹۲، ژئوفیزیک اکتشافی. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- ابراهیم‌زاده اردستانی، و، ۱۳۸۹، گرانی‌سنجی کاربردی (اکتشاف کانی، زمین‌شناسی مهندسی) چاپ اول، تهران: دانشگاه تهران.
- س کورور، ای. اس. ر، ۱۳۸۸، مبانی اکتشافات ژئوفیزیک. موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه فردوسی.
- Oldenburg, D.W. 1974. The inversion and interpretation of gravity anomalies. *Geophysics*, 39(4), pp.526-536.
- Gómez-Ortiz D, Agarwal BN3. DINVER. M: a MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3D horizontal density interface by Parker-Oldenburg's algorithm. *Computers & geosciences*. 2005;31(4):513-20.
- Dehghani, G.A. and Makris, J. 1984. The gravity field and crustal structure of Iran. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, pp.215-229.
- Foerste C, Sean L. Abrykosov O, Jean M. 2014. The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse

New advances in Geophysics and Geotechnical investigations in Deepwater environment

Majid Sajadian¹

¹KEPCO-NIOC, Drilling Office, majisajadian@gmail.com

New advances in Geophysics and Geotechnical investigations in Deepwater environment

Abstract

Deepwater activities such as drilling and production have been ongoing for nearly 50 years, making great contributions to industrialization. Given the increasing demand for energy, along with the restructuring of the energy supply catalyzed by efforts to achieve a low-carbon economy, deep seabed reservoir will play an important role in addressing energy- and resource-related problems in the future. A geohazard assessment workflow is presented that maximizes the use of 3D seismic reflection data to enhance the safety and success of offshore scientific & logical drilling. However, deep seabed mining remains in the exploratory stage, with many challenges presented by the high-pressure, low temperature, and complex geologic and hydrodynamic environments in deep-sea hydrocarbon structures. The importance of integrated geophysical studies for defining investigation scopes is highlighted. The use of the data for the design of surface and subsea development structure foundations and exploration and production wells is reviewed. Finally, this paper gives some key conclusions and future perspectives to provide Geophysics and Geotechnical studies and deep-water operations.

Keywords: Geophysics and Geotechnical studies, deep-water operations.

INTRODUCTION

The journey into deeper water continued in the 1980s with the investigation for the Bullwinkle platform in 400m of water. These investigations were targeted at developing design information for both fixed platform and compliant tower foundations. In the 1990s, investigations achieved a range of objectives, e.g., geophysical advancements, an improved understanding of Deepwater geological processes, development of design data for exploration and production wells, subsea template foundations, and pile foundations. There is clearly a need for developments in the skills and practice of offshore geotechnics which can be related to two specific reasons: 1. Hydrocarbon field discoveries are consistently being made at ever increasing depths, often to depths of 2000m, and within geotechnical materials with properties that are often beyond conventional experience; and 2. The offshore environment provides reliable wave and wind catchments for renewable energy which can be exploited without the constraints evident for onshore sites, such as public perceptions. Deepwater geotechnical investigation technology has evolved over a number of years. This evolution has been punctuated by several significant technological leaps forward. A recent example of a technological advance is the small diameter piezo probe used to determine rapidly ambient pore pressures and in situ permeability in clays [1,2]. Various physical material properties (hydraulic permeability, compactness...) and levees characteristics (presence of heterogeneities within the levee body and foundation, presence of man-made pipes...) associated with specific pathologies (low compactness, high hydraulic permeability, low shear strength...) characterize these mechanisms and increase their probability of occurrence (Figure 1).

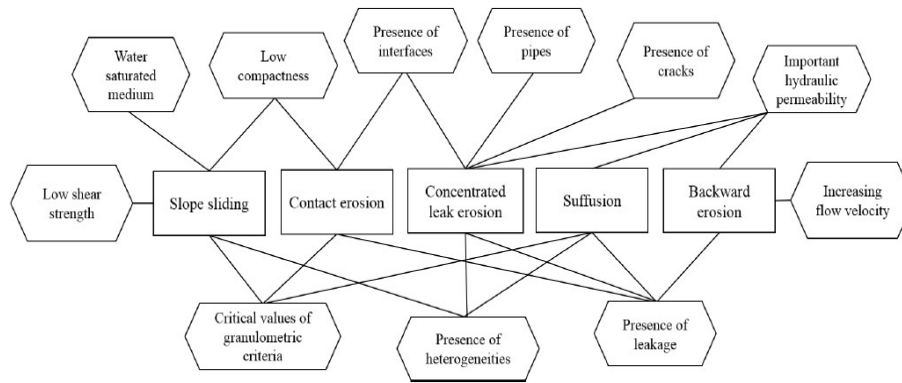


Figure 1. Diagram displaying the links between pathologies (in hexagons) and mechanisms that may lead to levee failure (slope sliding and four internal erosion mechanisms, in rectangles)

What has emerged from previous studies is that 3D seismic imagery of near-seafloor features play an increasingly key role in linking different scaled data sets and providing valuable information to develop sophisticated deepwater reservoir and basin-fill models (Figure 2) [2,3].

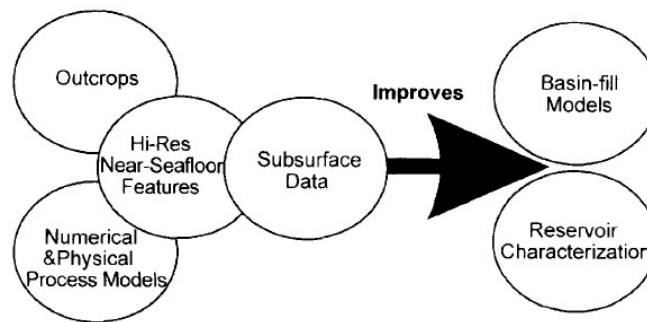


Figure 2. Multi-faceted approach to Deepwater faces analysis

Increasing energy consumption has driven the need for further hydrocarbon exploration, initially extending onshore fields in North America and the Middle East, in to shallow, near shore environments. The traditional approach of a preliminary investigation followed by a detailed ground investigation may eventually be replaced by a single integrated investigation, where ground investigations incorporate geophysical surveys in order to optimize geotechnical data collection. Some researchers discuss the application of integrated approaches on specific development sites. Recent advances in the application of geophysical techniques, has provided geotechnical engineers with a wide range of approaches for reliably determining the seabed terrain. In addition, the accumulation of geotechnical and geophysical data is allowing extensive databases to be developed which facilitate the extraction of geotechnical parameters for design purposes. In general, offshore site investigations, as with onshore investigations, require a combination of field testing and soil sampling for subsequent laboratory testing. In more recent years, the T-bar penetrometer has grown in popularity. The advantages of penetrometer testing lie in the flexibility of the systems available; the development of piezocones (PCPT) and seismic cones (SCPT), as well as pressure meter cones, electrical resistivity cones and lateral stress cones, all of which have some advantages over other in situ testing methods. The T-bar penetrometer has specific application to very soft soil sites, as it is more sensitive and thus considered more accurate for measuring the undrained shear strength of such soils[4,5].

Geotechnical and Geophysics Characterization and Activities

The operator is planning a visual survey of the seabed using a remotely operated vehicle (ROV)

or autonomous underwater vehicle (AUV) at potential drilling locations within to characterize seabed features (the “Project”) including:

- Identification and location of sensitive environmental features / habitats such as aggregations of habitat-forming corals or sponges
- Evaluation of benthic species diversity and abundance at each location
- Identification of geologic features such as boulders or hardgrounds
- Identification and location of anthropogenic features, such as unexploded ordinances, wrecks, cables, and debris

Figure 3 presents a simple process for assessing the data needs of a geophysics and geotechnical project.

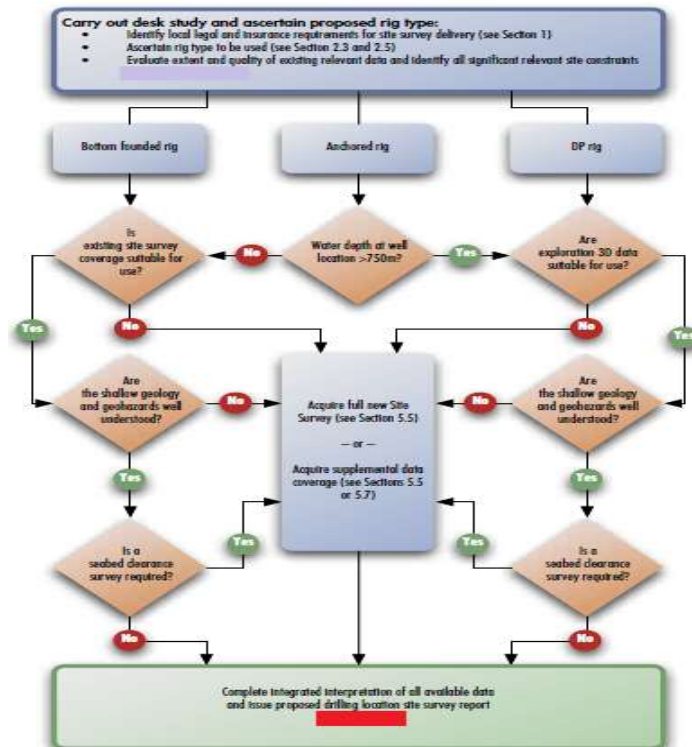


Figure 3. A simple process for assessing the data needs of a geophysics and geotechnical project

Subject to local operator policy, regulatory or insurance requirements, for guidance purposes the maximum age validity of pre-existing hydrographic and geophysical site survey data can be considered as [4,5]:

Table 1. pre-existing data validity guidance

| Activity Condition | Seabed Data | Subsurface Data |
|-----------------------|-------------|-----------------|
| No Activity | 5 years | 10 years |
| Engineering Activity | 1 year | 10 years |
| Well Control Incident | Invalid | Invalid |

Laboratory Testing on Soil Samples

The material extractions allow the identification of the soil and the understanding of its mechanical behavior as well as the lithology determination. The extraction can be made by using an auger or by coring. Laboratory testing have the benefit to provide very accurate information, however they do not study the in-situ sample and consequently some environmental parameters are not taken into account. That is why it is important to carry out laboratory testing to characterize a soil even if the measured parameters can differ from the in-situ ones. The article focuses on in-situ methods, explaining why we will not detail them. Moreover, these methods exclusively characterize one soil property [5].

Drilling Parameters Recordings

When a geotechnical survey is executed, many parameters are recorded in order to characterize the mechanical properties and to take advantage of the executed borehole. The drilling rig can drill through the with an established depth and diameter. While drilling, the device is cooled by a drilling fluid. The method capability to characterize properties is presented in Table 2.

Table 2. The drilling parameters recordings ability to characterize properties and characteristics.

| Properties and characteristics | Characterization ability |
|---------------------------------------|---|
| Water content | To our best knowledge, the water content cannot be determined even though the amount of water affects the method values since it has an impact on the soil plasticity |
| Interfaces | If the contrast of nature between two formations is strong, interfaces can be detected. |
| Granulometry | Relative information can be obtained by comparing drilling parameters of different materials. |
| Compactness | The progress speed is directly related to the mechanical resistance of the penetrated formation. It is therefore possible for two media of same composition, to establish which one is more compacted. The effective thrust also differs according to the stiffness of the penetrated medium. |
| Hydraulic permeability | With the correct shape factor (below or over the water table), the relative hydraulic permeability can be estimated according to the variations of the fluid injection flow on the adjusted injection pressure. |
| Shear strength | The rotational couple can be associated to a shear test with the effective thrust being the vertical stress. |

Many challenges within gas/oil fields are largely determined by the technical equipment applied and by a good interpretation of the geotechnical and the geophysical studies. The reason is because the parameters design obtained in this campaign are used for infrastructure design. In consequence the success in the production depends on a good system design. Obtained from the geophysical and the geotechnical explorations that were performed depending on the water depths. The exploration campaign must contemplate the coupling of the geotechnical and the geophysical studies, and on the needs and soil characteristics identified at the initial geophysics' exploration. The geophysical techniques used internationally are divided into three categories with respect to the exploration of the offshore developments:

- a) High-resolution reflection systems
- b) Seismic refraction system
- c) Electrical resistivity systems

These systems are used to determine the bathymetry and the seabed shape. With this information it is possible to make the decision on the amount and kind of sampling required for laboratory test, depending on the seabed conditions detected. It is also necessary to mention that for layer depths it is necessary to determine the selection of the geophysical equipment. Among the equipment used in exploration geophysics are the following systems: sonar, sidescan sonar pingers, boomers, etc.

Geotechnical exploration techniques

Compared to the large-scope survey of geophysical exploration, geotechnical exploration is based on a fixed-point survey. Geotechnical exploration mainly serves to test and evaluate the geological conditions (e.g., composition, structure, formation age, and genetic type of each soil layer along with adverse geologic actions) and the geotechnical properties of the seafloor soils (e.g., particle size distribution, void ratio, liquid and plastic limits, compression modulus, cohesion, and internal friction angle) in the project area. This information can be used to judge the stability and suitability of the project site. Geotechnical exploration is a direct method. According to the test site, the techniques for geotechnical exploration include in-situ and laboratory testing. Figure 4 shows some common in-situ testing techniques.

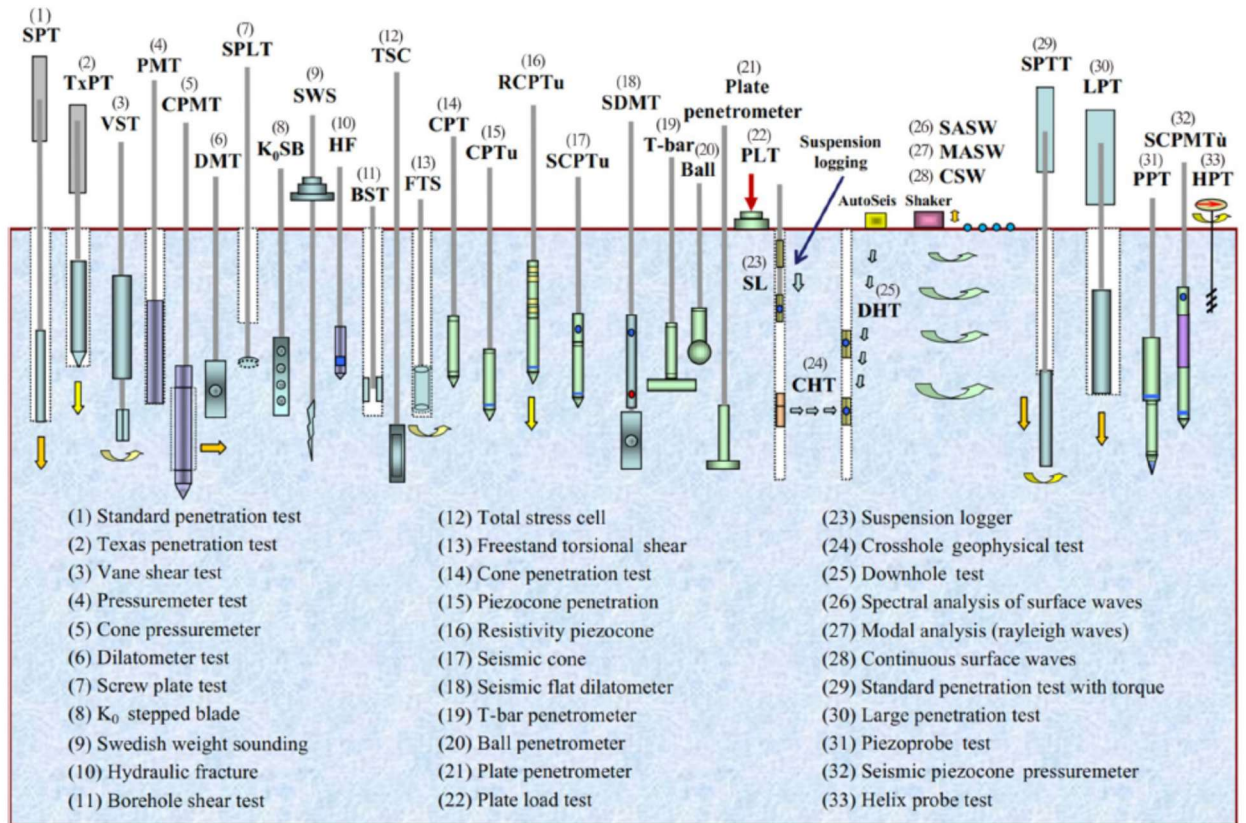


Figure 4. Common in-situ testing techniques

There is an increased interest in the role of physical/centrifuge modelling in understanding fundamental mechanisms, as well as the importance of numerical modelling in supporting the design process. Much of this work has been to produce design charts that might be used in routine design work. The main limitation to its widespread application as a design tool however, is the requirement for high quality soil property data for the proposed development site.

Several Case Studies Review

In this section presents a summary of several papers, followed by general comments on the papers: One research presented a case study of the project comprises 30 no. 3MW wind turbines and one offshore substation, arranged in a rectangular grid on a site area of approximately 10km². The ground conditions across the site are variable and complex; in particular, the authors note the presence of stiff to hard formations of completely weathered mudstone and siltstone and weak to moderately weak siltstone and sandstone across parts of the site, underlying superficial soils and glacial deposits of varying thickness. Another research provided an account of the Changi East reclamation project, carried out between 1992 and mid-2004 in the Republic of Singapore. The project required the deposition of some 200 million cubic metres of well-graded, free draining sand dredged from nearby sources in order to increase existing ground levels to above sea level, over a total land reclamation area of approximately 2500 hectares Results from the instrumentation and from the in-situ tests are presented and discussed for different phases of the project and for different areas of the project site. The results of a geotechnical investigation are presented as part of a process of soil characterization for the proposed site for an offshore shallow foundation system. The geotechnical data is used to carry out a preliminary analysis of the stability of a Gravity Base Structure to be used as a clump weight for a buoy located in the northern North Sea area. The geotechnical ground investigation related to CPT and geophysical tests carried out on the seabed soils, combined with laboratory test data for soils in adjacent areas.

Identifying Sources of Risk

A key objective of a site survey is to assess geohazards and to enable the risk posed to drilling operations by the seabed and geological conditions to be managed and reduced. The presence of hazards must be

determined through rigorous and consistent analysis and clearly reported in the text, maps, and other graphics that make up the site survey report. For each hazard identified, hazard potential should be stated in terms of the likelihood that the particular condition exists at a specific locality. The Technical Notes provide interpretation guidelines for the assessment of some key geohazards that may be identified during site survey. Sufficient time must be allowed in delivery of a site survey program to ensure the results are available in time. • to ensure all local regulatory permitting requirements are met ahead of the of the proposed well spud date - • to ensure the drilling project team can include them, and properly mitigate any risk of hazards identified from them, in the final well design.

Conclusion

In this paper, it is highlighted the relations between pathologies and existing fluvial levee failure mechanisms. It presented the most commonly used geophysical and geotechnical 5 methods and detailed their abilities to inform subsea information and data. Also, an overview was presented on the main points to be considered in a deep-water development from the point of view of geotechnical and geophysical studies for subsea infrastructure design. Another important factor on the geotechnical studies that geotechnical specialists must consider is the study done at the time of consolidation and subsidence of the crude oil field. It was done by laboratory tests as explained in this article. planning of geophysics and geotechnical exploration should take into account the appropriate equipment depending on the exploration at certain water depth. Although the geotechnical community has realized significant accomplishments in deepwater geotechnical operations, it must not rest on its Current successes. Each of the above points requires that technology keeps up with the pace being set by industry. This will take commitment and resource investment on the part of all concerned with deepwater geotechnical operations: operators, geotechnical contractors and vessel owners.

REFERENCES

- [1] Randolph, M., Cassidy, M., Gourvenec, S. & Erbrich, C. [2005] The challenges of offshore geotechnical engineering. Invited State of the Art Report, 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Japan, 123-176.
- [2] Walker, D. [1998] Opening Address. Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour, SUT, London.
- [3] Evans, T.G. et al [1998] Geotechnical challenges West of Shetland, Proceedings of the International Conference on Offshore Site Investigation and Foundation Behavior, Society for Underwater Technology (SUT), London.
- [4] Jeanjean, P., Campbell, K.J. & Kalsnes, B. [1998] Use of integrated study to characterize the Marlin deepwater site. Proceedings of the International Conference on Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour, Society for Underwater Technology (SUT), London.
- [5] Meimon, Y. [1992] Models for the behaviour of offshore structure foundations, 1: Methodologies and rheological models for soils. *Revue de L'Institute Francais du Petrole*, Vol. 47, No. 5, 625-669.
- [6] Zdravkovic, L., Potts, D.M. & Jardine, R.J. [2001] A parametric study of the pull-out capacity of bucket foundations in soft clay. *Geotechnique*, Vol. 51, No. 1, 55-67.

جدایش سیال با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای پیش از برانبارش؛ مطالعه موردی در یکی از مخازن کربناته ایران

تبسم کریم نژاد^۱، رامین نیک‌روز^۲، محمدعلی ریاحی^۳، مهران رحیمی^۴

^۱کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، st.t.karimnejad@urmia.ac.ir

^۲دانشیار، دانشگاه ارومیه، r.nikrouz@urmia.ac.ir

^۳استاد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، mariahi@ut.ac.ir

^۴کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، mehran.rahimi@ut.ac.ir

چکیده

تفکیک سیال مخزن یکی از رویکردهای مهم در کمی‌سازی تفسیر داده‌های لرزه‌ای می‌باشد و ارزیابی این رویکرد در توسعه مطالعات اکتشافی منابع هیدرکربنی بسیار راه‌گشا می‌باشد. کاهش ریسک حفاری یکی از مهمترین نتایج حاصل از مطالعات فیزیک سنگ می‌باشد و نتایج ارزیابی این رویکرد می‌تواند در مطالعات زیرسطحی کارآمد باشد. هدف اصلی این مطالعه بهبود درک پاسخ لرزه‌ای برای تفسیر سنگ‌شناسی و پیش‌بینی سیال با برآورد و مقایسه نشانگرهای AVO بر اساس تحلیل AVO در یکی از مخازن جنوب غرب ایران است. نشانگرهای AVO و ترسیم متقاطع نشانگرهای مختلف AVO نشان داد که تلفیق این نتایج می‌تواند در مطالعات زیرسطحی و تفسیر داده‌های لرزه‌ای بسیار کارآمد باشد.

واژه‌های کلیدی: تفکیک سیال، تغییرات دامنه در مقابل دورافت، جان‌شینی سیال.

Fluid discrimination using pre stack seismic attributes; a case study in one of Iranian carbonate reservoir

Abstract

Reservoir fluid discrimination is one of the important approaches in the quantitative seismic interpretation, and the evaluation of this approach can be helpful in the development of exploratory studies of hydrocarbon resources. Reducing the drilling risk is one of the most important results of rock physics studies, and the evaluation results of this approach can be efficient in subsurface studies. The main goal of this study is to improve the understanding of seismic response for lithology interpretation and fluid prediction with rock physics modeling and quantitative seismic interpretation in one of the reservoirs in southwest Iran. The results of this study showed that the results of fluid replacement could be improved by integrating the AVO attributes AVO attributes and the cross-plot of different AVO attributes showed that these results could be very efficient in subsurface studies and seismic data interpretation.

Keywords: fluid discrimination, AVO, fluid replacement

۱ مقدمه

هدف اصلی از تحلیل تغییر دامنه در مقابل دورافت برآورد نشانگرهایی است که بر دامنه امواج لرزه بازتابی تاثیر می‌گذارند. استفاده از این نشانگرها و ترسیم مقاطع‌هایی که از مقایسه این نشانگرها با یکدیگر حاصل می‌شوند، قادر به دستیابی به اطلاعاتی جهت تعیین نوع سیال، سنگ شناسی و نوع تخلخل در سنگ‌های کربناته بدست آورد (راسل و همسون ۱۹۹۹؛ صفرپور و همکاران، ۲۰۲۲). تحلیل دامنه در مقابل دورافت نسبت به لرزه‌نگاری معمولی چالش‌برانگیزتر است چراکه تحلیل دامنه در مقابل دورافت بر روی داده‌های پیش‌انبارش ۱ انجام می‌شود و به سیگنال داده‌های پتروفیزیکی اساسی که در حین انتشار موج پنهان می‌شود، بستگی دارد (رحیمی و ریاحی، ۲۰۲۳). عواملی که بر دامنه‌های لرزه‌ای تأثیر می‌گذارند باید درک و در نظر گرفته شوند و سپس داده‌ها باید به گونه‌ای پردازش شوند که تغییرات دامنه را بتوان به‌طور قابل اعتمادی به عنوان تغییرات در خواص سنگ و سیال تفسیر کرد. اطلاعات حاصل از تحلیل AVO شامل توضیح علت آنومالی‌ها بروی داده‌های لرزه‌ای برانبارش شده، استنتاج خصوصیات سنگ های مخزن از داده های قبل از برانبارش تمایز آنومالی‌های وابسته به لیتولوژی از آنومالی‌های ناشی از حضور هیدروکربن و مدلسازی مستقیم برای انطباق داده‌های واقعی با لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی ساخته شده بوسیله داده‌های برج (نگارهای چاه و یا نتایج آزمایشگاهی) انجام می‌گیرد. مدل‌سازی AVO، عبارت از ساخت لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی غیر نرمال (گروه‌های نقطه میانی مشترک) از نگارهای چاه می‌باشد. با انجام مدلسازی AVO و تشخیص نوع پاسخ AVO میتوان ارتباط بین خصوصیات سنگ-شناسی و سیالات منفذی را با داده‌های لرزه‌ای موجود بدست آورد. ترسیم مقاطع بر پایه مدل AVO می‌تواند راهنمای تشخیص پاسخ‌های غیرمعمول از سایر پاسخ‌ها (مانند پاسخ زمینه) باشد. برای ساخت لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی غیر نرمال علاوه بر سرعت موج تراکمی و چگالی، سرعت موج برشی نیز مورد نیاز است. مدلسازی AVO شامل سه مرحله اصلی است: (۱) تعیین مسیر قابل قبول از چشمه تا گیرنده‌ها، (۲) محاسبه ضریب بازتاب برای هر مسیر، (۳) محاسبه زمان سیر برای هر مسیر پرتو. در اولین و سومین مرحله نیاز به حل معادله موج یا تعقیب پرتو می‌باشد و در خصوص مرحله دوم، با استفاده از معادله ژئوپریتس یا تقریب‌های آن محاسبه می‌گردد.

۲ روش تحقیق

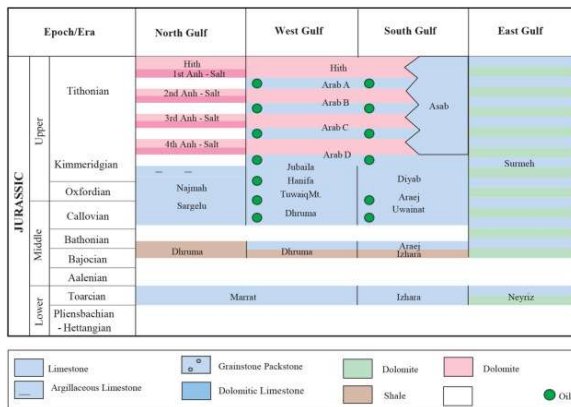
به طور کلی داده‌های موجود در این مطالعه شامل داده‌های چاه‌پیمایی، نگاره‌های پتروفیزیکی، داده پیش از برانبارش لرزه ای و افق سرسازندها می‌باشد. شکل ۱ استون چینه شناسی محدوده مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. یکی از مراحل مهم در فرآیند مدل‌سازی، انتقال داده‌های چاه از حوزه عمق به زمان می‌باشد. پس از آماده سازی داده های لرزه‌ای، موجک لرزه ای موجک لرزه‌ای با استفاده از داده‌های لرزه‌ای محاسبه و موجک با فاز صفر و قطبیت نرمال با طول ۱۵۰ میلی ثانیه استخراج می‌شود. موجک استخراج شده بر روی لرزه نگاشت مصنوعی اجرا میشود و بعد از اینکه تطابق بین لرزه نگاشت مصنوعی در محل چاه با داده لرزه‌ای انجام شد، موجک لرزه‌ای با استفاده از داده‌های چاه محاسبه خواهد شد که این موجک به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود (شکل ۱).

در نهایت با استفاده از داده های نگار صوتی و چگالی و داده های لرزه ای درون چاهی به منظور ساخت نگار مقاومت صوتی و سری ضرایب بازتاب استفاده و از هم‌امیخت آن با موجک مناسب، لرزه نگاشت مصنوعی ایجاد می‌گردد (کاستانیا و همکاران، ۱۹۸۵؛

کاستانیا و همکاران، ۱۹۹۸؛ سیم و بیکن، ۲۰۱۴). ترسیم مقاطع نشانگرهای AVO کمک به شناسایی آنومالی‌ها، شیب زمینه و یا پراکندگی از آن را می‌نماید. حضور هیدروکربن که وابسته به آنومالی‌های AVO داشته باشد ممکن است کاهش یا افزایش دامنه نسبت به دورافت را شامل شود (کاستانیا و همکاران، ۱۹۹۳؛ احمد و همکاران، ۲۰۱۵). در شکل ۳ ترسیم مقاطع گرادیان نسبت به تقاطع نمایش داده شده است. در این شکل مقیاس رنگی نمایشگر زمان می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده در زون کربناته، به طور کلی همگونی مشخصی در قسمت مورد مطالعه از مخزن کربناته مشاهده می‌شود که این مسئله می‌تواند بیانگر حضور سیال یکسانی در این ناحیه می‌باشد ولی نوع سیال مشخص نمی‌باشد.

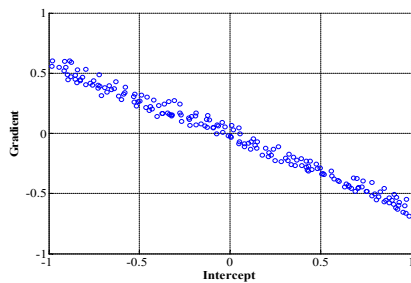
۳ نتیجه‌گیری

در مطالعه محدوده پایین مخزن، با استفاده از مدل‌سازی پیش‌رو، لرزه‌نگاشت مصنوعی حاصل از نگارهای چاه‌پیمایی ایجاد و سپس به کمک آن علت ناهنجاری مشاهده شده، بر روی داده‌های لرزه‌ای پیش‌از برانبارش مشخص گردید. با تولید نشانگرهای AVO، نوع ناهنجاری در افق مطالعاتی کلاس نوع اول تشخیص داده شد. این ناهنجاری در کلاس نوع اول دارای تقاطع مثبت، گرادیان منفی است. از بین نشانگرهای استخراج شده، تنها نشانگرهای تقاطع نسبت به گرادیان و نشانگر تقاطع نسبت به حاصل ضرب تقاطع در گرادیان در محدوده مورد مطالعه مناسب تشخیص داده شد.



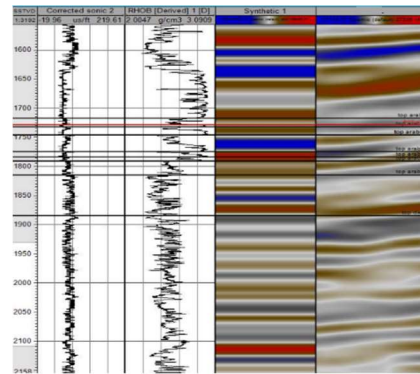
شکل ۱: ستون چینه شناسی در خلیج فارس (رحیمی و ریاحی،

۲۰۲۲).



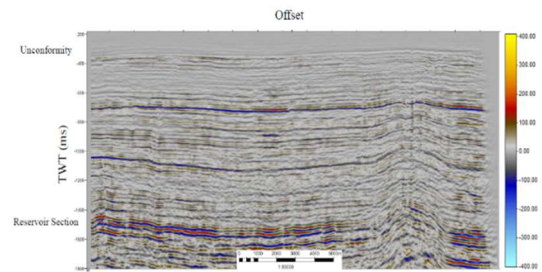
شکل ۳: کراس پلات گرادیان برحسب تقاطع دو منحنی رخدادهای

لرزه‌ای در محدوده زمانی مشخص



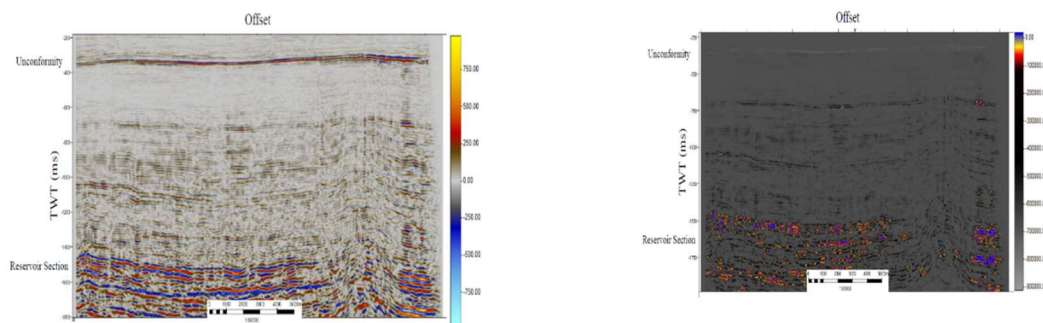
شکل ۲: مقطع لرزه‌ای مصنوعی و اعمال سرسازندها پس از اعمال چک

شات به ترتیب نگاره صوتی، نگاره چگالی، لرزه‌نگاشت مصنوعی AVO



شکل ۴: مقطع لرزه‌ای نشانگر تقاطع (Intercept) در میدان مورد

مطالعه



شکل ۵: مقطع لرزه‌ای نشانگر گرادیان (Gradient) در میدان مورد مطالعه

شکل ۶: مقطع لرزه‌ای بعد از اعمال نشانگر پیش‌برانبارش حاصل از ترکیب گرادیان و تقاطع

منابع

1. Ahmed, N., Khalid, P., Anwar, A.W., Ghazi, S., AVO forward modeling and attributes analysis for fluid identification: a case study. *Acta Geod. Geophys.* (2015).
2. Castagna, J. P., Batzle, M. L., and Kan, T. K., (1993). Rock physics-the link between rock properties and AVO response, in Castagna, J. P. and Backus, M. M., Eds., *Offset-dependent reflectivity—theory and practice of AVO analysis*. Society of Exploration Geophysicists (SEG), No 8, 131–171.
3. Castagna, J. P., Swan, H. W. and Foster, D., 1998, Framework for AVO gradient and intercept interpretation: *Geophysics*, 63, 948-956.
4. Castagna, J., Batzle, M. and Eastwood, R., 1985, Relationship between compressional and shear-wave velocities in clastic silicate rocks: *Geophysics*, 50, 571-581.
5. Castagna, J.P., 1993, Petrophysical Imaging using AVO: *The Leading Edge*, 12 (3), 172-179.
6. Rahimi, M., Riahi, M. A., (2022) Reservoir facies classification based on random forest and geostatistics methods in an offshore oilfield, *Journal of Applied Geophysics*, Volume 201, ISSN 0926-9851, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104640>.
7. Rahimi, M., Riahi, M. A., (2022) Application of instantaneous amplitude and spectral decomposition to determine the location and thickness of a hydrocarbon reservoir, *Bulletin of Geophysics and Oceanography*, DOI 10.4430/bgo00402
8. Simm, R., Bacon, M., (2014). *Seismic Amplitude: An Interpreter's Handbook*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
9. Russell, B., Hampson, D., (1999), *Amplitude versus offset analysis*; Manual of Hampson-Russell software.
10. Safarpour, M., Riahi, M. A., & Rahimi, M. (2023). Integration of Seismic Attributes and Wellbore Data of Ghar Formation in the Hindijan and Bahregansar Oilfields. *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, 12(2), 13-39. doi: 10.22050/ijogst.2022.336225.1634

RockMat: A Comprehensive MATLAB Toolbox for Rock Physics Modeling

Abbasi, Mostafa¹

¹*Geophysicist, National Iranian Oil Company, Exploration Directorate, abbasi.mstfa@gmail.com*

ABSTRACT

In the past decade, a wide variety of rock-physics modeling publications for different reservoir rocks have been emerged as workflows and case studies. But these studies are generally very case-specific and limited to few rock-physics models. Besides, these literatures rarely describe the workflow details and codes and are specific to that reservoir. To address these limitations, I have developed a comprehensive and easy-to-use rock-physics modeling toolbox in MATLAB (RockMat) that cover a wide variety of models to define the rock properties. These models include theoretical models (such as inclusion, crack and contact models), bound models, experimental models and fluid effect models (including fluid substitutions and frequency-dependent attenuation models). RockMat is developed in a modular scheme where the models can easily be combined to define more sophisticated models. The models are validated with different industrial packages and/or the original literatures.

Keywords: Rock-Physics Modelling, Software, MATLAB, Reservoir Characterization

INTRODUCTION

Rock-physics is a multidisciplinary field of study that has long been used to characterize rock properties based on the behavior of seismic waves propagating through them. This requires consideration of how the composition of a rock dictates its stress-strain relationship and thus seismic response. Primarily, this knowledge was mostly using experimental models to study the Earth's interior properties (Birch, 1952) but later, more theoretical models were involved to study the elastic properties of rocks. The fundamental theoretical concepts of rock physics are coming from the science of metallurgy and mechanics of solid material where the primary target is the solid phase. But, in the hydrocarbon industry this objective is shifted to the fluid phase, due to the importance and variability of the pore fluids.

In a standard seismic interpretation workflow, rock physics is used to relate impedance and elastic parameters derived from seismic data to specific rock properties. However, rock physics has a wide range of applications in different studies, such as studying the effect of fluid extraction and injection on the reservoirs, quantitative interpretation of changes in seismic responses due to changes in rock and fluid properties, sequestration of CO₂ into depleted reservoirs or exploration of geothermal energy.

One of the earliest open-source projects to develop rock physics models is the QSI toolbox from The Stanford SRB team that is a complement to Avseth et al's (2018) book, "Quantitative Seismic Interpretation". This library is very limited and covers just a few models. The Stanford SRB team has also developed another but much more extensive MATLAB toolbox (RPH tools) as a complementary resource to well-known Mavko et al's (2009) "Rock physics handbook". This library includes a great number of rock physics model along with a set of tools and utilities, but models are mainly limited to the book and must be applied in sample-by-sample scheme rather than a vector (matrix) scheme. Another effort to this subject is a Python package RockPhyPy (Yu et al, 2023) which is a recent and comprehensive set of many rock physics models that are stored into classes.

Comparing to the RPH toolbox, RockMat includes a greater number of effective medium models from different resources and literatures. Furthermore, functions and model presented in RockMat are coded using the matrix algebra such that they can be applied on the whole well-log or seismic trace at once. This makes the code much more efficient comparing to the SRB toolbox, where the codes are applied under a sample-by-sample scheme. This property makes the RockMat a fast and reliable tool for rock-physics inversion where, generally, a huge number of forward computations are required during the process.

Codes Breakdown

The codes presented in this toolbox are generally follow the formulation presented in the Mavko et al's (2020) "The Rock Physics Handbook". However, models are not limited to this book and many newer models and relations are also included in the package. Accordingly, MATLAB codes follow, more or less, the same classification as those given in this book as follows:

– Constants

This category includes some of the most common constant parameters relating to some of the empirical models and properties. This includes, Castagna's coefficients, Gardner's coefficients, Vernik's coefficients (of V_p - V_s relations) and the standard values of critical porosity for different rock types. Furthermore, this category also includes the standard values for elastic properties of different minerals.

– Fluid Properties

Fluid properties include a set of relations as proposed by Batzle and Wang (1992), for calculating the viscosity and elastic properties of different fluid types (including clean water, brine, gassy brine, dead and live oil and gas) under in-situ pressure and temperature conditions.

– Empirical Models

Empirical models are a set of relations between elastic and/or petrophysical properties that generally are estimated using regression on specified datasets. RockMat includes more the 30 well-known empirical relations for different rock properties.

– Effective Medium

Effective medium can be considered as the core of this toolbox. This category includes many functions based on different mixing law such as granular media, inclusion models, bound models crack models, and anisotropic models. Furthermore, two more specific models (i.e., Xu-White and Xu-Payne and Keys-Xu models) which are a combination of other models are also packaged into single m-files. Models presented in this category are very versatile and diverse such that they can be combine in different ways to produce more sophisticated model, specific to our desired reservoirs.

– Fluid Effect

Fluid effect is one of the most important but less investigate topics in the rock physics studies. In most studies this topic is limited into Gassmann's relation and fluid substitution, while it can provide very useful information regarding the scale and frequency calibration of different elastic measurements (e.g., well-log vs. seismic or core vs. well-logs). Furthermore, RockMat includes some relations for anisotropic fluid substitution and squirt-flow. Some of the relations in this category also provide some measures of compressional and shear rock quality factor.

– Pressure

Functions in this category relate the elastic properties of rock to pore-pressure variations. However, codes are no more than few best-known models including Bower, Eaton, modified Eaton Hottman-Johnson models.

– Math

Math functions includes a variety of mathematical relations to convert different elastic properties to each other, Mathematic operations, unit conversions, tensor operations, etc.

– Utilities

Utility functions consists of a diverse list of simple relations to estimate various rock features such as coordination number, contact ratio, crack density, tortuosity, pore stiffness, Biot coefficient, characteristic frequency, etc. These features are mainly used as primary model parameter in other functions. It also includes some more complex models such as Thomas-Stieber fitting plot, Marion-Bam pore stiffness factor and saturated and dry modulus vs critical porosity and pore stiffness.

RockMat Key Features

RockMat includes some specific features that distinguish it from similar code packages in Rock physic. First, all the codes in the RockMat are well documented not only in terms of description and form of input/output parameters, but also regarding to description of the special considerations about the methodologies, notes and references. I have tried, as much as possible, to provide the exact address to the formulations in the literature according to which codes are implemented.

Another feature of this toolbox is that they follow the same strategies for notations, documentations, inputs and outputs, etc. This makes codes very readable and comparable and easy to understand. Besides, Similar models can easily be substituted with each other to try out various functions during the modeling.

I have tried to write the codes with maximum flexibility and Generality. For example, all inclusion models are implemented such that they can insert the different inclusions either simultaneously or sequentially.

As noted earlier, this toolbox tries to use the matrix computation capabilities of MATLAB, as much as possible to be as efficient and fast as possible. Almost all the codes can be applied to a whole column vector (such as well-logs or seismic traces) at the same time, while yet loops and if-statements are avoided. This feature makes the functions very appropriate and efficient for the rock physics inversion process.

Another feature of RockMat is that it follows a modular scheme for coding, where each specific model, feature, property or relation is packaged into a single function. These functions can then be combined to setup more complex models in few numbers of code lines. For example, Xu-White model with all of its detail in Xu and White (1996) paper, can be written as follows

```
% Partition total porosity
phisand = phit.*(1-Vsh);
phiclay = phit.*Vsh;

% Calculate matrix and fluid properties
Km = voigtreusshill([Ksh, Kqz], [Vsh, 1-Vsh]);
Gm = voigtreusshill([Gsh, Gqz], [Vsh, 1-Vsh]);
rhom = voigt([rhosh, rhoqz], [Vsh, 1-Vsh]);
Kf = reuss([Kw, Ko], [sw, 1-sw]);

% Calculate dry rock properties
[Kmbw, Gmbw] = dem(Km, Gm, Kw, 0, phiclay, 'spheroidal', aspects(1));
[Kdry, Gdry] = demdry(Kmbw, Gmbw, phisand, 'spheroidal', aspects(2));

% Saturate sand pores with fluid
Ksat = gassmann( Kdry, Kmbw, phisand, Kf );
Gsat = Gdry;

% Convert elastic properties into P- and S-velocities
rhob = bulkdensity(sw, phit, rhom, rhow, rhoo )
[Vp, Vs] = mod2vel(Ksat, Gsat, rhob)
```

Code 1. Implementation of Xu-White model. Subscripts sh, qz, w, o corresponds to shale, quartz, water and oil respectively, Vsh is volume of shale and sw is water saturation.

Almost, all the codes are verified either with the literature results or available industrial packages (e.g., RokDoc). RockMat proved to exactly reproduced the same results as these references. Figure 1 shows an example of these results for Xu-Payne model in a shaly carbonate oil reservoir. As shown, the results from RockMat toolbox can exactly reproduce the RokDoc plots, where both have a reliable correlation with original measured logs.

CONCLUSION

In this paper we introduced a new comprehensive MATLAB toolbox (RockMat) for rock physics modeling which includes a wide variety of rock physical model. This toolbox has some features that makes it preferable to available academic and industrial packages, 1) It include almost all the proven rock physical models, 2) Its results are reliable for any type of reservoirs, 3) Its modular scheme makes it a flexible tool to easily generate more sophisticated models specific to our reservoirs, 4) A detailed documentation is included in the codes, 5) Its fast and easy-to-use. These features, makes RockMat a great choice for both academic studies and industrial applications.

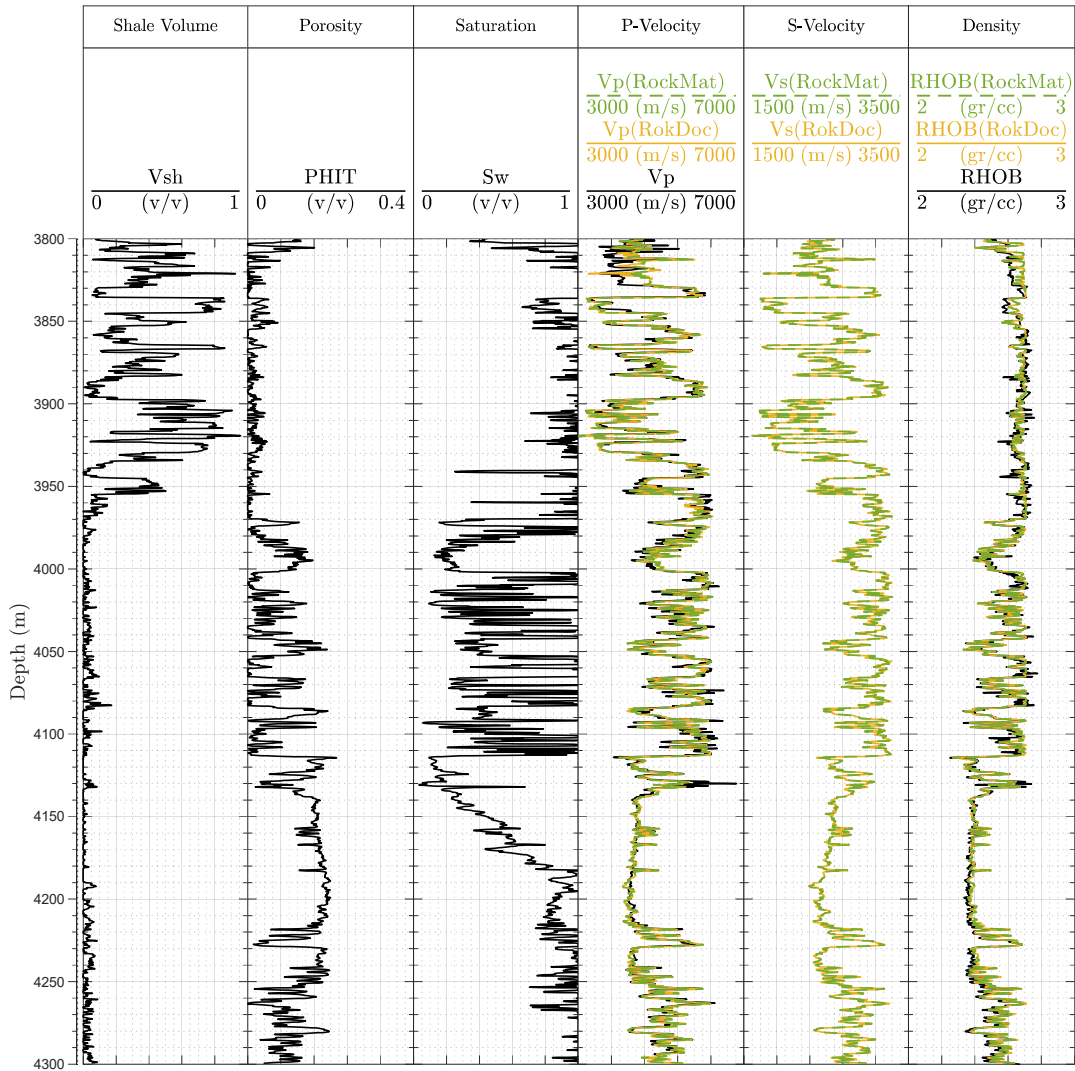


Figure 1. An example of Xu-Payne modeling results using RockMat (green) and its comparison to RokDoc results (Orange) and original measure logs (black). The first three tracks show the input petrophysical logs. As Shown, the results from the RockMat toolbox can exactly reproduce the RokDoc plots, and both have a reliable correlation with original measured logs.

REFERENCES

Birch, F., 1952. Elasticity and constitution of the Earth's interior. *Elastic Properties and Equations of State*, 26, pp.31-90.

Batzle, M. and Wang, Z., 1992. Seismic properties of pore fluids. *Geophysics*, 57(11), pp.1396-1408.

Xu, S. and White, R.E., 1996. A physical model for shear-wave velocity prediction1. *Geophysical prospecting*, 44(4), pp.687-717.

Avseth, P., Mukerji, T. and Mavko, G., 2005. *Quantitative seismic interpretation: Applying rock physics tools to reduce interpretation risk*. Cambridge university press.

Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J., 2009. *The rock physics handbook*. Cambridge university press.

Avseth, P., Mukerji, T. and Mavko, G., 2020. *Quantitative seismic interpretation: Applying rock physics tools to reduce interpretation risk*. Cambridge university press.

Yu, J., Mukerji, T. and Avseth, P., 2023. rockphypy: An extensive Python library for rock physics modeling. *SoftwareX*, 24, p.101567.

تشخیص و تحلیل ساختمانی دیاپیر نمک با استفاده از تحلیل نشانگرهای لرزه-

ای

لیلا بالسنینی^۱، محمدعلی ریاحی^۲، حکیم اسماعیلی اوغاز^۳، مهرا ن رحیمی^۴

^۱ کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، leila.balsini@ut.ac.ir

^۲ استاد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، mariahi@ut.ac.ir

^۳ رییس مهندسی طرحهای تحت الارضی ذخیره سازی گاز، شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران، nasr.3dg@gmail.com

^۴ کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، mehran.rahimi@ut.ac.ir

چکیده

ساختارهای نمک از چند منظر دارای اهمیت می‌باشند از جمله، نمک به دلیل خاصیت پلاستیکی و همچنین چگالی کم و نسبتاً ثابتش، می‌تواند ساختارهای نفوذی مانند دیاپیرها را به وجود آورد که از نظر زمین‌شناسی قابل مطالعه و بررسی می‌باشد. همچنین با توجه به اهمیت و افزایش روزافزون نیاز به منابع طبیعی از جمله نفت و گاز، همچنین نیاز به ذخیره سازی بهینه این منابع و بهره گیری از آن در مواقع لزوم، شناسایی ساختارها و مخازنی که در نگهداری این منابع نقش بسزایی دارند، از اهمیت بالایی برخوردار است. دیاپیرهای نمک مورد مطالعه از جمله ساختارهای زمین‌شناسی است که به دلیل ساختار و ویژگی منحصر به فردی که دارد، قادر به ذخیره این منابع می‌باشند. با استفاده از شواهد زمین‌شناسی و داده های ژئوفیزیکی از نوع لرزه ای بازتابی، میتوان تصویر واضح همراه با جزئیات از سطوح سقف و کف ساختار نمکی و نیز توالی های رسوبی و سازندهای پی سنگی اطراف آن ارائه داد. اما به دلایل متعدد مثل بازتابهای چندگانه، تبدیل قطبش امواج، افت انرژی بازتابیده شده از سطوح نمکی پرشیب، این داده ها ممکن است نتوانند جزئیات کافی برای تفسیر توده نمک و ساختارهای اطراف آن فراهم آورند. لذا با به کارگیری نشانگرهای لرزه ای همچون ماتریس همرخداد سطح خاکستری، کسینوس فاز، فرکانس لحظه ای و همچنین پوش، می‌توان در تفکیک نمک از سایر لایه‌ها بهره گرفت. و در مقطع لرزه‌ای تفسیر نمود. واژگان کلیدی: دیاپیر نمک، داده لرزه ای، نشانگرهای لرزه ای، تفسیر لرزه‌ای.

Detection and structural analysis of salt diapir using seismic attributes analysis

Salt structures are important for several reasons, for example, due to its plastic properties, as well as its low and relatively constant density, salt can create intrusive structures such as diapirs, which can be studied and investigated in geological. In addition, considering the importance and increasing need for natural resources, including oil and gas, as well as the need for optimal storage of these resources and their use when it is necessary, identifying the structures and reservoirs that play a significant role in maintaining these resources, is important. Salt diapirs are among the geological structures that can store these resources due to their unique structure and characteristics. Geological evidence and

geophysical data of the reflection seismic type, it is possible to provide a clear picture with details of the roof and floor surfaces of the salt structure as well as the sedimentary sequences and bedrock formations around it. Due to several reasons such as multiple reflections, wave polarization conversion, and energy loss reflected from steep salt surfaces, these data may not be able to provide enough details to interpret the salt mass and its surrounding structures. Therefore, by using seismic attributes such as gray level co-occurrence matrix, cosine of phase, instantaneous frequency, and also envelope, it can be used in the separation of salt from other layers and interpreted in the seismic section.

Keywords: Salt diapir, Seismic data, Seismic attributes, Seismic interpretation.

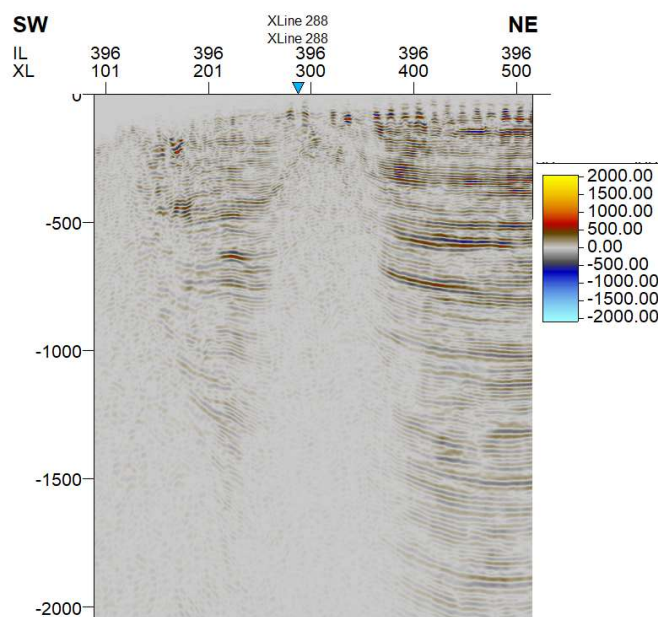
۱ مقدمه

دیاپیر نوعی توده نفوذی زمین‌شناختی است که در آن مواد دارای قابلیت تحرک و تغییر شکل پذیر، سنگ پوشاننده روی خود را میشکافند و هنگامی ایجاد می‌شوند که سنگ‌هایی با چگالی کمتر، در اثر نیروی شناوری به سنگ‌هایی با چگالی بالاتر بالای خود نفوذ میکنند. اصطلاح دیاپیر توسط لودویک مرازک زمین‌شناس رومانیایی برای توصیف توده‌های نمکی کارپاتین پیشنهاد شد. چنین ساختارهایی در کوه‌های ترانسیلوانیا در رومانی قبلاً نیز توسط پوسپنی تشخیص داده شده بودند. واژه دیاپیر از لغت یونانی *diapero* به معنی سوراخ کردن و نفوذ کردن گرفته شده است و این فرآیند به عنوان دیاپیریسم شناخته می‌شود. نمک به دلیل ناتراوایی و قابلیت حرکت خود، می‌تواند به عنوان یک سد نفوذ ناپذیر، سیالات واقع در زیر خود را حفظ نموده و در درازای زمان، تجمعات عظیمی از جمله نفت و گاز را به دام بیندازد. از این رو شناسایی و تفسیر دیاپیرها از اهمیت بالایی برخوردار است. بازتاب لرزه‌ای از امواج لرزه‌ای برای توصیف شرایط و ساختارهای زمین‌شناسی زیر سطح زمین استفاده می‌کند. در این پژوهش با بکارگیری نشانگرهای لرزه‌ای بر روی مقطع لرزه‌ای دیاپیرنمک در محدوده مورد مطالعه و تفسیر در ترسیم بهتر و وضوح بیشتر ساختار دیاپیر نمکی شده است.

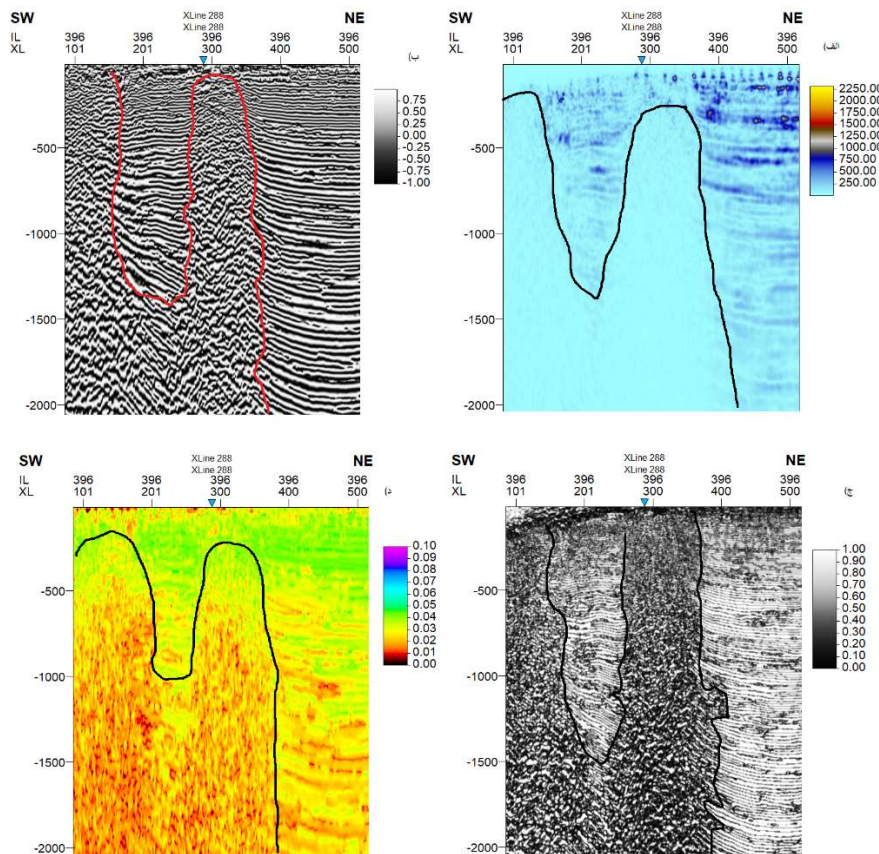
۲ روش تحقیق

نشانگرهای لرزه‌ای اجزایی از داده‌های لرزه‌ای هستند که با اندازه‌گیری، محاسبات و روش‌های دیگر از داده‌های لرزه‌ای به دست می‌آیند. نشانگرهای لرزه‌ای به عنوان بخشی از تفسیر لرزه‌ای در اوایل دهه ۱۹۷۰ معرفی شدند. از آن زمان بسیاری از نشانگرهای جدید مشتق و محاسبه شدند. [۲] در این پژوهش، یک مقطع در بخش مرکزی فلات ایران انتخاب شد و که ساختار نمک قابل مشاهده است. (شکل ۱). چند نشانگر لرزه‌ای از جمله ماتریس هم‌رخداد سطح خاکستری، کسینوس فاز، فرکانس لحظه‌ای و همچنین پوش، با توجه به هدف تحقیق، که شناسایی و مدلسازی دقیق تر ساختار دیاپیر نمک است، انتخاب گردیده است. هر کدام از نشانگرها معرفی و بر روی مقطع لرزه‌ای در بررسی گردیده و میزان تاثیر آن برای هدف مورد نظر بیان شده است. (شکل ۲). ماتریس هم‌رخداد سطح خاکستری معیاری از بافت یک تصویر است. این ماتریس، یک ابزار قدرتمند در زمینه پردازش تصویر است که به استخراج خواص بافتی یک تصویر

می‌پردازد [۳] و تعداد دفعات ترکیب های مختلف مقادیر روشنایی پیکسل که در یک تصویر رخ می دهد را توصیف میکند. (هارالیک و همکاران، ۱۹۷۳). کسینوس فاز مستقل از دامنه است و رویدادهای لرزه ای ضعیف و قوی را افزایش می دهد. پیوستگی، ناپیوستگی رویدادهای بستر را نشان می دهد [8, 9]. کسینوس فاز در امتداد افق اصولاً نباید تغییر کند، تغییر آن نشان دهنده گسل و یا ناهنجاریست. الگوهای چینه نگاری لرزه ای به راحتی با این نشانگر شناسایی می شوند و به مفسر اجازه می دهد تا فرآیندهای رسوبی را که بر منطقه تأثیر می گذارد آسان تر استنتاج کند. [۷] فرکانس لحظه ای مشتق زمانی فاز است، یعنی نرخ تغییر فاز. در تغییرات جانبی در سنگ شناسی، تعیین ضخامت بستر، وجود هیدروکربن (با ناهنجاری فرکانس پایین)، نشانگر منطقه شکستگی ها (با مناطق با فرکانس پایین) و تعیین ویژگی های سنگ نقش دارد. [۶] پوش نشان دهنده انرژی لحظه ای سیگنال است و از نظر بزرگی با ضریب بازتاب متناسب است. [۵] به عنوان یک نشانگر مرتبط با محتوای انرژی تریس لرزه ای، تشخیص تغییرات سنگ شناسی که ممکن است تفسیر آنها از ورودی لرزه ای اصلی دشوار باشد، مفید است. [۷] این نشانگر در برجسته کردن ناپیوستگی ها، تغییرات در سنگ شناسی، گسل ها، تغییرات در رسوب، اثریونینگ و مرزهای توالی مفید است. [۵].



شکل ۱: نمایی از یکی از مقاطع لرزه ای عمودی



شکل ۲: چهار نشانگر (الف) پوش (ب) کسنوس فاز (ج) ماتریس همرخداد سطح خاکستری و (د) فرکانس لرزه ای.

۳ نتیجه گیری

در نشانگر پوش، مقادیر بالای پوش می تواند به دلیل تغییرات مرزهای توالی های رسوبی باشد. در نشانگر کسینوس فاز، پیوستگی بازتابنده ها بدون در نظر گرفتن قدرتشان، به وضوح قابل مشاهده است، و به هم ریختگی و ناپیوستگی نشان از تغییر لایه رسوبی است. در نشانگر ماتریس همرخداد سطح خاکستری، با توجه به تفاوت بافتی گنبد نمکی با ساختارهای پیرامونش، این نشانگر آن را از سایر ساختارهای دربرگیرنده متمایز گردانده است، و در آخر نشانگر فرکانس لحظه ای، در عمق بیشتر تشخیص ساختار نمک با توجه به فرکانس پایین ساده تر است، اما با کاهش عمق و افزایش میزان فرکانس، تشخیص مرز و سقف دیپایر دچار مشکل می شود.

منابع

1. Badley, Michael E.(1985). Practical seismic interpretation, *International Human Resources Development Corporation, Boston*.
2. D.Subrahmanyam, P.H.Rao (2008). Seismic Attributes- A Review. *7th International Conference and exposition on petroleum Geopysics*. P398-404.
3. Haralick, R.M., Shanmugam, K., Dinstein, I. (1973) Textural features for image classification. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 3(6), 610-621.

4. Hudec, Michael R. Jackson, Martin P.A.(2007). Terra infirma: Understanding salt tectonics, *Earth-Science Reviews*,82,1-28.
5. Safarpour, M., Riahi, M. A., Rahimi, M., 2023. 'Integration of Seismic Attributes and Wellbore Data of Ghar Formation in the Hindijan and Bahregansar Oilfields', *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, 12(2), pp. 13-39. doi: 10.22050/ijogst.2022.336225.1634
6. Taner, F. V. Volpi, and U. Tinivella., (2001). Gas hydrate physical properties imaging by multiattribute analysis-black ridge bsr case history. *Marine Geology J.*, 178, 197-210.
7. Taner, M.T. Koehler, F, and Sheriff, R E.,. (1979). Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, Vol 44, pp. 1041-1063.
8. Rahimi,M., Riahi, M. A., 2022. Application of instantaneous amplitude and spectral decomposition to determine the location and thickness of a hydrocarbon reservoir. *Bulletin of Geophysics and Oceanography*. DOI 10.4430/bgo00402.
9. Zeng, H., Backus, M., Barrow, K., Tyler, N. (1998) a: Stratal slicing, part I: Realistic 3-D seismic model. *Geophysics*, Vol. 63, 502 – 513.

تحلیل ساختاری لایه های منفصل (بویژه نمک هرمز) و تاثیر آنها بر هندسه چین خوردگی ناحیه فارس با استفاده از مدل تجربی، اطلاعات زمین شناسی و ژئوفیزیکی

رضا شمس^۱، ایرج عبدالهی فرد^۲

^۱مدیریت اکتشاف نفت، اداره ژئوفیزیک

^۲مدیریت اکتشاف نفت، معاونت طرح ها

چکیده

زون های فارس و هرمزگان در شرق کمربند زاگرس توسط رخنمون های پرکامبرین - کامبرین سری هرمز شناخته می شوند. گسل های کششی عمیق قدیمی باعث ایجاد پستی و بلندی در سنگهای قبل از نمک هرمز (pre-Hormuz sediments) گردیده و موجب تشکیل حوضه هایی برای رسوبگذاری نمک هرمز کامبرین شده اند. از ابتدای رسوبگذاری پالئوزوئیک طی فرآیند Halokinesis، نمک هرمز در بعضی از نقاط شروع به بالا آمدن کرده و با ایجاد حوضه های کوچک (mini-basins) در اطراف خودش باعث ضخامت بیشتر رسوبات پالئوزوئیک در آنها شده است. در مراحل تکوین زاگرس، تاقدیس های با ابعاد و طول موج مختلف تشکیل می شوند که یکی از دلایل اصلی آن ناشی از غیر همسان بودن رسوبات در بخش های مختلف کمربند زاگرس است. وجود آنومالی هایی از گنبد های نمکی مدفون نقش بسزایی در این ناهمسانی دارند. ما با استفاده از دستگاه آزمایش جعبه ماسه، بررسی های میدانی و برداشتهای زمین شناسی و اطلاعات لرزه نگاری این ساختارها را مدل سازی نموده ایم.

واژه های کلیدی: ساختارهای سیگموئیدال، کمربند زاگرس، نمک هرمز، مدل سازی جعبه ماسه

Structural analysis of detached layers (especially Hormuz salt) and their effect on the folding geometry of Fars region using experimental model, geological and geophysical information.

Reza Shams¹ and Iraj Abdollahie Fard²

¹Oil Exploration Management, Geophysics Department

² Oil Exploration Management, Vice President of Projects

Abstract

The Fars and Hormuzgan Zones is eastern domain of the Zagros Belt which characterized by the outcrops and sub-crops of Precambrian-Cambrian Hormuz Salt. Deep-seated extensional faults played a major role in controlling the distribution and thickness variations of the Hormuz series and played important role in triggering and localizing the salt walls and diapirs This suggests that part of halokinesis could have been localized along the Precambrian-Cambrian extensional faults. Differential loading is the most probable principal mechanism for initiating and driving halokinesis in the Hormuz Salt Basin in Early Paleozoic. Therefore, it is expected that dissimilar types of the earlier salt related structures have their own influences on the geometry of present-day structures. Therefore, objective of this study is understanding role of the Hormuz Salt as basal décollement on long term sedimentation and relatively short term shortening happened

by the Zagros Orogeny. Most of the folds in this study area are mainly folded on the Hormuz salt detachment with NW-SE trend and variable sizes. Almost all the asymmetric anticlines in the study area are SW verging. But there are some folds with unconventional shape with one or both narrow and linear plunges. We used sand box modelling technique for better understanding geometry of the hidden earlier structures which were masked by the Zagros Orogeny.

Keywords: Hormuz salt, Zagros Belt, sand box modeling, sigmoidal structure

۱ مقدمه

شناخت اثرات تکتونیک نمک برای صنعت اکتشاف نفتی از آنجایی که بیش از ۱۳۰ حوضه رسوبگذاری تحت تاثیر توده های نمکی هستند مهم است (Jackson and Hudec, 2017). تاثیر لایه های نمک از دیرباز مورد بررسی قرار گرفته و نقش لایه های ضخیم نمک در کنترل تغییر شکل و طول موج ساختاری با توجه به مطالعات سطحی (ویژگی های رخنمون ها) و زیر سطحی (بعنوان مثال اطلاعات چاه و لرزه نگاری) و فن آوری های مدل سازی (عددی و فیزیکی) اثبات شده می باشد.

بالا آمدن نمک هرمز پرکامبرین - کامبرین از اواخر پرمین (Motiei, 1995) و اکثراً اواخر کرتاسه (بعنوان مثال Motamedi and Gharabeghli, 2018) قبل از برخورد نئوژن گزارش شده است (Jackson and Hudec, 2017). فراوانی ساختار های نمکی بیرون زده نواحی فارس و هرمزگان را یکی از ویژه ترین مناطق هالوکینیتیک دنیا کرده است. در نیمرخ های لرزه نگاری خلیج فارس یا قوس فارس (Jahani et al., 2017) ساختار های نمکی نشان دهنده افزایش ضخامت لایه از قله تاقدیس ها تا ناودیس های مرتبط با فرار نمک از ناودیس های حاشیه ای می باشند که این ویژگی گواه بر بالا آمدگی پیش رونده از افق های سازندی پالئوژئیک پایینی تا میانی و ایجاد حوضه های رسوبگذاری کوچک جانبی است (Jackson & Talbot, 1994). تفاوت در میزان رسوبگذاری محتمل ترین سازوکار برای شروع و حرکت در حوضه نمک هرمز اوایل پالئوژئیک است (Jahani et al., 2017; shams et al., 2020).

گسل های کششی عمیق بخش های بزرگ سنگ بستر یک نقش اساسی در کنترل آشفستگی و تغییرات ضخامت نمک هرمز (Jackson and Hudec, 2017) و تحریک و تمرکز یافتگی دیواره های نمکی و دیاپیر ها بازی می کند (Rowan, 2014). این نشان می دهد که بخشی از هالوکینیز می تواند در طول گسل های کششی پرکامبرین - کامبرین تمرکز یابد. سوالات اساسی نقش و رفتار این نمک های مدفون در طی فرآیند تکوین کمربند زاگرس است و سوال دیگر این است که آیا وجود این آنومالی ها عامل اساسی در ایجاد اشکال سیگموئیدی تاقدیس ها دارند. هدف از این مطالعه، بررسی تاثیر لایه های جدایشی و گسسته بویژه نمک هرمز بعنوان لایه جدایشی زیرین (basal detachment) در میان رسوبات بالایی آنها در طی فرآیند تکوین زاگرس بر ابعاد و شکل تاقدیس ها می باشد. استفاده از مدل سازی تجربی با جعبه ماسه (sand box modeling) می تواند درک بهتری از نقش آنومالی ها در تشکیل ساختار های نامتعارف در چین خوردگی کمربند زاگرس ارائه نماید. این ساختار های قدیمی اهمیت ویژه ای در مهاجرت هیدروکربور در طی دوره های مزوزئیک و ترشیاری داشته اند.

۲ روش تحقیق پراکندگی گنبد‌های نمکی

ساختارهای نمکی هرمز از غرب به گسل کازرون و از شرق به خط عمان (زون گسله زندان یا کمربند میناب جاسک) و از شمال به گسل تراستی زاگرس محدود می‌شود (شکل ۱). گنبد‌های نمکی مذکور در سطح زمین رخنمون دارند ولی در این میان برخی گنبد‌های نمکی تا کنون به سطح زمین راه نیافته‌اند و شناسایی آنها از طریق مطالعات ژئوفیزیکی و یا شواهد موجود در سطح میسر است.

کمربند چین و تراستی زاگرس (ZFTB) به عنوان یک زنجیره کوهستانی با روند NW-SE با طول تقریبی ۲۰۰۰ کیلومتر با همگرایی بین صفحات عربی و ایران شکل گرفت (Berberian & King 1981). تکامل این کمربند همچنین نتیجه بازشدگی پرمین-تریاس (توسعه گسل‌های کششی) و بالاراندگی افیولیت‌های کرتاسه پایینی (تغییر تصویر تکتونیکی زاگرس و تولید یک حوضه انعطاف پذیر پیش بوم) می‌باشد (Abdollahie Fard et al., 2019).

این کمربند توسط گسل‌های تراستی و امتداد لغز به چندین زون تقسیم شده است. پراکندگی سری هرمز در نواحی هرمزگان و فارس توسط ساختارهای گودال و نیمه گودال و بلندها کنترل میشوند (Edgell, 1996) که با یک بخش کششی در طی دوران پرکامبرین زیرین تا اوایل کامبرین (Al-Husseini, 2000) با حداکثر ضخامت ۱-۲ کیلومتر لایه جدایشی موثر و کارآمد ایجاد شده است (Lacombe & Bellahsen, 2016).

سری هرمز بعنوان قدیمی ترین رسوبات کمربند زاگرس تصور می‌شود (Colman-Sadd, 1978; Falcon, 1969) که توسط یک توالی رسوبی ضخیم پوشیده شده است. از طرف دیگر بازتاب‌های لرزه ای رسوبات قبل از هرمز در نیمرخ‌های لرزه‌نگاری قابل تشخیص هستند (Jahani et al., 2009) که نشانگر پوشش رسوبی خیلی ضخیم روی سنگ بستر بلورین زاگرس است. نمک هرمز با سن پرکامبرین زیرین، پایین ترین واحد سری هرمز است (Ahmadzadeh-Heravi, 1990) و در حوضه‌های تبخیری محدود نهشته شده‌اند (Jahani et al., 2007). این نمک هرمز تا ۱۰ کیلومتر ستون رسوبی از کامبرین تا پلیوسن در جنوب شرقی زاگرس (Davoudzadeh, 1990) از طریق مجاری عمودی توسط چگالی بالاتر لایه‌های رویی (Mukherjee et al., 2010) و در اشکال متفاوتی از ساختارهای نمکی همچون تاق‌دیس‌های نمک یا دیواره‌های نمکی نفوذ کرده‌اند (شکل ۲).

ساختارهای وابسته به نمک بخصوص دیابیرهای نمکی زون هرمزگان و فارس از قرن ۱۹ بدلیل اهمیت اقتصادی‌شان بطور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (Harrison, 1931 and Nicaise et al., 2011). دیابیرهای نمکی عمدتاً متعلق به نمک هرمز هستند. از طرف دیگر یک حوضه تبخیری دیگری که در اوایل تا میانه میوسن (حوضه تبخیری نئوزن) در جنوب خلیج فارس و بخش جنوب شرقی زون فارس وجود دارد (Abdollahie Fard et al., 2011). بخش تبخیری سازند دشتک نیز یکی دیگر از لایه‌های جدایشی بخصوص در ناحیه فارس محسوب می‌شود.

اشکال گوناگونی برای دیپیرهای نمکی ذکر شده است (Jackson and Hudec, 2017) ولی در این میان حالت بالا آمدگی به شکل گنبد مانند شایعتر است. تلفیق دیپیرهای نمکی مدفون نزدیک به سطح زمین که تحت تاثیر کوتاه شدگی زاگرس قرار گرفته اند باعث تغییرات رئولوژی سنگها شده و می توانند باعث ایجاد اشکال متفاوتی از تاقدیس ها شوند. شکل و اندازه لایه های جدایشی در بین لایه های صلب نیز خود منشاء تغییرات زیادی در ابعاد تاقدیس های مرتبط با تکتونیک این نوع از ساختارها می گردد (شکل ۳).

در برخی موارد نمک هرمز در اعماق زیاد حالت پهن پیدا کرده و در سطح شاهد ساختار گرد و بزرگی همانند جزیره کیش هستیم. زمانیکه دیپیر بصورت ستونی بالا می آید چون سطح تماس کمتری (با توجه به مقطع افقی کوچک آن) با سنگهای روباره دارد بنابراین دارای توان بیشتری جهت قطع کردن لایه های بالایی و رسیدن به سطوح کم عمق است. ساختمان سیری الوند در بخش میانی خلیج فارس نمونه چنین ساختاری در مقایسه با ساختمان کیش در نزدیکی آن است (شکل ۴). اشکال دیگری همچون قارچی و یا شاخه شاخه برای گنبدهای نمکی هرمز برشمرده شده است. بررسی شکل گنبدها می تواند به شناسایی مکانیسم بالا آمدن آنها کمک نماید. گاهی غسل های شعاعی نیز میتواند نشاندهنده فعالیت نمک هرمز باشد (شکل ۵).

البته تعدادی از گنبد های نمکی ناشی از تمرکز یافته گی نقطه ای یک دیواره نمکی حاصل شده اند (Jahani et al., 2017) که در نهایت به سطح زمین رسیده اند. گنبد های نمکی را میتوان بر اساس میزان فرسایش یافتگی روانه نمک و قطعات بیگانه درون آنها که نشاندهنده سن تشکیل و ظهور آنها به سطح زمین است، نیز تقسیم بندی نمود (Jahani et al., 2007). با توجه به اینکه عمق نفوذ نمک هرمز در طی پالئوژئیک متفاوت می باشد لذا ساختار های مرتبط با آنها که در طی کوتاه شدگی کمر بند زاگرس شکل گرفته اند دارای مشخصات منحصر به فردی هستند.

Halokinesis

حرکت نمک هرمز در اکثر دیپیرهای ناحیه فارس از اواخر کرتاسه (e.g., Harrison, 1930; Kent, 1958; Player, 1969; Edgell, 1996; Talbot and Alavi, 1996; Bahroudi and Koyi, 2003; Letouzey and Sherhati, 2004; Callot et al., 2007, 2012; Jahani et al., 2007, 2009, 2017; Perotti et al., 2011) و در بعضی از آنها از اواخر پرمین (Motiei 1995) شروع شده است. دیپیر های نمک هرمز بیشتر در جنوب شرقی فارس و خلیج فارس متمرکز شده اند. این حجم از ساختارهای نمکی و مرتبط با نمک یکی از باشکوه ترین مناطق هالوکینیتیک (halokinetic provinces) را در دنیا رقم زده است.

تعدادی از نیمرخهای لرزه نگاری خلیج فارس بخصوص در محدوده قوس فارس (Fars Arch) فعالیت و حرکت نمک از ابتدای پالئوژئیک (Jahani et al., 2009) با ایجاد حوضه های کوچک جانبی (lateral mini-basins) و ناودیس های حاشیه ای (rim syncline) باعث افزایش ضخامت رسوبات در اطراف و نازک شدگی آنها در قله این آنومالی های نمک شده اند (Jahani et al. 2007, 2009, 2017; Jackson & Talbot, 1994). بنابراین شروع گنبدی شکل (Doming) و چینه رشدی (Growth strata) بیشتر گنبد های نمکی از ابتدای پالئوژئیک شروع شده و تا زمان حال ادامه داشته است (Jahani et al., 2017). حوضه های حاشیه ای درست بعد از

رسوبگذاری نهشته های غیر نمکی بروی نمک هرمز تشکیل میشوند این فرآیند بخصوص در محل هایی که تجمع و ضخامت برجای نمک بدلیل گودال های (Grabau) ایجاد شده از گسل های کششی پرکامبرین زیاد می باشد، تشدید می گردد. در این فرآیند بدلیل شناوری نمک از یک طرف و وزن رسوبات بالایی از طرف دیگر باعث فرونشست رسوبات در اطراف آنومای ها و حرکت نمک از گودال ها به بلندها (Horst) می گردد. با تمرکز نمک بر روی لبه توپوگرافی های رسوبات زیر نمک، دیواره های نمکی و یا قارچ های نمکی ایجاد می گردد. گسل های کششی عمیق پرکامبرین در رسوبات زیر نمک هرمز نقش اصلی را در ایجاد این دیواره های نمکی و حوضه های حاشیه ای آنها دارند (Jahani et al., 2017). مقاطع لرزه ای خلیج فارس نشان میدهد که ساختار های مرتبط با نمک هرمز در انتهای پالئوژئیک تقریباً مدور بوده و تغییرات در میزان رسوبگذاری قله نسبت به حاشیه ها و یا فرسایش بیشتر قله ها نسبت به حاشیه ها باعث همگرایی بیشتری نمک بسمت قله گردیده است (شکل ۲).

توصیف زمین شناسی ساختارهای نامتعارف

اگرچه برای اکثر تاقدیس های گنبدی نمی توان روند مشخصی تعیین نمود با این حال روند بیشتر تاقدیس هایی که یک یال یا هر دو یال کشیده و باریک دارند دارای روند شمال غرب جنوب شرق هستند. مهمترین تاقدیس هایی که در ناحیه فارس اصطلاحاً سیگوئیدال هستند عبارتند از: سلامتی، ددنجان، نورا، سورمه، شاهینی، کفتر، سفیدزاخور، بندوبس، دنگ، باووش، گاوبست، خلفانی، هرنگ، شو و تاقدیس های گهکم، فراقان، هندان و تاقدیس نمک در ناحیه شمال بندرعباس (شکل ۶). تعدادی از آنها از جمله سلامتی، ددنجان، کفتر، شو، هرنگ، گهکم، فراقان، هندان و نمک دارای رخنمونی از نمک هرمز می باشند و بقیه تاقدیس ها گنبدی تقریباً مدور در بخش مرکزی تاقدیس دارند که احتمالاً متأثر از نمک هرمز بوده است. موضوعی که این تاقدیس ها را از دیگر تاقدیس های مرتبط با نمک مجزا می نماید شکل ظاهری دوکی آنهاست. بارز ترین نمونه از تاقدیس های سیگوئیدال، که احتمالاً شکل دوکی آن به توده نمک قدیمی موجود در هسته مربوط می شود، تاقدیس های کفتر و نورا در فارس ساحلی و گهکم و فراقان در شمال بندرعباس می باشد. تاقدیس کفتر با طول ۸۲ کیلومتر که ۵۵ کیلومتر آن به بخش تقریباً مدور آن مربوط می گردد و عرض ۱۲ کیلومتر در بخش مدور و یک تا ۸ کیلومتر آن به بخش بال های شمال شرقی و جنوب غربی محدود می شود و در ۱۰ کیلومتری شمال شهر جهرم و در مجاورت شمال تاقدیس کرباسی واقع شده است. ارتفاع بلندترین نقطه در تاقدیس ۲۸۱۷ متر از سطح دریاست و قدیمی ترین بیرون زدگی در هسته آن گروه بنگستان می باشد. ولی سطح اصلی تاقدیس را سازند آسماری می پوشاند. یک گنبد نمکی کوچک به ابعاد ۲.۵ کیلومتر طول و ۱.۲ کیلومتر عرض در مرکز بخش گرد تاقدیس وجود دارد و با دو بال باریک در دو سوی شمال غرب و جنوب شرق ظاهری دوکی شکل دارد (شکل ۶). این تاقدیس در مسیر گسل پی سنگی نظام آباد قرار گرفته است و دارای جابجایی امتداد لغز چپ گرد است. تاقدیس های سلامتی، ددنجان و سورمه در مسیر گسل امتداد لغز راست گرد کره بس قرار گرفته اند و بنظر در عمق دارای یک دیواره نمکی واحد هستند که در طی فرآیند حرکت گسل امتداد لغز، نمک هرمز بصورت متمرکز شده از محل شکستگی ها خارج شده است (Shams et al., 2020). تمام تاقدیس ها نامتقارن هستند و حداقل یکی از طرفین آنها باریک شده است.

تاقدیس نورا یا میمند دارای روند شمال غرب - جنوب شرق با 70 کیلومتر طول و ۱۲ کیلومتر عرض در بخش گرد مرکزی و حداکثر ۷ کیلومتر در دو بال شمال غربی و جنوب شرقی است و در شرق فیروزآباد و جنوب میمند واقع شده است. توالی سازندها از بختیاری تا ایلام در نورا رخنمون دارند و بدنه اصلی آن را سازندهای آسماری - جهرم تشکیل می دهد. این تاقدیس طویل دارای یک قله تقریباً مدور با رخنمون سروک می باشد که محور غربی آن با پلانژ محور شرقی تاقدیس ددنجان متصل می گردد (معینی و دیگران، ۱۳۸۷).

پدیده هالوکنیز را میتوان عامل اصلی تشکیل هسته ابتدایی تاقدیس نورا در نظر گرفت که در مراحل تکامل چین خوردگی زاگرس به شکل کنونی درآمده است (شکل ۷). این تاقدیس طویل دارای یک قله تقریباً مدور با رخنمون سروک می باشد که محور آن به سمت غرب چرخیده است و با پلانژ تاقدیس چرخیده ددنجان متصل می گردد. بخش چرخیده غربی تاقدیس نورا احتمالاً تحت تاثیر حرکت امتداد لغز گسل کره بس بوده است ولی نطفه تشکیل این تاقدیس تحت تاثیر پدیده هالوکنیز بسبب وجود پله های تکتونیکی در زیر نمک هرمز بوده است. ناهمواری نمایش داده شده در مقطع لرزه ای شکل ۷ در زیر بخش برجسته احتمالاً عامل تمرکز نمک برای بالا آمدن این بخش از تاقدیس شده است. وجود پدیده بال نمکی (salt wing) نشان از دگرشکلی نسبتاً شدید که باعث جدایش لایه های ضعیف شده است را می دهد (Jackson and Hudec, 2017; Shams et al., 2020). یال غربی قله تاقدیس نورا دارای آثار رشد چینه ای می باشد که رسوبگذاری همزمان با رشد و نفوذ نمک را نشان می دهد. در شمال تاقدیس نورا، تاقدیس بیضوی شکل مرتفع سیم وجود دارد. تاقدیس سیم در ناودیس شمالی تاقدیس نورا تشکیل شده است که بدلیل وجود ناهمواری تکتونیکی در رسوبات قبل از هرمز واقع در لبه شمالی تاقدیس نورا و جنوبی تاقدیس سیم باعث مهاجرت نمک درست بعد از رسوبگذاری پالئوژئیک شده است و در زمان برخورد زاگرسی شکل کنونی را گرفته اند. نقش لایه های سست و نرم میانی از جمله رسوبات تبخیری دشتک بجز تاثیرات ناحیه ای نقش اساسی در دگرشکلی این تاقدیس نداشته اند.

در نیمرخ لرزه نگاری به وضوح دیده میشود یال جنوبی تاقدیس نورا در محلی که به ناودیس فیروز آباد منتهی میشود یازتابنده ها از پالئوژئیک پایینی با رشد چینه ای حاصل از پدیده هالوکنیز همراه بوده اند (Shams et al., 2020). بطوری که همزمان با رسوبگذاری از ابتدای پالئوژئیک با فرونشست ناشی از وزن رسوبات از یک طرف و حرکت نمک از ناودیس حاشیه ای بسمت قله تاقدیس از طرف دیگر ایجاد یک آنومالی گنبدی شکل نموده است. وجود یک بلندا مهاجرت نمک را به هسته تاقدیس نورا تشدید کرده است بطوری که قبل از چین خوردگی نفوژن زاگرس در محل فعلی تاقدیس نورا احتمالاً یک دیواره نمکی باریک وجود داشته که بخش غربی آن در محل نزدیک به دشت فیروزآباد دارای برجستگی بیشتر بوده است و همین تمرکز نقطه ای نمک باعث شده است در زمان چین خوردگی زاگرس، این تاقدیس دچار چرخش محوری گردد. این نوع ساختار در ستون های نمکی هرمز قدیمی (pre-Hormoz salt diapir) که در معرض دگرشکلی زاگرس قرار گرفته اند بصورت یک جبهه جلو رفته (salient) بروز میکند که همین شکل خود نشاندهنده وجود نمک قدیمی در هسته تاقدیس نورا می باشد که جبهه تراستی جلویی را دستخوش انحنای کرده است (شکل ۷). در گزارشات زمین شناسی هیچ گونه گسل امتداد لغز قابل توجهی در بخش چرخش محور گزارش نشده است از طرف دیگر در دشت فیروز

اباد وجود یک برش نمکی و بیرون زدگی سازند گوری با نمایی از چینه رشدی، نشان دهنده نفوذ نمک در لایه های بالایی است.

در مقطع لرزه نگاری که از بخش حجیم تاقدیس باووش عبور کرده میتوان تاثیر نمک هرمز را در دگرشکلی تقریباً متقارن یال های شمال و جنوب آن دید. در این مقطع هیچ نشانه ای از فعالیت لایه نرم میانی دشتک در این بخش دیده نمی شود. وجود دو ناودیس تقریباً هم ارتفاع در دو طرف این مقطع لرزه نگاری دو بعدی موید این موضوع است که احتمالاً نمک هرمز با فرار از طرفین و نفوذ در بخش مرکزی تاقدیس باعث ایجاد یک گنبد شده که در مراحل بعدی در اثر دگرشکلی زاگرس اولاً شیب یال جنوبی بخش حجیم تاقدیس بیشتر شده و ثانیاً با چین خوردگی و گسلش پلانژ غربی تاقدیس، باعث ایجاد یک تاقدیس باریک شده است که شکل سیگموئیدال به آن داده است. البته لایه های نرم میانی همچون دشتک بخصوص در تاقدیس مرز (بال شمال غربی) باعث تشدید چین خوردگی در طی فرآیند کوهزایی زاگرس شده است. وجود افتادگی ثقلی که در بخش قله تاقدیس باووش بر روی بازتابهای لرزه‌ای مشاهده می گردد میتواند دلیل دیگری از وجود حجم بالای نمک هرمز قدیمی در بخش هسته این تاقدیس باشد (شکل ۸).

تاقدیس گهکم دارای روند شمال غرب - جنوب شرق با ۳۴ کیلومتر طول و ۱۰ کیلومتر عرض در بخش گرد مرکزی و حداکثر ۳ کیلومتر در بال شمال غربی است و تاقدیس فراقان نیز با روند شمال غرب - جنوب شرق با ۴۴ کیلومتر طول و ۱۲ کیلومتر عرض در بخش تقریباً گرد مرکزی و حداکثر ۴ کیلومتر در بال جنوب شرقی است. این دو تاقدیس در شمال بندرعباس واقع شده اند.

ورال (۱۹۷۸) در شمال بندرعباس ۶ روند چین و تراست تشخیص داده است و ضخامت اصلی نمک را در این مناطق ۲۰۰۰ متر در نظر گرفته است که در نتیجه مهاجرت نمک از ناودیس ها به تاقدیس ها برای گهکم، فراقان و خوش کوه ضخامت بیش از ۸۰۰۰ متر ارزیابی کرده است.

روند اثر محوری چین ها به تدریج از جهت شمال غرب-جنوب شرق، در بخش های میانی به شرق-غرب و در ناحیه بندر عباس به شمال شرق- جنوب غرب تغییر می نمایند.

چین خوردگی رسوبات کنگلومرای بختیاری و قرارگیری نمک فینو بر روی کنگلومرا و همچنین قرارگیری نمک سرچاهان بر روی رسوبات آبرفتی نشاندهنده جوان بودن فعالیت تکتونیکی و نمکی در این منطقه می باشد (شکل ۹).

نقشه هم ضخامت سازند دالان در برونزد های گهکم، فراقان و خوش کوه و همچنین اطلاعات چاههای نمک و فینو نشاندهنده افزایش ضخامت دالان با روند شمال شرقی می باشد این افزایش ضخامت و رخساره کربناتی توده ای نشاندهنده لبه شمال شرقی قاره آفریقا- عربی می باشد (p.verrall; 1978).

از طرفی در خطوط لرزه نگاری که اخیراً در دشت سرچاهان برداشت شده است، چینه های رشدی را به وضوح نشان میدهد که موید فعالیت نمک هرمز در طی مراحل رسوبگذاری بوده است. (شکل ۱۰)

مدل سازی توسط جعبه ماسه (Sand Box modeling)

جهت نشان دادن تاثیر نمک هرگز مدفون قبلی بر شکل و طول موج ظاهری تاقدیس های مرتبط با نمک از مدل سازی توسط جعبه ماسه ای استفاده کرده ایم. مزیت مهم ماسه جهت استفاده برای این نوع آزمایشات همگون بودن آن برای تاثیر دگرشکلی ناشی از وجود یک آنومالی در میان آن است. از ماسه های رنگی جهت لایه بندی برای نمایش نوع دگرشکلی و تاثیر آنومالی ها در ضخامت های مختلف استفاده شده است. اندازه دانه های ماسه استفاده شده در این آزمایشات توسط دستگاه های دقیق محاسبه شده است. این ماسه ها دارای جور شدگی بر اساس چارت کامپتون (Compton 1962) بصورت جورشدگی متوسط (Moderately sorted) و گرد شدگی آنها بر اساس چارت ام سی پاورز (M.C. Powers 1953) به صورت گرد شده تا نیمه گرد شده (Rounded to Sub rounded) می باشد. دانه بندی در حد متوسط (Medium grained) می باشد اما دانه هایی در حد گرد شده کامل (Fine - Coarse) هم وجود دارد. چگالی ماسه ۱.۵ الی ۱.۵۵ گرم بر سانتی متر مکعب و زاویه اصطکاک داخلی ۳۳ درجه می باشند. از محلول نرم نشاسته ذرت (corn starch cream) جهت نمایش آنومالی استفاده شده است که دارای چگالی ۱.۱ می باشد که نسبت به ماسه دارای کنتراست خوبی است. ویسکوزیته این محلول غیر نیوتنی ۱۰۶ سانتی پواز در دمای ۲۵ درجه محاسبه گردیده است. دستگاه جعبه ماسه، مکعبی با عرض ۲۰ سانتی متر و طول ۲۵ سانتی متر و ارتفاع ۱۰ سانتی متر می باشد و صفحه متحرک با سرعت ۱ میلی متر در دقیقه در داخل آن حرکت می کند (Shams et al., 2020). ضخامت ستون ماسه ۲.۵ سانتی متر بوده است که آنومالی هایی با قطر ۳ سانتی متر در داخل آنها جایگذاری شده اند. مقادیر ستون ماسه و سرعت حرکت صفحه متحرک نسبت به ستون رسوبگذاری و حرکت صفحات تکتونیکی با نسبت بزرگنمایی ۳.۵ برابر در نظر گرفته شده است (شکل ۱۱).

در این آزمایش جهت کمتر کردن اصطکاک از کرم وازلین در کف استفاده شده است. در آزمایش اول یک آنومالی در مرکز جعبه ماسه و بین ستون ماسه جایگذاری گردید. جهت نشان دادن تاثیر فاصله قرار گیری آنومالی ها از دیواره متحرک، سه آزمایش انجام گرفت. در هر سه آزمایش یکی از آنومالی ها (آنومالی سمت راست) در فاصله ۱۰ سانتی متری از دیواره متحرک بوده و آنومالی دیگر (آنومالی سمت چپ) بترتیب در فاصله ۲.۵، ۵ و ۱۵ سانتی متر نسبت به دیواره متحرک قرار گرفته اند. فاصله دو آنومالی از همدیگر ۶.۵ سانتی متر می باشد. هر دو آنومالی با فاصله یکسانی از دیواره های ثابت جانبی قرار دارند (شکل ۱۲).

تحلیل و بررسی آزمایش ها

آزمایش اول) آنومالی خیلی نزدیک به صفحه متحرک می باشد

با شروع دگرشکلی و بعد از ۴ درصد کوتاه شدگی جبهه موج به جلو آنومالی سمت چپ که در فاصله ۲.۵ سانتی متری صفحه متحرک قرار گرفته است، منتقل شده و بشکل منحنی درمی آید. با ادامه کوتاه شدگی ابتدا بعد از گنبدی شدن، دچار شکستگی در روباره شده و در نهایت با خروج محلول همراه می گردد. در طرف دیگر، آنومالی دورتر از صفحه متحرک که در فاصله ۱۰ سانتی متری قرار گرفته است با جذب تنش باعث انحراف در

جبهه موج شده و بصورت یک تاقدیس گنبدی درمی آید. ارتباط بین این دو آنومالی بصورت یک تاقدیس باریک و کم عرض است (شکل ۱۲ الف).

آزمایش دوم) آنومالی نزدیک به صفحه متحرک می باشد

جبهه موج بعد از ۸ درصد کوتاه شدگی انحنای آنومالی سمت چپ که در فاصله ۵ سانتی متری از دیواره متحرک قرار گرفته است را نشان می دهد. در ادامه دگرشکلی دچار شکستگی در روباره شده و محلول آن خارج می گردد. در طرف دیگر، مشابه حالت قبل یک گنبد ظاهر گشته که دارای شیب های ملایم تر است. ارتباط این دو گنبد نیز همانند آزمایش اول توسط یک تاقدیس باریک و کم عرض می باشد. میزان خروج محلول از آنومالی سمت چپ در آزمایش اول خیلی بیشتر از آزمایش دوم است که نشاندهنده تنش بیشتر و در نتیجه پمپاژ بیشتر محلول می باشد (شکل ۱۲ ب).

آزمایش سوم) آنومالی دور از صفحه متحرک می باشد

در این آزمایش تا ۸ درصد کوتاه شدگی نیز آثار مشهودی از گنبد و بالا آمدگی ناشی از آنومالی ها دیده نمیشود در این آزمایش آنومالی سمت چپ در فاصله ۱۵ سانتی متری دیواره متحرک قرار دارد و لذا آنومالی سمت راست با ۱۰ سانتی متر فاصله از دیواره متحرک، اولین نشانه های انحراف جبهه موج را نشان می دهد. در نهایت هر دو آنومالی با ۱۶ درصد کوتاه شدگی فقط بصورت گنبد های ملایم دیده میشوند. ارتباط آنها بصورت یک ناودیس پهن دیده میشود و در جبهه موج قبل از آنها یک فرو افتادگی عمیق مشهود است (شکل ۱۲ ج).

در همه این آزمایش ها با شروع دگرشکلی ، جبهه جلویی با ایجاد یک برجستگی (salient) در محل آنومالی نزدیک به دیواره متحرک ابتدا باعث نمایان شدن حضور آنومالی می شود. با ادامه دگرشکلی ، آنومالی نزدیک به دیواره متحرک بصورت یک گنبد درآمده و در نهایت با ایجاد گسل های کششی در سطح ، روباره باز شده و روانه ایجاد می گردد. در طرف دیگر، آنومالی دورتر از دیواره متحرک فعال می گردد که نشاندهنده یک نقطه ضعف یا یک لایه نرم در میان لایه صلب تر بوده و با ایجاد برجستگی (salient) در جبهه دگرشکلی نمایان می گردد. لایه صلب ماسه جلو آنومالی ها همچون یک مانع (buttress) عمل می نماید و باعث بالا آمدن ستون لایه نرم می گردند. در این آزمایشات میزان روباره ۲ میلی متر در نظر گرفته شده است ولی اگر این مقدار روباره بیشتر و یا کمتر گردد تاثیر زیادی در نتایج آزمایشات خواهد گذاشت. ارتباط آنومالی ها در این دسته از آزمایشات با تاقدیس های تقریباً کم عرض و کم ارتفاع دیده می شود که بسته به فاصله آنومالی ها از صفحه متحرک شدت و ضعف آن متفاوت است بطوری که در آزمایش اول بدلیل نزدیکی زیاد آنومالی سمت چپ به دیواره متحرک، جبهه های دگرشکلی متاثر از نقطه ضعف بوجود آمده در محل آنومالی، موجب ایجاد روندهایی با طول موج های زیاد و دامنه های کم شده است که با رسیدن جبهه موج به آنومالی دورتر، بسمت آن متمایل شده و ایجاد روندهایی مورب نسبت به جهت حرکت صفحه متحرک کرده است. در این آزمایش جبهه اولین دگرشکلی متاثر از آنومالی نزدیک به صفحه متحرک قرار گرفته و در نتیجه در فاصله حدود ۲ سانتی متری از صفحه متحرک شکل گرفته است. در آزمایش دوم بدلیل فاصله گرفتن آنومالی سمت چپ از صفحه متحرک و نزدیک شدن دو آنومالی به هم، جبهه موج اولیه تحت تاثیر آنومالی و ضخامت ماسه شده است و در نتیجه در

فاصله خیلی دورتر از صفحه متحرک و حدود ۵ سانتی متری آن شکل گرفته است. محصول نهایی ارتباط این دو آنومالی با یک روند مورب نسبت به صفحه متحرک نشان می دهد بدون آنکه خبری از جبهه های دگرشکلی قبلی باشد (شکل ۱۲). در آزمایش سوم بدلیل فاصله گرفتن زیاد آنومالی ها از صفحه متحرک، مکان جبهه دگرشکلی اولیه متأثر از ضخامت لایه ماسه می باشد که این مکان در فاصله حدود ۴ سانتی متری از دیواره متحرک است. در کوتاه شدگی های بیشتر تاثیر آنومالی ها بر جبهه دگرشکلی نمایان شده ولی روند های مورب بوضوح آزمایشات قبلی دیده نمیشود.

با مقایسه نتایج آزمایشات و تصاویر ماهواره ای بعضی از تاقدیس های نواحی فارس و شمال بندرعباس به شباهت غیر قابل انکار آنها میتوان پی برد (شکل ۱۳).

۳ نتیجه گیری

همانگونه که تغییر سازند ها در محیط های رسوبگذاری عامل مهمی در نحوه رفتار آنها نسبت به دگرشکلی و ایجاد پیچیدگی های ساختمانی است، قرار گرفتن تکتونیک سازند نرم و قابل انعطاف همچون نمک هرمز نیز در کنار سازند های چگال و صلب می تواند ایجاد ساختارهایی نماید که از روند عمومی کمربند چین خوردگی طبیعت ننماید و یا حداقل باعث انحراف در جهت تنش وارده گردد. نمک هرمز عامل مهمی در آنومالی های ساختاری کمربند چین خورده و گسلش زاگرس بازی می کنند که بسته به فاصله آنها از کمربند، عمق نفوذ آنها در بین سازندهای بالاتر از خود، شکل نفوذشان، زمان شروع بالآآمدگی و میزان حجم ستون نمکی آنها دارای رفتار های متفاوتی می گردند و ساختار متفاوتی را ایجاد می کنند. در انواعی از این ساختار ها همزمان با رسوبگذاری شدت حرکت رو به بالای نمک محسوس بوده و ایجاد رشد چینه ای در رسوبات سنوزئیک و ترشیاری نموده اند. یکی از این نوع ساختارها همانگونه که در مدل سازی تجربی دیدیم، ساختار سیگنوئیدال می باشند که به نمک های مدفون قدیمی و عملکرد لایه های نرم میانی مربوط می گردند. این ساختار ها بصورت کلی دارای دو بخش می باشند ۱- بخش گرد و حجیم که محل هسته نمک هرمز قدیمی بوده است ۲- بخش باریک و اصولاً کشیده دماغه ها که لایه های نرم میانی در زمان کوهزایی فعال تر هستند. در بعضی از این ساختارهای سیگنوئیدال نمک هرمز به سطح رسیده است و ایجاد روانه نمک در سطح زمین نموده است (تاقدیس کفتر) ولی در تعدادی از آنها نمک در هسته تاقدیس باقی مانده است و لایه نرم میانی بعنوان مثال بخش تبخیری سازند دشتک به خصوص در دماغه ها فعالتر هستند. از طرفی عدم افزایش ضخامت تکتونیک لایه نرم میانی همچون دشتک در بخش حجیم این گونه تاقدیس ها می تواند موید این نکته باشد که بخش های بالایی تاقدیس ها کمتر تحت تاثیر چین خوردگی بوده اند و از طرفی این موضوع برای بخش های کشیده و دارای پلانژها برعکس بوده بطوری که افزایش ضخامت دشتک موجب جابجایی محوری در آنها نیز گردیده است.

منابع

شمس، ر.، عبدالهی فرد، ا.، بوذری، س.، پور کرمانی، م.، ۱۴۰۲، بررسی ساختارهای سیگموئیدال و ارتباط آنها با لایه

های جدایشی از جمله گنبد‌های نمکی مدفون قدیمی در ناحیه فارس و هرمزگان از کمر بند چین خورده زاگرس با استفاده از مدل سازی تجربی و اطلاعات لرزه نگاری: مجله پژوهش های علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی
 معینی، م.، توکلی، س.، محمدی، پ.، ۱۳۸۷، زمین شناسی ساختمانی تاقدیس نورا: گزارش زمین شناسی ۲۱۸۰ مدیریت اکتشاف نفت

- Abdollahie Fard I., Sepehr M. & Sherkati S., 2011, Neogene salt in SW Iran and its interaction with Zagros folding, *Geol. Mag.* 148 (5–6), 2011, pp. 854–867. Cambridge University Press, doi:10.1017/S0016756811000343
- Abdollahie Fard I., Sherkati S., McClay K. & Haq B.U., 2019, Tectono-Sedimentary Evolution of the Iranian Zagros in a Global Context and Its Impact on Petroleum Habitats, in Farzipour Saein A. (ed.), *Tectonic and Structural Framework of the Zagros Fold-Thrust Belt, Developments in Structural Geology and Tectonics* 3, 17-28, doi.org/10.1016/B978-0-12-815048-1.00002-0
- Ahmadzadeh-Heravi, M., 1990. New concepts of Hormoz formation stratigraphy and problem of salt diapirism in soth Iran. In *Proceeding of symposium on Diapirim with special refrence to Iran*, vol 1. Al-Husseini, M.I., 2000. Origin of the Arabian plate structures; Amar collision and Nadj rift. *Geo Arabia* 5, 527e542
- Bahroudi, A., Koyi, H.A., 2003. Effect of spatial distribution of Hormuz salt on deformation style in the Zagros fold and thrust belt: an analogue modelling approach. *J. Geol. Soc. London* 160 (5), 719–733. <http://dx.doi.org/10.1144/0016-764902-135>.
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Can. J. Earth Sci.* 18 (2), 210–265. <http://dx.doi.org/10.1139/e81-019>
- Callot, J.P., Jahani, S., Letouzey, J., 2007. The role of pre-existing diapirs in fold and thrust belt development. In: Lacombe, O., Lavè, J., Roure, F., Vergès, J. (Eds.), *Thrust Belts and Foreland Basins*. Springer, Berlin, pp. 309–325.
- Colman-Sadd, S.P., 1978. Fold development in Zagros simply folded belt, Southwest Iran. *AAPG Bullet.* 62 (2), 984–1003.
- Davoudzadeh, M., 1990. Some dynamic aspects of the salt diapirism in the Southern Iran. In: *Symposium on diapirism*, pp. 97-109.
- Edgell, H.S., 1996. Salt tectonism in the Persian Gulf basin. In: Alsop, G.L., Blundell, D.L., Davison, I. (Eds.), *Salt tectonics*. Geological Society, London, Special Publications 100, pp. 129–151. 10.1144/GSL.SP.1996.100.01.10.
- Falcon, N.L., 1969. Problems of the relationship between surface structure and deep displacements illustrated by the Zagros Range. In: Kent, P.E., Satterhwaite, G.E., Spencer, A.M. (Eds.), *Time and Place in Orogeny*. Geological Society, London, Special Publications 3, pp. 9–21. 10.1144/GSL.SP.1969.003.01.02.
- Harrison, J.V., 1931. Salt domes in persia. *J. Inst. Pet. Tech.* 17 (91), 300e320.
- Jackson, M. P. A., Hudec, M. R., 2017. Structure and evolution of Upheaval Dome: Pinched-off salt diapir or meteoritic impact structure?: Austin, TX, The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Report of Investigations 262, 93 p.
- Jackson, M.P.A., Talbot, C.J., 1994. Advances in salt tectonics. In: Hancock, P.L. (Ed.), *Continental deformation*. Pergamon Press, pp. 159–179.
- Jahani, S., Callot, J.-P., Frizon de Lamotte, D., Letouzey, J., Leturmy, P., 2007. The salt diapirs of the eastern Fars province (Zagros, Iran): A brief outline of their past and present. In: Lacombe, O., Lavè, J., Roure, F., Vergès, J. (Eds.), *Thrust Belts and Foreland Basins*. Springer, Berlin, pp. 289–308.
- Jahani, S., Callot, J.-P., Letouzey, J., Frizon de Lamotte, D., 2009. The eastern termination of the Zagros Fold-and-Thrust Belt, Iran: Structures, evolution, and relationships between salt plugs, folding, and faulting. *TC6004. Tectonics* 28 (6). <http://dx.doi.org/10.1029/2008TC002418>.
- Jahani, S., Hassanpour, J., Mohammadi-Firouz, S., Letouzey, J., Frizon de Lamotte, D., Alavi, S.A., Soleimany, B., 2017. Salt tectonics and tear faulting in the central part of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran. *Mar. Petrol. Geol.* 86, 426–446. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.06.003>.
- Lacombe O. and Bellahsen N., 2016, Thick-skinned tectonics and basement-involved fold–thrust belts: insights from selected Cenozoic orogens, *Geol. Mag.*, pp. 1-48, Cambridge University Press, doi:10.1017/S0016756816000078
- Letouzey, J., Sherkati, S., 2004. Salt movement, tectonic events, and structural style in the central Zagros fold and thrust belt (Iran). In: Paper presented at 24th Annual GCSSEPM Foundation Bob F. Perkins Research Conference: Salt-Sediment Interactions and Hydrocarbon Prospectivity: Concepts, Applications, and Case Studies for the 21st Century, Gulf Coast Section. Houston, Texas, SEPM.
- Motamedi, H., Gharabeigli, G.R., 2018. Structural Style in the Fars Geological Province: Interaction of Diapirism and Multidetachment Folding In: *Tectonic and structural framework of the Zagros fold thrust belt*, pp. 145–158.

Motiei, H., 1995. Petroleum geology of Zagros. Geological Survey of Iran Publication 1e2 (In Farsi), 1e589

Nissen, E., Tatar, M., Jackson, J. A. & Allen, M. B. 2011. New views on earthquake faulting in the Zagros fold-and-thrust belt of Iran. *Geophysical Journal International* 186, 928–44.

Perotti, C. R., Carruba, S., Rinaldi, M., Bertozzi, G., Feltre, L., & Rahimi, M., 2011, The Qatar-South Fars arch development (Arabian Platform, Persian Gulf): insights from seismic interpretation and analogue modelling. *New Frontiers in Tectonic Research-At the Midst of Plate Convergence*, 325-352.

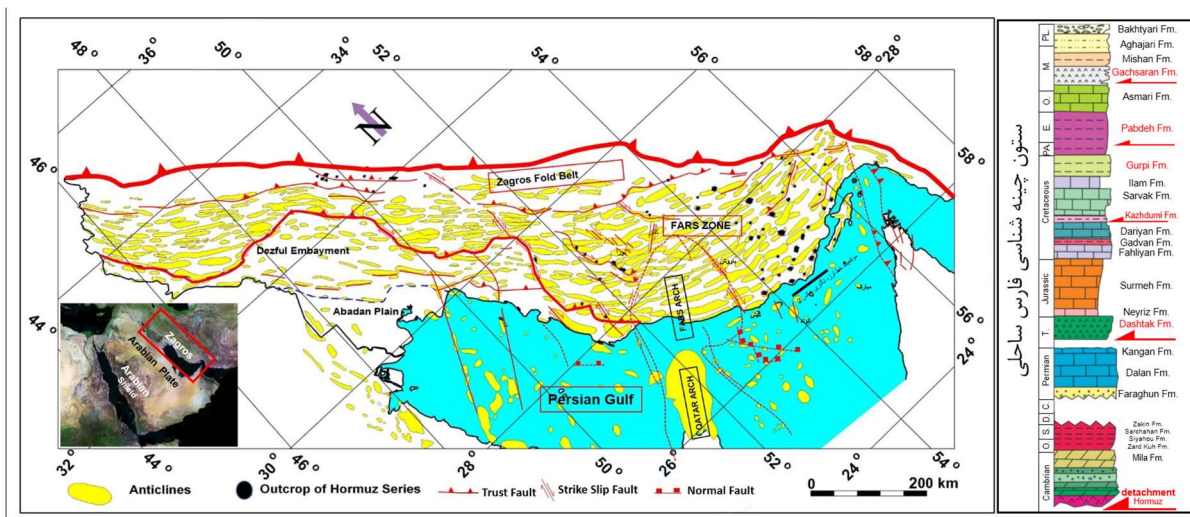
Player, R.A., 1969. Salt diapirs study. National Iranian Oil Company, Exploration Division, Tehran, Report No. 1146, unpublished.

Rowan, M.G., 2014. Passive-margin salt basins: hyperextension, evaporite deposition, and salt tectonics. *Bas. Res.* 26 (1), 154e182. <http://dx.doi.org/10.1111/bre.12043>.

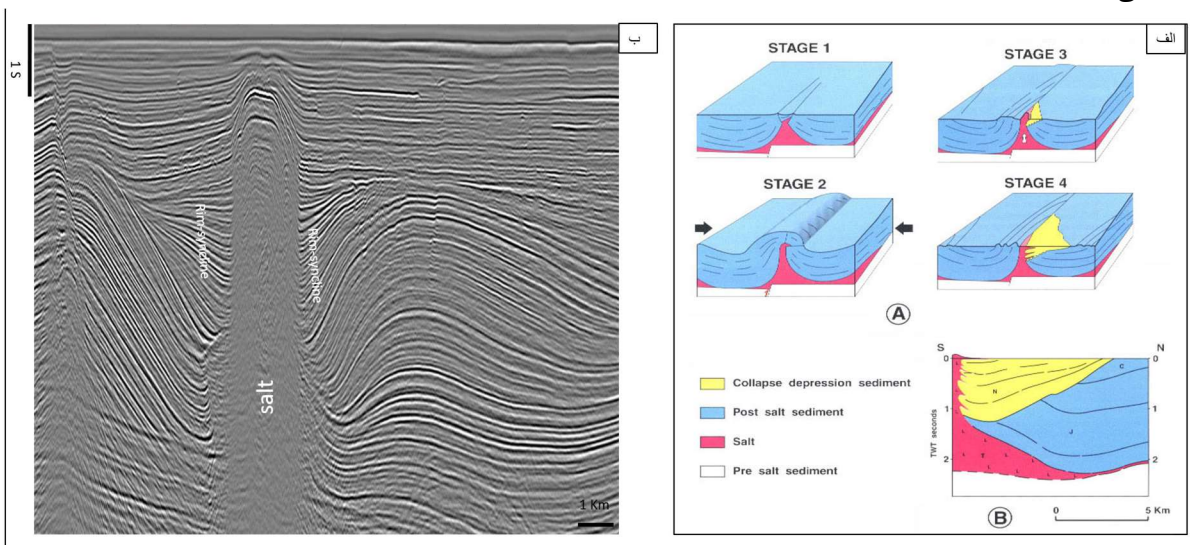
Shams, R., Abdollahie Fard I, Bouzari, S., Pourkermani, M., 2020. Investigating Role of the Hormuz Salt Bodies in Initiation and Evolution of the Strike Slip Faults in the Fars Zone of the Zagros Fold and Thrust Belt: Insights from Seismic Data and Sandbox Modeling. *Pure Appl. Geophys.* 177 (2020), 4623–4642 2020 Springer Nature Switzerland AG <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02521-0>

Talbot, C.J., Alavi, M., 1996. The past of a future syntaxis across the Zagros. In: Alsop, G. L., Blundell, D.L., Davison, I. (Eds.), *Salt tectonics*. Geological Society, London, Special Publications 100, pp. 89–109.

Verrall, P., 1978. The geology of the Bandar Abbas Hinterland, South Fars. GR 1286

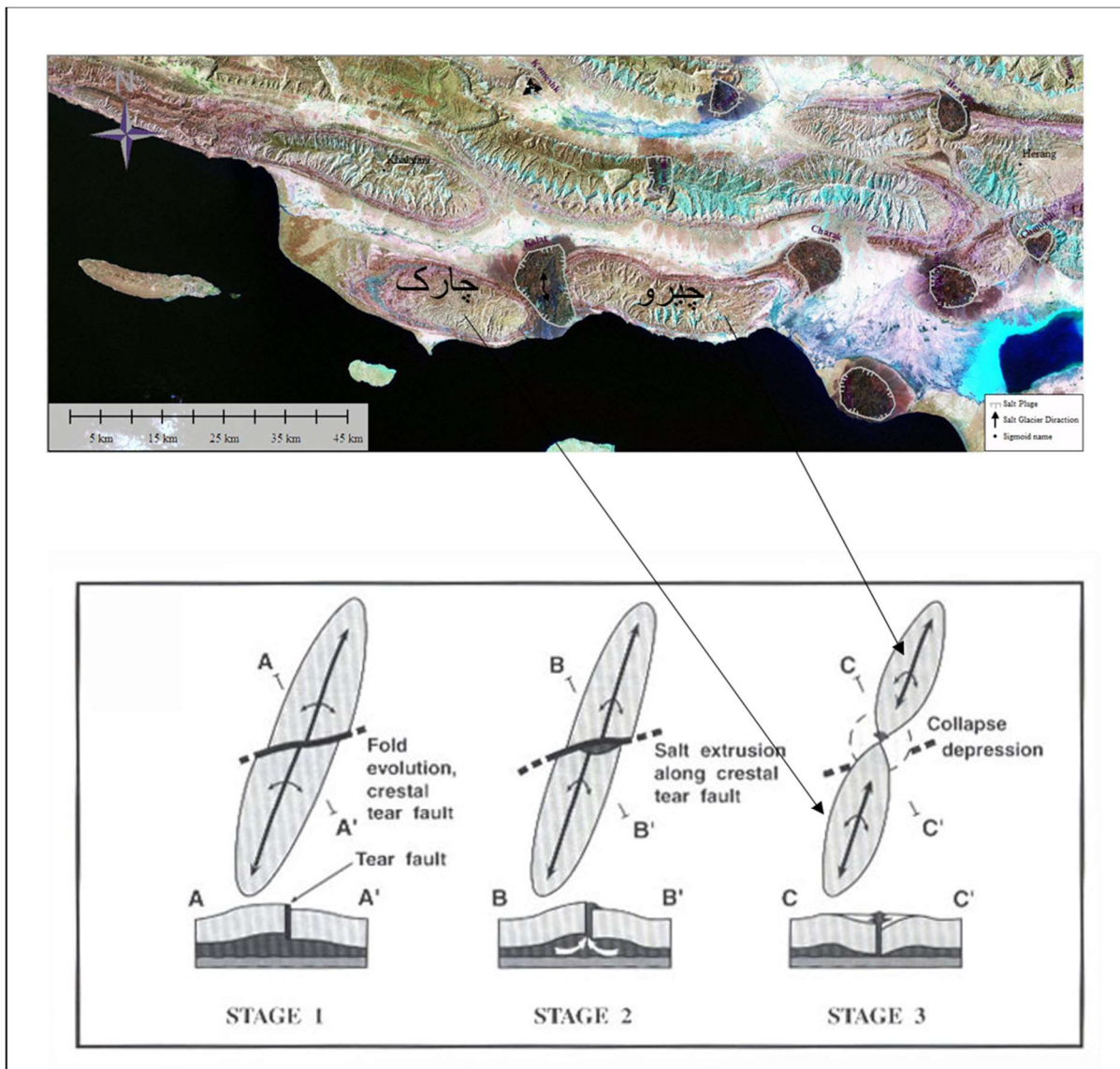


شکل ۱: کمر بند چین خورده و گسلش زاگرس و موقعیت گنبد های نمکی هرمز در ناحیه فارس و ستون چینه شناسی فارس ساحلی.

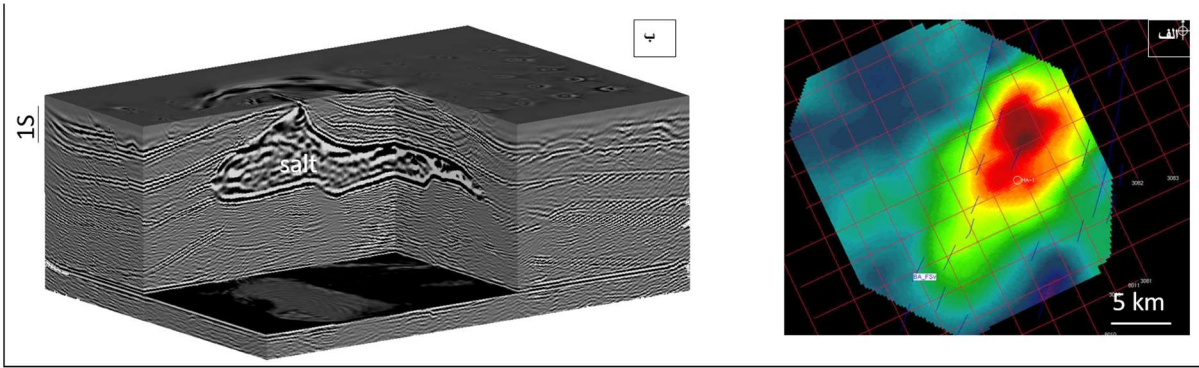


شکل ۲: الف) نفوذ نمک در طی مراحل مختلف چین خوردگی در کوه های اطلس، الجزیره (اقتباس از et al., 1994

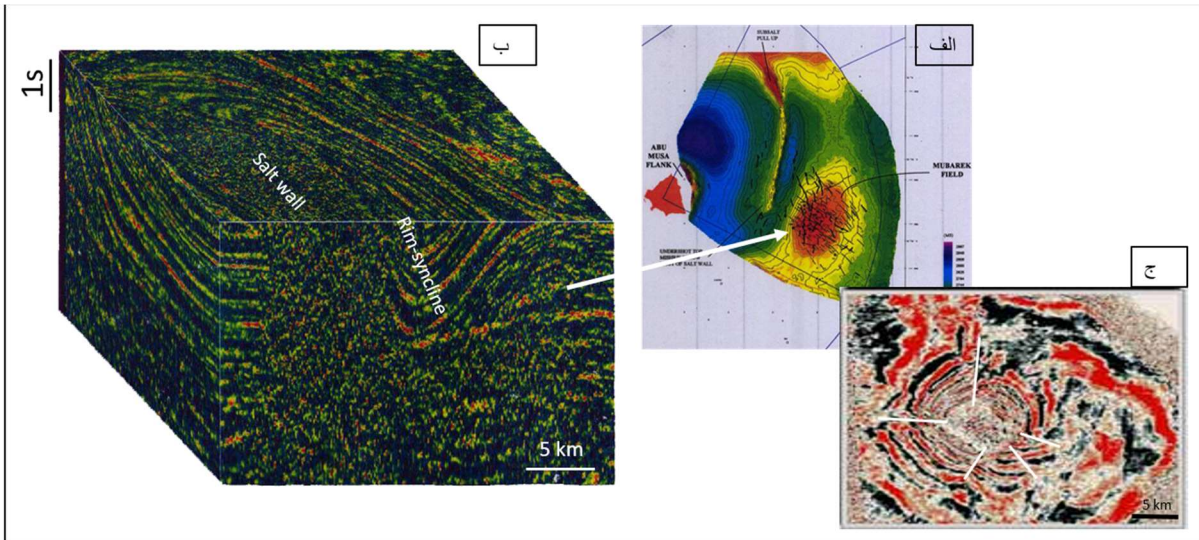
(Vially, ب) مقطع لرزه نگاری خلیج فارس که نشان دهنده ایجاد حوضه‌های حاشیه ای در اطراف گنبد‌های نمکی است. در این مثال پیکره نمکی مربوط به نمک معادل سازند آسماری به سن الیگوسن-میوسن است.



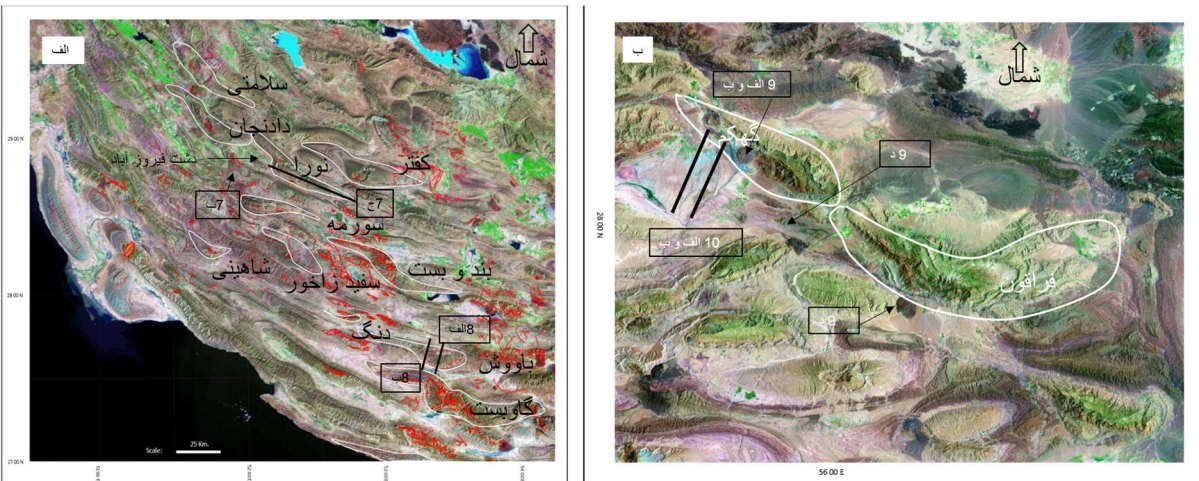
شکل ۳: حضور نمک در بخش میانی تاقدیس و تشکیل دو تاقدیس چيرو چارک بعلت انحلال نمک و ریزش در موقعیت ساختار نمکی (اقتباس از Letouzey et al., 1995).



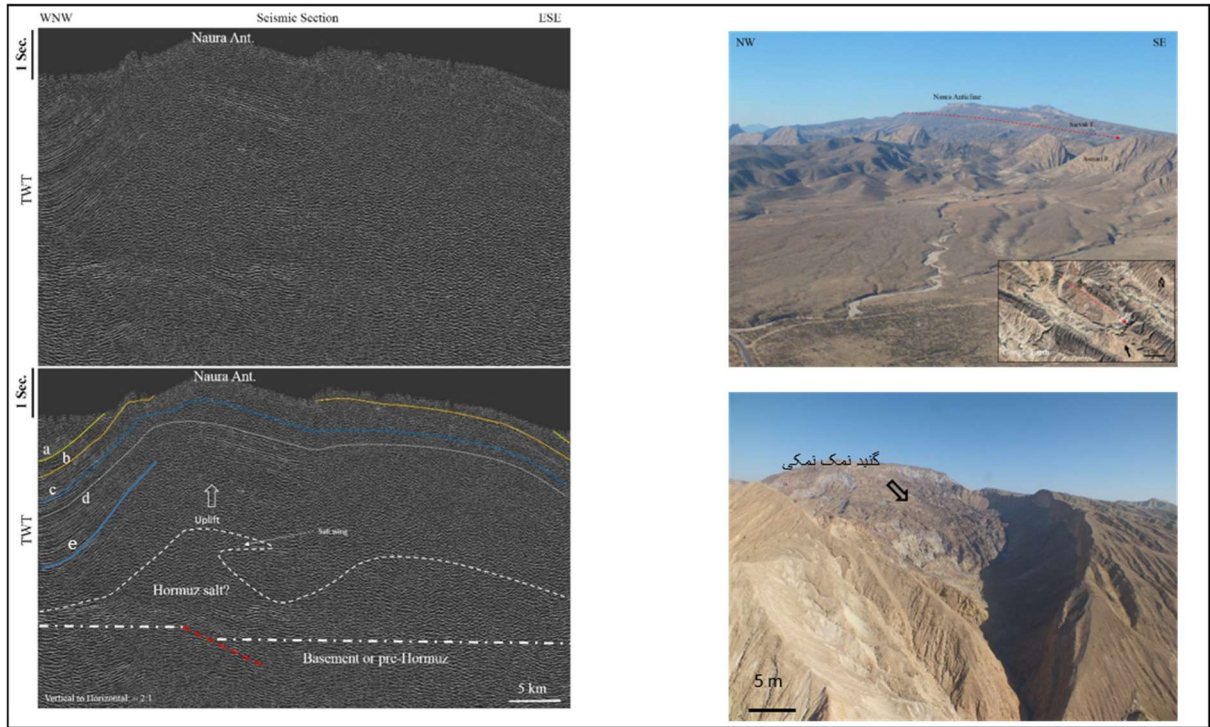
شکل ۴: الف) نقشه عمقی سازند داریان در ساختمان نمکی HA، ب) نمونه‌ای از پیکره نمکی در یک مکعب لرزه‌نگاری سه‌بعدی (تفسیر از دکتر عبدالهی فرد)



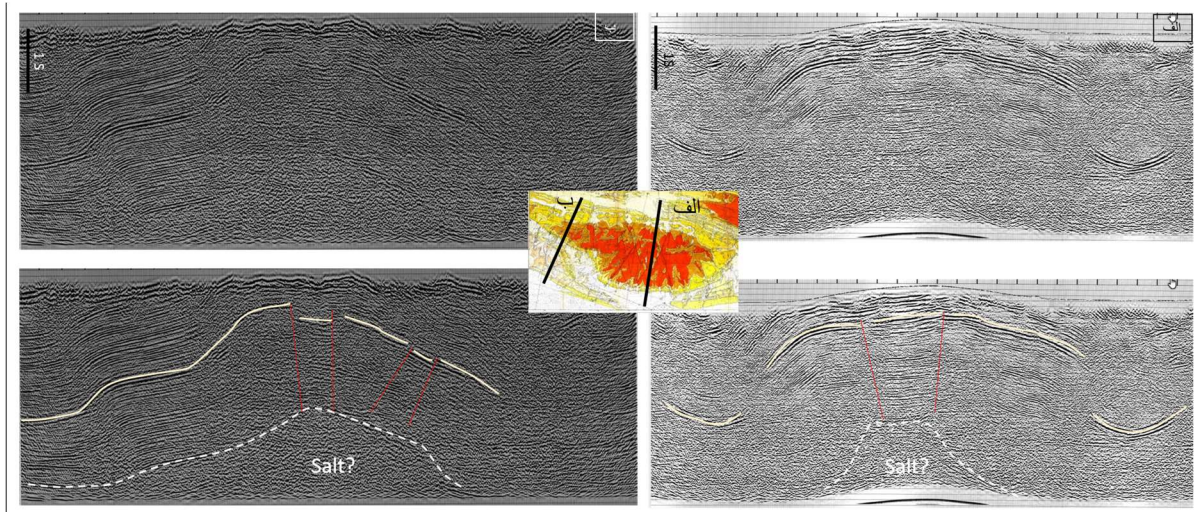
شکل ۵: الف) نقشه عمقی تاقدیس پشت لاک پشتی مبارک، ب) مکعب لرزه‌نگاری سه‌بعدی ساختمان مبارک در خلیج فارس، ج) گسل‌های شعاعی در مقطع زمانی (Time slice) اطلاعات سه بعدی خلیج فارس (موقعیت تاقدیس در عکس ۱ نشان داده شده است، تفسیر از دکتر عبدالهی فرد).



شکل ۶: موقعیت تاقدیس‌هایی که از نظر شکل ظاهری بصورت سیگوئیدال هستند.



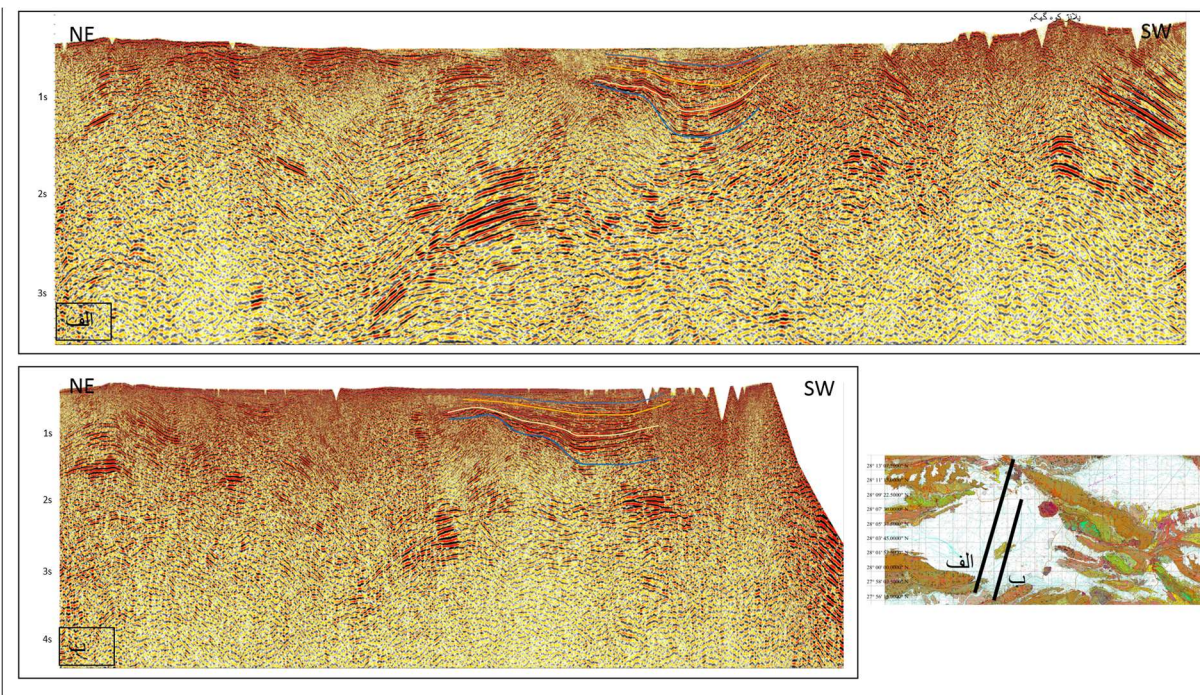
شکل ۷: الف) عکس از بخش جنوبی تاقدیس که نشاندهنده گنبدی بودن آن را دارد، ب) وجود نمک هرمز در سطح زمین در گنبد نمک نمکی در مجاورت تاقدیس نورا. ج) چینه رشدی که نشاندهنده همزمانی بالآمدن نمک با رسوبگذاری است در بخش حجیم تاقدیس نورا، سازندهای تفسیر شده به ترتیب از جوانتر به قدیمی تر شامل: a: آسماری، b: سروک، c: دشتک، d: کنگان، e: پالئوزئیک میانی (موقعیت خط لرزه نگاری و تصاویر الف و ب در شکل ۶ نشان داده شده است).



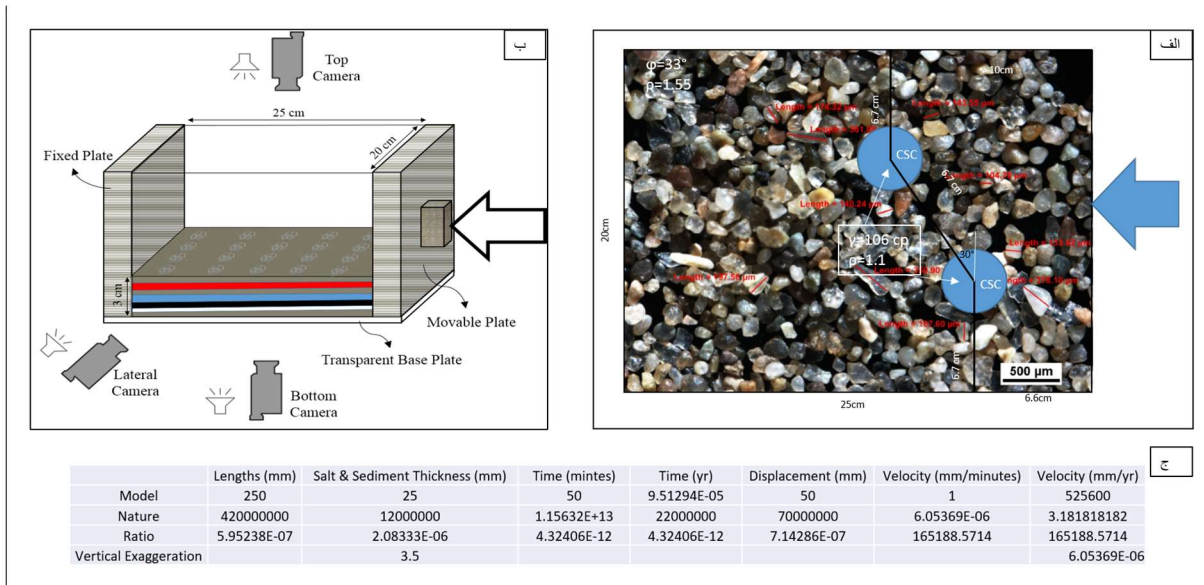
شکل ۸: الف) نمایش مقطع لرزه ای از بخش میانی تاقدیس باووش، ب) نمایش مقطع لرزه ای از بخش شرقی تاقدیس باووش، با مقایسه این دو تصویر به تغییرات ساختاری از بخش حجیم به بخش دماغه و افتادگی‌های ثقلی در قله تاقدیس به دلیل وجود نمک در هسته پی برد (موقعیت تاقدیس و خطوط لرزه نگاری در عکس ۶ نشان داده شده است).



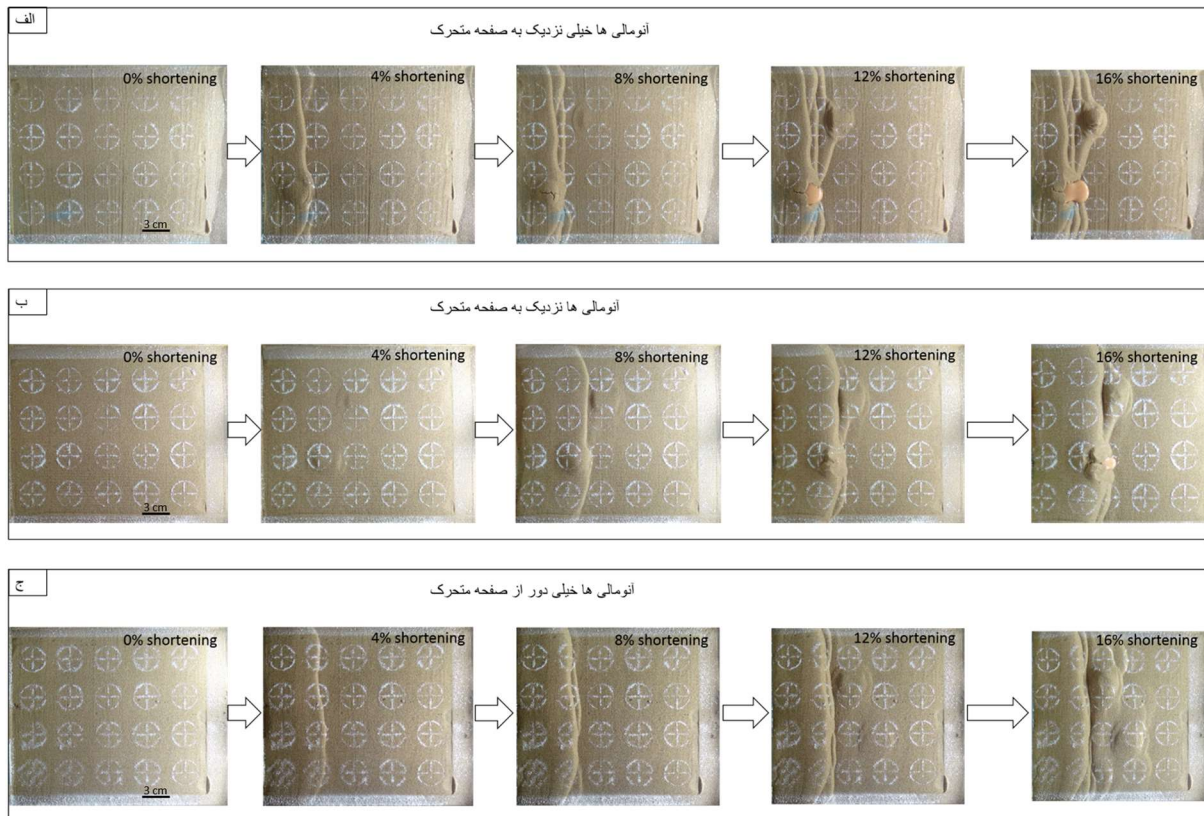
شکل ۹: الف و ب) عکس از بخش میانی نمک سرچاهان که نشاندهنده وجود آبرفت های عهد حاضر در زیر نمک می باشد، ج) وجود نمک‌هرمز در سطح زمین و بر روی کنگلومرای بختیاری در گنبد نمکی در مجاورت تاقدیس فینو. د) کنگلومرای بختیاری بشدت چین خورده که نشاندهنده فازهای آخر تکتونیک در منطقه می باشد. (موقعیت تصاویر در شکل ۶ نشان داده شده است).



شکل ۱۰: الف و ب) نمایش مقطع لرزه ای دشت جنوبی سرچاهان، وجود چینه های رشدی را که موید فعالیت نمک هرمز در زمان رسوبگذاری می باشد را نشان می دهد (موقعیت تاقدیس و خطوط لرزه نگاری در عکس ۶ هم نشان داده شده است).

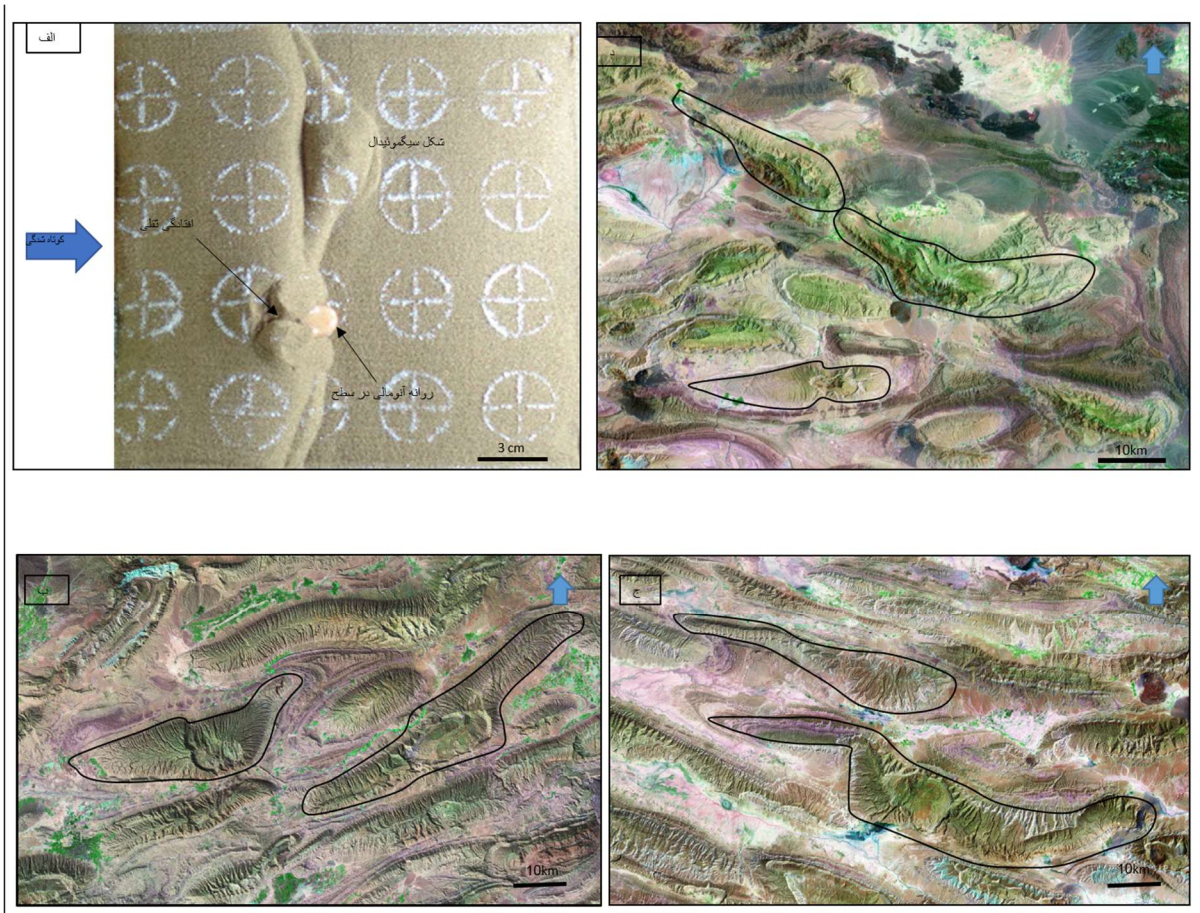


شکل ۱۱: الف) طراحی مدل فیزیکی و نحوه قرار گیری آنومالی‌ها در بین ستون ماسه، ب) نمایش شماتیک از دستگاه جعبه‌ماسه، ج) تناسب بندی بین طول و عرض کمر بند چین‌خورده زاگرس و اندازه‌های دستگاه آزمایش که بزرگنمایی حدود ۳.۵ برابر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: نمایش کوتاه‌شدگی در حالت‌های مختلف از نظر قرار گیری آنومالی‌ها در فواصل مختلف از دیواره متحرک، در هر سه حالت آنومالی بالایی در مکان ثابت بوده و برابر ۱۰ سانتی متری از صفحه متحرک قرار گرفته است و آنومالی پایینی در فواصل مختلف جایگذاری شده است، الف) آنومالی پایینی در فاصل ۲.۵ سانتی متری از صفحه متحرک قرار دارد، ب) آنومالی پایینی در فاصله ۵ سانتی متری از صفحه متحرک قرار دارد، ج) آنومالی پایینی در فاصله ۱۵ سانتی

متری از صفحه متحرک قرار دارد.



شکل ۱۳: الف) شکل سیگموئیدال در یکی از آزمایشات ماسه ای با دو آنومالی، ب و ج) نمایش تصویر ماهواره ای از شکل سیگموئیدال تاقدیس کفتر، نورا و باووش ج) نمایش تصویر ماهواره ای از شکل سیگموئیدال تاقدیس گهکم و فراقون و همچنین خروج نمک در تاقدیس هندان و تشابه سازی آن با مدل آزمایشگاهی

A Hybrid CNN-LSTM Deep Learning Framework for Porosity Prediction in Carbonate Reservoirs

Amirreza Mehrabi¹, Majid Bagheri², Majid Nabi Bidhendi², Ebrahim Biniiaz Delijani¹,
Mohammad Behnoud¹

¹*Department of Petroleum Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

²*Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.*

ABSTRACT

Porosity estimation in carbonate reservoirs is crucial for hydrocarbon exploration and production. Traditional methods for porosity estimation, such as empirical correlations and geostatistical techniques, often rely on limited geological knowledge and may not capture the complex relationships between porosity and various geological features. This research aims to develop a novel hybrid Convolutional Neural Network (CNN)-Long Short-Term Memory (LSTM) deep learning framework for porosity prediction in carbonate reservoirs. The proposed framework aims to leverage the strengths of both CNNs and LSTMs to capture both spatial and temporal patterns in well log data, thereby improving the accuracy and reliability of porosity estimation. The combination of CNNs and LSTMs in a deep learning architecture allows for the efficient extraction of both local spatial features and long-term temporal dependencies in well log data. The model prediction performance improved from 0.67 (for MLP) to 0.98 for LSTM, indicating the accuracy of the model. The results suggest that the CNN-LSTM model can accurately estimate porosity in heterogeneous carbonate reservoirs, and its ability to capture spatial and temporal dependencies makes it well-suited for modeling complex geological systems.

Keywords: Carbonate, porosity estimation, deep learning, CNN, LSTM, well data

INTRODUCTION

The reservoir characterization in carbonate reservoirs is challenging due to their complex pore structures and inherent heterogeneities. Porosity is determined by core analysis, well logs, and seismic data[1, 2]. Core analysis is considered the most reliable method for determining porosity because it directly measures pore space. However, core analysis is expensive and time-consuming. Well logs indirectly measure porosity by analyzing rock's electrical, acoustic, or nuclear properties. The most common well logs for porosity estimation are neutron, density, and sonic logs[3, 4].

Numerous studies have utilized machine learning algorithms, such as support vector machines, random forests, and artificial neural networks, to predict porosity in carbonate reservoirs[5]. These methods have demonstrated promising results by incorporating well-log data, seismic attributes, and geologic information[6]. Although machine learning has been used in reservoir characterization, the complexity of the data in carbonate reservoirs requires more advanced techniques to extract meaningful insight. Therefore, recent studies have focused on hybrid machine learning and deep learning to improve the prediction accuracy of machine learning[3, 7].

This work presents the hybrid deep learning model for porosity estimation in heterogeneous carbonate reservoirs. This hybrid architecture harnesses the strengths of both CNN and LSTM networks, enabling the capture of spatial and temporal dependencies in the input well data. The proposed method lies in its ability to learn a representation of the complex data pattern and structure that is specific to the heterogeneous carbonate reservoirs. The porosity estimation problem is formulated as a regression problem, where the input is a well log, and the output is a core analysis porosity. The input well log can be preprocessed using CNN layers to extract relevant features, followed by LSTM layers to model the spatial dependencies within the dataset. The final output can then be generated using a fully connected layer. The input to the CNN-LSTM model is a sequence of log measurements, and the output is the predicted porosity value. The

input data includes Gamma ray (GR), travel-time (DT), NPHI, ROHB, LLB logs, and core analysis data from a carbonate reservoir. The CNN-LSTM model was implemented using the TensorFlow platform in Python language programming. The model's hyperparameters such as the number of hidden layers and epochs, learning rate, and batch size were optimized using the Keras Tuner library's optimization framework.

Methodology

The study utilizes a comprehensive dataset comprising well log data and core data from carbonate reservoirs. The hybrid CNN-LSTM model developed for porosity estimation in carbonate reservoirs consists of two main components: a CNN for feature extraction and an LSTM for capturing temporal dependencies. The porosity estimation with hybrid CNN-LSTM Deep Learning Framework can be summarized as follows

- Data Preprocessing: collect and normalize the data.
- Feature Engineering: Extract relevant features from the well-log data.
- Data Splitting: Split the dataset into training, validation, and test sets.
- Training Initialization: Initialize batch size and the number of epochs.
- Training and Validation: Train the hybrid CNN-LSTM model on the training set.
- Model Evaluation: Calculate porosity estimates using the trained model.
- Result Analysis: Analyze the model's predictions compared to actual porosity values

The CNN is designed to learn and extract relevant features from the input well log data, capturing spatial relationships and patterns indicative of porosity variations within the reservoir.

The outputs of the CNN are then fed into the LSTM, which is responsible for capturing the temporal dependencies and generating the final porosity estimations. The LSTM network is designed to effectively model long-term dependencies and sequential patterns within the input data, enabling the model to learn and predict porosity values based on the complex interactions among the petrophysical properties derived from the well logs.

The CNN-LSTM architecture (as shown in Figure 1) was specifically formulated for the regression prediction problem, where the goal is to estimate continuous porosity values based on the input well data.

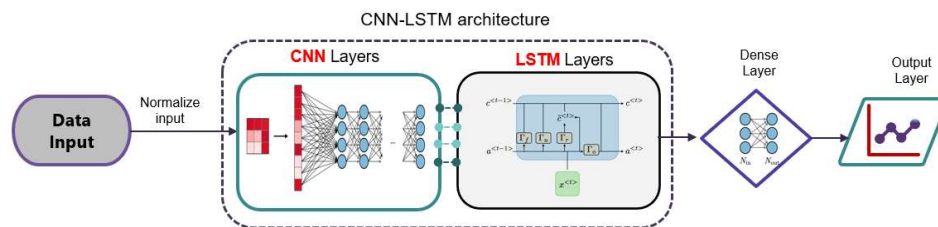


Figure 1- CNN-LSTM model architecture

The architecture consists of a 1D convolutional layer followed by a max pooling layer, an LSTM layer, a dropout layer to prevent overfitting, a time-distributed dense layer with a sigmoid activation function, and a flatten layer followed by a dense layer with a linear activation function. We compile the model using the Adam optimizer and mean squared error as the loss function, and train it on the training set for a specified number of epochs. Also, we use Multi-Layer Perceptron (MLP) neural network as a conventional machine learning model to compare the results of the proposed hybrid deep learning model. MLP is an artificial neural network consisting of multiple layers of interconnected nodes, each representing a mathematical function.

Prior to model training, extensive preprocessing is performed to clean and normalize the well log and core data. This includes handling missing values, scaling features, and ensuring data consistency to facilitate effective learning by the CNN-LSTM model. The well-log data includes

Gamma-ray (GR), compressional sonic travel-time (DT), bulk density (RHOB), neutron porosity (NPHI), and deep resistivity (LLD), as shown in Figure 2.

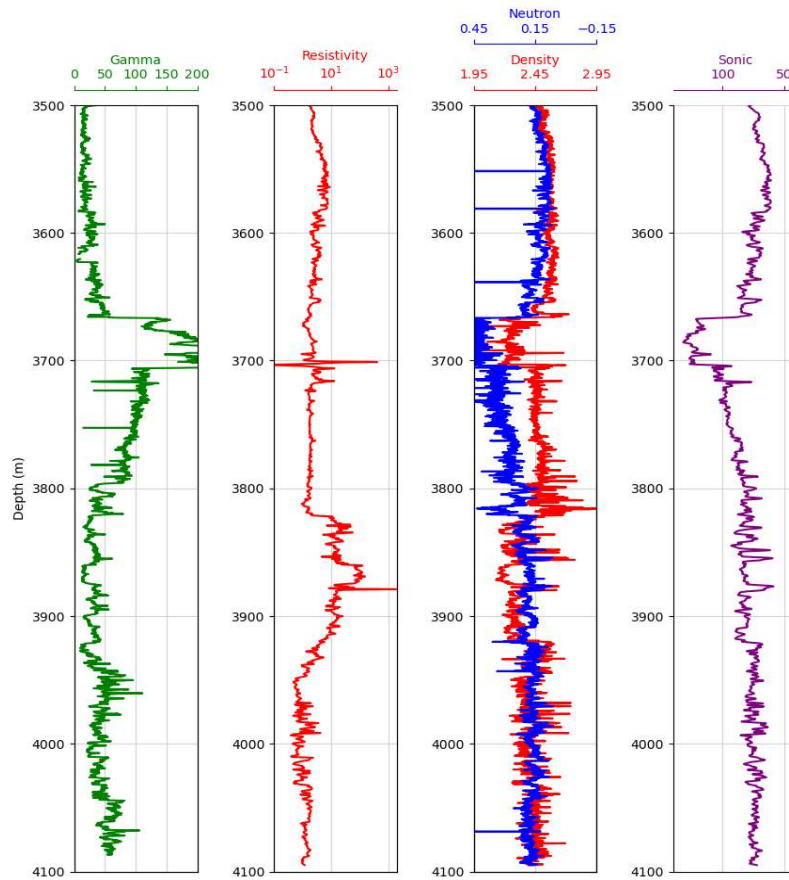


Figure 2-Well log data

The hybrid CNN-LSTM model was trained and evaluated using well dataset, including well logs and core data.

Results and Discussion

We first used the MPL neural network to train a dataset of well-log data and corresponding porosity values to learn the relationship between these variables. The input layer of the network receives the well log data as inputs, which include measurements of gamma-ray, sonic, neutron, resistivity, and density logs data. The output layer of the network produces a predicted porosity value. During the training of this model, the weights of the connections between nodes are adjusted to minimize the difference between the predicted porosity values and the actual porosity values in the training dataset. Once trained, the MPL neural network was used to predict the porosity of new well-log data that it has not seen before. The performance of the MLP model is shown in Figure 3.

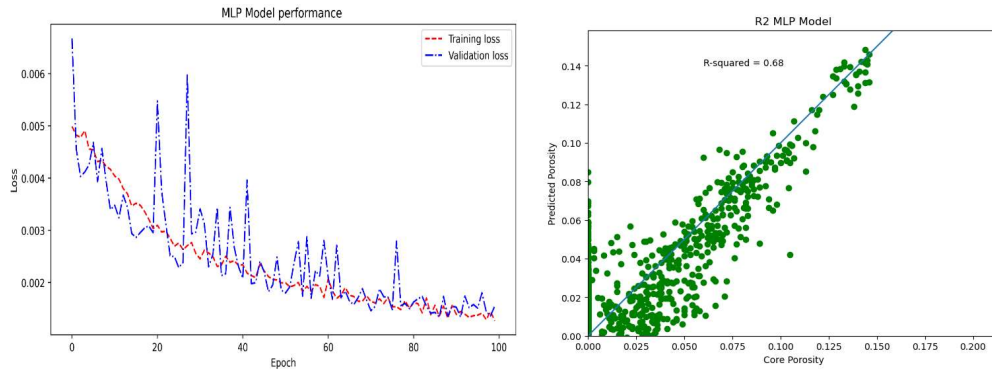


Figure 3- MLP model performance

The results of MLP model are poor as can be seen from the correlation coefficient between the model and core data. The performance evaluation of this model shows MSE is 0.0039 and the correction coefficient is 0.67.

We evaluate the model's performance on the testing set using mean squared error as the evaluation metric. Figure 4 shows the performance of the CNN-LSTM model for the training and validation dataset.

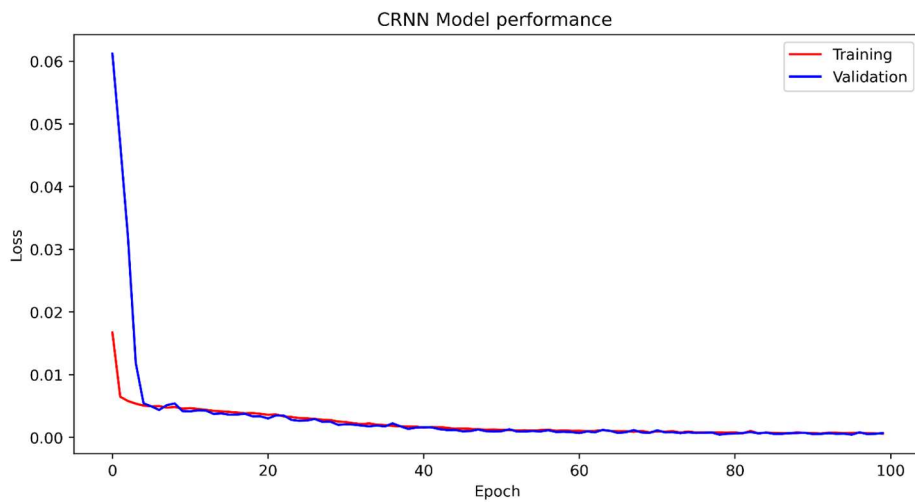


Figure 4- CNN-LSTM model performance

As can be seen, A good fit is identified by a training and validation loss that decreases to a point of stability with a minimal gap between the two final loss values. The coefficient of determination (R-squared) to measure how well the model can predict the output values for CRNN is shown in Figure 5.

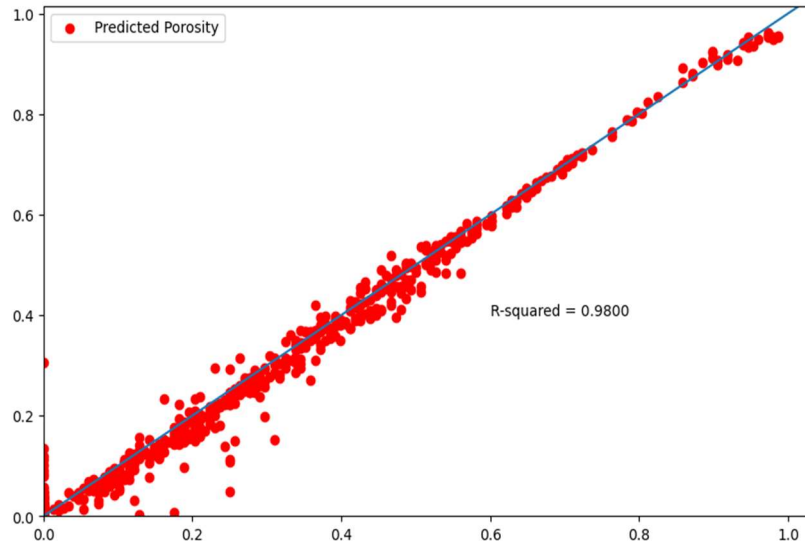


Figure 5- CNN-LSTM model prediction evaluation

The correlation coefficient between the CRNN model and the core data obtained was 0.98, which shows excellent performance. Table 1 presents the comparison of the performance of both tuned models.

Table 1- Performance comparison of MLP and CRNN model

| Calculated parameter | MSE | R-Square |
|----------------------|---------|----------|
| MPL model | 0.00039 | 0.67 |
| CRNN model | 0.01342 | 0.98 |

The results showed that the CRNN model had a MAS of 0.01342, while the MLP model had an average MSE of 0.00039. This indicates that the CRNN model was able to predict porosity with higher accuracy than the MLP model.

CONCLUSION(S)

A hybrid CNN-LSTM model is proposed in this work to predict porosity on real data from a carbonate oil field in Iran. The model is a combination of CNN and LSTM, where well-logs are used as input, and core porosity is estimated as output. The CNN is used to extract features of high dimensional data, while LSTM can remember past inputs and model sequential data. The performance of the CNN-LSTM model was compared with the MLP model in terms of mean square error (MSE) and determination coefficient (R2) values. The hybrid model proved to be highly effective in predicting porosity accurately in multidimensional spaces, achieving approximately 98% porosity estimation in this study. The model could also handle complex predictions of reservoir porosity by extracting relevant features and using gate control, such as a forgetting gate. The correlation coefficient between the model prediction and core data improved from 0.67 to 0.98, indicating the accuracy of the model. Compared to traditional MLP algorithms, the CNN-LSTM model performed better, achieving higher accuracy rates with fewer model parameters. The ability of the CNN-LSTM model to effectively capture and analyze spatial and temporal patterns in well-log data makes it an ideal choice for porosity prediction tasks.

REFERENCE

1. Bagrintseva, K.I., *Carbonate Reservoir Rocks*. 2015: Scrivener Publishing LLC.
2. Bust, V.K., J.U. Oletu, and P.F. Worthington, *The Challenges for Carbonate Petrophysics in Petroleum Resource Estimation*. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2011. **14**(01): p. 25-34.
3. Wang, J. and J. Cao, *Deep Learning Reservoir Porosity Prediction Using Integrated Neural Network*. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022. **47**(9): p. 11313-11327.
4. Tiab, D. and E.C. Donaldson, *Chapter 3 - Porosity and Permeability*, in *Petrophysics (Fourth Edition)*, D. Tiab and E.C. Donaldson, Editors. 2016, Gulf Professional Publishing: Boston. p. 67-186.
5. Moosavi, N., et al., *Fuzzy support vector regression for permeability estimation of petroleum reservoir using well logs*. Acta Geophysica, 2022. **70**(1): p. 161-172.
6. Moosavi, N., et al., *Porosity prediction using Fuzzy SVR and FCM SVR from well logs of an oil field in south of Iran*. Acta Geophysica, 2022.
7. Xu, C., et al., *Machine learning in petrophysics: Advantages and limitations*. Artificial Intelligence in Geosciences, 2022. **3**: p. 157-161.

Automated Seismic Velocity Picking via Deep Semantic Segmentation

Saadat Mahdi, Fakhari Mohammad Ghasem, Hosseini Shoar Behnam, Salehi Ehsan¹

¹ Dana Energy Company, Geophysical Services, Tehran, Iran, Fakhari.Mohammad@danaenergy.com

ABSTRACT

We developed a deep neural network model to automatically implement velocity analysis from semblance images, eliminating the need for extensive manual picking. Our method treats velocity picking as an image segmentation task on input semblance images. We train a U-Net convolutional neural network architecture using over 2000 common depth point (CDP) gathers and corresponding picked velocity profiles to segment the semblance images into distinct velocity regions. We optimize the model using techniques like sequence learning and customized loss functions. When evaluated on test CDP gathers excluded from training, the model achieved 99.3% accuracy in delineating the major velocity boundaries. This demonstrates the capability for high-quality automated velocity picking directly from seismic images using deep learning.

Keywords: Velocity analysis, Deep Learning, U-Net, Encoder-Decoder

INTRODUCTION

Velocity analysis is critical for accurate seismic imaging and subsurface characterization. However, conventional workflows rely heavily on tedious, subjective manual picking of velocity surfaces on semblance gathers (Yilmaz, 2001). Automating velocity analysis could greatly increase productivity. Recent advances in deep learning have driven adoption in many seismic applications, including processing and interpretation tasks (Yu and Ma, 2021). However, few published studies explore harnessing deep learning specifically for automating core seismic processing tasks like velocity analysis (Yang and Ma 2019).

In this work, we demonstrate automated velocity prediction by formulating this challenge as an image segmentation problem on input semblance images. We customize a U-Net convolutional neural network (CNN) architecture to delineate major velocity boundaries in the semblance.

The encoder-decoder structure enables contextual feature extraction while the lateral connections combine multi-scale information for precise velocity localization (Jégou et al., 2017). We optimized the network training using custom loss functions with added regularization and velocity matching to improve convergence and accuracy.

When evaluated on unseen land surveys, the method achieves over 99% pixel-wise accuracy in predicting velocity labels from the input semblance images.

Methods

We formulate velocity prediction from semblance images as a pixel-wise semantic segmentation task. This model is based on the U-Net CNN architecture which follows an encoder-decoder structure (Ronneberger et al, 2015). The encoder progressively compresses the input image into lower resolution feature representations, capturing useful contextual information. The decoder then upsamples these features into a full-resolution segmentation map, enabling precise localization of velocity boundaries.

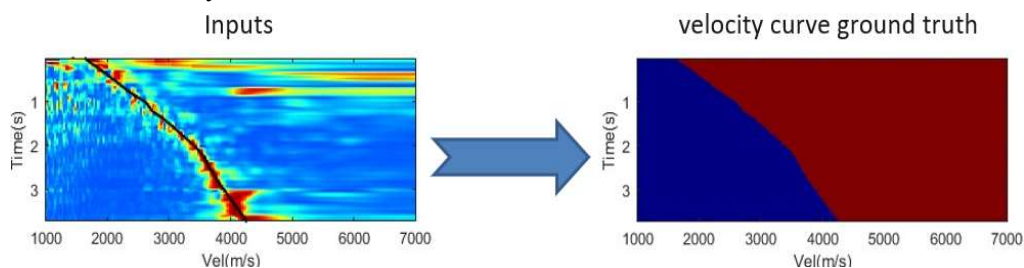


Figure 1. Formulation a semantic segmentation task. Input semblance with velocity picks (left) and output categorical velocity mask (right).

We recast velocity picking as image segmentation (Figure 1), therefore, the model predicts velocity regions directly from input semblance.

Training Strategies

Various strategies were explored to enhance model accuracy:

- **Network Architecture:** We experimented different U-Net depths, including 3 and 4-level encoders, varying filter and Kernel sizes to balance feature learning capacity and overfitting risk.
- **Input Configuration:** We tested single semblance images vs sequences of depth frames. Sequence inputs better encode velocity consistency but require more data to prevent overfitting.
- **Loss Functions:** We designed custom hybrid loss terms, combining pixel-wise cross entropy ($CE(p(x;\theta),y)$) with regularization penalties like Tikhonov smoothing ($\alpha \|L v\|_2^2$) and velocity matching ($\lambda \|v_{Pred}(x; \theta) - v_{True}(x)\|_2^2$) metrics.

Smooths velocity predictions to prevent unrealistic fluctuations:

$$L(\theta) = CE(p(x; \theta), y) + \alpha \|L v\|_2^2 \quad (1)$$

Here, α is a hyperparameter controlling the regularization strength. The regularization term penalizes first-order differences between predicted velocities, promoting smoother trends.

- **Velocity Matching Loss:** Incorporates regularization for agreement between predicted and true velocity trends:

$$L(\theta) = CE(p(x; \theta), y) + \lambda \|v_{Pred}(x; \theta) - v_{True}(x)\|_2^2 \quad (2)$$

Here, λ is a hyperparameter controlling the strength of the regularization term. The regularization term focuses on overall patterns, reducing sensitivity to local variations. Fine-tuning the coefficients (α and λ) significantly improved training stability. The final U-Net configuration is depicted in Figure 2. key hyperparameters summarized in Table 1.

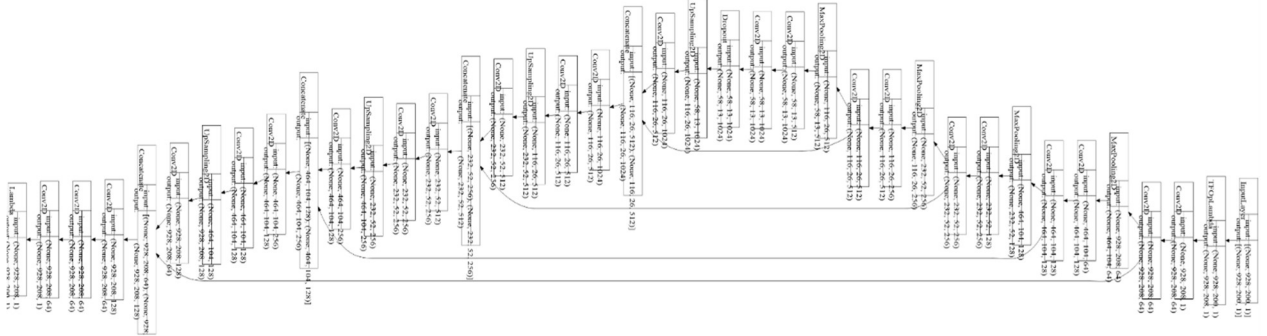


Figure 2. The final optimized U-Net architecture used for velocity prediction.

Table1. The optimized U-net model Key hyperparameters.

| Network | Depth | Variables | Mini Batch | Loss | Validation data | Validation Accuracy | Epochs |
|---------|-------|-----------|------------|--|-----------------|---------------------|--------|
| U-Net | 3 | 20.1 M | 16 | $CE(p(x; \theta), y) + \alpha \ L v\ _2^2 + \lambda \ v_{Pred}(x; \theta) - v_{True}(x)\ _2^2$ | 10% | 99.3 | 12 |

The network trained on a dataset of over 2000 CDP gathers, with 80% for training, 10% for validation, and 10% as an unseen test set. Model parameters were optimized by minimizing a hybrid cross-entropy segmentation loss along with custom regularization penalties.

Training Analysis

To analyze model performance, we visualized predictions on sample training CDPs (Figure 3(a)). Strong agreement between predicted and true velocities was observed, with velocity differences <50 m/s. We also assessed lateral consistency on full velocity sections (Figure 3(b)). The predicted trends match major patterns of true sections. Velocity differences are small, highlighting accurate predictions.

Test Analysis

To evaluate generalizability, we analyzed model predictions on unseen test CDP gathers (Figure 4). The predicted velocity profiles show strong agreement with the true manually picked velocities. This demonstrates the model can accurately estimate velocities even for new seismic lines excluded from the training data. When aggregated over multiple adjacent CDP gathers, the predicted sections match the major patterns and trends of the true velocity surfaces. Minor smoothing of some local variations is observed, but key boundaries are delineated. By effectively learning robust velocity relationships from the training data, the network translates well to unseen CDP gathers.

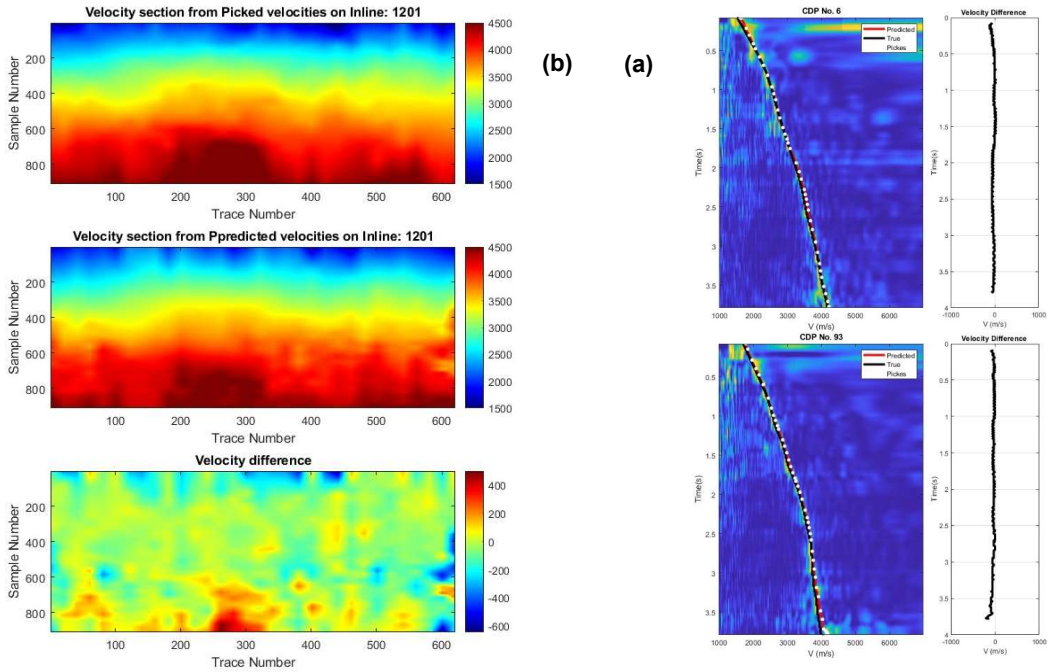


Figure 3. a) Left: Predicted velocity (red), true manually picked velocity (Black), Right: velocity difference for sample CDP gathers from the training dataset., b) Full velocity section of model prediction on training CDP gathers of line 1201. Top: True manually picked velocities. Middle: Predicted velocities. Bottom: Difference.

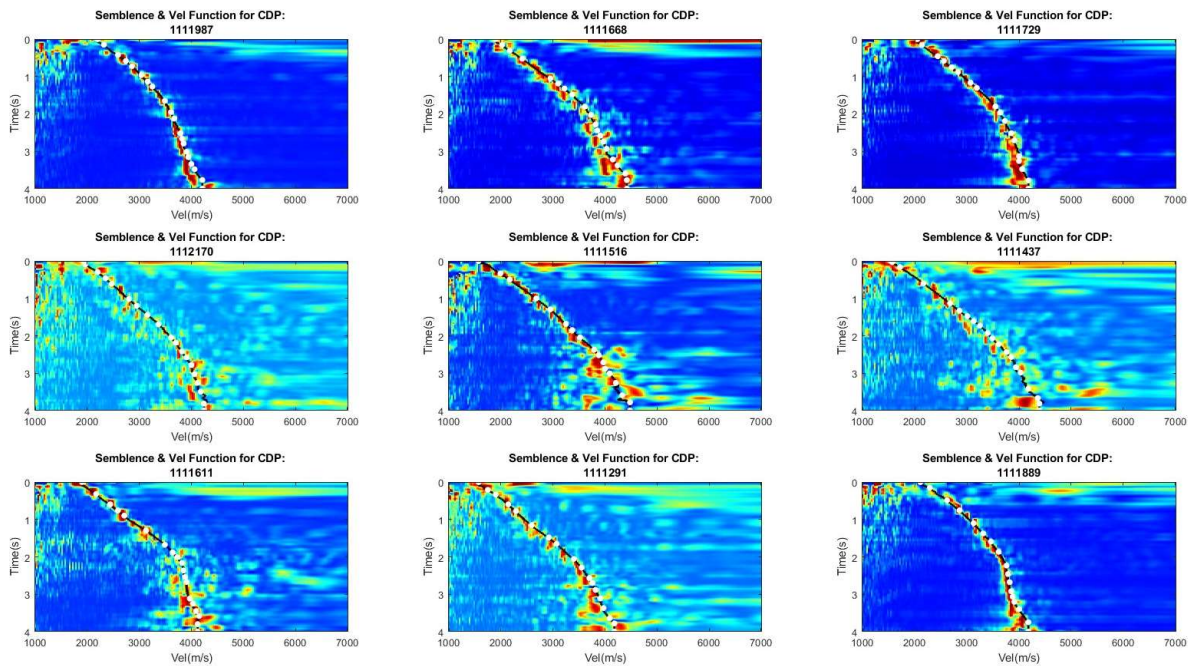


Figure 4. The predicted velocity profiles on semblance gathers for 9 representative CDP sections. This seismic line and its CDP gathers were intentionally excluded from the training dataset to assess the model's ability to generalize to unseen seismic data.

The uncertainty map in Figure 5 provides useful insights into regions where the velocity predictions may require additional QC. The uncertainty stems from areas with ambiguous seismic signatures where the model has lower confidence. Focusing manual QC efforts on these high uncertainty zones could enable efficient quality control.

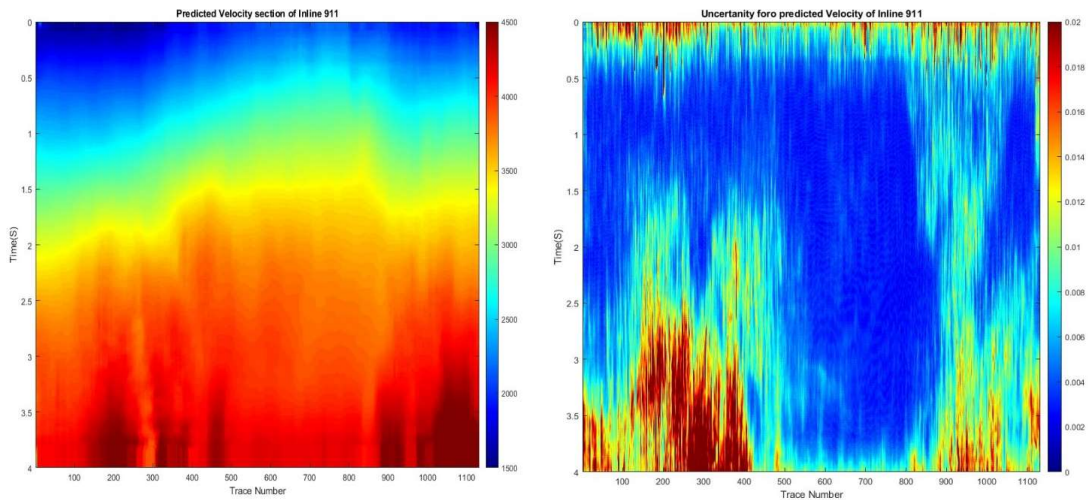


Figure 5. *Left: Full velocity sections of model predictions on test CDP gathers (Test Line). Right: Uncertainty map for velocity predictions on the test seismic line. Warmer colors indicate higher uncertainty in the predicted velocities.*

CONCLUSION(S)

In this work, we presented a customized deep learning model for fully automating velocity picking from seismic data. By recasting the velocity picking problem as an image segmentation problem on semblance gathers, we can leverage CNN architectures to accurately classify pixels into distinct velocity regions with only light QC needs. Our model achieves real-time velocity prediction per CDP gather. The proposed DL workflow has the potential to greatly increase productivity for velocity model building in seismic processing.

In comparison with the traditional manual velocity picking, this method provides a dense picking of velocity in temporal and spatial direction leading to more accurate and resolvable velocity, this method also needs much less time as it leverages high performance GPU computing. For the QC purpose, however, we need a finite number of control points, so we can extract knee points of the predicted trend which with an uncertainty map extracted from the DNN model serve the requirements for quality control and manual correction purpose. This method also serves as a demonstration case study for injecting deep learning approaches to augment traditional geophysical techniques.

REFERENCES

- Jégou, S., Drozdal, M., Vazquez, D., Romero, A., & Bengio, Y. (2017). The one hundred layers tiramisu: Fully convolutional densenets for semantic segmentation. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops (pp. 11-19).
- Yang, F. & Ma, J. (2019). Deep-learning inversion: A next-generation seismic velocity model building method. *GEOPHYSICS*, 84(4), R583–R599.
- Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*. Society of exploration geophysicists.
- Yu, S., & Ma, J. (2021). Deep learning for geophysics: Current and future trends. *Reviews of Geophysics*, 59(3), e2021RG000742.
- Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, Proceedings, Part III 18* (pp. 234-241). Springer International Publishing.

Application of Deep Neural Networks for Spatial Relation Learning in Seismic Object Detection

Fakhari Mohammad Ghasem, Salehi Ehsan, Saadat Dasteny Mahdi¹

¹ Dana Energy Company, Geophysical Services, Tehran, Iran, Fakhari.Mohammad@danaenergy.com

ABSTRACT

Deep Learning (DL) is the state-of-the-art Machine Learning (ML) technique which is widely deployed in academia and industry. DL allows automated identification of complicated patterns in large data sets (“big data”). Since the seismic data can be treated as image, there have been many successful applications of DL in this field. In this study, we focus on DL in seismic interpretation, specifically seismic object detection. We present the application of the CNN technique to classify gas chimneys from shallow sediments containing gas. These sediments show similar characteristics as gas chimneys in selected seismic attributes used in conventional ML classification methods. Our work showcases deep learning's exceptional capacity for spatial relationship modeling, enabling accurate seismic object detection even in complex cases where conventional machine learning approaches struggle.

Keywords: Deep Learning (DL), Convolutional Neural Network (CNN), Gas chimney

INTRODUCTION

Deep learning (DL) has emerged as a powerful machine learning technique for automatically identifying complex patterns in large datasets. In recent years, there has been rapidly growing interest in applying DL across many domains, including for analysis of seismic data. Our text mining analysis on geophysics journal articles shows the exponential increase in DL-focused studies, underscoring its importance for the community (Figure 1).

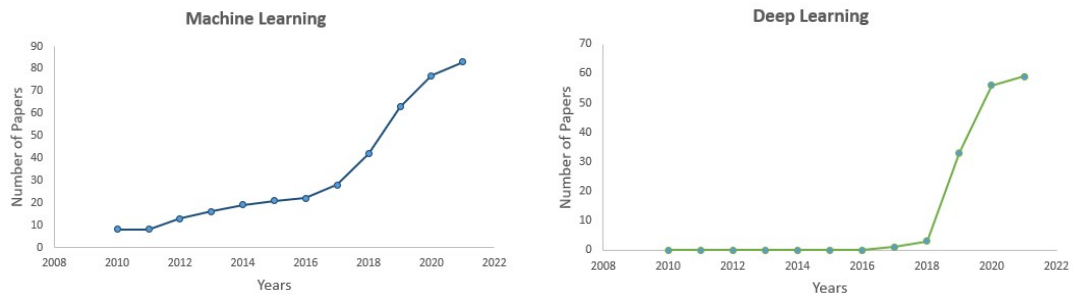


Figure 1. Change rate for ML and DL topics based on numbers of papers by titles including ML and DL as keywords

While DL has enabled breakthroughs in seismic processing and interpretation tasks like salt body delineation, we focus here on a persistent challenge of accurate detection of seismic chimneys. Specifically, conventional machine learning methods struggle to reliably separate chimney signatures when surrounding shallow gases or undesired features that have similar attributes (Figure 2).

In this work, we showcase the value of convolutional neural networks (CNNs), a specialized DL architecture, for learning spatial relationships to address this limitation. We train CNN models on seismic sections labeled for chimney presence to implicitly capture morphological chimney characteristics. Our results demonstrate enhanced chimney localization accuracy compared to standard neural networks, particularly in regions with interfering shallow gases. This highlights the effectiveness of DL for seismic object detection in complex scenarios requiring contextual understanding.

By improving chimney recognition, our work enables better characterization of near subsurface fluid migration pathways and associated drilling hazards. More broadly, this serves as an exemplar case for leveraging modern deep learning to augment spatial pattern recognition within seismic interpretation.

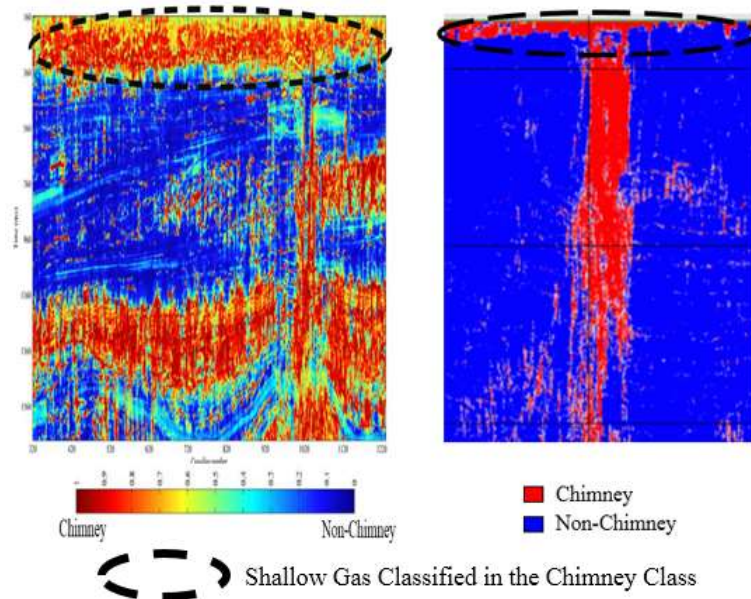


Figure 2. The North Sea Posterior probability of “chimney” class example by Hashemi et al. 2008 (left) and Gulf of Mexico Example Posterior probability of “chimney” by Aminzadeh et al 2001 (right). In both cases, the presence of shallow gases has been identified as a weak point in the chimney detection method within the gas chimney class.

Gas chimney detection

In gas chimney detection, the classical supervised ML models such as the multilayer perceptron (MLP) are most commonly used (Heggland et al., 1999; Meldahl et al., 1999), which use a set of attributes as input data. While conventional machine learning has shown some promise for gas chimney detection, fundamental limitations remain in tracking chimneys to the seafloor. Engineered seismic attributes serve as input for classifiers, but these have difficulty fully separating chimneys from surrounding shallow gases that exhibit similar seismic properties. As shown in Figure 2, results from supervised learning chimney detections demonstrate this shortcoming. Predicted chimney probability volumes in the North Sea and Gulf of Mexico indicate an ambiguity clearly delineating a continuous chimney path near the surface. Overlapping signals from co-located shallow gases obscure the chimney conduit.

The convolutional layers in a CNN classifier act as an attribute generator. Thus, CNN-based classification has the same classical meta attributes seismic object detection workflow which attributes have been generated in convolutional and pooling layers of a CNN structure. In the classical multi-attribute approach, the attributes are meaningful and basically compute a physical seismic property. But CNN attributes are computed by simple mathematical operators, and therefore have no geophysical implications. CNN does not require a selection of attributes to work. Instead, it uses a large amount of training data to assign the given inputs to specific labels, e.g., object and background in seismic object detection.

These limitations show the need for more advanced approaches. In this study, we apply a convolutional neural network (CNN) which can learn optimal attributes tailored to gas chimneys while modeling spatial context absent in classical methods. We demonstrate this approach on the same North Sea F3 block where classical supervised ANN model struggled with ambiguity near the surface (Figure 3b).

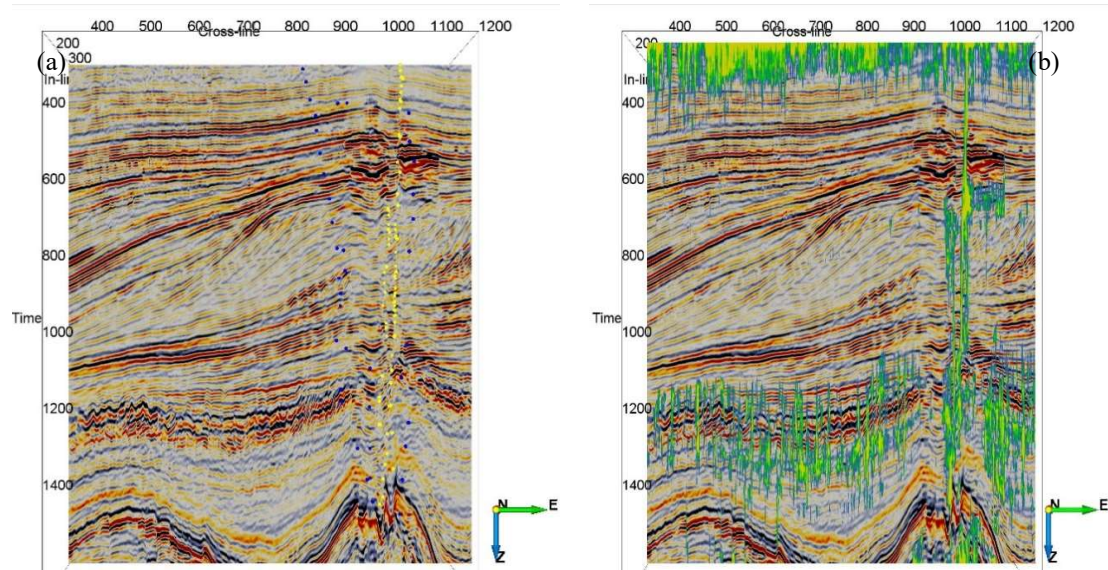


Figure 3. a) A section from in-line 130 of F3 seismic data (F3 block in the Dutch sector of the North Sea). Yellow picks are shown chimney class and blue picks are shown “non-chimney” locations, b) Posterior probability of “gas chimney” on this section, obtained from classical NN

As can be seen in this figure, the posterior probability of gas chimney in this section includes three main areas where the shallowest part is shallow sediments containing gasses (gas packet), the second area is a vertical zone from the bottom to the surface that is a dominant gas chimney, and the third part in the bottom section is a dewatering zone that has been classified into chimney class. In other words, the areas with low similarity are classified as gas chimney class, such as shallow sediments containing gas.

As mentioned earlier, CNN does not require an attribute generation process and can be applied directly to seismic amplitude data. Successful implementation of a CNN classification task requires a large number of labeled training samples. However, feature engineering can help reduce the amount of labeled data needed for training (Puget et al., 2017). By utilizing appropriate features and engineering techniques, it may be possible to decrease the amount of labeled data required for training. For example, pre-trained CNN models like ResNet and transfer learning can be used to train a model on a large dataset and then fine-tune it for a smaller dataset.

In gas chimney detection the number of labeled training samples is limited. To tackle this issue, we use a special input to our CNN classification strategy here. We use two seismic attributes similarity and signal-to-noise ratio with seismic amplitude for input. Therefore, each input data sample is a small patch of seismic amplitude, similarity and signal to noise attributes centered on the sample to be classified as a chimney or non-chimney. We extended the picked points in both chimney and non-chimney classes by 12 samples in the crossline direction, and by 24 samples in the time direction on either side of them. This created a 2D patch with dimensions of 25×49, centered around the selected point. Figure 4 shows the schematic of the architecture of our CNN model for chimney detection. Table 1 describes the specifications of the training phase.

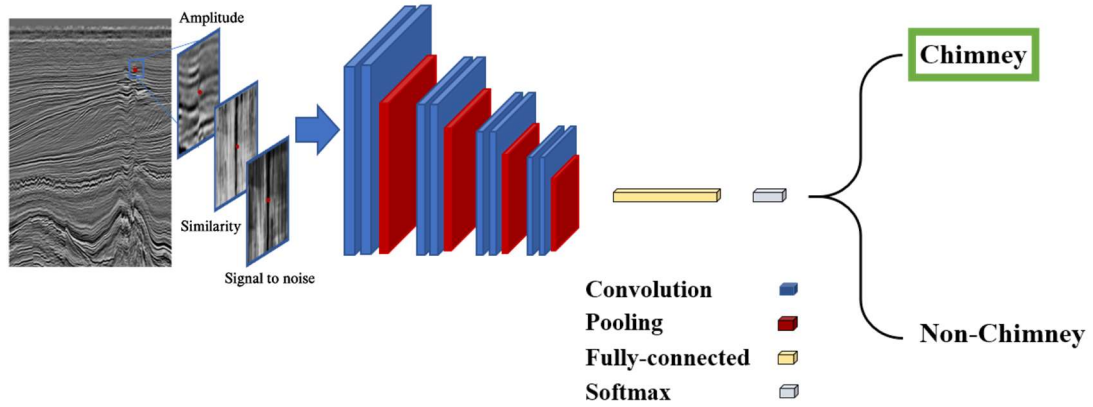


Figure 4. The schematic of Deep Convolutional Network used to classify gas chimney.

Table 1. Specifications of the training phase.

| Number of epochs | Initial Learning rate | Batch size | Optimizer | Training accuracy | Validation accuracy |
|------------------|-----------------------|------------|-----------|-------------------|---------------------|
| 45 | 10^{-3} | 32 | Adam | 95% | 93% |

Figure 5, shows the final classification result using an eleven-layer CNN model architecture trained using 2D patches with multiple sequences for gas chimney detection. The CNN output is superimposed on the seismic section in Figure 3(a), where the gas chimney is well detected. As can be seen in this figure, non-chimney positions such as shallow gases and dewatering areas, were correctly distinguished from chimneys.

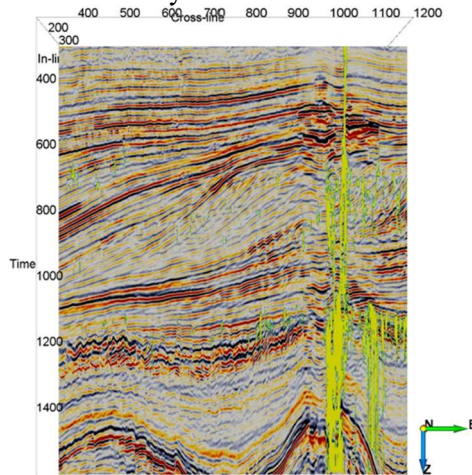


Figure 5. The Posterior probability of “gas chimney” overlaid on the seismic section figure 8, obtained from CNN classification.

CONCLUSION(S)

In this study, we showcased how DL can elevate challenging seismic object detection tasks, particularly in scenarios demanding spatial context understanding. Our focus was on accurately classifying chimneys in shallow gases using CNNs trained on labeled sections that capture chimney morphology. With limited training data as a constraint for geophysics applications, we boost efficiency by integrating seismic attributes into the input representation. Overall, deep learning holds promise to augment spatial pattern recognition within interpretation, performing where traditional methods falter.

REFERENCES

Heggland R., Meldahl P., Palmer G., de Groot P., 1999. The chimney cube, an example of semi-automated detection of seismic objects by directive attributes and neural networks: part II; interpretation. SEG Technical Program Expanded Abstracts, pp. 935–940, SEG.
 Meldahl P., Heggland R., Palmer G., de Groot P., 1999. The chimney cube, an example of semi-automated detection of seismic objects by directive attributes and neural networks: part I; methodology, SEG Technical Program Expanded Abstracts, pp. 931–934.
 Puget, J. F. (2017). Feature Engineering For Deep Learning. Inside Machine learning.

Advances in Oil Spill Cleanup Methods: A Comprehensive Review

Mohsen Bidgoli¹

¹*Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran, seyed.bidgoli@ut.ac.ir*

ABSTRACT

Oil spills pose significant threats to marine ecosystems and coastal environments, necessitating effective and timely cleanup methods. This article provides a comprehensive review of various oil spill cleanup techniques, highlighting their advantages, limitations, and recent advancements. The methods discussed encompass mechanical, chemical, and biological approaches, each with its unique set of challenges and successes. As environmental concerns grow, it is crucial to evaluate the efficiency and sustainability of these cleanup methods to mitigate the impact of oil spills on our planet. It will be discussed that a holistic approach that integrates multiple cleanup techniques and considers the long-term ecological consequences is essential for developing robust strategies to safeguard marine ecosystems and coastal areas from the detrimental effects of oil spills.

Keywords:

Oil spills, cleanup methods, environmental impact, mechanical methods, chemical dispersants, biological remediation

INTRODUCTION

Oil spills, whether from industrial accidents or maritime disasters, have devastating consequences on marine ecosystems. The urgency to develop effective and environmentally friendly cleanup methods has led to continuous advancements in the field. This article explores various approaches employed for oil spill cleanup, evaluating their efficacy and environmental implications.

Mechanical Methods:

Mechanical methods represent a frontline defense in the battle against oil spills, employing physical means to swiftly and efficiently remove oil from the water's surface. Among the widely adopted mechanical techniques, booms and skimmers stand out as stalwart tools in the arsenal of oil spill responders.

Booms, long barriers made of materials designed to repel oil or absorb it, are strategically deployed to contain the spread of spilled oil. They act as a floating barricade, preventing the oil slick from extending further and confining it within a manageable area (Minh et al.). This containment not only prevents the oil from spreading to unaffected regions but also facilitates subsequent cleanup efforts.

Skimmers, on the other hand, are mechanical devices that literally skim or suction the oil from the water's surface. These machines work efficiently to collect and recover the oil, separating it from the water (Dhaka and Chattopadhyay). However, the effectiveness of booms and skimmers can be compromised under challenging conditions, such as adverse weather or when dealing with highly viscous oils (Yajvinder Saharan et al.).

The limitations of traditional mechanical methods have spurred innovation in the field, leading

to the development of cutting-edge technologies. One notable advancement involves the integration of autonomous robotic systems into oil spill cleanup operations. These robotic systems, equipped with advanced sensors and artificial intelligence, offer a transformative solution to the challenges faced by human-operated methods.

Chemical Dispersants:

Chemical dispersants, integral to oil spill response strategies, constitute a multifaceted approach to mitigating the environmental impact of oil spills. These substances play a crucial role by breaking down oil into smaller droplets, thereby facilitating microbial degradation and accelerating the natural processes of remediation. The fundamental principle behind chemical dispersants lies in their ability to alter the physical and chemical properties of oil, rendering it more amenable to microbial attack (Zhu et al.). By breaking down the oil into smaller droplets, dispersants increase the surface area available for microbial colonization and degradation, expediting the natural breakdown of hydrocarbons and promoting a more rapid return to environmental equilibrium.

However, the use of chemical dispersants is not without controversy. The potential toxicity of dispersants to marine life has been a focal point of concern. While dispersants aim to mitigate the environmental impact of oil spills, their chemical composition and interaction with marine ecosystems raise questions about unintended consequences. Research has indicated that certain dispersants can have adverse effects on aquatic organisms, prompting a critical examination of their environmental footprint.

In response to these concerns, ongoing research endeavors are dedicated to developing safer dispersants. Scientists are diligently working towards formulations that minimize ecological impact while maintaining or even enhancing cleanup efficiency (Onokare et al.). This includes exploring novel compounds with reduced toxicity and improved biodegradability, aiming to strike a delicate balance between the immediate necessity of efficient cleanup and the long-term preservation of aquatic ecosystems.

The dichotomy between the urgent demand for effective oil spill cleanup and the imperative to safeguard marine ecosystems necessitates a meticulous balancing act. Striking this delicate equilibrium requires not only scientific innovation but also regulatory frameworks that ensure the responsible and judicious use of chemical dispersants (Loh et al.). It underscores the importance of a holistic approach where cleanup efforts align with the overarching goal of environmental preservation.

Biological Remediation:

Biological remediation stands as a beacon of hope in the quest for sustainable and eco-friendly solutions to oil spills. At its core, this approach relies on the remarkable capabilities of microorganisms to metabolize and degrade oil, offering a nuanced and environmentally conscious method for mitigating the impact of oil-contaminated environments. Bioremediation techniques, which form the cornerstone of biological methods, have demonstrated significant promise in effectively treating areas affected by oil spills, with the added benefit of being tailored for specific oil types (Madan et al.).

However, the effectiveness of biological remediation hinges on a deep understanding of the complex interactions between microorganisms and oil compounds. It is not merely a matter of introducing microorganisms to an oil-contaminated environment; rather, it requires a nuanced comprehension of the microbial ecology involved. Researchers delve into the intricacies of microbial metabolism, exploring how different species collaborate to break down hydrocarbons and convert them into less harmful byproducts (Singh et al.).

The optimization of biological remediation strategies involves a continual refinement of techniques to enhance the efficiency and reliability of the process. This includes investigating the factors that influence microbial activity, such as environmental conditions, nutrient availability, and the presence of inhibitory substances (Ganesan et al.). By deciphering these variables, scientists can fine-tune the application of biological methods to various scenarios, ensuring their effectiveness across diverse oil spill contexts.

The eco-friendly nature of biological methods aligns with the growing emphasis on sustainability in environmental management. Unlike some chemical cleanup approaches, biological remediation leaves behind minimal ecological footprint, promoting the restoration of ecosystems in a more natural and harmonious manner (Bi et al.). This aspect of biological remediation not only addresses the immediate aftermath of oil spills but also contributes to the long-term health and resilience of affected environments.

In conclusion, biological remediation represents a dynamic and evolving frontier in the field of oil spill cleanup. By harnessing the power of microorganisms, this approach offers a sustainable and targeted solution to the complex challenges posed by oil-contaminated environments. As research continues to unravel the intricacies of microbial interactions and as innovative techniques are developed, biological remediation stands poised as a key player in shaping the future of environmentally conscious oil spill response strategies.

Innovations and Future Directions:

Recent innovations in oil spill cleanup methods include the integration of artificial intelligence for real-time monitoring and decision-making, as well as the exploration of nanotechnology for enhanced efficiency in containment and recovery. The future of oil spill cleanup lies in interdisciplinary collaboration, combining engineering, biology, and technology to develop holistic and sustainable solutions.

Conclusion:

In conclusion, the multifaceted challenge of oil spill cleanup demands a nuanced and adaptive approach. Mechanical, chemical, and biological methods each play a role in mitigating the impact of oil spills, but no single method is without drawbacks. The quest for sustainable solutions remains at the forefront of research, emphasizing the need for continuous innovation and collaboration among scientists, engineers, and policymakers.

As technology evolves, the integration of robotics and artificial intelligence into cleanup efforts holds great promise. Autonomous systems can navigate challenging environments and execute cleanup operations with precision, reducing human exposure to hazardous conditions. Real-time monitoring using AI enhances the effectiveness of response strategies, allowing for timely adjustments based on dynamic environmental conditions.

Moreover, the development of eco-friendly chemical dispersants and the refinement of biological remediation techniques underscore the industry's commitment to minimizing the ecological footprint of cleanup operations. Striking a balance between efficiency and environmental preservation remains a key challenge, requiring ongoing research and regulatory scrutiny.

Looking ahead, a holistic and sustainable approach to oil spill cleanup will necessitate international cooperation and standardization of cleanup protocols. Collaborative efforts can foster the exchange of knowledge, expertise, and resources, ensuring that best practices are adopted globally. Additionally, public awareness and engagement are crucial in advocating for responsible industrial practices and stringent regulations that deter oil spills.

In summary, the quest for effective oil spill cleanup methods is a dynamic and evolving field,

marked by continuous innovation and a commitment to environmental stewardship. The challenges posed by oil spills are formidable, but with interdisciplinary collaboration, technological advancements, and a collective dedication to sustainability, we can strive to protect our oceans and coastal ecosystems from the devastating consequences of oil contamination.

REFERENCES

1. Bi, Huifang, et al. "A Review on Recent Development in the Use of Surface Washing Agents for Shoreline Cleanup after Oil Spills." *Ocean & Coastal Management*, vol. 245, 1 Nov. 2023, p. 106877, www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0964569123004027, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106877>. Accessed 9 Jan. 2024.
2. Dhaka, Abhinav, and Pradipta Chattopadhyay. "A Review on Physical Remediation Techniques for Treatment of Marine Oil Spills." *Journal of Environmental Management*, vol. 288, June 2021, p. 112428, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112428>.
3. Ganesan, Mirunalini, et al. "Bioremediation by Oil Degrading Marine Bacteria: An Overview of Supplements and Pathways in Key Processes." *Chemosphere*, vol. 303, 1 Sept. 2022, p. 134956, www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653522014497, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134956>.
4. Loh, Andrew, et al. "Stability of Mechanically and Chemically Dispersed Oil: Effect of Particle Types on Oil Dispersion." *Science of the Total Environment*, vol. 716, 1 May 2020, pp. 135343–135343, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135343>. Accessed 16 Nov. 2023.
5. Madan, Ayush, et al. "Isolation & Characterization of Hydrocarbon Degrading Bacteria: A Bio-Remedial Approach to Clean-up Oil Spills." *Advanced Materials Letters*, vol. 14, no. 4, 1 Oct. 2023, pp. 2304–1736, aml.iaamonline.org/article_23458.html, <https://doi.org/10.5185/amlett.2023.041736>. Accessed 9 Jan. 2024.
6. Minh, T.D., et al. "Micro/Nano-Machines for Spilled-Oil Cleanup and Recovery: A Review." *Chemosphere*, vol. 271, May 2021, p. 129516, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129516>. Accessed 17 Sept. 2021.
7. Onokare, Emuesirije P., et al. "Effectiveness and Toxicity of Chemical Dispersant in Oil Spill Aquatic Environment." *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, vol. 19, no. 2, 1 Jan. 2022, pp. 41–46, content.iospress.com/articles/asian-journal-of-water-environment-and-pollution/ajw220022, <https://doi.org/10.3233/AJW220022>. Accessed 9 Jan. 2024.
8. Singh, Divya, et al. "Bio-Inspired Remediation of Wastewater: A Contemporary Approach for Environmental Clean-Up." *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 5, 1 Jan. 2022, p. 100261, linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666086522000030, <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100261>.
9. Yajvinder Saharan, et al. "Recent Advances in Soil Cleanup Technologies for Oil Spills: A Systematic Review." *Water Air and Soil Pollution*, vol. 234, no. 8, 21 July 2023, <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06428-z>.
10. Zhu, Zhiwen, et al. "Recent Advances in Chemical and Biological Degradation of Spilled Oil: A Review of Dispersants Application in the Marine Environment." *Journal of Hazardous Materials*, vol. 436, Aug. 2022, p. 129260, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129260>. Accessed 25 Oct. 2022.

Application of D-PATV method to determine the first arrival time in seismic refraction tomography

Abtin Pegah¹ Feng Bo² Amin Roshandel Kahoo³

¹Phd candidate, School of ocean and earth science, Tongji university, Shanghai, china
abtin_pegah@tongji.edu.cn

²Professor, School of ocean and earth science, Tongji university, Shanghai, china

³Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ABSTRACT

The study utilized seismic refraction tomography to accurately visualize underground layers, employing three arrival time calculation methods: expert user determination, Hatherly method, and D-PAVT method. The aim was to explore automatic first-breaks picking determination methods for scenarios with limited data or inexperienced researchers. The D-PATV method has yielded satisfactory results when compared to the Hatherly method, often displaying the closest resemblance to the expert user's output. In urban seismic refraction data acquisition, noise is inevitable. therefore, in the proposed method for first-breaks picking, we first smooth the signal with the powerful D-PATV method and then determine the start of the event with the derivative of the results. It should be noted that since this method is based on derivation, it can only be used in case of resources with minimum phase.

Keywords: First arrival times, Tomography, Seismic refraction, Method determined by user, Hatherly method, D-PATV method

1-INTRODUCTION

Seismic signals are introduced using explosives, hammer blows, or elastic wave generators. The energy travels directly through the upper layer or down through various layers before returning (refracted arrivals). Geophones, spaced at regular intervals, detect this energy on the surface (Anomohanran, 2012).

The seismic refraction method uses P-waves for depth information and S-waves for engineering properties (Ayolabi et al., 2009). Ricker's 1953 definition of the first arrival times addressed issues related to the change region and signal-to-noise ratio. However, manually selecting arrival times from the first refraction is time-consuming. Computational methods for calculating the first arrival times have been developed (Ricker 1953).

McCormack et al. (1993) correctly obtained the selection of first arrival times using a neural network, while Ivanov and Miller (2004) modified the rate-energy algorithm. These algorithms were studied using two sets of synthetic and real seismic data (Akram et al. 2012).

2-Methodology

Tomography evaluates velocity model compatibility with seismic data, offering high accuracy through iterative updating. It excels in heterogeneous structures, enhancing resolution between layers and reducing depth determination error. Seismic refraction tomography (SRT) predicts velocity gradient and lateral velocity changes, surpassing traditional methods. SRT is valuable in areas where conventional methods falter. This research aims to employ tomography to identify subsurface layers and compare automatic vs. expert-determined first arrival times. The goal is to assess the automatic method's suitability and accuracy, particularly for handling large data volumes.

2-1-Hatherly method

Hatherly's method is a computerized method and scientifically it is a suitable alternative to all kinds of manual processing methods. Studies have shown that the results of this method are accurate and independent of changes in signal amplitude and signal-to-noise ratio (Hatherly 1982).

$$T'_i = T_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (T_j - t_j) \quad (1)$$

In the above equation, n represents the number of traces, the time of each source and the time is determined using quadratic interpolation between digital samples.

2-2-PATV method (polynomial approximation and total variation)

This method is suitable for filtering any discontinuity in a low-frequency field, which is valid for seismic refraction.

$$y(n) = s(n) + x(n) + \omega(n), \quad n = 1, \dots, N \quad (2)$$

Where $s(n)$ is a polynomial of low degree, $X(n)$ is one of almost uniform signals and $\omega(n)$ is Gaussian white noise. At the same time, to obtain $X(n)$ and $S(n)$, simultaneous polynomial approximation and complete filtering (PATV) are proposed as follows:

$$\arg \min_{a,x} \lambda \|Dx\|_1 + \|Y - Ga - X\|_2^2 \quad (3)$$

The matrices of D , a , G , Y are as follows:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_2 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & \dots & 2^d \\ 1 & 3 & \dots & 3^d \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & N & \dots & N^d \end{bmatrix}, a = \begin{bmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} -1 & & & 1 \\ & -1 & & \\ & & -1 & \\ & & & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrix G is an $N \times (d+1)$ Vandermonde matrix, D is $N \times (N-1)$, and a is a vector of polynomial multipliers (Selesnick et al. 2012). The role of λ in formula (3) is evident when λ approaches ∞ and 0. Small λ values lead to irregular changes and noise estimation, while large λ values result in regular changes and quantitative estimation. Properly setting λ is crucial for satisfactory results (Selesnick et al. 2012). To solve the minimization problem (3), note that the minimization on a can be explicitly expressed.

$$a = (G^t G)^{-1} G^t (y - x) \quad (4)$$

Substituting (4) into (3), the cost function in (3) can be written as:

$$\arg \min_x \lambda \|Dx\|_1 + \|H(y - x)\|_2^2 \quad (5)$$

Where H defined as:

$$H = I - G(G^t G)^{-1} G^t \quad (6)$$

If $u_0 = Dx$ and $u_1 = x$, thus Equation (5) is equivalent to the following optimization problem

$$\arg \min_x \lambda \|u_0\|_1 + \|H(y - u_1)\|_2^2 \quad (7)$$

In brief, for the simultaneous problem of polynomial approximation and complete changes filtering, the changes can be identified using the iterative algorithm (8) and then a solution for a can be obtained.

$$u_0 \leftarrow \text{soft} \left(Dx + d_0, \frac{0.5\lambda}{\mu_0} \right) \quad (8a)$$

$$b = x + d_1 \quad (8b)$$

$$u_1 \leftarrow \left[(y + \mu_1 b + \frac{(G^t G)^{-1} G^t (b-y)}) \right] \quad (8c)$$

$$X \leftarrow (\mu_0 D^t D + \mu_1 I)^{-1} (\mu_0 D^t (u_0 - d_0) + (\mu_1 (u_1 - d_1))) \quad (8d)$$

$$d_0 \leftarrow d_0 (u_0 - Dx) \quad (8e)$$

$$d_1 \leftarrow d_1 (u_1 - x) \quad (8f)$$

$$\text{GO to } 8a \quad (8g)$$

Note that the size of the $(G^t G)^{-1}$ matrix must be $d \times d$. Since the polynomial degree d is much lower than the length of N , this is a small matrix (Selesnick et al. 2012).

3- Data acquisition and implementation of methods

In the eastern region of Iran, the geotechnical assessment of soil sediments is essential for the design of wind turbines in a wind farm area. Covering an expanse of 8.2 square kilometers, the study area encompasses a diverse terrain, transitioning from a flat plain to a mountain slope. Seismic wave acquisition entails the utilization of a hammer (8 kg) on a steel plate (the dimension is 20 cm \times 20 cm \times 5 cm) to generate a range of wave types. The vertical component of these waves is then captured using 4.5 Hz geophones and a 24-channel seismograph system. In this area, we have a large amount of seismic data, and our goal is to determine the first arrival time by

choosing the most suitable automatic method.

4-Discussion and research method

In this study, arrival times were acquired through three different methods: 1- User determination, 2- Hatherley method, 3- D-PATV method. Subsequently, precise depth sections of the subsurface layers were derived using SeisImager software. The first arrival times were obtained, followed by inversion and the acquisition of the velocity layer model. Subsurface layer visualization, along with the first arrival times of each image obtained through different methods, were then compared.

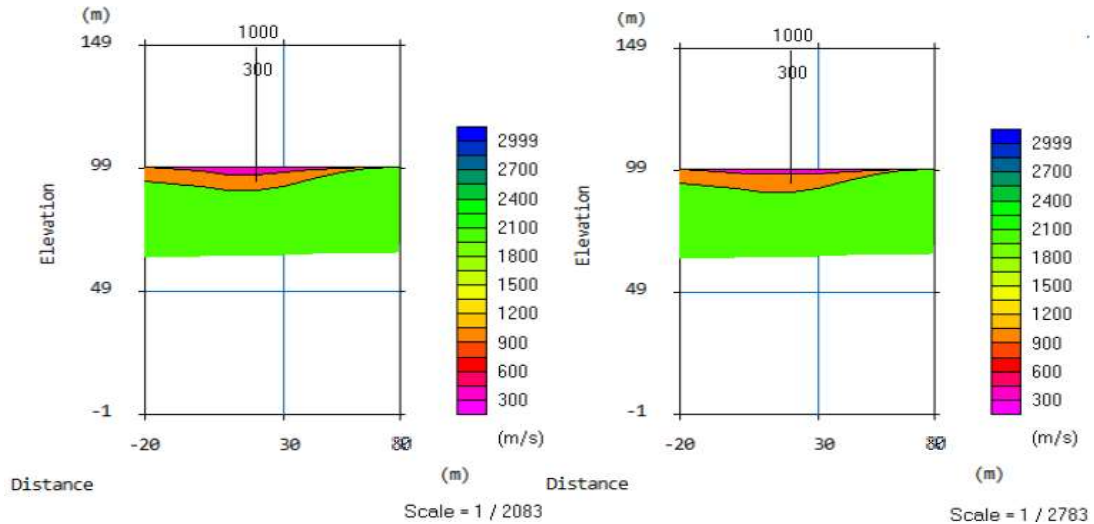


Figure 1: Layered velocity model of seismic line No. 001 in the method determined by user

Figure 2: Layered velocity model of seismic line No. 001 in the method determined by Hatherley

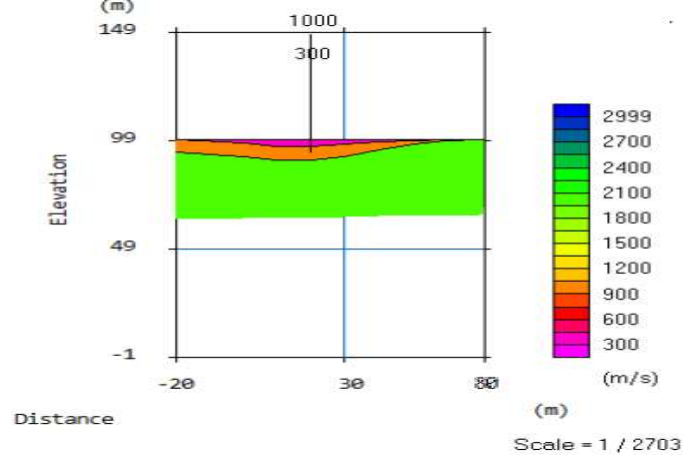


Figure 3: Layered velocity model of seismic line No. 001 in the method determined by D-PATV

As you can see, the results of the layer velocity model (from Fig 1 to 3) obtained using three different methods to determine the first arrival times are similar, but the D-PATV method and user determination are more similar.

The results obtained from seismic line 002 indicate that the existence of a high level of noise has led to the ineffectiveness of the Hatherly method but the results obtained from D_PATV and Hatherly methods are very close to each other.

5-Conclusion

In this research, we obtained the first arrival times for several seismic lines by using three different methods: determine by expert user, Hatherly, and D-PATV, and then we obtained the seismic velocity cross section and the layer velocity model, which we briefly presented in this article. And the obtained results showed that the D-PATV method is a suitable automatic

method compared to other methods when we have a large volume of seismic data.

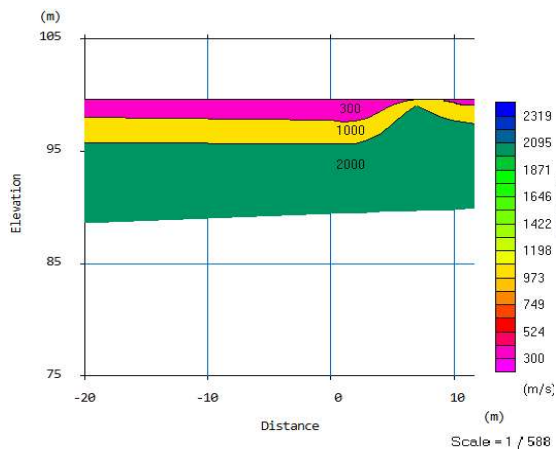


Figure 4: Layered velocity model of seismic line No. 002 determine by user

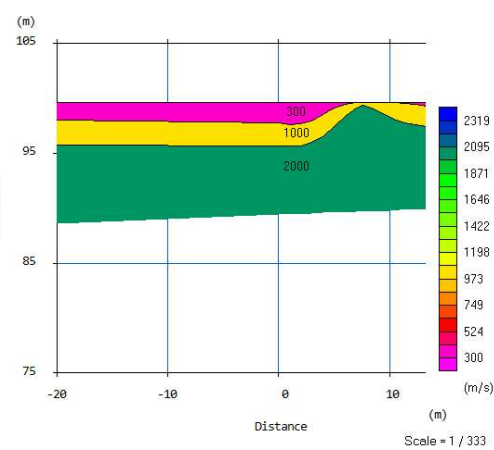


Figure 5: Layered velocity model of seismic line No. 002 determine by D-PATV method

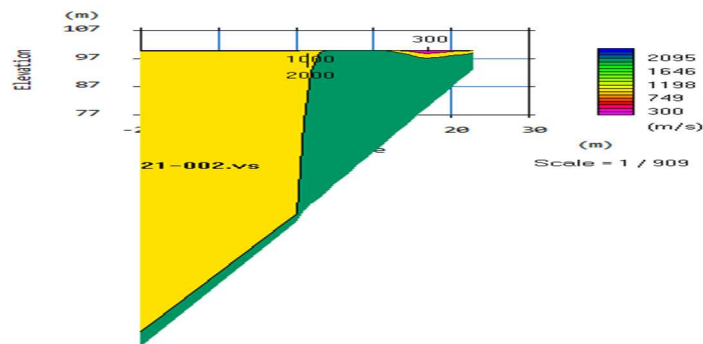


Figure 6: Layered velocity model of seismic line No. 002 determine by Hatherly method

References

- Akram, J., & Eaton, D. (2012). Adaptive microseismic event detection and automatic time picking. In 2012 CSEG Annual Convention (Vol. 15).
- Anomohanran, O., 2012. Geophysical interpretation of seismic reflection data obtained from Umureute and Aminyaibo area of Delta state. Nigeria, Nigerian J.Sci. Environ., 11: 148-153.
- Ayolabi, E.A., L. Adeoti, N.A. Oshinlaja, I.O. Adeosun and O.I. Idowu, 2009. Seismic refraction and resistivity studies of part of Igbogbo township, south-west Nigeria. J. Scient. Res. Dev., 11: 42-61.
- Hatherly, P J, A computer method for determining seismic first arrival times, Geophysics, 1982, 47, 1431-1436.
- Ricker, N. (1953). Wavelet contraction, wavelet expansion, and the control of seismic resolution. Geophysics, 18(4), 769-792.
- McCormack, M.D., Zaucha, D.E., Dushek, D.W. (1993). "First-break refraction event picking and seismic data trace editing using neural networks." Geophysics, 58(1), 67-78.
- Ivanov, J., & Miller, R. D. (2004, January). Semi-automatic Picking of First Arrivals through Cross Correlation Using Spline Interpolation Applied to Near-Surface Seismic Surveys. In Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2004 (pp. 1420-1425). Society of Exploration Geophysicists.

کاربرد مدارهای کوانتومی در مطالعات ژئوفیزیکی

محمدحسن سلیمانی^۱، محمدعلی ریاحی^۲، مهران رحیمی^۳

کارشناسی ارشد^۱، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، mh.soleimani@ut.ac.ir

استاد^۲، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، mariahi@ut.ac.ir

کارشناسی ارشد^۳، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، Mehran.rahimi@ut.ac.ir

چکیده:

در عصر اطلاعات و پیشرفت‌های روزافزون علمی امروز، مدارهای کوانتومی به مثابه یک پیشرفت بنیادین در حوزه محاسبات کوانتومی، امکانات و افق‌های جدیدی را در زمینه‌های متعدد علمی و صنعتی فراهم آورده‌اند. در این مطالعه به معرفی کاربرد پتانسیل‌های مدارهای کوانتومی در ژئوفیزیک، از جمله تحلیل دقیق‌تر داده‌های لرزه‌ای و مدل‌سازی با سرعت و دقت بالا پرداخته‌ایم. با استفاده از توانایی‌های بی‌نظیر کیوبیت‌ها در برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی، این مدارها قادر به انجام محاسبات پیچیده‌ای هستند که با محدودیت‌های سیستم‌های کلاسیک قابل مقایسه نیستند. همچنین، این فناوری می‌تواند امنیت داده‌های ژئوفیزیکی را ارتقاء بخشد. با این حال، برای دستیابی به استفاده گسترده از این فناوری، چالش‌های عملی و فنی پیش روی ما قرار دارد که نیازمند تحقیقات بیشتر و سرمایه‌گذاری‌های مالی است. این مقاله گامی در جهت تحقق این هدف است. در این تحقیق ما یک مدار کوانتومی ارائه کردیم که پتانسیل بالایی در طبقه‌بندی رخساره‌های چاه دارد، که می‌تواند در آینده به پیشرفت‌های چشمگیری در عرصه ژئوفیزیک منجر شود.

واژه‌های کلیدی: مدارهای کوانتومی، ژئوفیزیک، تجزیه و تحلیل داده‌های لرزه‌ای، محاسبات کوانتومی، کیوبیت‌ها، برهم‌نهی، درهم‌تنیدگی، طبقه‌بندی رخساره‌های چاه.

Application of the Quantum Circuits in Geophysical Studies

¹Mohammad Hassan Soleimani, ²Mohammad Ali Riahi, ³Mehran Rahimi

Abstract:

In today's era of information and scientific advancements, quantum circuits have emerged as a fundamental development in quantum computing, providing new possibilities and opportunities in various scientific and industrial fields. In this study, we have explored the potential of quantum circuits in geophysics, particularly in the analysis of seismic data and modeling with high speed and accuracy. By leveraging the unique abilities of qubits in superposition and entanglement, these circuits can perform complex calculations that surpass the limitations of classical systems. Additionally, this technology can enhance the security of geophysical data. However, to achieve widespread adoption of this technology, there are practical and technical challenges that require further research and financial investments. This article is a step towards realizing this goal. In our research, we introduced a quantum circuit with high potential in the classification of well facies, which could lead to significant improvements in the field of geophysics in the future.

Keywords: Quantum Circuits, Geophysics, Seismic Data Analysis, Quantum Computing, Qubits, Superposition, Entanglement, Classification of well facies.

مدارهای کوانتومی به عنوان پیشرفتی بنیادین در حوزه علوم و مهندسی کوانتومی، افق‌های نوینی را در طیف گسترده‌ای از زمینه‌های علمی و صنعتی ارائه می‌دهند. کاربردهای بالقوه آن‌ها در ژئوفیزیک، رشته‌ای که به بررسی ساختارها و خواص زمین اختصاص دارد، بسیار امیدوار کننده است. روش‌های سنتی در ژئوفیزیک، اغلب با محدودیت‌هایی در قابلیت‌های پردازش داده مواجه هستند، به ویژه هنگامی که حجم و پیچیدگی داده‌های ژئوفیزیکی به طور نمایی در حال افزایش است. اما مدارهای کوانتومی با استفاده از اصول مکانیک کوانتومی، می‌توانند محاسبات پیچیده را با سرعت و دقت بی‌سابقه‌ای انجام دهند [1, 2]. بیت‌های کوانتومی یا کیوبیت‌ها می‌توانند به دلیل پدیده توازن به طور همزمان در چندین حالت وجود داشته باشند و این ویژگی به مدارهای کوانتومی اجازه می‌دهد تا حجم عظیمی از داده‌ها را به طور مؤثرتری نسبت به سیستم‌های کلاسیک پردازش کنند. در زمینه ژئوفیزیک، استفاده از مدارهای کوانتومی می‌تواند به تجزیه و تحلیل سریع‌تر و دقیق‌تر داده‌های لرزه ای و مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر برای اکتشاف زیرسطحی کمک کند [5, 7]. همچنین شبیه‌سازی کوانتومی می‌تواند فرآیندهای زمین‌شناختی را با جزئیات و سرعتی که توسط رایانه‌های کلاسیک قابل دسترسی نیست، مدل‌سازی کند. علاوه بر این، مدارهای کوانتومی دارای ویژگی‌های امنیتی ذاتی هستند که می‌توانند داده‌های حساس ژئوفیزیکی را در برابر تهدیدات سایبری نوظهور محافظت کنند [3, 4]. با این حال، استفاده از مدارهای کوانتومی در ژئوفیزیک همچنان در مراحل اولیه قرار دارد و برای بهره‌برداری کامل از این فناوری، چالش‌های فنی و عملی وجود دارد. برای استفاده عملی و گسترده از مدارهای کوانتومی در ژئوفیزیک، نیاز به توسعه فناوری‌های جدیدی برای ساخت مدارهای کوانتومی بزرگ‌تر و قابلیت کنترل بیشتر است. در کل، استفاده از مدارهای کوانتومی در ژئوفیزیک باعث می‌شود تا قدرت پردازش و تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی افزایش یابد و به دستیابی به تصاویر دقیق‌تر و سازوکارهای پیشرفته‌تر برای اکتشاف و مطالعه زیرسطحی کمک کند. با این حال، برای بهره‌برداری کامل از این فناوری، نیاز به تحقیقات بیشتر و تخصیص بوجه‌های مالی به این مطالعات است.

۲ روش تحقیق

ساختار مدارهای کوانتومی

مکانیک کوانتومی زیربنای اصول محاسبات کوانتومی است. برخلاف بیت‌های کلاسیک، کیوبیت‌ها - واحدهای اساسی اطلاعات کوانتومی - می‌توانند به طور همزمان در ترکیبی از حالت‌ها وجود داشته باشند، خاصیتی که به عنوان برهم نهی شناخته می‌شود. علاوه بر این، کیوبیت‌ها را می‌توان درهم‌تنید، یک پدیده کوانتومی منحصر به فرد که به کیوبیت‌های همبسته اجازه می‌دهد بدون توجه به فاصله، فوراً بر یکدیگر تأثیر بگذارند. چارچوب ریاضی محاسبات کوانتومی شامل اعداد مختلط، جبر خطی و نظریه احتمالات است. بردارهای حالت که در فضای هیلبرت نمایش داده می‌شوند، وضعیت کوانتومی یک سیستم را توصیف می‌کنند [2, 6]. عملگرهایی که از نظر ریاضی به صورت ماتریس نشان داده می‌شوند، بر روی این بردارها برای تغییر حالت عمل می‌کنند. مفهوم تانسور برای توصیف سیستم‌های چند کیوبیت استفاده می‌شود. دروازه‌های کوانتومی بلوک‌های سازنده مدارهای کوانتومی هستند که مشابه دروازه‌های منطقی در محاسبات کلاسیک هستند. با این حال، برخلاف دروازه‌های کلاسیک، دروازه‌های کوانتومی عملیات برگشت‌پذیری را انجام می‌دهند که با ماتریس‌های واحد نمایش داده می‌شوند. دروازه‌های کوانتومی رایج شامل دروازه‌های پاولی، دروازه هادامارد، دروازه‌های فاز (S و T) و دروازه‌های چرخشی (مانند RY) هستند که هر کدام مربوط به تبدیل‌های خاصی در فضای حالت هستند.

بردار حالت: یک کیوبیت توسط یک بردار حالت در فضای هیلبرت دو بعدی نمایش داده می‌شود. به عنوان مثال، حالت یک کیوبیت می‌تواند به صورت زیر باشد:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (1)$$

دروازه‌های کوانتومی: دروازه‌های کوانتومی توسط ماتریس‌های یگانی نمایش داده می‌شوند. به عنوان مثال، دروازه پاولی X-که حالت یک کیوبیت را معکوس می‌کند، به صورت زیر است:

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

دروازه‌های چرخش: دروازه‌های چرخش توسط ماتریس‌هایی نمایش داده می‌شوند که بردار حالت را روی کره بلاخ^۱ به اندازه زاویه معینی می‌چرخانند. برای مثال، چرخش به دور محور Y به اندازه زاویه θ به صورت زیر است:

$$(3)RY(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) & -\sin(\theta/2) \\ \sin(\theta/2) & \cos(\theta/2) \end{pmatrix}$$

کاربردهای مدارهای کوانتومی در ژئوفیزیک

تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی: مدارهای کوانتومی می‌توانند در تحلیل داده‌های حجیم و پیچیده ژئوفیزیکی نقش کلیدی داشته باشند. با استفاده از توان محاسباتی برتر، مدارهای کوانتومی می‌توانند الگوریتم‌های پیچیده تحلیل داده را با سرعت و دقت بیشتری اجرا کنند، که این امر منجر به درک بهتری از داده‌های لرزه ای و پتانسیل اکتشافی می‌شود.

شبیه‌سازی کوانتومی: ابزاری قدرتمند در حوزه اکتشافات ژئوفیزیکی است که به محققان این امکان را می‌دهد تا فرآیندهای زمین‌شناختی پیچیده را با دقت و سرعت بی‌سابقه‌ای مدل‌سازی کنند. این تکنیک می‌تواند برای مطالعه و شناسایی ساختارهای زیرزمینی مانند مخازن نفت و گاز، منابع معدنی و آب‌های زیرزمینی به کار رود. با استفاده از مدل‌سازی کوانتومی، دانشمندان می‌توانند سناریوهای مختلف اکتشافی را شبیه‌سازی کرده و بهترین رویکردها را برای حفاری و استخراج منابع طبیعی ارزیابی کنند. شبیه‌سازی‌های کوانتومی می‌توانند مقیاس‌های زمانی و فضایی بسیار دقیق‌تری نسبت به مدل‌های کلاسیکی ارائه دهند. این دقت بیشتر به دانشمندان کمک می‌کند تا تصویری واضح‌تر و عمیق‌تر از ساختارهای زیرزمینی و خصوصیات آن‌ها داشته باشند، که این امر نتایج اکتشاف را دقیق‌تر و مطمئن‌تر می‌کند. علاوه بر این، شبیه‌سازی کوانتومی می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و زمان اکتشاف کمک کند، زیرا امکان مدل‌سازی دقیق‌تر و سریع‌تر فرآیندها را فراهم می‌آورد.

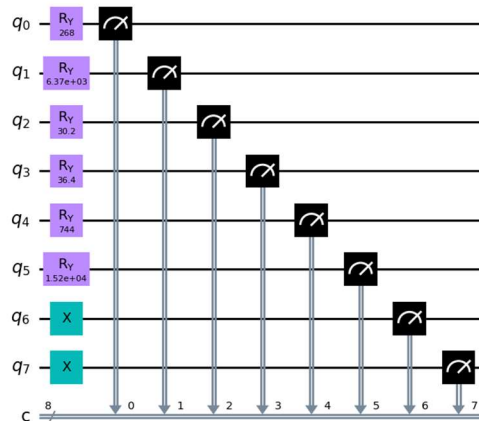
امنیت داده‌های ژئوفیزیکی: با توجه به حساسیت داده‌های ژئوفیزیکی، امنیت آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. مدارهای کوانتومی با قابلیت‌های رمزنگاری پیشرفته خود می‌توانند امنیت داده‌های ژئوفیزیکی را تضمین کنند. استفاده از رمزنگاری کوانتومی می‌تواند از داده‌ها در برابر دستکاری‌ها و دسترسی‌های غیرمجاز محافظت کند. در پژوهش جاری، ما به کاربرد مدارهای کوانتومی برای طبقه‌بندی رخساره‌های سنگی چاه‌های پرداخته‌ایم.

شکل ۱ نمایانگر مدار کوانتومی است که برای رمزنگاری ویژگی‌ها و برچسب‌های مرتبط با داده‌های چاه به کار می‌رود. این مدار، که از قابلیت‌های محاسبات کوانتومی بهره می‌برد، می‌تواند به عنوان بخش مهمی از فرآیند تحلیل داده‌های چندبعدی در نظر گرفته شود. در این بخش از مقاله، به تشریح جزئیات بخشی از کار انجام شده می‌پردازیم و نحوه کدگذاری ویژگی‌های مورد مطالعه و نیز برچسب‌های رخساره‌ای در قالب حالت‌های کوانتومی را بازگو می‌کنیم. این رویکرد، زمینه‌ساز تحلیل‌های دقیق‌تر و بهره‌گیری از قابلیت‌های پردازشی برتر محاسبات کوانتومی برای مسائل پیچیده زمین‌شناسی است.

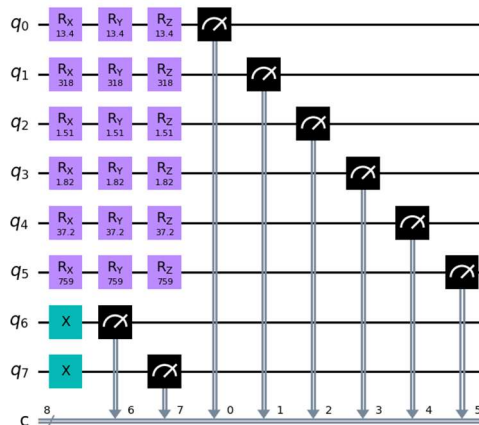
در این مدار کوانتومی با استفاده از داده‌های ویژگی‌سنجی. مدار شامل ۶ کیوبیت برای کدگذاری ویژگی‌ها و ۲ کیوبیت اضافی برای برچسب‌گذاری رخساره‌ها می‌باشد. دروازه‌های RY اعمال شده بر روی هر کیوبیت ویژگی‌ها را با زوایای دوران متناسب با مقادیر واقعی آن‌ها کدگذاری می‌کنند. دروازه‌های X در کیوبیت‌های q6 و q7، برچسب‌های دودویی مورد نظر برای رخساره‌ها را نمایش می‌دهند. تمام کیوبیت‌ها در نهایت اندازه‌گیری شده و نتایج در بیت‌های کلاسیکی ثبت می‌گردند. در مرحله بعدی ما سه دروازه RZ، RY، RX را اضافه کردیم و مشاهده شد که عملکرد مدار در طبقه بندی بهبود یافت که مدار طراحی شده در شکل ۲ مشاهده می‌کنیم البته ما در ابتدای راه هستیم. در تحقیق حاضر، رویکرد اولیه ما در استفاده از مدارهای کوانتومی برای طبقه‌بندی رخساره‌های چاه نشان داده است که می‌تواند نسبت به روش‌های دیگر دقت بالایی را به ارمغان آورد. همچنین، ما در حال کار کرد روی این روش برای بالا بردن دقت طوری که قابل مقایسه با روش‌های دیگر مرسوم در طبقه بندی نباشد. لازم به ذکر است که این مطالعه با استفاده از زبان برنامه

^۱ در مکانیک کوانتومی کره بلاخ نمایشی هندسی از حالت یک سیستم کوانتومی دو حالته کیوبیت است. که با نام فیزیکدان فلیکس بلاخ نام‌گذاری شده است.

نویسی پایتون و بر روی کامپیوتر کلاسیکی به انجام رسیده است، که این امر امکان ارزیابی اولیه استفاده از مدار های کوانتومی فراهم می کند.

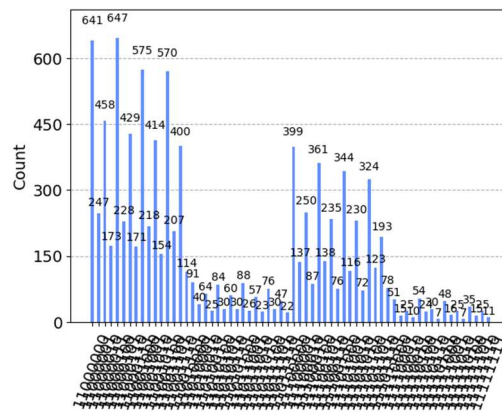


شکل ۱. مدار کوانتومی با تک دروازه RY برای طبقه بندی رخساره های چاه



شکل ۲. مدار کوانتومی با ۳ دروازه برای طبقه بندی رخساره های چاه

در نهایت در شکل ۳ بررسی نتایج حاصل از اندازه گیری های مکرر و تکرارهای مدار (شات ها)، مشاهده می شود که توزیع نتایج، شاهد یک الگوی خاص است. حالت های کوانتومی که بیشترین تعداد شمارش را دارند، نشان دهنده احتمالات بالاتری از رخ دادن هستند و می توانند دلالت بر دقت بالای مدار در شناسایی و طبقه بندی رخساره های صحیح باشند. این نشان می دهد که مدار ما به خوبی توانسته است ویژگی های کلیدی داده ها را شناسایی کرده و به نحو اثربخشی آنها را کد گذاری کند. این مدار کوانتومی برای رمزنگاری و ویژگی ها و برجسب های مرتبط با داده های چاه طراحی شده است، در نتیجه حالت هایی که با فرکانس بالاتری رخ داده اند، حالت هایی هستند که ویژگی های کلیدی و برجسب های صحیح را به خوبی نمایش می دهند.



شکل ۳. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مکرر و تکرارهای مدار کوانتومی.

۳ نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ما شاهد قابلیت‌های مفیدی از مدارهای کوانتومی در ارتقاء فرآیندهای ژئوفیزیکی بودیم. استفاده از محاسبات کوانتومی، نه تنها در افزایش دقت و سرعت تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی‌های زمین‌شناختی مؤثر خواهد بود، بلکه در زمینه امنیت داده‌های ژئوفیزیکی نیز نقش بسزایی ایفا خواهد کرده. با این وجود، توسعه و به‌کارگیری این فناوری در مقیاس وسیع همچنان نیازمند تحقیقات گسترده‌تر و حمایت‌های مالی است تا موانع فنی و عملی موجود برطرف شوند و به‌کارگیری آن در عرصه صنعت ژئوفیزیک تسریع یابد. در نهایت، این مطالعه نشان داد که مدارهای کوانتومی پتانسیل تحول‌آفرینی در صنعت ژئوفیزیک دارند و می‌توانند به عنوان ابزاری قدرتمند برای کشف و بهره‌برداری بهتر از منابع زیرزمینی به‌کار روند. ما معتقدیم که تداوم تحقیقات در این زمینه می‌تواند مرزهای دانش ما را درک و بهره‌برداری از پتانسیل‌های کوانتومی گسترش دهد و ما را به سوی دوران نوینی از پیشرفت‌های ژئوفیزیکی هدایت کند.

منابع

1. Dukalski, M., Rovetta, D., van der Linde, S., Möller, M., Neumann, N., & Phillipson, F. (2023). Quantum computer-assisted global optimization in geophysics illustrated with stack-power maximization for refraction residual statics estimation. *Geophysics*, 88(2), V75-V91.
2. Dukalski, M. (2021, September). Toward an application of quantum computing in geophysics. In *Fifth EAGE Workshop on High Performance Computing for Upstream* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.
3. Henderson, J. M., Podzorova, M., Cerezo, M., Golden, J. K., Gleyzer, L., Viswanathan, H. S., & O'Malley, D. (2023). Quantum algorithms for geologic fracture networks. *Scientific Reports*, 13(1), 2906.
4. Moradi, S., Trad, D., & Innanen, K. A. (2018, October). Quantum computing in geophysics: Algorithms, computational costs, and future applications. In *SEG International Exposition and Annual Meeting* (pp. SEG-2018). SEG.
5. Rahimi, M., Riahi, M. A., (2022). Reservoir facies classification based on random forest and geostatistics methods in an offshore oilfield. *Journal of Applied Geophysics* 201(4):104640. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2022.104640
6. Sahimi, M., & Tahmasebi, P. (2022). The Potential of Quantum Computing for Geoscience. *Transport in Porous Media*, 145(2), 367-387.
7. Soleimani, M., & Bagheri, M. (2023). Utilization of Quantum Science Capacity in Geophysical Studies. *The 20th Iran Geophysics Conference*

بررسی فناوری های جدید ژئوفیزیکی و تاثیر آن بر اکتشاف منابع هیدروکربنی

^۱ محسن مظفری، ^۲مجید باقری، ^۳محمدعلی ریاحی، ^۴محمدحسن سلیمانی

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران mozaffari.mohsen@ut.ac.ir

^۲ دانشیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران majidbagheri@ut.ac.ir

^۳ استاد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران mariahi@ut.ac.ir

^۴ کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران mh.soleimani@ut.ac.ir

چکیده:

این تحقیق به بررسی تأثیر پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های ژئوفیزیکی بر اکتشاف منابع هیدروکربنی می‌پردازد. تکنیک‌های نوین مورد بحث شامل تصویربرداری لرزه‌ای چندجزئی، بررسی‌های گرانشی و مغناطیسی هوابرد، و استفاده از گرانش‌سنج‌های ابررسانا می‌باشند. این روش‌ها با استفاده از حسگرهای پیشرفته و فناوری فیبر نوری، قادر به ارائه داده‌های دقیق‌تری در مورد ساختارها و خصوصیات زیرزمینی هستند، که نقش مهمی در کاهش خطرات اکتشافی و افزایش بهره‌وری دارند. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، چالش‌هایی نیز وجود دارد و وجود دارد. این مطالعه نشان می‌دهد که فناوری‌های ژئوفیزیکی نوین نه تنها از نظر فنی بلکه از نظر اقتصادی نیز تأثیر مهمی بر صنعت اکتشاف دارند، و ادامه تحقیق و توسعه در این زمینه‌ها برای پیشبرد علم و فناوری حائز اهمیت است.

واژه‌های کلیدی: تصویربرداری لرزه‌ای چندجزئی، بررسی‌های گرانشی و مغناطیسی هوابرد، گرانش‌سنج‌های ابررسانا، اکتشاف هیدروکربنی، فناوری‌های ژئوفیزیکی و فیبر نوری

Exploring New Geophysical Technologies and Their Impact on Hydrocarbon Resource Discovery

¹Mohsen Mozafari, ²Majid Bagheri, ²Mohammad Ali Riahi, ³Mohammad Hassan Soleimani

Abstract:

This research examines the impact of recent advances in geophysical technologies on the exploration of hydrocarbon resources. New techniques discussed include multicomponent seismic imaging, airborne gravity and magnetic surveys, and the use of superconducting gravimeters. Using advanced sensors and fiber optic technology, these methods can provide more accurate data on underground structures and properties, which play an important role in reducing exploration risks and increasing productivity. Despite the remarkable progress, there are also challenges. This study shows that new geophysical technologies have an important impact on the exploration industry not only technically but also economically, and continued research and development in these fields is important to advance science and technology.

Keywords: multicomponent seismic imaging, airborne magnetic and gravity surveys, superconducting gravimeters, hydrocarbon exploration, geophysical technologies, and optical fiber

۱ مقدمه

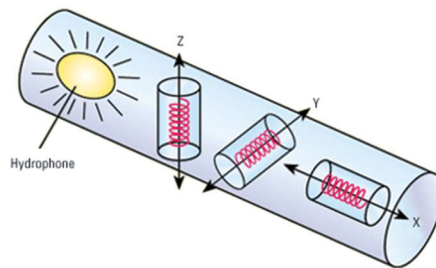
در عرصه اکتشاف هیدروکربنی و معدنی، پیشرفت‌های نوین در فناوری‌های ژئوفیزیکی نقش حیاتی در شناسایی و ترسیم دقیق‌تر منابع زیرزمینی ایفا کرده‌اند. یکی از این تکنیک‌های پیشرفته، تصویربرداری لرزه‌ای چندجزئی است که با بهره‌گیری از حسگرهای پیشرفته، امکان اندازه‌گیری اجزای عمودی و افقی امواج لرزه‌ای را فراهم می‌آورد. بررسی انجام شده در حوزه اکتشافات ژئوفیزیکی، استفاده از فناوری فیبر نوری به طور قابل توجهی افزایش یافته است. همزمان، بررسی‌های گرانشی و مغناطیسی هوابرد، به واسطه استفاده از حسگرهای متصل به پهبادها و هلی‌کوپترها، اطلاعات دقیقی را در محدوده‌های گسترده ارائه می‌دهند. این روش‌ها به عنوان ابزاری اقتصادی و کارآمد برای اکتشافات منطقه‌ای

مطرح هستند. بهبودهای اخیر در تجهیزات و فرآیندهای پردازش داده، کیفیت و دقت نتایج گرانشی و مغناطیسی هوابرد را ارتقا داده‌اند. علاوه بر این، گرانش‌سنج‌های ابررسانا نیز به عنوان ابزارهای بسیار حساس در اندازه‌گیری نیروی گرانش زمین به کار می‌روند. تحولات اخیر در این فناوری‌ها به ما امکان اندازه‌گیری دقیق‌تر تغییرات در میدان گرانشی زمین را داده‌اند، که در نتیجه، به تشخیص دقیق‌تر ساختارها و خصوصیات زمین‌شناسی کمک کرده است. در مجموع، این تکنیک‌های پیشرفته ژئوفیزیکی به محققان امکان می‌دهند تا با دقت و وضوح بالاتری به اکتشاف منابع هیدروکربنی بپردازند، و به این ترتیب، به کاهش خطرات مرتبط با اکتشاف کمک می‌کنند. این پیشرفت‌ها نه تنها از نظر فنی مهم هستند، بلکه از لحاظ اقتصادی نیز تأثیر گذارند، زیرا به بهینه‌سازی فرآیندهای اکتشافی و توسعه منابع کمک می‌کنند.

۲ روش تحقیق

تصویربرداری لرزه ای چند جزئی:

تکنیک تصویربرداری لرزه‌ای چندجزئی شامل استفاده از حسگرهایی است که توانایی اندازه‌گیری جزئیات عمودی و افقی امواج لرزه‌ای را دارند. این روش امکان تشخیص بهتر ویژگی‌های زیرزمینی را فراهم می‌کند، به ویژه در مورد خصوصیات متفاوت سنگ‌ها و سطوح اشباع شده با مایعات، که می‌توانند نشان‌دهنده‌ی حضور منابع هیدروکربنی باشند. فناوری‌های جدید به توسعه حسگرها و سامانه‌های ثبت داده‌های پیشرفته‌ای منجر شده‌اند که قادر به برداشت داده‌های لرزه‌ای چندجزئی با وضوح بالا هستند. این پیشرفت‌ها در اکتشاف هیدروکربن‌ها موجب توصیف دقیق‌تر ساختارها و خصوصیات زیرزمینی شده‌اند که محل قرارگیری ذخایر هیدروکربنی هستند. در شکل ۱ نمونه‌ی طرحی از یک سنسور لرزه ای چهار جزئی مشاهده می‌کنید. برای مثال، استفاده از داده‌های لرزه‌ای چندجزئی برای مشخص کردن شکل و جهت گسل‌ها و شکاف‌ها کمک شایانی می‌کند، که این امر به فهم بهتری از ویژگی‌های زیرسطحی منجر می‌شود. تصویربرداری لرزه‌ای چندجزئی به عنوان یک روش پیشرفته، برای بهبود تشخیص و شناسایی مخازن هیدروکربن، به ویژه در مواردی مانند شیل‌های غیرمتعارف، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این شیل‌ها، وجود شبکه‌های پیچیده می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد مخزن داشته باشد. استفاده از داده‌های لرزه‌ای چندجزئی این امکان را فراهم می‌آورد که ویژگی‌های زیرزمینی را با دقت بالا توصیف کرد و به این ترتیب، به افزایش دقت در برآوردهای منابع و کاهش خطرات مرتبط با اکتشاف کمک کند.

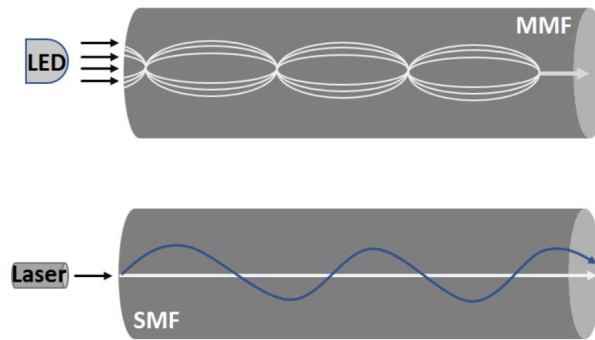


شکل ۱. سنسور لرزه ای چهار جزئی. (glossary.slb)

سنجش صوتی توزیع شده:

در حوزه اکتشافات ژئوفیزیکی، استفاده از فناوری فیبر نوری به طور قابل توجهی افزایش یافته است، که این افزایش به خصوص در زمینه‌های کاوش، توسعه و مانیتورینگ محیط‌های زیرزمینی مشاهده می‌شود. این فناوری نقش کلیدی در بهینه‌سازی روش‌های جمع‌آوری و تحلیل داده‌های حیاتی دارد، که به نوبه خود سرعت بخشیدن به تصمیم‌گیری‌ها، کاهش هزینه‌ها و زمان را در پی دارد. سنجش صوتی توزیع شده (Distributed Acoustic Sensing)، که از طریق اندازه‌گیری‌های انجام شده در طول کابل‌های فیبر نوری عمل می‌کند، در میان تکنیک‌های ژئوفیزیکی محیط‌های پیچیده به شهرت قابل توجهی دست یافته است. DAS به عنوان یک فناوری مبتنی بر فیبر نوری، توانمندی‌های برجسته‌ای در زمینه تصویربرداری زیرسطحی و نظارت لحظه‌ای در مواردی مانند پروفایل لرزه‌ای عمودی، مانیتورینگ مخزن و به نمایش گذاشته است. در بررسی تحقیقات انجام شده در این زمینه مشخص شد که کابل‌های SMF به دلیل قابلیت‌های

برجسته در ثبت ویژگی‌های صوتی سیگنال در طول کابل، به عنوان یکی از پرکاربردترین انواع کابل‌های فیبر نوری برای سیستم‌های سنجش صوتی توزیع شده (DAS) شناخته شده‌اند. با این حال، ترکیب SMF با کابل‌های MMF، که برای اندازه‌گیری‌های سنجش دمای توزیع شده (DTS) مورد استفاده قرار می‌گیرند، به دلیل تغییرات دمایی و پهنای باند بالا، محبوبیت یافته است. نصب و راه‌اندازی کابل‌ها یک عامل کلیدی در فرآیند اکتشاف ژئوفیزیکی است و تلاش‌های زیادی را برای پردازش داده‌های DAS و کاربرد آن در زمینه‌های اکتشافی می‌طلبد. بهبود در پیش‌پردازش داده‌ها، کنترل و بهینه‌سازی پارامترهای اکتساب DAS، ارتقای نسبت سیگنال به نویز (SNR) و مقایسه نتایج با سایر روش‌های اندازه‌گیری لرزه‌ای می‌تواند به این فرآیند کمک کند. در شکل ۲ مقایسه ای بین کابل‌های SMF و MMF مشاهده می‌کنید.



شکل ۲. مقایسه کابل‌های SMF و MMF (CBO).

بررسی‌های گرانشی و مغناطیسی هوابرد:

بررسی‌های گرانشی و مغناطیسی از طریق هوا شامل جمع‌آوری اطلاعات گرانشی و مغناطیسی از طریق حسگرهای متصل به پهباد ها و هلی کوپتر ها است. این روش‌ها اطلاعات دقیقی را در محدوده‌های گسترده فراهم می‌کنند و به عنوان یک راهکار اقتصادی و کارآمد برای تحقیقات گسترده منطقه‌ای شناخته می‌شوند. بهبودهای اخیر در تجهیزات دقیق و فرایندهای پردازش داده باعث افزایش کیفیت و دقت در نتایج گرانشی و مغناطیسی هوابرد شده است. برای نمونه، کاربرد گرادئومترهای گرانشی هوابرد که تغییرات گرادیان میدان گرانشی زمین را اندازه‌گیری می‌کنند، توانایی شناسایی تغییرات ریزتر و دقیق‌تر در میدان گرانشی زمین را به ارمغان آورده است. نتایج حاصل از این پیشرفت‌ها در زمینه اکتشاف منابع هیدروکربن شامل توانایی شناسایی و نقشه‌برداری ساختارها و خصوصیات زیرزمینی است که می‌توانند محل قرارگیری مخازن هیدروکربنی باشند. در بخش اکتشاف هیدروکربن، این روش‌ها برای ترسیم حدود و ژئومتری حوضه‌های رسوبی که می‌توانند حاوی مخازن هیدروکربنی باشند بر اساس تفاوت‌ها در چگالی و خصوصیات مغناطیسی سنگ‌های رسوبی به کار رفته است. در شکل ۳ نیز نمونه ای از سیستم‌های گرانشی هوابرد آورده شده است.



شکل ۳. نمونه ای از سیستم گرانشی هوابرد با فناوری پیشرفته (DGS)

گرانش سنج های ابرسانا:

گرانش سنج های ابرسانا از جمله ابزارهای فوق العاده حساسی هستند که برای اندازه گیری نیروی گرانش زمین به کار می روند. این دستگاه ها بر پایه پدیده ابرسانایی عمل می کنند، که در آن مواد خاصی در دماهای بسیار پایین هیچ مقاومت الکتریکی نشان نمی دهند. در این سیستم ها از یک کره کوچک ابرسانا استفاده می شود که درون یک میدان مغناطیسی شناور می ماند و مکان آن توسط تداخل سنج لیزری با دقت بالا ردیابی می شود، به این ترتیب که اندازه گیری های فوق العاده دقیقی از گرانش امکان پذیر می گردد. بهبودهای اخیر در تکنولوژی گرانش سنج های ابرسانا به افزایش حساسیت و دقت آن ها منجر شده است، به گونه ای که حتی تغییرات جزئی تر و ظریف تر در نیروی گرانشی زمین قابل اندازه گیری است. این پیشرفت ها در اکتشافات هیدروکربنی امکان ترسیم دقیق تر و با کیفیت بالاتر ساختارها و خصوصیات زمینی را فراهم آورده اند. برای مثال، این گرانش سنج ها به همراه دیگر تکنیک های ژئوفیزیکی مانند تکنیک های لرزه ای و مغناطیسی برای تصویربرداری از ساختار زمین شناسی مناطق حاوی هیدروکربن به کار گرفته شده اند. این ابزارها همچنین در رصد تغییرات در میدان گرانش زمین که ناشی از جابجایی سیالات زیرزمینی است، استفاده شده اند و بینش هایی را در مورد رفتار مخازن هیدروکربنی ارائه می دهند. به طور کلی گرانش سنج های ابرسانا ابزار ارزشمندی برای درک زمین شناسی زیرسطحی مناطق هیدروکربن دار ارائه می دهند. در شکل ۴ نمونه از این نوع گرانش سنج نشان داده شده است.



شکل ۴. طرحی از گرانش سنج ابرسانا. (GWR Instruments)

۳ نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های ژئوفیزیکی و کاربردهای آن‌ها در حوزه اکتشاف هیدروکربنی پرداخته شد. ابزارهای نوینی مانند تصویربرداری لرزه‌ای چندجزئی، بررسی‌های گرانشی و مغناطیسی هواپرد، و گرانش‌سنج‌های ابرسانا به عنوان بخشی از این پیشرفت‌ها، نقش مهمی در ترسیم دقیق‌تر و با وضوح بالاتر منابع زیرزمینی ایفا کرده‌اند. این تکنیک‌ها، که با فناوری فیبر نوری و استراتژی‌های پیشرفته پردازش داده‌ها همراه هستند، به کاهش خطرات اکتشافی و افزایش کارایی و بهره‌وری در فرآیندهای اکتشافی کمک کرده‌اند. با این حال، چالش‌هایی هنوز وجود دارد. راهکارهای مبتنی بر الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند در حل این چالش‌ها موثر واقع شوند، به ویژه در بهبود دقت و کیفیت داده‌های حاصل از این فناوری‌ها. در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که فناوری‌های ژئوفیزیکی نوین، نه تنها از نظر فنی بلکه از نظر اقتصادی نیز، تأثیر مهمی بر صنعت اکتشاف دارند. آن‌ها امکان دستیابی به داده‌های با کیفیت بالاتر و با دقت بیشتر را فراهم می‌کنند، که به نوبه خود به بهینه‌سازی فرآیندهای اکتشافی و توسعه پایدار منابع کمک می‌کند. بنابراین، ادامه تحقیق و توسعه در این حوزه‌ها برای پیشبرد علم و فناوری ژئوفیزیکی حائز اهمیت است.

منابع

Fairhead, J. D., Cooper, G. R. J., & Sander, S. (2017). Advances in airborne gravity and magnetics. In *Proceedings of exploration* (Vol. 17, pp. 113-127).

Farfour, M., & Yoon, W. J. (2016). A review on multicomponent seismology: A potential seismic application for reservoir characterization. *Journal of advanced research*, 7(3), 515-524.

Gou, X., Liu, X., and Cheng, Y. (2018). Application of superconducting gravimeter in resource exploration and environment monitoring. *Nonlinear Dynamics*, 94(3), 1869-1885.

Mohd Noh, K. A., Abdul Latiff, A. H., Otchere, D. A., Tackie-Otoo, B. N., Putra, A. D., Riyadi, Z. A., & Asfha, D. T. Application of Distributed Acoustic Sensing in Geophysics Exploration: Comparative Analysis of Single-Mode (Smf) and Multi-Mode Fiber (Mmf) Optic Cable.

Zhang, K., Lin, N. T., Yang, J. Q., Jin, Z. W., Li, G. H., & Ding, R. W. (2022). Predicting gas-bearing distribution using DNN based on multi-component seismic data: Quality evaluation using structural and fracture factors. *Petroleum Science*, 19(4), 1566-1581.

ژئوفون اپتیکال

شمس‌الدین اسماعیلی^۱، سام‌الدین اسماعیلی^۲

استادیار، دانشگاه رازی، s.esmaeili@razi.ac.ir

دکتری ژئوفیزیک، شرکت نفت مناطق مرکزی ایران، samesm@gmail.com

چکیده

این مقاله یک ژئوفون اپتیکال تک مؤلفه‌ای جدید را توصیف می‌کند. اساس کار سیستم نوسان‌گر در این ژئوفون بر پایه جرم و فنر و سیستم خواندن اطلاعات بر پایه تکنیک ماره استوار است. در این پژوهش از برهم‌نهی دو عدد توری ماره برای تشکیل طرح ماره بهره گرفته شده است. در واقع توری‌های ماره در اثر جابجایی زمین و به تبع آن سنسور نسبت به هم جابجا شده و این عمل باعث جابجایی بزرگتری در فریزهای ماره تشکیل شده، می‌شود. به منظور آشکارسازی و ثبت جابجایی فریزهای ماره از یک آشکارساز و یک دیود نوری در مقابل هم و در دو طرف طرح ماره استفاده شده است. بنابراین با جابجایی فریزها، شدت باریکه نوری لیزری که به یک آشکارساز نوری می‌رسد، تغییر می‌کند. از این رو سیگنال خروجی این ژئوفون با ارتعاش رسیده با آن دچار تغییرات می‌شود. داده‌ها بدست آمده با استفاده از یک مبدل آنالوگ به دیجیتال رقمی ۱۶ بیتی رقمی و ثبت شده است. بررسی‌های و آزمایش‌های صورت گرفته بر روی این سنسور نشان داد که از دقت و حساسیت بالایی برخوردار بوده و نسبت به نمونه‌های متداول آن مزیت‌های بیشتری دارد.

واژه‌های کلیدی: ژئوفون، تکنیک ماره، آشکارساز نوری، توری ماره، دیود نوری

Optical Geophone

Shamseddin Esmacili¹, Sameddin Esmacili²

¹Razi university, Kermanshah, Iran, s.esmaeili@razi.ac.ir

²Geophysicist, National Iranian Oil Company (NIOC), samesm@gmail.com

Abstract

This paper describes a new single-component optical geophone. The oscillator system in this geophone is based on the mass spring, and the readout system is based on the moiré technique. A moiré pattern is formed due to superimposing of the two gratings structures. We used two similar overlaid grids at a small angle, one of them is fixed to the frame of the sensor, and the other one is attached to the suspended mass. Moiré pattern is illuminated with a laser diode. The laser beam passes through the moiré pattern and a narrow slit and hits on a light detector. Due to moving the oscillatory mass and the fringes movements, the light intensity on the detector varies and is recorded as voltage. The obtained data is digitized and recorded by using a 16-bit ADC converter. Comparisons with conventional geophone show that, in terms of both noise and signal fidelity, the optical approach is quite viable. Our geophone was found to be compatible with the reference geophone.

Keywords: Geophone, Moiré technique, Light detector, Laser diode

۱ مقدمه

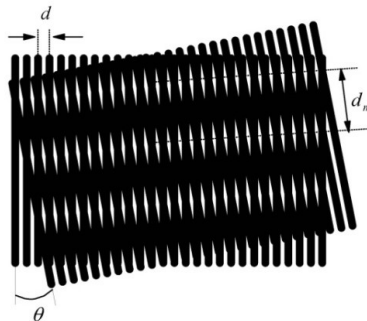
علم ژئوفیزیک وابسته به تجهیزات داده برداری مناسب برای کسب اطلاعات لازم از زمین می باشد. بر کسی پوشیده نیست که اولین و یکی از مهم ترین مراحل تعیین کننده در انجام یک پروژه ژئوفیزیکی، برداشت صحیح داده ها است. بر این اساس در روش های مختلف ژئوفیزیکی از تجهیزات مختص به آنها که از دقت، حساسیت و کیفیت بالایی برخوردار هستند بهره گرفته می شود. در این میان لرزه نگاری یکی از شاخه های پر کاربرد و مهم ژئوفیزیک برای پی جویی های مهندسی و اکتشافات منابع نفت و گاز است.

در لرزه نگاری با گسیل امواج لرزه ای الاستیک به درون زمین و دریافت دوباره ی آنها در سطح زمین تصویری از لایه بندی و ساختارهای درونی زمین بدست می آید. برای ثبت امواج لرزه ای از گیرنده ای به نام ژئوفون استفاده می شود. ژئوفون ها در فواصل مشخص و در طول یک خط برداشت بر روی زمین قرار داده می شوند. چشمه ی امواج لرزه ای عمدتاً انفجار و یا ویبراتورها هستند. در واقع امواج بازتابی و انکساری توسط ژئوفون ها دریافت و به سیگنال الکتریکی تبدیل می شوند. فرکانس طبیعی ژئوفون ها از مرتبه چند هرتز است و امواجی با دامنه ی چند میکرومتر و بالاتر را آشکار می کنند [۱].

اساس کار ژئوفون های متداول بر پایه ی سیستم جرم - فنر استوار است [۲]. با ثابت نگه داشتن چارچوب دستگاه ژئوفون به زمین، جرم آویزان (نوسانگر) در لحظه ی اولیه ی رسیدن پالس لرزه ای به علت اینرسی ماند جا می ماند. جابه جایی جرم نسبت به بدنه ی دستگاه توسط یک سیستم الکترومغناطیسی ثبت می شود. این سیستم متشکل از یک سیم لوله و آهن ربا است که یکی به بدنه ی دستگاه و دیگری به نوسانگر متصل است. در اثر جابجایی جرم در نوسانگر سیم لوله و آهن ربا نسبت به هم حرکت کرده و بر طبق قانون القای الکترومغناطیس فارادی شار مغناطیسی عبور کرده از سیم لوله تغییر کرده که سبب اعمال جریان الکتریکی به سیم لوله می شود. این جریان طبق قانون لنز به گونه ای است که با عامل بوجود آورنده خود مخالفت می کند. بر این اساس با دریافت امواج لرزه ای توسط ژئوفون، یک جریان الکتریکی تولید می شود که دامنه ی ولتاژ آن متناسب با سرعت جابه جایی نوسانگر است. این روش به تغییرات میدان های الکترومغناطیسی حساس است و ثبت داده ها در محیط های دارای میدان های الکتریکی و مغناطیسی با نوفه همراه است. در این پژوهش روشی جدید برای ثبت دقیق جابجایی جرم نسبت به بدنه ی ژئوفون بر پایه ی استفاده از تکنیک ماره ارائه می شود. تکنیک ماره روشی ساده و بسیار کارآمد در اندازه گیری جابه جایی های بسیار کوچک است.

۲ تکنیک ماره

هنگامی که دو ساختار تناوبی مانند دو توری روی هم قرار گیرند و خطوط آنها زاویه ی کوچکی با هم بسازند، نقش یا طرح تناوبی جدیدی ظاهر می شود که نقش ماره نامیده می شود. دوره ی تناوب فضایی یا گام نقش ماره d_m به مراتب بزرگ تر از دوره ی تناوب فضایی یا گام توری ها d است (شکل ۱).



شکل ۱: نقش ماره حاصل از برهم نهی دو توری با گام یکسان که خطوط آنها با هم زاویه کوچک θ می سازند.

هنگامی که دو توری مشابه انتخاب شوند، نسبت گام نقش ماره به گام توری ها برابر خواهد بود با:

$$\frac{d_m}{d} = \frac{1}{2\sin(\theta/2)} = \frac{1}{\theta} \quad (۱)$$

جابه‌جایی یکی از توری‌ها به اندازه‌ی d در امتداد عمود بر خطوط‌اش موجب یک جابه‌جایی در نقش ماره به اندازه‌ی d_m می‌شود و بزرگ‌نمایی‌ای از مرتبه‌ی $\frac{1}{\theta}$ به دست می‌آید [۳].

۳ اساس کار ژئوفون اپتیکال

ژئوفون اپتیکال از دو بخش اصلی نوسان‌گر و سیستم ثبات نوری تشکیل شده است. نوسان‌گر در این ژئوفون جرم و فنر می‌باشد که وظیفه دریافت و آشکارسازی ارتعاشات را به عهده دارد. فرکانس طبیعی سیستم نوسان‌گر ۱ هرتز است. جرم نوسان‌کننده در اینجا در واقع یک قاب نگهدارنده برخی از اجزای سیستم ثبات و اجزای متصل شده به آن است. برای تشکیل طرح ماره از دو توری مشابه با تعداد ۱۰ خط بر میلی‌متر بهره گرفته شده است. یکی از توری‌ها به بدنه ژئوفون ثابت شده و دیگری همان‌گونه که اشاره شد به قاب نگهدارنده که جرم نوسان‌کننده است متصل شده است. این دو توری بدون آنکه تماس فیزیکی با هم داشته باشند در مقابل هم قرار می‌گیرند، به طوری که بر هم مماس باشند و خطوط آنها زاویه‌ی کوچکی با هم بسازند. بر این اساس طرح ماره تشکیل شده که در اثر جابه‌جایی نوسان‌گر طرح ماره دچار تغییرات می‌شود. در واقع با جابه‌جایی جرم نوسان‌کننده در اثر اینرسی ماند، توری‌ها نسبت به هم جابجا شده که سبب جابه‌جایی بزرگتری در طرح ماره می‌شود. در این ژئوفون با استفاده از دیود نورگسیل و یک آشکارساز نوری در دو سمت طرح ماره، جابه‌جایی فریزهای ماره تشکیل شده را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود. در واقع با جابه‌جایی فریزهای ماره از مقابل باریکه نور، شدت نور دریافتی توسط آشکارساز نوری تغییر کرده که این موضوع باعث تغییر سیگنال خروجی از آن می‌شود. تغییرات سیگنال خروجی نیز نمایان‌گر میزان جابه‌جایی جرم نوسان‌کننده است. شکل ۲ نمایی از ژئوفون ساخته شده را نشان می‌دهد.

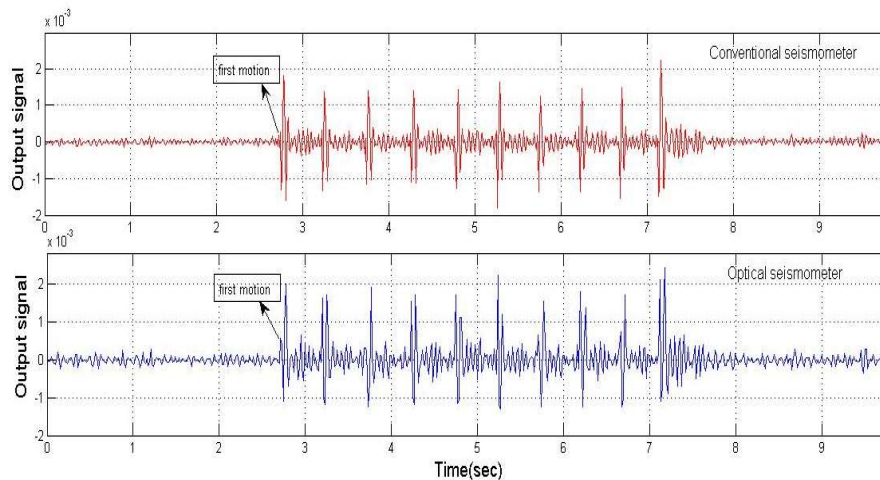


شکل ۲: ژئوفون اپتیکال ساخته شده در کنار یک ژئوفون متداول (چپ) بدون بدنه بیرونی و نمای کامل ژئوفون اپتیکال ساخته شده (راست).

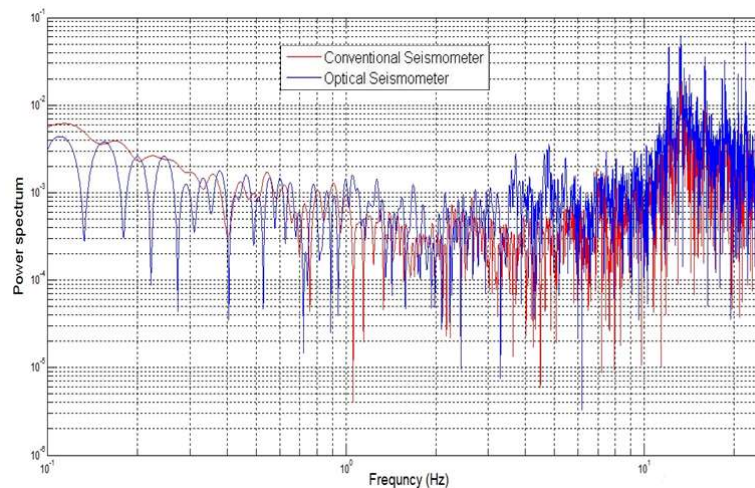
نتایج بدست آمده

به منظور بررسی عملکرد ژئوفون اپتیکال از مقایسه نتایج بدست آمده برای آن با یک ژئوفون از انواع تجاری (Sunfull, PS-10ES) استفاده شده است. این آزمایش در شرایط یکسان و هم‌زمان به انجام رسیده است. در واقع هر دو ژئوفون در شرایط واقعی در زمین و در یک فاصله مشخص از یک منبع تولید موج لرزه‌ای قرار گرفتند. منبع تولید موج در اینجا یک چکش در فاصله ۲ متری می‌باشد. آزمایشات بارها بر روی هر دو نمونه به انجام رسید که در اینجا صرفاً برخی از نتایج ارائه شده است. شکل ۴ سیگنال بدست آمده از چند ضربه ایجاد شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، تطبیق بسیار خوبی بین داده‌های بدست آمده برای هر دو نمونه ژئوفون وجود دارد. از سویی با نگاهی به نتایج در می‌یابیم که ژئوفون اپتیکال دارای مزایایی از قبیل نسبت سیگنال به نویز بالاتر، حساسیت بیشتر نسبت به سیگنال‌های ضعیف‌تر و نیز اولین رسید امواج لرزه‌ای می‌باشد. همچنین در شکل ۵، طیف توان برای داده‌های بدست

آمده از هر دو ژئوفون نشان داده شده است. در اینجا نیز تطبیق خوبی بین طیف بدست آمده برای هر دو نمونه وجود دارد. البته نتیجه حاصل نشان می‌دهد که پاسخ ژئوفون اپتیکال برای محتوی فرکانسی پایین‌تر نسبت به نوع متداول آن بالاتر است که در واقع این موضوع مرتبط با فرکانس طبیعی پایین‌تر ژئوفون اپتیکال است.



شکل ۴: داده‌های بدست آمده برای دو نمونه ژئوفون اپتیکال (آبی) و تجاری مدل Sunfull, PS-10ES (قرمز).



شکل ۴: طیف توان حاصل از دو نمونه ژئوفون اپتیکال (آبی) و تجاری مدل Sunfull, PS-10ES (قرمز).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک ژئوفون اپتیکال بر پایه تکنیک ماره ارائه شده است. سیستم دریافت امواج لرزه‌ای و آشکارسازی آن‌ها در این سنسور بر پایه جرم و فنر می‌باشد که جابجایی جرم نوسان کننده در آن با استفاده از تکنیک ماره به سیگنال خروجی تبدیل می‌شود. در اینجا تغییر شدت نور دریافتی توسط آشکارساز نوری که در اثر جابجایی فریزها از مقابل آن حادث می‌شود، به تغییر در سیگنال خروجی می‌انجامد که نمایان‌گر جابجایی جرم نوسان کننده است.

منابع

- [1] S. K. Upadhyay, Seismic Reflection processing, 2004.
- [2] W. M. Telford, L. P. Geldart, R. E. Sheriff, D. A. Keys, Applied Geophysics, 1990.
- [3] Amiror. I., (2003), "The Theory of Moiré Phenomenon", Kluwer Academic Publishers, London.

تعیین عمق موهو به روش پارکر-اولدنبورگ بهبود یافته در منطقه زاگرس

راضیه صفیان بلداجی^۱، وحیدابراهیمزاده اردستانی^۲

^۱ موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استاد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

مرز جدا کننده پوسته و گوشته، ناپیوستگی موهو نامیده می شود که ارتباط مستقیمی با توپوگرافی سطح زمین دارد. برای محاسبه عمق موهو با استفاده از داده های گرانی از روش های متعددی از جمله بات، اولیبر، پارکر-اولدنبورگ، استفاده می شود. یکی از کارآمدترین روش های وارون سازی برای تعیین مرز موهو، الگوریتم پارکر-اولدنبورگ بهبود یافته می باشد. در این روش نتایج براساس تکرار معکوس تبدیل فوریه حاصل می شود، این ویژگی سرعت محاسبات را افزایش می دهد و در مواقعی که با تعداد زیادی داده سروکار داریم این ویژگی قابل ملاحظه است. در وارون سازی داده های ژئوفیزیکی حساسیت داده با افزایش عمق کاهش می یابد، به عبارتی وضوح و تفکیک عمقی کاهش می یابد. این نکته در روش پارکر-اولدنبورگ تا حد زیادی بر طرف شده است. در داده مصنوعی دقت این روش بررسی شده است همچنین از این الگوریتم بر روی داده واقعی در پهنه زاگرس (منطقه محلات) استفاده شده است. نتایج حاصله با مطالعات قبلی در این منطقه همخوان است.

واژه های کلیدی: عمق موهو، وارون سازی، الگوریتم پارکر-اولدنبورگ، داده گرانی.

Determining the Moho depth using Parker Oldenburg's improved method in the Zagros region

Raziye Safian Boldaji¹, Vavid Ebrahimzade Ardestani²

Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

² *Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran*

Abstract

The Moho discontinuity is the dividing line between the crust and the mantle. Several methods, including the Parker-Oldenburg, Bot, and Euler methods, are used to determine the Moho depth. The Parker-Oldenburg method's results are based on inverse iteration, which yields the Fourier transform. This algorithm's great speed, which is due to its based on the fast Fourier transform, is one of its important features. The Parker-Oldenburg method has greatly and largely resolved the issue of the decrease in sensitivity to depth that exist in inversion of geophysical data and that prevents us from having adequate resolution and precision in depth for investigations. The MATLAB program was used to apply this approach, which is based on actual data from the Mahalat area in the Zagros region. After modifications and re-gridding, the algorithm stopped after 10 iterations, and The results were in accordance with the previous investigations in this area.

Keywords: Moho depth, inversion, Parker-Oldenburg,

۱ مقدمه

اکتشافات براساس داده های میدان پتانسیل مانند گرانی سنجی در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از جمله کاربردهای روش میدان پتانسیل می توان به اکتشافات هیدروکربن، اکتشافات مواد معدنی و نیز مطالعات ناحیه ای و منطقه ای پوسته برای تعیین مرز ناپیوستگی ها اشاره کرد. در تفسیر داده های پتانسیل می توان از الگوریتم های مختلف وارون سازی استفاده کرد که با توجه به خصوصیات الگوریتم و نتیجه قابل ارائه روش مناسب وارون سازی انتخاب می شود. نتایج وارون سازی باید حداکثر شباهت را به مدل زیر سطحی واقعی داشته باشد. الگوریتم وارون سازی پارکر-اولدنبورگ

برای مطالعات منطقه‌ای پوسته (تعیین مرز موهو) روشی کارآمد است. این رابطه توسط اولدنبرگ از ترکیب با روش پارکر حاصل شده است. این روش از تبدیل فوریه سریع استفاده می‌کند بنابراین دارای سرعت بالایی می‌باشد. این الگوریتم برای مدلهایی با تعداد بسیار زیاد داده محاسبات را در حداقل زمان انجام می‌دهد.

۲ روش تحقیق

الگوریتم پارکر-اولدنبرگ^۱ در ۱۹۷۴ ارائه شد، این الگوریتم توسط اورتیز و آگروال^۲ (۲۰۰۵) برای تعیین تغییرات افقی لایه‌ها استفاده و به صورت کد متلب ارائه شد. ژائو و سان^۳ (۲۰۱۹) نشان دادند که مثبت فرض کردن جهت Z به سمت بالا در مدل‌سازی پیشرو و وارون خطا ایجاد می‌کند. آنها جهت محور Z را به سمت پایین مثبت فرض کردند سپس برنامه اورتیز و آگروال را مجدداً براساس اصلاحات انجام شده بازنویسی کردند. پارکر تبدیل فوریه آنومالی گرانی ناشی از یک لایه ناهموار و یکنواخت را به شرح زیر ارائه داد:

$$F[\Delta g] = 2\pi G\rho e^{-|\vec{k}|z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\vec{k}|^{n-1}}{n!} F[h(\vec{r})^n] \quad (1)$$

که در آن $F[\]$ عملگر تبدیل فوریه، hr ارتفاع نسبی که نشان دهنده متوسط عمق موهو است، G ثابت جهانی گرانش، k عدد موج و ρ تباین چگالی است که به صورت اختلاف چگالی بین لایه بالایی و لایه پایینی $\rho = \rho_{below} - \rho_{above}$ تعریف می‌شود. هنگامی که جهت مثبت محور Z به سمت پایین باشد تبدیل فوریه آنومالی گرانی از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$F[\Delta g] = -2\pi G\rho e^{-|\vec{k}|z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\vec{k}|^{n-1}}{n!} F[h(\vec{r})^n] \quad (2)$$

به ظاهر یک منفی به رابطه اضافه شده است، اما باید تبدیل فوریه آن براساس جهت Z جدید برای آنومالی گرانی محاسبه شود. عمق تغییر نمی‌کند. در نهایت معادله وارون برای روش بهبود یافته پارکر-اولدنبرگ به شکل زیر نوشته می‌شود (ژائو و سان؛ ۲۰۱۹).

$$F[h(\vec{r})] = -\frac{F[\Delta g]e^{|\vec{k}|z_0}}{2\pi G\rho} + \frac{|\vec{k}| F[h(\vec{r})^2]}{2!} + \frac{|\vec{k}| F[h(\vec{r})^3]}{3!} + \frac{|\vec{k}| F[h(\vec{r})^4]}{4!} - \dots \quad (3)$$

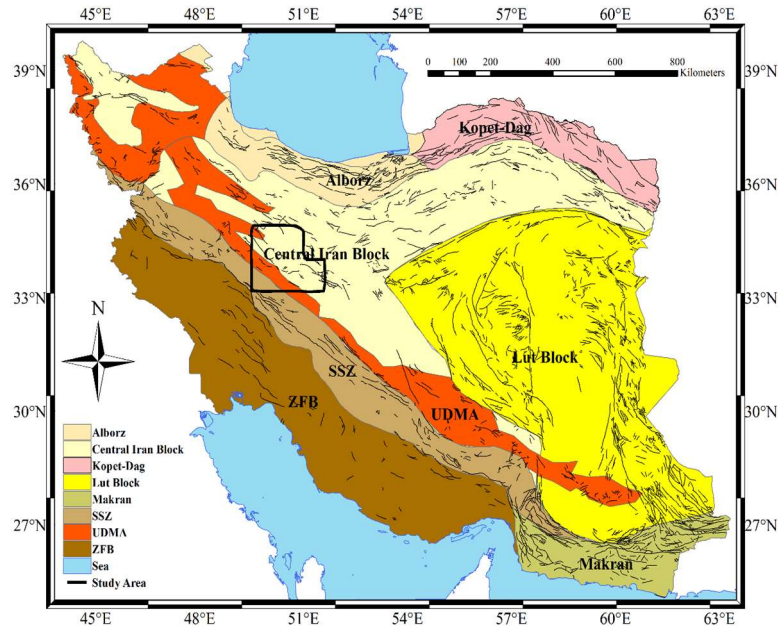
۳ مروری بر زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

فلات ایران بین دو صفحه اوراسیا و عربستان واقع شده است و به لحاظ زمین‌ساختی به نوار چین‌خورده زاگرس، البرز، کپه داغ، ایران مرکزی و دشت لوت تقسیم می‌شود. کمربند کوهزایی زاگرس در ایران قسمتی از کوه آلپ-همیالیا با وسعتی حدود ۲۰۰۰ کیلومتر در جهت شمال باختری-جنوب خاوری از شمال تا جنوب ایران گسترش یافته است. براساس مطالعات انجام شده توسط دهقانی و ماکریس (دهقانی و ماکریس، ۱۹۸۳) حداکثر ضخامت پوسته در بخش اصلی زاگرس با مقدار ۵۰-۵۵ کیلومتر و مقدار متوسط عمق موهو در ایران در حدود ۴۰ کیلومتر است. این کمربند از سه پهنه موازی و مرتبط شامل مجموعه ماگمایی ارومیه-دختر، پهنه سندرچ-سیرجان و کمربندی چین‌خورده ساده می‌باشد. منطقه محلات بخشی از زون سیرجان-سندرچ واقع شده است. ساختارهای اصلی این منطقه عبارتند از شیل، ماسه سنگ، سنگ آهک و برخی سنگ‌های آتش‌فشانی. چند گسل عمده در این منطقه شناسایی شده است که یکی از مهمترین گسل‌ها، گسل دلیجان است.

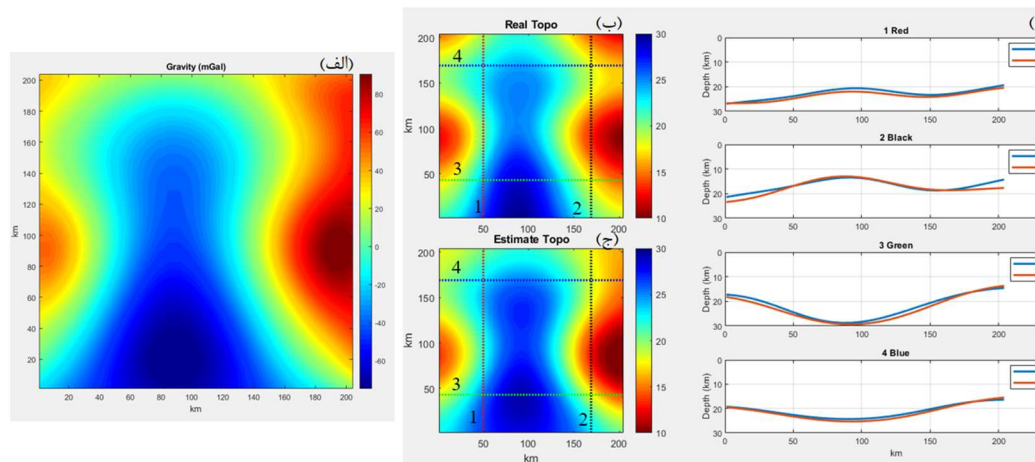
۴ داده مصنوعی

تباین چگالی مدل مصنوعی برابر ۰/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. عمق مدل از ۱۰ تا ۳۰ کیلومتر و عمق متوسط آن

۲۰ کیلومتر است. طول و عرض مدل ۲۰۴ کیلومتر و فاصله نمونه برداری ۷ کیلومتر است. اثر گرانی مدل در شکل ۲ الف نشان داده شده است. با استفاده از روش جدید عمق مدل مصنوعی برآورد شده و در شکل ۲ با عمق واقعی مدل مقایسه شده است. نتایج وارون سازی با مقادیر عمق مدل مصنوعی همخوان است.



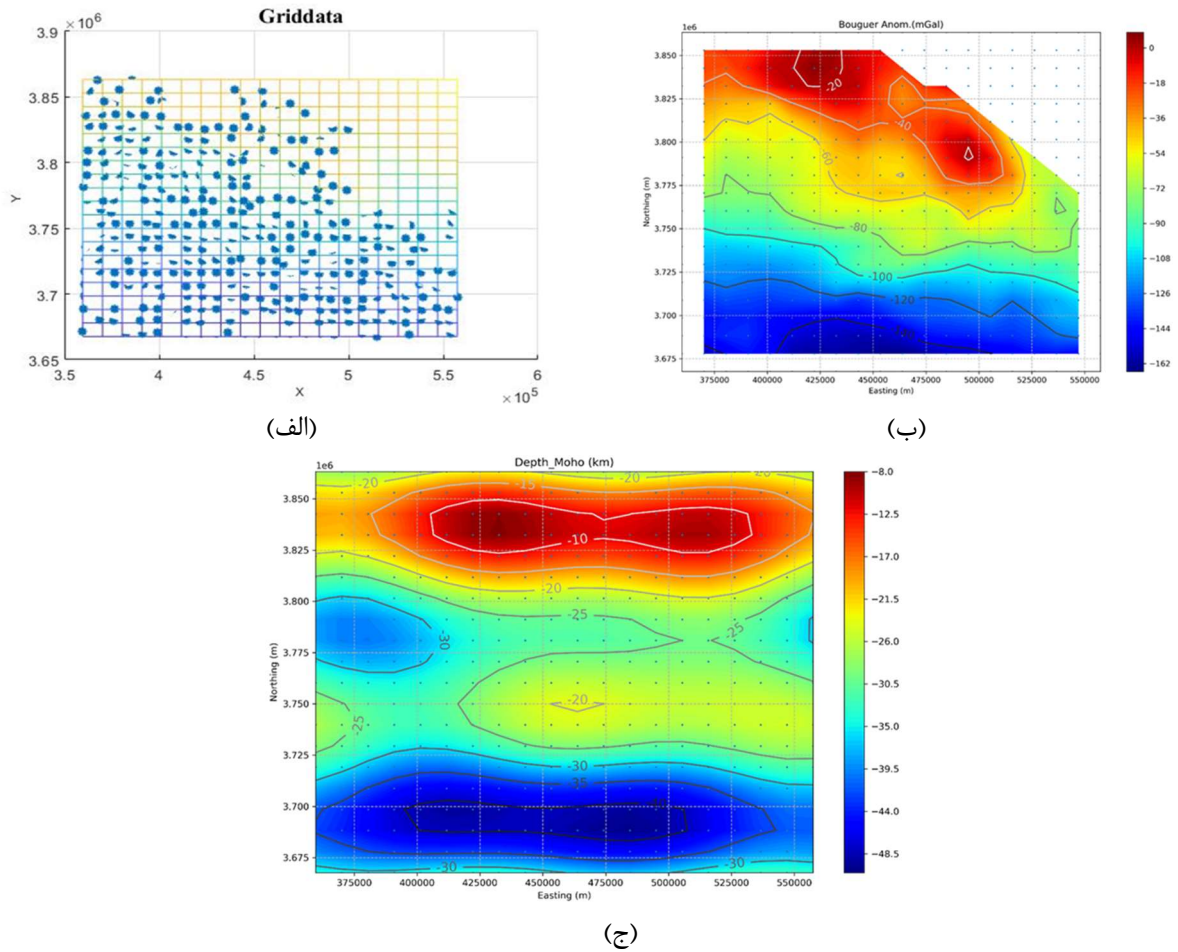
شکل ۱. نمایی از ساختار زمین شناسی ایران و منطقه مورد مطالعه.



شکل ۲. الف) نقشه گرانی مدل مصنوعی (ب) توپوگرافی مدل مصنوعی (ج) توپوگرافی تخمین زده شده با استفاده از وارون سازی (د) مقایسه بین توپوگرافی تخمین شده (ET) با توپوگرافی مدل مصنوعی (RT).

۵ داده واقعی

منطقه مورد مطالعه شامل ۳۷۰ داده گرانی است. به دلیل پراکندگی نقاط ابتدا با استفاده از کد متلب داده‌ها گردید شده است و یک ماتریس ۲۰ در ۲۰ ایجاد شد. طول داده‌ها در راستای محور X و Y ۲۰۰ کیلومتر است. برای وارون سازی تباین چگالی برابر با ۰/۳ کیلوگرم بر متر مکعب و مقدار عمق میانگین برابر با ۳۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. نتیجه نهایی بعد از ۱۰ تکرار بدست آمده است. عمق موهو در حدود ۸ تا ۴۸ کیلومتر اندازه‌گیری شد. نتایج با بررسی‌های قبلی در این منطقه و مطالعات پیشین تطابق مناسبی نشان داد. بی‌هنجاری گرانی محاسبه شده در این قسمت به‌طور تقریبی شبیه به بی‌هنجاری گرانی ورودی است.



شکل ۳. الف) نقاط داده‌های گرانی پس از گردکردن (ب) نمایش نقشه آنومالی گرانی مشاهده شده (ج) عمق موهو تخمین زده شده توسط وارون‌سازی.

منابع

- Blakely, R. J., 1996, Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications, Cambridge University Press, Cambridge.
- Dehghani, G. A., and J. Makris. "The gravity field and crustal structure of Iran." Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen (1984): 215-229.
- Gomez-Ortiz D., and Agarwal B., (2005). 3DINVER.M: a MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3D horizontal density interface by Parker -Oldenberg's algorithm, Computers & Geosciences, 31, Issue 4, pages 513-520
- Oldenberg D.W., (1974). The inversion and interpretation of gravity anomalies, Geophys, 39, NO.4, pp.526-536.
- Parker R.L., (1972). The rapid calculation of potential anomalies, Geophys. J. R. astr. Soc, 31, pp. 447-455
- Parker, R.L., 1973. The Rapid Calculation of Potential Anomalies. Geophys. J. R. 31, 447-455.
- Xiuhe Gao, Siyuan Sun .2019 .DINVER.M: A MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3D horizontal density interface by Parker-Oldenburg's algorithm.

آنالیز سرعت روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل

علیرضا صدوقی^۱، هاشم شاهسونی^۲

^۱دانشجوی دکتری، دانشگاه کاشان، sadoughmine.alireza@gmail.com

^۲اعضای هیئت علمی، دانشگاه کردستان، h.shahsavani@uok.ac.ir

چکیده

تحلیل سرعت شامل جستجو برای مقادیر شباهت، به ازای سرعت‌ها و زمان‌هایی که در یک بازه دلخواه قرار دارند می‌باشد. در روش معمول از یک عملگر نقطه میانی مشترک جهت تحلیل سرعت استفاده می‌شود. عملگر برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل که بسط داده شده عملگر نقطه میانی مشترک است، برای تخمین سرعت استفاده می‌شود. ابتدا یک مدل سرعت لایه‌های زیرسطحی در نرم‌افزار منبع باز سایزمیک یونیکس؛ تحت سیستم عامل لینوکس ساخته شده است. سپس داده‌های لرزه‌ای از مدل مربوطه با آرایش خاص برداشت شده است. در نهایت نتایج آنالیز سرعت و برانبارش به دست آمده از دو روش به خوبی نشان می‌دهد در روش پیشنهادی با تکیه بر تکنیک خاص پردازشی و تمرکز بیشتر بر روی پراش‌دهنده‌ها، توانایی تعیین محل دقیق تر بازتابنده و مقدار سرعت آن وجود دارد. این در حالی است که در روش معمول، امکان تعیین محل بازتابنده و سرعت آن به خوبی وجود ندارد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز سرعت، برانبارش، پراش، مدل سرعت.

Velocity Analysis by Model-Based Common Diffraction Surface Stack Operator

Alireza Sadooghi^{1*}, Hashem Shahsavani²

¹PhD student, University of Kashan, sadoughmine.alireza@gmail.com
²Associate Professor, University of Kurdistan, h.shahsavani@uok.ac.ir

Abstract

Velocity analysis includes searching for similarity values for velocities and times that are in a desired interval. In the usual method, a common midpoint operator is used for velocity analysis. The model-based common diffraction surface stack operator, which is an extension of the joint midpoint operator, is used to estimate the velocity. First, a velocity model of subsurface layers in Seismic Unix opensource software; It is built under the Linux operating system. Then, the seismic data of the relevant model was taken with a special arrangement. Finally, the results of analysis of velocity and discharge obtained from the two methods show well that in the proposed method, relying on special processing technique and focusing more on the diffraction emitters, there is the ability to determine the exact location of the reflector and the value of its velocity. has it. This is while in the usual method, it isn't possible to determine the location of the reflector and its velocity well.

Keywords: Velocity analysis, discharge, diffraction, velocity model.

۱ مقدمه

به تصویر کشیدن جزئیات بیشتر ساختارهای زیرسطحی، هدف تحقیقات در پژوهشگاه‌های دانشگاهی و صنعت نفت و گاز است که در نهایت به مفسر کمک می‌کند تا موقعیت کاوش و استخراج نفت و گاز را با تخمین دقیق‌تری تعیین کرد. برانبارش نقطه میانی مشترک، به خاطر توانایی آن در جداسازی سیگنال از نوفه‌هایی که دارای فرکانس یکسان هستند؛ مهم‌ترین مرحله در پردازش داده است که توسط ماین^۱ در سال ۱۹۶۲ مطرح شد (ماین، ۱۹۶۲). در ادامه به منظور حذف تأخیر زمان رسید امواج و حذف اثر دورافت، از تصحیح برونراند نرمال استفاده شد. این تصحیح، در صورتی که بازتابنده‌ها شیب‌دار بوده و یا دارای شیب‌های مخالف باشند به خوبی عمل نکرده و پردازش صحیحی صورت نمی‌پذیرد، بنابراین برای رفع این مشکل از یک مرحله پردازشی دیگری به نام تصحیح برونراند شیب^۲ استفاده می‌شود. ایلماز^۳ در سال ۱۹۸۰، تصحیح برونراند شیب را برای غلبه بر مسئله‌ی شیب‌های متداخل پیشنهاد کرد (ایلماز، ۱۹۸۰). با این وجود باز هم در نواحی که تغییرات جانبی شدید سرعت وجود دارد، اعمال تصحیح برونراند شیب قادر به حل مسئله تداخل شیب‌ها نخواهد بود. رابطه بین روش آنالیز سرعت برانبارش و روش سطح بازتاب مشترک به وسیله هرتوک^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۷ تشریح گردیده است (هرتوک و همکاران، ۲۰۰۷). در چنین حالتی در نظر گرفتن فقط یک عملگر برانبارش برای هر نمونه از مقطع دورافت صفر به منظور شبیه‌سازی این مقطع که شامل تمامی حوادث لرزه‌ای، بازتابنده‌ها و منحنی‌های پراش باشد دیگر کافی نیست. برای در نظر گرفتن چنین تداخل شیب‌هایی، پیشنهاد شد تا به جای یک عملگر، تعداد محدودی عملگر به منظور برانبارش برای یک نمونه از مقطع دورافت صفر در نظر گرفته شود (سلیمانی منفرد، ۱۳۸۸ و مان^۵، ۲۰۰۱ و مان^۶، ۲۰۰۲). مشکل بزرگ روش پیشنهاد شده در نداشتن یک معیار برای مشخص کردن نقاطی که دارای تداخل شیب می‌باشند و همچنین تعیین تعداد حوادث لرزه‌ای که در یک نمونه از مقطع دورافت صفر شرکت داشته‌اند می‌باشد. برای به‌دست آوردن مقطع برانبارش شده‌ای که شامل تمامی حوادث لرزه‌ای تداخل شده در یکدیگر باشد، سلیمانی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ با ترکیب مفهوم روش سطح برانبارش بازتاب مشترک و تصحیح برونراند شیب (هل^۶، ۱۹۹۱)، به جای در نظر گرفتن فقط یک عملگر و یا تعداد محدودی عملگر برانبارش، بازه پیوسته‌ای از شیب‌ها را به منظور برانبارش برای هر نمونه از مقطع دورافت صفر در نظر گرفتند (سلیمانی^۷ و همکاران، ۲۰۰۹). آن‌ها عملگر برانبارش سطح بازتاب مشترک را به منظور آشکارسازی بیشتر هذلولی‌های پراش، تبدیل به عملگر برانبارش سطح پراش مشترک که در ارتباط با یک نقطه پراش عمقی است، استفاده نمودند (سلیمانی منفرد، ۱۳۸۸). روش برانبارش سطح پراش مشترک به صورت موفقیت‌آمیزی بر روی داده‌های زمینی پیاده‌سازی شده است (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۲). به دلیل زمان‌بر بودن، روش را تبدیل به یک روش آزمایشگاهی و پژوهشی کرده است. به منظور کاربردی نمودن روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده، روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل با تکیه بر تکنیک دنبال کردن پرتو و تمرکز بر روی پراش‌دهنده‌ها معرفی شده (شاهسونی، ۲۰۱۱) و بر روی داده مصنوعی سیگزیبی توای (Sigsbee2a) (پفان هولز^۸، ۲۰۰۱) و داده زمینی در کشور آلمان (شاهسونی و همکاران، ۲۰۱۱) به صورت بسیار موفقیت‌آمیزی پیاده‌سازی گردیده است.

۲ بحث و روش

آنالیز سرعت با استفاده از روش معمول نقطه میانی مشترک و روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل بر روی داده‌های مصنوعی انجام شده است. قبل از مقایسه طیف‌های سرعت به‌دست آمده از دو روش، توانایی و صحت عملکرد روش پیشنهادی در آشکارسازی بازتابنده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این کار مدل سرعتی با مشخصات

¹ Mayne

² Dip Move Out (DMO)

³ Yilmaz

⁴ Hertweck

⁵ Mann

⁶ Hale

⁷ Soleimani

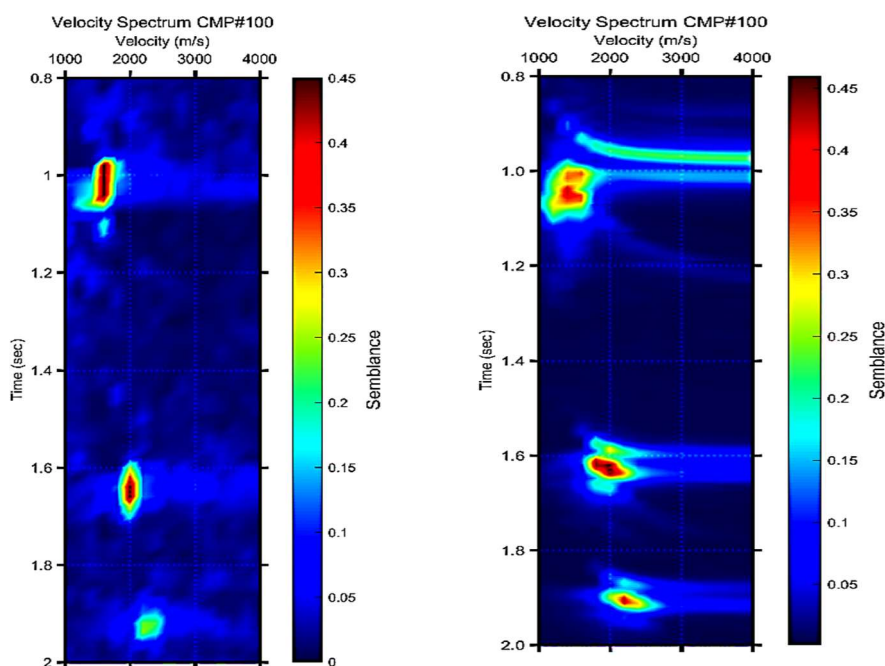
⁸ Pfaffenholz

خاص و تغییرات سرعت، در نظر گرفته شده است. در ادامه با توجه به مشخصات برداشت داده از روی مدل مدنظر برای داده‌های مصنوعی، روش پیشنهادی بر روی این داده‌ها پیاده‌سازی شده است. با توجه به قابلیت‌های روش پیشنهادی، پس از برداشت داده از مدل تهیه شده به شکل مصنوعی، توانایی روش پیشنهادی در عملکرد یا رد عملکرد روش مورد ارزیابی قرار گرفته است.

جدول ۱: متغیرهای به کار برده شده در برداشت لرزه‌ای داده‌های مصنوعی

| واحد | فاصله | پارامتر |
|-------|-------|---------------------------------------|
| متر | 50 | فاصله بین انفجارها |
| متر | 50 | فاصله بین ژئوفون‌ها |
| تعداد | 282 | تعداد انفجارها |
| تعداد | 60 | تعداد ژئوفون‌ها در هر برداشت |
| تعداد | 33840 | تعداد کل ردهای برداشت شده |
| تعداد | 680 | تعداد گروه‌های نقطه میانی مشترک |
| متر | 25 | فاصله گروه‌های نقطه میانی مشترک از هم |
| متر | 2975 | مختصات اولین انفجار |
| متر | 17025 | مختصات آخرین انفجار |
| متر | 0/0 | مختصات اولین ژئوفون |
| متر | 20000 | مختصات آخرین ژئوفون |

روش پیشنهادی بر روی یک خط از داده‌های لرزه‌ای دو بعدی که قبلاً به روش نقطه میانی مشترک پردازش شده‌اند، پیاده‌سازی شده است تا امکان مقایسه سرعت‌های برانبارش به دست آمده امکان پذیر باشد. شکل زیر طیف سرعت در روش پیشنهادی برای گروه نقطه میانی شماره ۱۰۰ را نشان می‌دهد که دارای ۵۰ عدد لرزه‌نگاشت است.



شکل ۱: الف) مقطع طیف سرعت حاصل از روش پیشنهادی، ب) مقطع طیف سرعت حاصل از روش معمول.

مطابق شکل طیف سرعت به دست آمده از روش پیشنهادی دارای زمینه نوفه بسیار پایین تری نسبت به طیف سرعت به دست آمده از روش معمول است. هر چند بازتابنده اول در روش پیشنهادی به دلیل بزرگ تر بودن عملگر برانبارش، کشیدگی پیدا کرده و دارای میزان همدوسی کمتری نسبت به روش معمول است اما با افزایش زمان، بازتابنده های عمیق تر دارای همدوسی بیشتری هستند. به عبارت دیگر روش پیشنهادی می تواند بازتابنده های عمقی را بهتر از روش های معمول آشکارسازی نماید. با کاهش تعداد لرزه نگاشت ها در یک گروه نقطه میانی مشترک، توانایی های روش پیشنهادی آشکارتر می گردد. بنابراین، طیف سرعت به دست آمده از روش پیشنهادی دارای زمینه نوفه بسیار پایین تری نسبت به روش معمول است.

۳ نتیجه گیری

در واقع با معرفی ایده آنالیز سرعت با استفاده از عملگر برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل، استراتژی جدیدی در مبحث تحلیل سرعت ارائه شد. در این تحقیق آنالیز سرعت با استفاده از عملگر برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل به جای عملگر معمول نقطه میانی مشترک، پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد که استفاده از روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل جهت انجام آنالیز سرعت نسبت به روش معمول، حتی در گروه های نقطه میانی مشترک و با تعداد کم لرزه نگاشت ها قادر به تعیین محل بازتابنده و مقدار سرعت آن است. این توانایی با توجه به در نظر گرفتن لرزه نگاشت های مجاور و تعداد بیشتر لرزه نگاشت ها محقق می گردد. به همین طریق با در نظر گرفتن تعداد بیشتر لرزه نگاشت ها، نوفه موجود در طیف سرعت به دست آمده از روش پیشنهادی نسبت به روش معمول بسیار کمتر بوده که این امر در داده هایی که دارای نوفه بالایی هستند موجب تشخیص بهتر و دقیق تر محل بازتابنده و مقدار سرعت آن می گردد.

منابع

- سلیمانی منفرد، م. (۱۳۸۸). "برانبارش سطح پراش مشترک، ارائه یک روش نوین در حل مساله تداخل شیب ها"، پایان نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- سلیمانی منفرد، م.، ادیبی، ا.، شاهسونی، ه.، سکوتی، م.ر.، الف. (۱۳۹۲). تصویرسازی لرزه ای در کمربندهای رو رانده با ساختار پیچیده با نشانگرهای جنبشی میدان موج. م. ژئوفیزیک ایران، ۷(۴)، ۹۵-۱۱۶.
- Hale, D. (1991). Dip Moveout Processing. Soc. Expl. Geophys., Tulsa.
- Hertweck, T., Schleicher, J., and Mann, J. (۲۰۰۷). Data-stacking beyond CMP. The Leading Edge, 26(7): 818-827.
- Mann, J. (2001), "Common-Reflection-Surface stack and conflicting dips", In Extended abstracts, 63th EAGE Conference. Session P077.
- Mann, J. (2002), "Extensions and applications of the Common-Reflection-Surface Stack method. Logos Verlag, Berlin.
- Mayne, W. H. (1962), "Common reflection point horizontal stacking techniques", Geophysics, 27, 927-928.
- Pfaffenholz, J. (2001). Sigsbee2 synthetic subsalt data set: image quality as function of migration algorithm and velocity model error. In Workshop on velocity model independent imaging for complex media, Extended abstracts. Soc. Expl. Geophys. Session W5-5.
- Shahsavani, H., Mann, J., Piruz, I., Hubral, P. (2011), "A model-based approach to the Common-Diffraction- Surface Stack method-a synthetic case study". SBGF conference, Brazil.
- Shahsavani, H., Mann, J., Piruz, I., Hubral, P. (2011), "A model-based approach to the Common-Diffraction- Surface Stack". 75th EAGE Conference. Session P074.
- Soleimani, M., Piruz, I., Mann, J., and Hubral, P. (2009), "Solving the problem of conflicting dips in Common-Reflection-Surface stack". In Extended Abstracts, 1st Internat. Conf. & Exhib., Shiraz, Iran. Eur. Assn. Geosci. Eng.
- Yilmaz, Ö and Claerbout, J.F. (1980), "Prestack partial migration". Geophysics, 45(12), pp 1753-1759.

وارون سازی داده های مغناطیس با استفاده از روش یادگیری عمیق

مصطفی موسی پور یاسوری^۱، سیده هانی متولی عنبران^۲

^۱ موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

هوش مصنوعی جدیدترین رویکرد در وارون سازی داده های ژئوفیزیکی است که از آن در برآورد ابعاد آنومالی های توده ای و تعیین عمق و هندسه سنگ بستر حوضه های رسوبی استفاده می شود. در این روش ارتباط بین فضای داده و مدل با استفاده از الگوریتم های یادگیری عمیق تعیین می شود. برای این منظور بعد از طراحی مدل یادگیری، این مدل را آموزش می دهند. برای آموزش مدل به تعداد زیادی داده مصنوعی نیاز است. سرانجام از مدل آموزش دیده شده برای پیش بینی داده واقعی استفاده می شود. در این پژوهش از روش یادگیری عمیق (deep neural network) برای وارون سازی داده های مغناطیس استفاده شده است. برای آموزش شبکه ۲۰۰ هزار مدل مصنوعی تولید شد. پس از آموزش مدل DNN از آن برای پیش بینی عمق سنگ بستر یک پروفیل در داده بیشاپ استفاده شد که نتایج آن قابل قبول بوده است همچنین از این مدل برای پیش بینی عمق حوزه رسوبی واقع در حوزه ایران مرکزی استفاده شده که نتایج با تفسیر لرزه ای همخوان بوده است.

واژه های کلیدی: هوش مصنوعی، وارون سازی داده های مغناطیس، یادگیری عمیق، تعیین عمق سنگ بستر.

Magnetic inversion using deep neural network

Moustafa Mousapour Yasoori¹, Seyed-hani Motavalli-anbaran²

¹ Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

² Associate Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Artificial intelligent is the latest approach to geophysical data inversion which is used to estimate the size of anomaly and determine the depth and geometry of basement. In this method, the relationship between the data and model space is determined by deep learning algorithms. To this end, the learning network model is first designed and then trained. It should be noted that, a large amount of synthetic data is needed to train the model. In the end, the trained model is used to predict the real data. In this way, the deep neural network method was used to the inversion of magnetic data. For the sake of the deep neural network (DNN) training, 200,000 synthetic data were produced and then the DNN model was used to predict the depth of basement on a magnetic data profile in the Bishop area. Meantime, the result was acceptable. To round of the discussion in this article, the DNN model was used to predict the depth of sedimentary basin in the Central Iran, which the results are correlated with the seismic interpretation.

Keywords: Artificial intelligence, magnetic inversion, deep neural network, basement depth estimation.

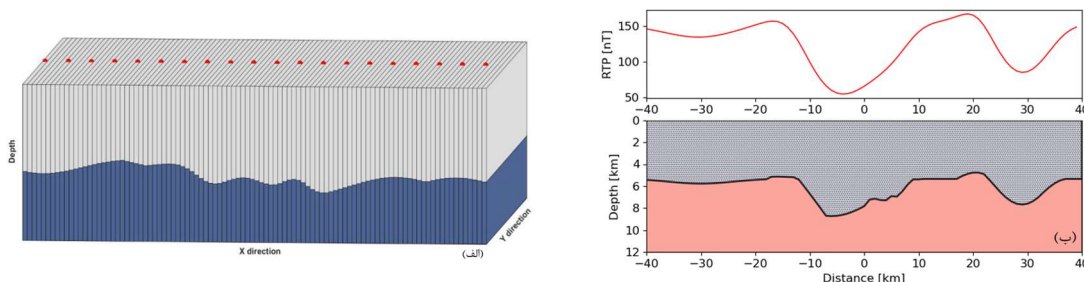
۱ مقدمه

روش های وارون سازی را می توان به دو دسته خطی و غیر خطی تقسیم کرد. الگوریتم های متنوعی در دهه های گذشته مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. از الگوریتم های کلاسیک بر پایه کمینه سازی تابع هدف با استفاده از مشتقات و سپس الگوریتم های بهینه سازی تصادفی با راه حل های تصادفی و عمومی مانند الگوریتم ژنتیک، الگوریتم کلونی مورچه و الگوریتم PSO^۱ و ... برای به حداقل رساندن یک تابع هدف استفاده شد. جدیدترین رویکرد در این حوزه، استفاده از هوش مصنوعی در وارون سازی داده های ژئوفیزیک می باشد که تاکنون چندین استراتژی برای وارون سازی با استفاده از

یادگیری ماشین توسعه داده شده است. وو و همکاران^۲ (۲۰۲۳) از یادگیری ماشین برای بهبود وارون‌سازی گرانی استفاده کرده‌اند. آنها یادگیری ماشین را برای افزایش وضوح عمقی و انتخاب پارامترهای وارون‌سازی به کار برده‌اند. این روش بر روی آنومالی توده‌ای استفاده شده است. ویتال و همکاران^۳ (۲۰۲۳) از یادگیری ماشین برای تعیین عمق حوضه رسوبی در داده‌های میدان پتاسیل بهره برده‌اند. هو و همکاران^۴ (۲۰۲۱) و باقری‌آشنا و همکاران (۲۰۲۳) از روش یادگیری عمیق (DNN^۵) برای وارون‌سازی غیر خطی داده‌های مغناطیس استفاده کرده‌اند. DNN یک تکنیک هوش مصنوعی است که ارتباط بین لایه ورودی و خروجی را به صورت غیر خطی برقرار می‌کند. روش هو و همکاران (۲۰۲۱) برای تعیین حدود آنومالی توده‌ای و روش باقری‌آشنا و همکاران (۲۰۲۳) برای تعیین عمق حوضه رسوبی بوده است. در این پژوهش از روش باقری‌آشنا و همکاران (۲۰۲۳) استفاده می‌شود. این روش ابتدا بر روی مدل مصنوعی داده بیشاپ ارزیابی و سپس برای تعیین عمق حوضه رسوبی در در بخشی از ایران مرکزی (تاق‌دیس سراج) به کار برده شده است.

۲ روش تحقیق

در وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی، با استفاده از داده مشاهده‌ای، پارامترهای فیزیکی و ساختارهای زیر سطحی مدل می‌شوند. رابطه بین مدل و داده به صورت $d=Gm$ نوشته می‌شود. که در آن d داده مشاهده‌ای، m پارامترهای مدل و G نگاشتی است که فضای مدل را با فضای داده مرتبط می‌کند. پارامترهای مدل با استفاده از $m=G^{-1}d$ بدست می‌آید. در وارون‌سازی با استفاده از یادگیری عمیق فرض می‌شود که مدل زیر سطحی m_1, m_2, \dots, m_p و داده ژئوفیزیکی متناظر با آن d_1, d_2, \dots, d_p در دسترس است. بنابراین به تابع G نیاز است تا ارتباط بین فضای مدل و داده را برقرار کند. این تابع معادل تخمین پارامترهای مدل DNN است که در اینجا با G_{dnn} نشان داده می‌شود. پارامترهای مدل با استفاده از $m=G_{dnn}d$ بدست می‌آید. معماری مدل DNN به صورت پیشخور پرسپترون است که ارتباط بین لایه ورودی d با لایه خروجی m را با استفاده از پارامترهایی برقرار می‌کند. برای بدست آوردن پارامترهای تابع G_{dnn} مدل یادگیری ماشین طراحی می‌شود که در آن تعداد لایه‌ها، تعداد گره‌ها در هر لایه، تابع فعال‌سازی، پارامترهای بهینه‌سازی و... باید تنظیم شوند. در یادگیری عمیق سه فرآیند طی می‌شود. در مرحله اول تعداد زیادی داده توپوگرافی با استفاده از جمع چند تابع گوسی به صورت تصادفی و پروفیلی تولید می‌شود، سپس داده عمقی به منشورهای قائم تبدیل شده و اثر مغناطیسی لایه‌ها با خودپذیری مغناطیسی ثابت در مرکز هر منشور با استفاده از فرمول بلکلی (۱۹۹۵) محاسبه شد (شکل ۱ الف). در مرحله دوم از این داده‌ها برای آموزش مدل DNN طراحی شده، استفاده می‌شود. در مرحله آخر از مدل آموزش دیده شده برای پیش‌بینی داده واقعی یا داده‌ای که در فرآیند آموزش شبکه وارد نشده، استفاده می‌شود.



شکل ۱. الف) مدل ۲/۵ بعدی و نقاط برداشت داده (قرمز)، برگرفته از باقری‌آشنا و همکاران (۲۰۲۳) ب) نمونه‌ای از تولید مدل مصنوعی، رسوبات با رنگ خاکستری بدون خودپذیری مغناطیسی و سنگ بستر با رنگ آجری با خودپذیری مغناطیسی ۰/۰۳.

۳ وارون‌سازی با استفاده از مدل DNN

• داده مدل بیشاپ

از این داده در فرآیند آموزش شبکه استفاده نمی‌شود. با توجه به اینکه اطلاعات عمق و داده مغناطیسی آن موجود است

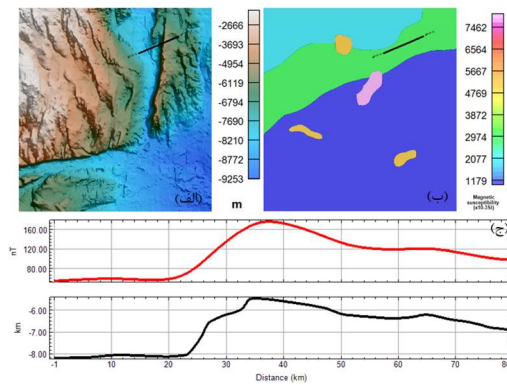
Wu et al.^۲

Vitale et al.^۳

Hu et al.^۴

Deep Neural Network^۵

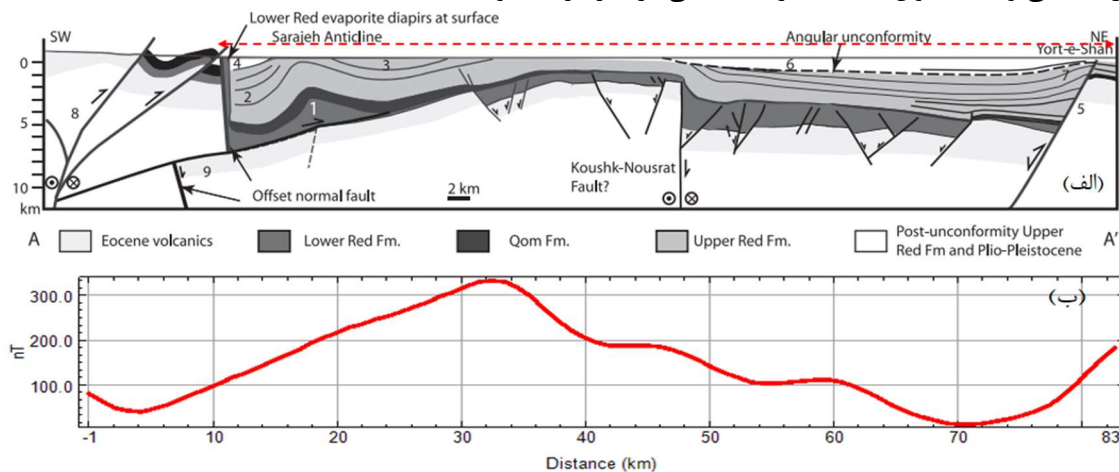
به عنوان داده ارزیابی از آن استفاده می‌شود. یک پروفیل بر روی این داده به طول ۸۰ کیلومتر در ناحیه با خودپذیری مغناطیسی ۰/۰۳ برای ارزیابی مدل DNN انتخاب شده است (شکل ۲).



شکل ۲. اطلاعات مدل بیشاپ، الف) توپوگرافی سنگ بستر، ب) خودپذیری مغناطیسی مدل، ج) داده مغناطیس برگردان به قطب و توپوگرافی بر روی پروفیل انتخاب شده (پروفیل با خط مشکی در الف و ب مشخص شده است).

• داده واقعی

حوزه ایران مرکزی توسط مورلی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری مطالعه شده است. در این مقاله یک مقطع لرزه‌ای در راستای شمال شرق-جنوب غرب تفسیر شده است که از تقادیس سراجه عبور می‌کند. داده مغناطیس این پروفیل از داده مغناطیس هوابرد ایران استخراج شده است. از نظر زمین شناسی این مقطع شامل سازند قرمز بالایی، سازند قم، سازند قرمز پائینی و لایه ولکانیکی ائوسن است که تنها لایه ائوسن خاصیت مغناطیسی دارد. لذا عمق بالایی این لایه می‌تواند به عنوان سنگ بستر مغناطیسی در نظر گرفته شود.



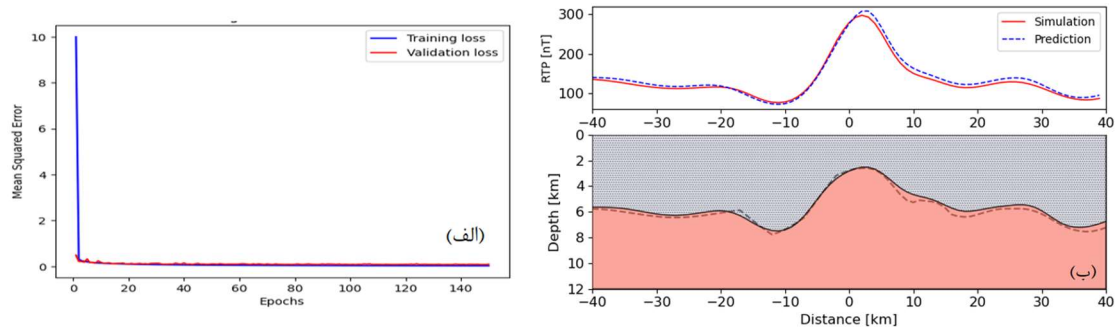
شکل ۳. الف) مقطع عمقی تفسیر شده در مقاله مورلی و همکاران (۲۰۱۳) خط چین قرمز محدوده داده مغناطیس است، ب) داده مغناطیس بر روی این پروفیل (استخراج شده از داده مغناطیس هوابرد ایران).

• ساخت مجموعه داده

با توجه به داده‌های مدل بیشاپ و داده واقعی، ۲۰۰ هزار مدل مصنوعی با میل مغناطیسی صفر درجه، انحراف مغناطیسی ۹۰ درجه و خودپذیری مغناطیسی ۰/۰۳ در واحد SI ساخته شد. این داده‌ها برای آموزش شبکه استفاده می‌شود. عمق مدل تولید شده از ۱ تا ۹ کیلومتر است.

• ساخت مدل DNN

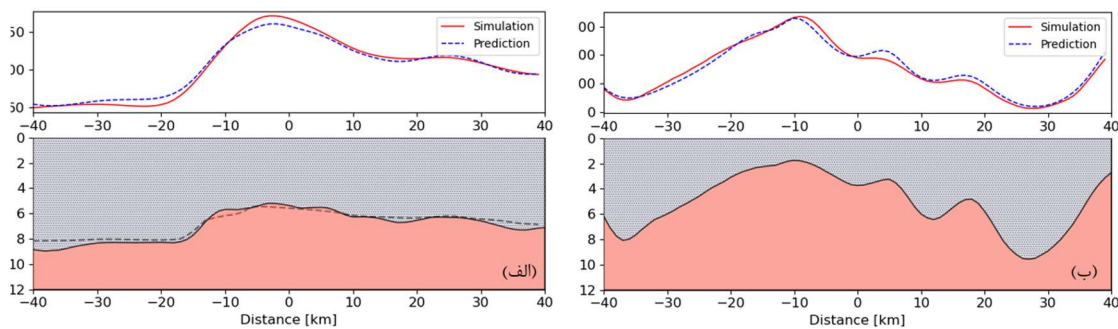
داده‌های تولید شده برای پیدا کردن نگاشت غیر خطی بین داده و مدل به شبکه وارد شد. شبکه با ۷ لایه پنهان طراحی شده که هر لایه آن شامل ۱۰۰۰ گره است. همچنین شبکه با ۱۵۰ دوره (Epochs) آموزش دیده شد. از ۱۰ درصد داده برای اعتبارسنجی (Validation) استفاده شده است. دقت آموزش شبکه و اعتبارسنجی آن در شکل ۴ الف آمده است. برای آزمایش مدل DNN از داده‌ای که در آموزش و اعتبارسنجی وارد نشده برای پیش‌بینی عمق مدل استفاده شده است (شکل ۴ ب). عمق مدل مصنوعی با دقت خوبی توسط مدل DNN برآورد شده است.



شکل ۴. الف) دقت آموزش و اعتبار سنجی داده‌ها برای دوره‌ها (Epochs) ب) نمونه‌ای از نتایج پیش‌بینی مدل DNN، منحنی قرمز اثر مغناطیسی مدل مصنوعی و منحنی آبی (خط چین) اثر مغناطیس مدل پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد، خط چین مشکی عمق مدل مصنوعی و رنگ آجری نیز عمق پیش‌بینی شده است.

• نتایج وارون‌سازی داده بیشاپ و داده واقعی

با استفاده از مدل DNN آموزش دیده شده، عمق داده بیشاپ پیش‌بینی شده است (شکل ۵ الف). نتایج پیش‌بینی شده با عمق مدل مصنوعی با خطای کمی منطبق است. عمق پیش‌بینی شده داده واقعی در شکل ۵ ب نشان داده شده است. نتایج آن با نتایج تفسیر عمقی لرزه کاملاً منطبق نیست اما با توجه به جنس و کیفیت داده می‌توان گفت عمق پیش‌بینی شده همخوانی مناسبی با تفسیر لرزه‌ای آن دارد.



شکل ۵. الف) نتایج پیش‌بینی عمق مدل با استفاده از DNN، ب) پروفیل داده بیشاپ (ب) پروفیل داده واقعی، منحنی قرمز اثر مغناطیسی داده، منحنی آبی (خط چین) اثر مغناطیس مدل پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد، خط چین مشکی عمق مدل مصنوعی (در شکل الف) و رنگ آجری نیز عمق پیش‌بینی شده است.

منابع

- Ashena, Z., Kabirzadeh, H., Kim, J.W., Wang, X. and Ali, M., 2023. A Novel 2.5 D Deep Network Inversion of Gravity Anomalies to Estimate Basement Topography. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 26(04), pp.1484-1497.
- Blakely, R. J. 1995. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511549816>.
- Hu, Z., Liu, S., Hu, X., Fu, L., Qu, J., Wang, H. and Chen, Q., 2021. Inversion of magnetic data using deep neural networks. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 311, p.106653.
- Morley, C.K., Waples, D.W., Boonyasaknanon, P., Julapour, A. and Loviruchsuttee, P., 2013. The origin of separate oil and gas accumulations in adjacent anticlines in Central Iran. *Marine and petroleum geology*, 44, pp.96-111.
- Vitale, A., Gabriellini, G. and Fedi, M., 2023. Deep learning to estimate the basement depth by gravity data using a feedforward neural network. *Geophysics*, 88(3), pp.G95-G103.
- Wu, G., Wei, Y., Dong, S., Zhang, T., Yang, C., Qin, L. and Guan, Q., 2023. Improved Gravity Inversion Method Based on Deep Learning with Physical Constraint and Its Application to the Airborne Gravity Data in East Antarctica. *Remote Sensing*, 15(20), p.4933.

Sub-pixel channel boundary delineation based on partial area effect

Masoume Lotfi¹, Abdolrahim Javaherian^{1,2}, Saeid Rezakhah Varnousfaderani³,
Hamid Reza Amindavar⁴

¹Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran,

²Formerly Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³Faculty of Mathematics and Computer Science, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

⁴Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Email: javaherian@aut.ac.ir

ABSTRACT

Considering buried channels as prevalent stratigraphic traps is indispensable in petroleum exploration and drilling. This article presents a novel seismic attribute that employs the partial area effect strategy to detect individual discontinuities, especially channel boundaries. We tested the recommended method on a simulated time slice with meandering and branching sinusoidal channels of different sinuosity and thickness and on field data sets from southwest Iran. We evaluated the effectiveness of the partial area effect algorithm against well-known edge detectors and seismic attributes. The results revealed that the designated algorithm could produce a more accurate map of channel boundaries with reduced influence from random noise. Quantitative validation tests, including localization error, precision, sensitivity, and error rate, likewise confirmed the superiority of the proposed sub-pixel procedure.

Keywords: Channel boundaries, Classic edge detectors, Seismic attributes, Partial area effect, Sub-pixel resolution

INTRODUCTION

Accurate characterization of underlying abnormalities, like channels, is necessary for seismic interpretation. Buried channels, primarily composed of permeable and porous sediments surrounded by impermeable rock units, are geomorphic features with the potential for hydrocarbon reserves or drilling hazards (Karbalaali et al., 2018). Channels in perpendicular seismic profiles are hard to distinguish due to their U-shaped appearances (Qin et al., 2017). The extreme contrast in high-frequency components and significant changes in pixel intensity values allow for precise identification of channel boundaries in horizontal slices (Boustani et al., 2020). As a result, image processing techniques should be able to delineate seismic discontinuities, like channel boundaries, more conveniently. Many attributes and pixel-level edge measures have been employed to facilitate automatic and semi-automatic seismic interpretation, especially channel boundary identification (Chopra et al., 2011; Qi et al., 2016; Boustani et al., 2020). Seismic attributes are primarily used to determine the discontinuities at the pixel level. A single pixel in seismic data sets intersects a large area beneath the surface of the earth; hence, edge delineation at the sub-pixel level will yield more helpful information. The necessity for more accurate edge localization in industrial applications has prompted researchers to explore the concept of sub-pixel edge delineation. The partial area effect (PAE) was first introduced by Trujillo-Pino et al. (2013) to delineate edges in digital images with sub-pixel resolution. Lotfi et al. (2021) proposed a unique seismic attribute according to the partial area effect concept to achieve more accurate channel boundary depictions. In this paper, we investigated the capability of the PAE algorithm with a gradient-directed window on synthetic and field seismic data sets to enhance channel boundary delineation, especially edges with critical dips.

METHODOLOGY

To optimize the performance of the PAE algorithm in the presence of unappealing features and excessive noise, edge-preserving smoothness, as a combination of diffusion and median filters, is an essential step in this context. The designed filter softens the uniformly intensity-valued pixels and sharpens the geological discontinuities. Next, the gradients of the seismic picture have to be efficiently identified using a two-dimensional mask in both the horizontal and vertical directions. The projected gradients are used to calculate the slope signs of the seismic events for each pixel. Based on the local gradient maxima, the edge nominees are identified. The direction and size of the PAE window are determined for the local maximum points. The area under the edge curve in each window is used to calculate the edge curve coefficients for the central pixel. Finally, the determined edge positions with PAE coordinates are transformed into the image coordinates. The suggested algorithm's flowchart is shown in Figure 1.

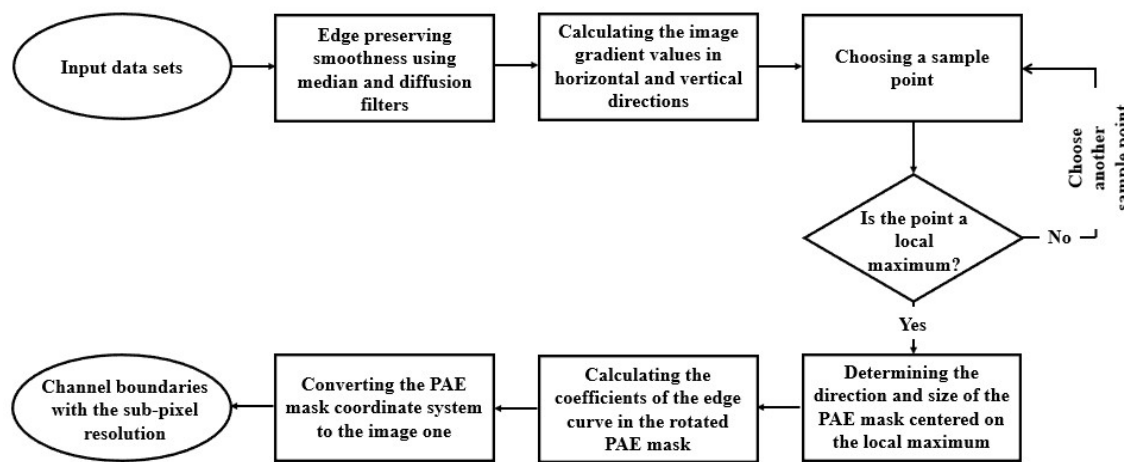


Figure 1. A flowchart showing how the PAE method is used to identify channel boundaries.

RESULTS AND DISCUSSION

It is crucial for seismic interpretation to correctly understand the borders of channels due to their importance as a reserve target or drilling hazard. The PAE edge detector was applied to field and synthetic seismic horizontal slices, covering channels of different widths and tortuosities. Finally, the PAE technique was contrasted with some seismic properties (frequency, curvature, and similarity) and traditional edge detectors (Laplacian of Gaussian (LoG), Roberts, and Sobel). With a signal-to-noise ratio of 2, Figure 2a depicts the studied synthetic horizontal slice polluted with Gaussian white noise. The produced ground truth is outlined in red. In Figures 2b–h, the capacity of the PAE method to precisely identify channel boundaries in synthetic data sets is qualitatively compared to the classic edge measures and seismic attributes. A horizontal slice from the field data sets is shown in Figure 3a, with its binary ground truth highlighted in red. The visual comparison of the proposed method and conventional pixel-resolution ones is shown in Figures 3b–h. As anticipated, the PAE edge detector lessened the effect of unwanted random noise and enhanced the result of edge detection, especially in cases with very close boundaries. Although the Sobel operator outperformed the conventional edge detectors, random noise significantly impacted its performance. Of all seismic attributes, curvature performed the best by providing maps with a higher number of valid edge points. Compared to the frequency attribute, the similarity attribute was less affected by the undesirable random noise but recorded the channels at a broader width. The 2D stacked column charts in Figure 4 demonstrate the superiority of the PAE algorithm by revealing the lowest localization error and error rate, as well as the highest precision and sensitivity.

CONCLUSIONS

The PAE method can be a valuable tool for localizing channelized events due to the high-frequency contrast at their borders. Several binary classification tests on the obtained edge maps verified the PAE method's effectiveness. The recommended approach identified channel borders in both synthetic and field seismic horizontal slices more accurately than classic edge detectors and seismic attributes.

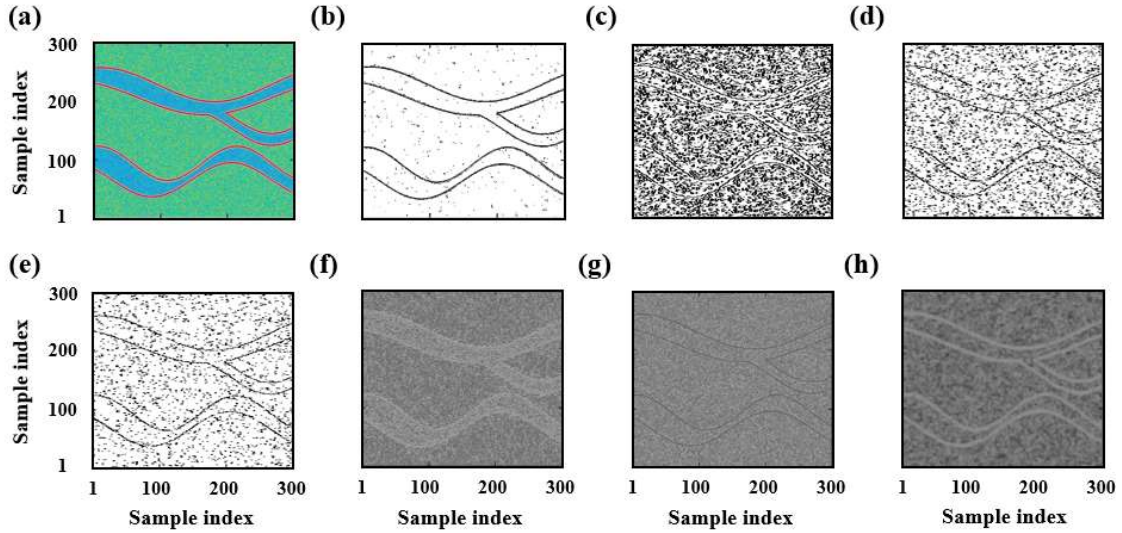


Figure 2. Implementing several edge detection algorithms and seismic attributes on the synthetic time slice: (a) The studied time slice infected by Gaussian white noise with a signal-to-noise ratio of 2. The edge maps produced from the: (b-h) PAE, LoG, Roberts, Sobel, frequency, curvature, and similarity algorithms, respectively. For quantitative evaluations, the red boundaries that were manually picked are used as the necessary ground truth.

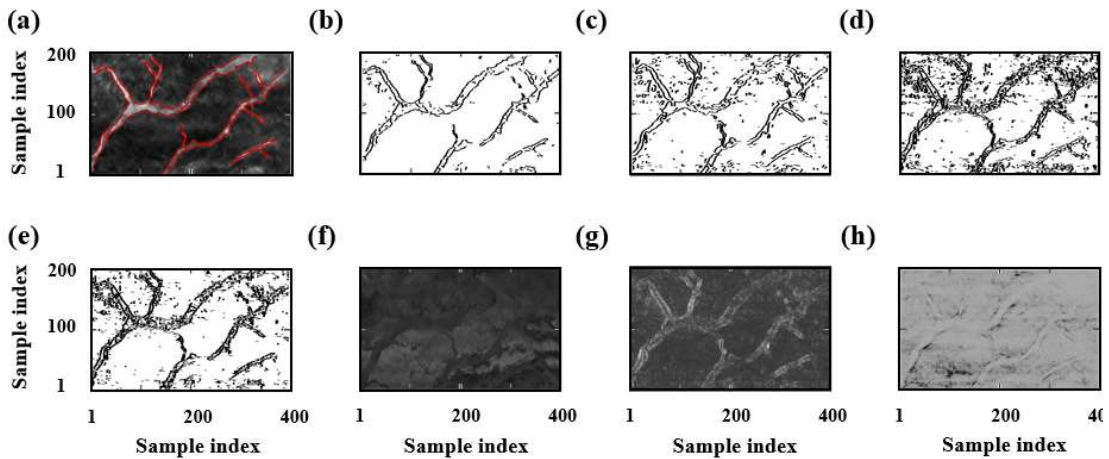


Figure 3. Implementing different edge detectors and seismic attributes on the field time slice. (a) The studied time slice from southwest Iran. The results obtained from the: (b-h) PAE, LoG, Roberts, Sobel, frequency, curvature, and similarity algorithms, respectively. The manually specified red boundaries provide the essential ground truth for quantitative assessments.

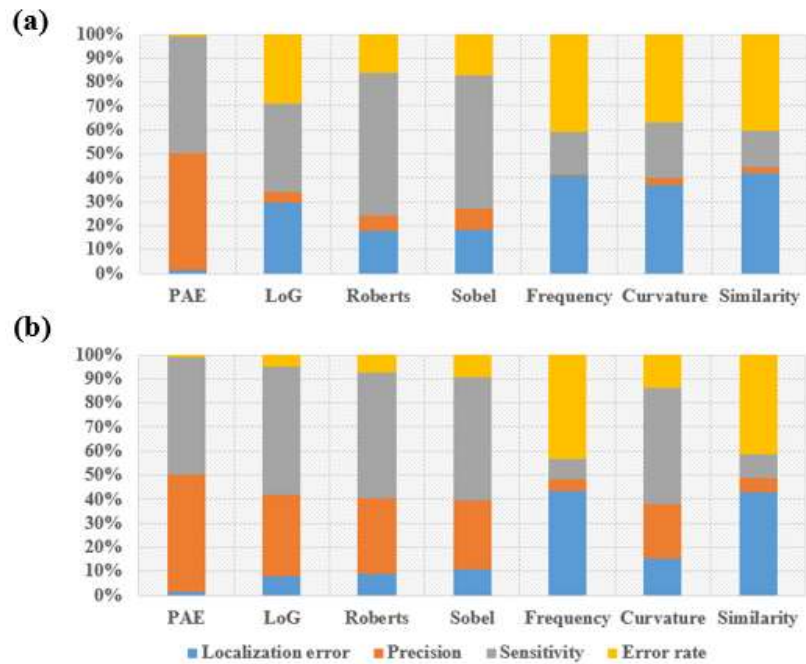


Figure 4. The quantitative comparison of the PAE and other methods performed on the (a) synthetic, and (b) field seismic time slices in 2D stacked column charts describing the localization error, precision, sensitivity, and error rate tests.

REFERENCES

- Boustani, B., Javaherian, A., Nabi-Bidhendi, M., Torabi, S., and Amindavar, H.R., 2020. Channel boundary detection using a 3D morphological filter and adaptive ellipsoidal structuring element. *Exploration Geophysics*, **51**(2), 232-247.
- Chopra, S., Misra, S., and Marfurt, K.J., 2011. Coherence and curvature attributes on preconditioned seismic data. *The Leading Edge*, **30**(4), 386-393.
- Karbalaali, H., de Groot, P., Javaherian, A., Qayyum, F., Dahlke, S., and Torabi, S., 2018. Identification of shallow geohazard channels based on discontinuity seismic attributes in the South Caspian Sea. *Geophysics*, **83**(6), B317-B322.
- Lotfi, M., Javaherian, A., Varnousfaderani, S.R., and Amindavar, H.R., 2021. Channel boundary detection using partial area effect with sub-pixel resolution. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **208**, p.109375.
- Qi, J., Lin, T., Zhao, T., Li, F., and Marfurt, K., 2016. Semi-supervised multi-attribute seismic facies analysis. *Interpretation*, **4**(1), SB91-SB106.
- Qin, Y., Alves, T.M., Constantine, J., and Gamboa, D., 2017. The role of mass wasting in the progressive development of submarine channels (Espírito Santo Basin, SE Brazil). *Journal of Sedimentary Research*, **87**(5), 500-516.
- Trujillo-Pino, A., Krissian, K., Alemán-Flores, M., and Santana-Cedrés, D., 2013. Accurate subpixel edge location based on partial area effect. *Image and Vision Computing*, **31**(1), 72-90.

استفاده از ماشین بردار پشتیبان و یادگیری عمیق در دسته بندی رخساره ها براساس نشانگرهای وارون سازی پیش از برانبارش

مهران میرزاوندی^۱، عبدالرحیم جواهریان^۲، محمدرضا صابری^۳، هادی مهدوی بصیر^۴

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی نفت-اکتشاف، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، m.mirzavandi@aut.ac.ir

^۲ استادیار، گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، javaherian@aut.ac.ir

^۳ مشاور ارشد علمی شرکت GeoSoftware هلند، saberi.rp@gmail.com

^۴ استادیار، گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، basir.m@aut.ac.ir

برای دسته‌بندی رخساره‌ها در مقطع لرزه‌ای روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از معمول‌ترین آن‌ها استفاده از نشانگرهای وارون‌سازی پیش از برانبارش است. با استفاده از داده‌های وارون‌سازی و رخساره‌های اطراف چاه مدل ماشین بردار پشتیبان آموزش داده شد و پس از آن با استفاده از یک چاه فرآیند اعتبارسنجی انجام گرفت. در مرحله بعد روش شبکه‌های عصبی هم‌آمیختگی مورد استفاده قرار گرفت که با به کارگیری فرآیند هم‌آمیختگی دوبعدی بر روی مقطع لرزه‌ای نقشه‌های ویژگی محاسبه گردید و از طریق شبکه‌های عصبی فرآیند رگرسیون صورت گرفت. خروجی رگرسیون همان نشانگرهای استفاده شده در روش دسته‌بندی ماشین بردار پشتیبان است. سپس با ترکیب شبکه عصبی هم‌آمیختگی با یک مدل ماشین بردار پشتیبان از پیش آموزش داده شده یک مدل ترکیبی جدید برای دسته‌بندی رخساره‌ها ساخته شد. دقت فرآیند اعتبارسنجی در هر دو مدل ۹۳ درصد برآورد گردید.

واژه‌های کلیدی: نشانگرهای وارون‌سازی، رخساره، ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی هم‌آمیختگی، مدل ترکیبی.

Elastic impedance based facies classification using support vector machine and deep learning

Mehran Mirzavandi¹, Abdolrahim Javaherian², Mohammad Reza Saberi³, Hadi Mahdavi Basir⁴

¹M.Sc. in Petroleum Engineering-Exploration, Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology

²Professor, Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

³Senior research advisor, GeoSoftware, The Hague Area, 2591 XR, Den Haag, The Netherland

⁴Assistant Professor, Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

The classification of facies in seismic sections involves various methods; one of the most common is the use of pre-stack inversion attributes. A support vector machine model was trained using the inversion attribute and well log facies, followed by validation using a well process. In the next stage, a convolutional neural network was employed, where 2D convolution processing was used to calculate feature maps on the seismic section, and the regression process was carried out through neural networks. The regression output was the same attributes mentioned in the support vector machine classification method. Subsequently, by combining the convolutional neural network with a pre-trained support vector machine model, a new hybrid model for facies classification was created. The validation accuracy of both models in classification was estimated to be 93 percent.

Keywords: Inversion attributes, Facies, Support vector machine, Convolutional neural network, Hybrid model.

۱ مقدمه

یک واحد رخساره لرزه‌ای می‌تواند به‌عنوان یک واحد رسوبی تعریف شود که خصوصیات لرزه‌ای آن با واحدهای مجاور آن متفاوت است. طبقه‌بندی رخساره‌های لرزه‌ای مرحله مهمی در بررسی و شناخت سنگ مخزن و توسعه میدان نفتی است. مقاومت کشسان^۱ (EI) در سال ۱۹۹۰ برای کمک در اکتشافات و توسعه در اقیانوس اطلس در غرب جزیره شتلند^۲ به‌کار گرفته شد (کنولی، ۱۹۹۹). استفاده از مقاومت کشسان باعث موثر واقع‌شدن کارکردن هم‌زمان با داده‌های وارون‌سازی^۳ شده و داده‌های دورافت دور می‌شود به وارون‌سازی داده‌های با دورافت غیر صفر کمک می‌کند زیرا این پارامتر یک مجموعه نمودار سرعت موج برشی، سرعت موج فشارشی و چگالی (ρ ، β ، α) را فراهم می‌کند که با ضریب بازتاب زاویه با دورافت بالا سازگار است.

کاربردهای یادگیری ماشین^۴ (ML) صنایع مبتنی بر داده از خدمات مالی تا علوم زیستی به‌طور فزاینده‌ای در حال گسترش هستند. محیط غنی از داده صنعت نفت و گاز نیز به‌عنوان یک راه‌گشا برای این فناوری در حال پیشرفت است. کاهش خطرات مربوط به فرصت‌های بررسی و توسعه، با استفاده از تفسیر کمی مبتنی بر تغییر دامنه در مقابل دورافت (AVO)، به‌عنوان یک مرحله حیاتی در توسعه منابع هیدروکربوری، در نظر گرفته می‌شود. مطالعات گذشته، به‌طور خاص بر روی AVO تمرکز داشته‌اند و اغلب از روش‌های ماشین‌بردار پشتیبان^۵ (SVM) استفاده کرده‌اند. کوزما (۲۰۰۳)، لی و یو (۲۰۱۵) مسئله رگرسیون تغییرات دامنه در مقابل دورافت^۶ (AVO) با استفاده از چاه‌های مصنوعی را ارائه دادند، در حالی که لی و کاستاگنا (۲۰۰۴) برای دسته‌بندی از SVM استفاده کرده‌اند (نشیتسوجی و اکسلی، ۲۰۱۹). با توسعه سریع در محاسبات واحد پردازش گرافیکی^۷ (GPU) و موفقیت‌های کسب شده در حوزه بینایی کامپیوتر^۸، روش‌های یادگیری عمیق که یکی از آن‌ها شبکه‌های عصبی هم‌آمیختگی^۹ (CNN) است، شروع به جذب تفسیرکنندگان لرزه‌ای در دسته‌بندی رخساره‌های لرزه‌ای با نظارت می‌کنند.

۲ روش تحقیق

به‌طور کلی داده‌های موجود در این مطالعه شامل داده‌های سرعت، نگارهای پتروفیزیکی، افق‌های لرزه‌ای سازند غار، داده‌های برانبارش جزئی می‌باشند. جهت استفاده از داده‌های پتروفیزیکی چاه در فرآیند وارون‌سازی ابتدا باید تطابق چاه با مکعب لرزه‌ای صورت پذیرد. اساس کار وارون‌سازی مقاومت کشسان تغییرات دامنه در مقابل دورافت بوده در هر زاویه نشانگر خاصی را حاصل می‌شود. نتایج وارون‌سازی پیش از برانبارش در شکل ۱ نشان داده شده است که شامل نشانگرهای حاصل ضرب پارامتر لامه در چگالی ($\lambda\rho$)، مقاومت لرزه‌ای موج برشی (Z_S)، مقامت لرزه‌ای موج تراکمی Z_p ، حاصل ضرب پارامتر سختی در چگالی ($\mu\rho$)، نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی ($\frac{V_p}{V_s}$) می‌باشد. خوشه‌بندی رخساره‌ها نیز در حیطه چاه با استفاده الگوریتم بدون نظارت K-میانگین انجام پذیرفته است که نتایج حاصل شامل ۷ رخساره بر اساس تخلخل، اشباع سیال و سنگ‌شناسی است. نتایج تفسیر در جدول ۱ نشان داده شده است. برای دسته‌بندی رخساره‌ها از دسته‌بند SVM استفاده شده که بر مبنای حداکثر حاشیه عمل می‌کند. این الگوریتم با استفاده از تعدادی ماشین‌بردار یک مرز دسته‌بندی میان دسته‌ها در نظر گرفته که حداکثر حاشیه را از هر دسته دارا باشد. دقت فرایند آزمون برای مدل SVM مقدار ۹۶ درصد برآورد شده و نیز دقت فرآیند اعتبارسنجی با استفاده از چاه A-06 نیز ۹۳ درصد بوده است. نتایج اعتبارسنجی و همچنین اعمال روش SVM بر روی مکعب داده‌های وارون‌سازی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

¹ Elastic impedance

² Shetland

³ Inversion

⁴ Machine learning

⁵ Support vector machine

⁶ Amplitude variation with offset

⁷ Graphic processing unit

⁸ Computer vision

⁹ Convolutional neural network

شبکه‌های عصبی پیچشی عموماً با اعمال عملیات ادغام^۱ و هم‌آمیخت نقشه‌های ویژگی را از تصاویر خارج کرده و آن‌ها را با حالات مختلف با یکدیگر ترکیب می‌کنند. در بسیاری از مقالات پیشنهاد شده که برای فرآیندهای رگرسیون و دسته‌بندی هم‌زمان جهت بالابردن دقت، از مدل‌های ترکیبی^۲ استفاده شود. به همین جهت در این مطالعه روش CNN به صورت ترکیبی با روش SVM که یک روش قوی برای دسته‌بندی‌های چندکلاسه بوده ترکیب شده و مدل ترکیبی CNNSVM را تشکیل می‌دهند. نتایج رگرسیون خروجی CNN که شامل ۵ نشانگر ذکر شده است برای دسته‌بندی وارد یک مدل SVM از پیش آموزش داده شده می‌گردد. در ادامه این مطالعه هدف ساخت یک مدل ترکیبی است که بتواند با استفاده از پردازش تصویر بازتاب‌های لرزه‌ای، هم وارون‌سازی انجام داده و هم رخساره‌ها را دسته‌بندی کند. برای این هدف از الگوریتم CNN برای پردازش تصویر و انجام رگرسیون جهت به دست آوردن نشانگرهای وارون‌سازی استفاده شده است. متغیر مستقل بخش CNN در مدل ترکیبی تصویر مقطع لرزه‌ای بوده که فیلترهای دوبعدی هم‌آمیخت بر روی تصاویر حرکت کرده و با ترکیب نقشه‌های ویژگی حاصل از تصویر نقشه‌های ویژگی جدیدتری ساخته و تغییرات پیکسل‌ها را در نظر می‌گیرند. مدل CNN شامل ۳ بلوک هم‌آمیخت و ادغام بیشینه برای استخراج ویژگی تصاویر، یک لایه صاف‌کننده، ۳ لایه نورون‌های کاملاً متصل و ۵ لایه خروجی می‌باشد. نتایج رگرسیون نشانگرها توسط مدل CNN در فرآیند اعتبارسنجی چاه A_06 در شکل ۴ نشان داده شده است. آن چه مشخص است تبعیت نتایج مدل CNN از روند کلی نشانگرهای حاصل از نرم افزار است. دقت فرآیند اعتبارسنجی در دسته‌بندی ۹۳ درصد برآورد شد و نتایج اعتبارسنجی در امتداد چاه A-06 در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳ نتیجه‌گیری

تلفیق نشانگرهای وارون‌سازی یکی از مهم‌ترین ابزارها در دسته‌بندی هم‌زمان رخساره‌ها براساس تخلخل، اشباع و سنگ‌شناسی می‌باشد. برای استفاده از روش‌های معمول یادگیری ماشین مانند SVM که براساس کار با داده‌های دارای ساختار عددی عمل می‌کنند باید ابتدا نشانگرهای وارون‌سازی با استفاده از نرم‌افزار از داده‌های لرزه‌ای استخراج شده و سپس با آموزش مدل، فرآیند دسته‌بندی رخساره‌ها بر اساس پارامترهای مدنظر صورت پذیرد. با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق مانند CNN می‌توان فرآیند وارون‌سازی را با بکارگیری پردازش تصاویر مقطع لرزه‌ای انجام داده و پس از آن با دسته‌بندی SVM ترکیب شده و دسته‌بندی صورت پذیرد. دقت هر دو مدل SVM و CNNSVM ۹۳ درصد برآورد گردیده است با این تفاوت در مدل ترکیبی CNNSVM تمام فرآیندها به صورت خودکار بوده و با سرعت و هزینه کمتری نسبت به روش‌های دیگر صورت می‌پذیرد.

منابع

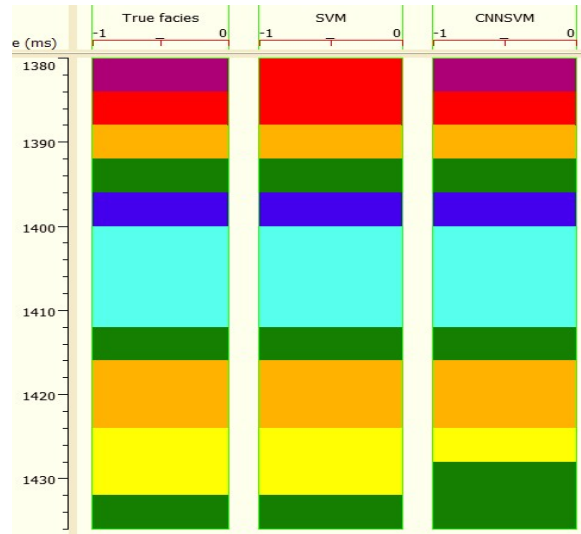
- Connolly, P. 1999. Elastic impedance. *The Leading Edge*, **18**(4), 438-452.
- Kuzma, H. A. 2003. A support vector machine for AVO interpretation. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2003* (pp. 181-184). Society of Exploration Geophysicists.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. 2015. Deep learning. *Nature*, **521**(7553), 436-444.
- Li, J., & Castagna, J. 2004. Support vector machine (SVM) pattern recognition to AVO classification. *Geophysical Research Letters*, **31**(2), 1-4.
- Nishitsuji, Y., & Exley, R. 2019. Elastic impedance based facies classification using support vector machine and deep learning. *Geophysical Prospecting*, **67**(4), 1040-105.

¹ Pooling

² Hybrid models

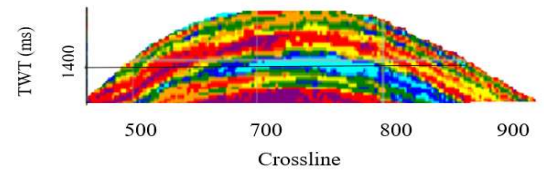
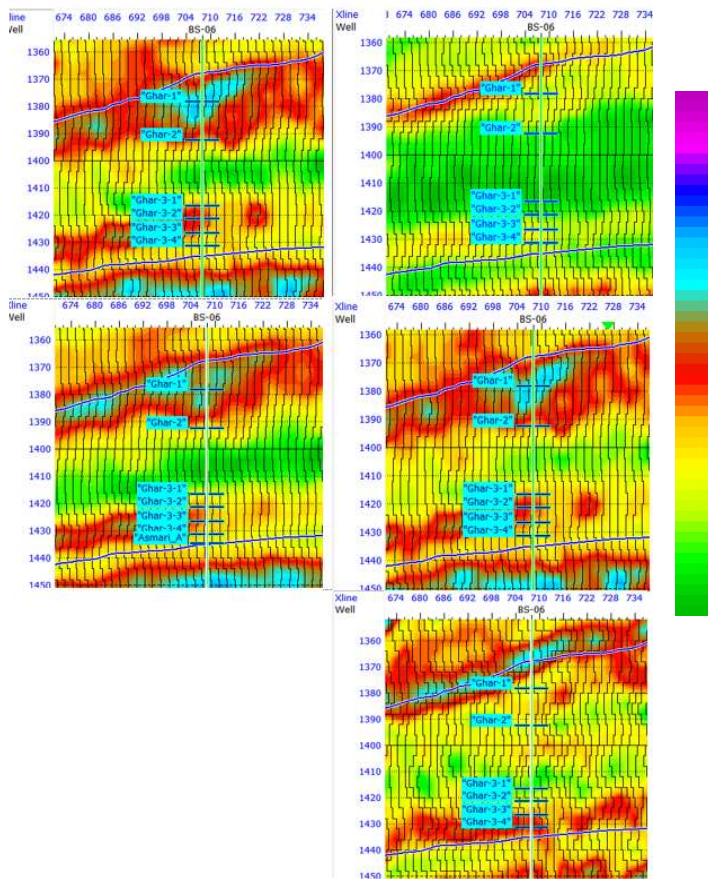
جدول ۱. تفسیر رخساره‌های حاصل با استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی.

| شماره | رنگ | نام رخساره بر اساس سنگ‌شناسی، اشباع و تخلخل |
|-------|----------|---|
| ۱ | قرمز | دولومیت اشباع از گاز متخلخل |
| ۲ | آبی | ماسه‌سنگ اشباع از گاز با تخلخل بالا |
| ۳ | سبز | ماسه‌سنگ شیلی و دولومیتی اشباع از گاز با تخلخل بالا |
| ۴ | بنفش | دولومیت شیلی اشباع از گاز با تخلخل متوسط |
| ۵ | زرد | دولومیت شیلی اشباع مخلوط آب و نفت با تخلخل متوسط |
| ۶ | سبز روشن | ماسه‌سنگ اشباع از گاز با تخلخل بسیار بالا |
| ۷ | نارنجی | دولومیت شیلی اشباع از آب و گاز با تخلخل متوسط |

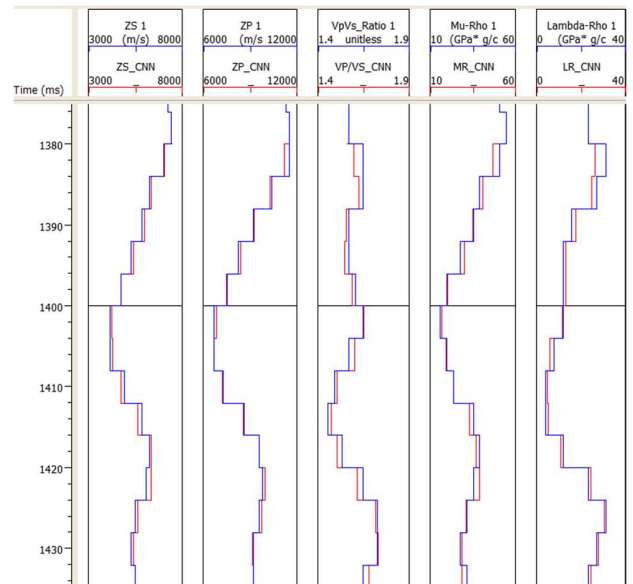


شکل ۲. نتایج دسته‌بندی اعتبارسنجی دو مدل SVM و CNNSVM حول

چاه A-06



شکل ۳. دسته‌بندی رخساره‌ها در افق غار با الگوریتم SVM.



شکل ۴. نتایج فرآیند اعتبارسنجی در وارون‌سازی مدل CNNSVM

حول، چاه A-06

شکل ۱. نشانگرهای حاصل از وارون‌سازی پیش از برآیند و پس از برآیند. (الف)

(ب) $\lambda\rho$ ((GPa)*(g/cm³)) (ج) z_s ((m/s)*(g/cm³)) (د) $\mu\rho$ ((GPa)*(g/cm³))

$$\frac{V_p}{V_s} (e) z_p ((m/s)*(g/cm^3))$$

طبقه‌بندی رخساره‌های لرزه‌ای بر اساس الگوریتم شبکه‌های عصبی در دشت گرگان، ایران

بهاره هدایت^۱، مهرداد سلیمانی منفرد^۲، لوئیس سوموزا لوسادا^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود، b.hedayat@shahrood.ut.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشگاه صنعتی شاهرود، msoleimani@shahroodut.ac.ir

^۳ استادیار، سازمان زمین‌شناسی اسپانیا، l.somoza@igme.es

چکیده

امروزه استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در اکتشاف منابع هیدروکربوری، به منظور مرتفع کردن نیاز انرژی دنیا، امری بدیهی و لازم‌الاجراء می‌باشد. در این میان، داده‌های لرزه‌ای، بهترین ابزار برای اکتشاف مخازن هیدروکربوری می‌باشند. تفسیر داده‌های لرزه‌ای در ارزیابی و مطالعه ساختارهای زمین‌شناسی، روشی کارآمد می‌باشد ولی در برخی از موارد با توجه به زمین‌شناسی پیچیده، تفسیر لرزه‌شناسی با مشکل مواجه می‌شود. استفاده از سیستم‌های هوش مصنوعی و طراحی سیستمی که بتواند با جمع‌آوری دانش، پایگاه اطلاعاتی گسترده و قوی را تشکیل دهد، می‌تواند فرآیند تصمیم‌گیری و تفسیر لرزه‌شناسی را بهینه‌سازی کند. بدین منظور، در این پژوهش از شبکه عصبی به عنوان یک روش کارآمد و هوشمند با هدف ارزیابی رخساره لرزه‌ای استفاده خواهد شد. شبکه عصبی مصنوعی روشی است که دانش ارتباط بین چند مجموعه داده را از طریق آموزش فراگرفته و برای استفاده در موارد مشابه در یک حوزه کاربردی خاص ذخیره می‌کند. این مطالعه، با استفاده از داده‌های لرزه‌ای پس از برانبارش و شبکه عصبی مصنوعی با هدف مطالعه رخساره لرزه‌ای و شناسایی هندسه دیاپیرهای گلی، محدوده دشت گرگان را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. شبکه عصبی مصنوعی با ارزیابی لایه‌های اطلاعاتی متفاوت، محدوده دیاپیرهای گلی را مشخص می‌کند.

واژه‌های کلیدی: شبکه عصبی، تفسیر لرزه‌ای، دشت گرگان، رخساره‌های لرزه‌ای، دیاپیرهای گلی.

Seismic facies classification based on Neural Networks algorithm in the Gorgan plain, Iran

Bahareh Hedayat¹, Mehrdad Soleimani Monfared², Luis Somoza Losada³

¹ PhD Candidate, Shahrood University of Technology

² Associate Professor, Shahrood University of Technology

³ Research Professor, Geological Survey of Spain (IGME)

Abstract

The utilization of geophysical methods in hydrocarbon exploration has become essential to meet the world's growing energy demands. Among these methods, seismic data remains the most effective tool for hydrocarbon reservoir exploration. Seismic data interpretation is a powerful technique for evaluating and studying geological structures; however, it encounters challenges in cases of complex geology. The integration of artificial intelligence (AI) systems and the design of a comprehensive knowledge base through data collection can optimize the decision-making and seismic interpretation processes. This research employs artificial neural networks as an intelligent and efficient method for seismic facies analysis. Artificial neural networks, through training, capture the relationships between diverse datasets and store this knowledge for application in similar cases within a specific field. Using post-depositional seismic data and an

artificial neural network, this study focuses on evaluating the seismic facies and identifying the geometry of salt diapirs in the Gorgan Basin. The artificial neural network, by assessing different informational layers, delineates the extent of salt diapirs in the study area.

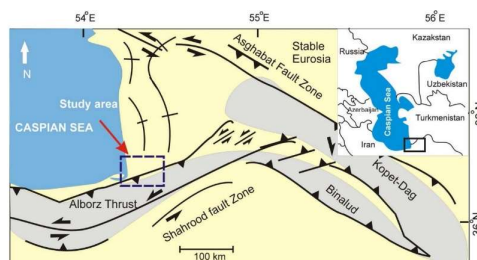
Keywords: Neural Network, Seismic Interpretation, Gorgan Plain, Seismic Facies, Mud Diapirs.

۱ مقدمه

توصیف ساختاری زمین‌شناختی در یک منطقه از منظر اکتشاف نفت بسیار مهم است. یکی از اهداف اصلی تفسیر ساختاری لرزه‌ای تهیه نقشه‌ایی از ساختارهای زمین‌شناختی است، به طوری که نقشه مذکور بتواند با دقت بالا نشان‌دهنده ساختار نفتی یا گازی و از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشد. تفسیر ساختاری لرزه‌ای به طور وسیعی بر پایه ارتباط مستقیم بین بازتابنده لرزه‌ای و سطح مشترک و جدا کننده طبقات زمین‌شناختی استوار می‌باشد.

طی دهه گذشته و با افزایش کاربرد هوش مصنوعی در صنایع مختلف، و علاقه به نتایج پژوهش‌های مرتبط با هوش مصنوعی به ویژه شبکه عصبی، سیستم‌های مبتنی بر دانش با سرعت چشم‌گیری رو به افزایش است. در حال حاضر، شبکه عصبی عملکرد مناسبی را در بسیاری از حوزه‌های کاربردی فراهم کرده است. در پژوهش‌های قبلی طبقه‌بندی رخساره‌ها (فریرا و همکاران، ۲۰۱۹ و اشرف و همکاران، ۲۰۱۹)، مشاهده شده است که طبقه‌بندی رخساره‌ها در تفسیر داده‌های لرزه‌ای امری چالش‌برانگیز است و روش شبکه عصبی می‌تواند در جهت برطرف کردن این چالش کمک کند. استفاده از روش شبکه عصبی در طبقه‌بندی رخساره‌های لرزه‌ای (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸، روبلز و همکاران، ۲۰۲۱ و العلی و همکاران، ۲۰۲۰) در پژوهش‌های اندکی یافت می‌شود.

منطقه مورد مطالعه در حاشیه جنوب‌شرقی حوضه جنوبی دریای خزر، بین طول‌های جغرافیایی ۵۴ و ۵۵ درجه شرقی و عرض‌های ۳۶ تا ۳۷ درجه شمالی استان گلستان واقع شده است. این منطقه با توجه به سنگ‌شناسی و زمین‌ساخت دارای منابع نفت و گاز فراوان است و دیاپیرهای گلی متعدد و پنهان آن نقش مهمی در به دام انداختن نفت و گاز ایفا می‌کند (بنتاکور، س.، ۲۰۱۵ و سلیمانی، م.، ۲۰۱۶). تقریباً ۷۵٪ مخازن نفتی این منطقه، مربوط به ساختارهای تاقدیسی است که حاصل گل‌فشان‌ها و همراه با بالا آمدن گل در طی زمان تشکیل شده‌اند (مازینی، آ. و اتیوپ، ج.، ۲۰۱۷). لذا برگه گرگان، با توجه به اهمیت منطقه از دیدگاه اکتشاف ذخایر هیدروکربوری و همچنین عدم بررسی و مطالعات گسترده در آن، منطقه مناسبی برای انجام پژوهش مورد نظر می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه و راه‌های دسترسی به گل‌فشان‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از سلیمانی و همکاران، ۲۰۱۸)

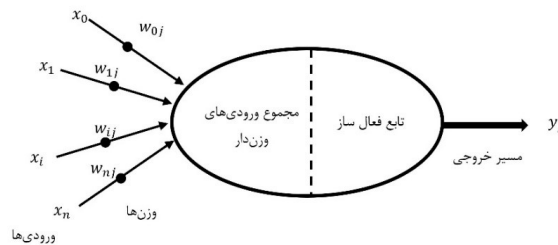
۲ روش تحقیق

شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN^۱) یکی از روش‌های هوش مصنوعی و برگرفته از شبکه‌های عصبی طبیعی مغز انسان بوده و به طور وسیعی در علوم مهندسی برای الگوبرداری و تقلید از نحوه فکر و رفتار مغز انسان، در مواردی که نیاز به استفاده از هوش می‌باشد، به کار گرفته شده است (نیکان، و.، ۲۰۰۸). استفاده از شبکه عصبی مصنوعی امکان توصیف و تشریح روابط غیرخطی موجود در بین متغیرهای محیط‌های طبیعی پیچیده، که فرآیندهای فیزیکی آنها مستقیماً قابل

^۱ Artificial Neural Network

مشاهده نیست، طبقه‌بندی داده‌ها با استفاده از فرآیند آموزش و همچنین بررسی عدم قطعیت مربوط به داده‌های ورودی را فراهم می‌آورد (زاده، ل.ع.، ۱۹۹۷). اما روش‌های ریاضی خطی و معمولی نمی‌توانند برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و مبهم استفاده شوند (پوروال و همکاران، ۲۰۰۶). ساختار شبکه‌های عصبی شامل لایه‌های محاسباتی به هم پیوسته‌ای از واحدهای شبکه به نام نرون^۲ می‌باشد. در واقع نرون‌ها عمده‌ترین قسمت شبکه‌های عصبی بوده و واحد پردازش اطلاعات می‌باشند (راو، ز.، ۲۰۰۰). نرون‌ها اساساً توابع ریاضی بوده و ارتباط‌دهنده هر نمونه از بردارهای ویژه ورودی^۳، در مجموعه داده‌های آموزشی، به بردار خروجی هدف می‌باشند. هر نرون شامل مجموعه‌ای از ارتباط دهنده‌ها^۴ است. شدت و میزان این ارتباط به وسیله یک وزن (مقدار عددی) کنترل می‌گردد (راو، ز.، ۲۰۰۰). این مقدار، وزن پیوندی^۵ نام دارد (هایکین، س.، ۱۹۹۴). در شبکه‌های عصبی این وزن دائماً اصلاح می‌شود تا هر بردار ویژه ورودی با بردار هدف خروجی مربوط به خود به طور صحیح منطبق و مرتبط گردد. بنابراین دانش و هوش مصنوعی به کار رفته در نحوه اختصاص وزن‌های پیوندی با استفاده از آموزش شبکه امکان‌پذیر می‌گردد (هایکین، س.، ۱۹۹۴).

نرون همچنین شامل یک عملگر جمع می‌باشد که برای جمع نمودن ورودی‌های وزن‌دار (وزن داده شده) به کار می‌رود. علاوه بر این نرون شامل یک تابع انتقال یا فعال‌ساز^۶ بوده که برای کنترل خروجی نرون به کار می‌رود (راو، ز.، ۲۰۰۰). شکل ۲ اجزای یک نرون مصنوعی را به طور نمادین نمایش می‌دهد.



شکل ۲. اجزای یک نرون در شبکه عصبی مصنوعی به طور نمادین (نیکانن، و.، ۲۰۰۸).

در شکل فوق مجموع ورودی‌های وزن‌دار و تابع فعال‌ساز با توجه به روابط زیر به دست می‌آید:

$$I_j = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_i \quad \text{رابطه ۱}$$

$$y_j = \varphi(I_j) \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن x_i و y_j به ترتیب لایه ورودی و خروجی هستند و w_{ij} وزن‌ها، I_j مجموع ورودی‌های وزنی و $\varphi(I_j)$ تابع فعال‌ساز می‌باشند.

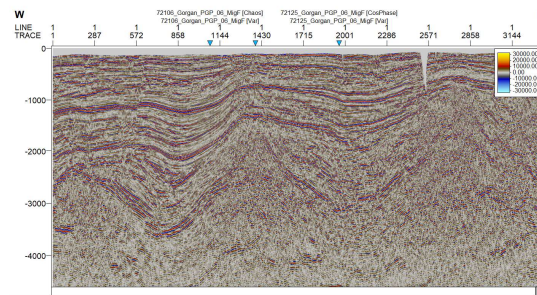
شبکه‌های عصبی دارای روش‌ها و مدل‌های مختلفی می‌باشد که همه آن‌ها الگوها و نمونه‌هایی را برای آموزش و یادگیری نیاز دارند تا بتوانند از آنها برای پیش‌بینی و طبقه‌بندی استفاده کنند. بر همین اساس الگوهای یادگیری مختلفی نیز وجود دارد.

۳ بحث

در این تحقیق از داده‌های لرزه ای دوبعدی دشت گرگان استفاده شده است. داده‌های لرزه‌ای با زمان کوچ پس از برنابارش (PSTM^۷) با نرخ نمونه‌برداری ۴ میلی‌ثانیه در قالب SEG-Y استفاده شد (شکل ۳). علاوه بر این، مطالعات

^۲ Neuron
^۳ Input Feature Vector
^۴ Synapses
^۵ Synaptic Weights
^۶ Activation Function
^۷ Post-Stack Migration

زمین‌شناسی و چینه‌شناسی قبلی برای تفسیر بهتر بازتابنده‌های لرزه‌ای و ژئوبادی‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

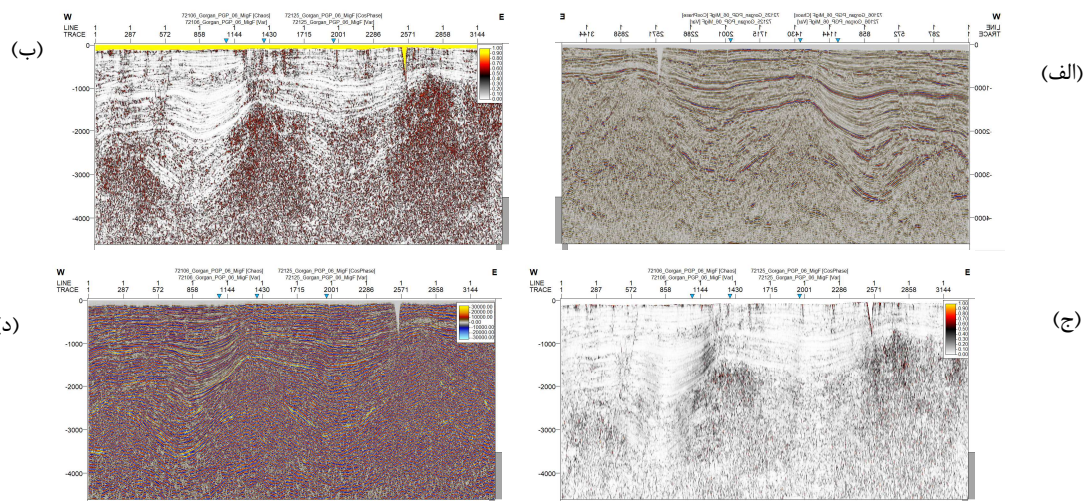


شکل ۳. داده لرزه‌ای پس از برانبارش (PSTM)

فرآیند به کارگیری روش شبکه عصبی شامل دو رویکرد اصلی برای شناسایی رخساره‌های لرزه‌ای است. در بخش اول، ابتدا داده‌های لرزه‌ای توسط مطالعات نشانگرها برای شناسایی بازتابنده‌های لرزه‌ای و ساختارهای زیرسطحی بررسی شد. تعداد زیادی نشانگر لرزه‌ای بر روی مقطع لرزه‌ای اعمال و بررسی شد. سپس ضریب همبستگی میان این نشانگرها محاسبه و نشانگرهایی که بیشترین هم بستگی را داشتند، شامل نشانگر هموارسازی، بی‌نظمی، واریانس و تباين صوتی نسبی^۸ به عنوان ورودی شبکه عصبی انتخاب گردیدند. جدول ۱ ضریب همبستگی نشانگرهای فوق و شکل ۴ نشانگرها با بیشترین ضریب همبستگی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ضریب همبستگی نشانگرهای لرزه در روش شبکه عصبی

| | Relative Acoustic Impedance | Structural Smooth | Chaos | Variance |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|--------|----------|
| Relative Acoustic Impedance | 1.0000 | 0.8195 | 0.0245 | 0.0134 |
| Structural Smooth | 0.8195 | 1.0000 | 0.0194 | 0.0049 |
| Chaos | 0.0245 | 0.0194 | 1.0000 | 0.2176 |
| Variance | 0.0134 | 0.0049 | 0.2176 | 1.0000 |
| Total | 0.8207 | 0.8206 | 0.2311 | 0.2200 |



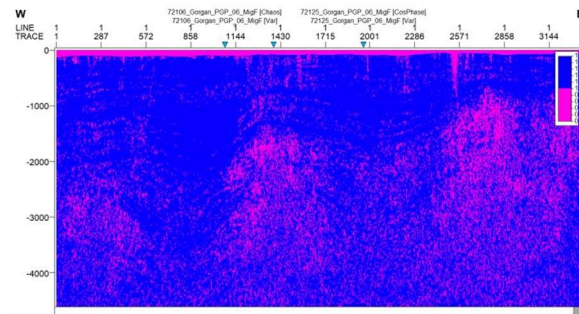
شکل ۴. مقاطع نشانگرهای لرزه‌ای با بیشترین ضریب همبستگی - (الف) نشانگر هموارسازی، (ب) نشانگر بی‌نظمی،

(ج) نشانگر واریانس، (د) نشانگر تباين صوتی نسبی

در بخش دوم، فرآیند ایجاد و پیاده‌سازی روش شبکه عصبی انجام گرفت. به عبارت دیگر با استفاده از نتایج بخش اول

⁸ Relative Acoustic Impedance

آموزش شبکه عصبی پرداخته انجام گرفت. خروجی شبکه عصبی، مقطع لرزه ای با رویکرد شناسایی دیاپیرهای گلی می‌باشد. شکل ۵ تفسیر انجام شده توسط شبکه عصبی را نشان می‌دهد.



شکل ۵. مقطع آنالیز رخساره های لرزه‌ای به روش شبکه عصبی

۴ نتیجه‌گیری

این مطالعه بر روی تشخیص دیاپیرهای گلی در مقطع لرزه‌ای با استفاده از شبکه عصبی در یکی از حوضه‌های رسوبی ایران تمرکز دارد. شبکه عصبی عملکرد مغز انسان را در یک زمینه خاص شبیه سازی می‌کنند. در این تحقیق شبکه عصبی طراحی و تهیه شد که توانایی شناسایی دیاپیرهای گلی را بر روی داده‌های لرزه ای دارد. این سیستم با آموزش و با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای، دیاپیرهای گلی را به طور خودکار بر روی داده‌های لرزه‌ای تفسیر می‌کند. شبکه عصبی روشی کارآمد برای تفسیر دیاپیرهای گلی در داده‌های لرزه‌ای فراهم می‌کند. این روش می‌تواند فرآیند تفسیر را با دقت بالا، زمانی که متخصص در دسترس نیست، تسهیل کند لازم به ذکر است آنچه برای آموزش شبکه عصبی در این پروژه ذکر شد، حداقل دانش قابل تعریف برای شبکه عصبی است. مسلم است که افزایش آموزش سیستم برابر با شباهت بیشتر سیستم به انسان و در نتیجه دقت و کارایی بیشتر است. همچنین با آموزش شبکه عصبی می‌توان سایر ساختارهای زیرسطحی را بر روی مقاطع لرزه ای تفسیر کرد.

منابع

- Ashraf, U., Zhu, P., Yasin, Q., Anees, A., Imraz, M., Mangi, H. N. and Shakeel, S., "Classification of reservoir facies using well log and 3d seismic attributes for prospect evaluation and field development: A case study of sawan gas field, pakistan." *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 175, pp. 338–351, 2019.
- Al-Ali, A., Stephen, K. and Shams, A., Applications of artificial neural network for seismic facies classification: A case study from the mid-Cretaceous reservoir in supergiant oil field. In SPE Europec featured at EAGE Conference and Exhibition, SPE, 2020, December.
- Betancor, I. S., Mud diapirs and folds in the South Caspian Basin, geometry and syn-sedimentary evolution of structures with petroleum interest, Ph.D. dissertation, University of Granda, Spain, 2015.
- Ferreira, D. J. A., Lupinacci, W. M., Andrade Neves, I. De., Zambrini, J. P. R., Ferrari, A. L., Gamboa, L. A. P. and Azul, M. O., "Unsupervised seismic facies classification applied to a presalt carbonate reservoir, santos basin, offshore brazil." *AAPG Bulletin*, vol. 103, no. 4, pp. 997–1012, 2019.
- Haykin, S., 1994, *Neural networks: A comprehensive foundation*, 2nd edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Lubo-Robles, D., Ha, T., Lakshmirarahan, S., Marfurt, K.J. and Pranter, M.J., "Exhaustive probabilistic neural network for attribute selection and supervised seismic facies classification", *Interpretation*, 9(2), pp. T421-T441, 2021.
- Mazzini, A., Etiope, G., "Mud volcanism: An updated review," *Earth Science Review*, vol. 168, pp. 81-112, 2017.
- Nykänen, V., "Radial basis function link net used as a prospectivity mapping tool for orogenic gold deposit within the central Lapland greenstone belt, Northern Fennoscandian Shield", *Natural Resources Research*, Vol.17, No.1, 2008.
- Porwal, A., Carranza, E.J.M., Hale, M., "Bayesian network classifiers for mineral potential mapping", *Computers & Geosciences*, Vol.32, No.1, pp.1-16, 2006.
- Rao, Z., *Artificial neural networks*, In: *Computation and hydroinformatics lecture materials*, school of civil Engineering and Geoscience, University of Newcastle upon type, 2000.
- Soleimani, M., "Seismic image enhancement of mud volcano bearing complex structure by the CDS method, a case study in SE of the Caspian Sea shoreline," *Russian Geology and Geophysics*, vol. 57, pp. 1757-1768, 2016.
- Soleimani, M., Aghajani, H., Heidari Nejad, S., "Structure of giant buried mud volcanoes in the South Caspian Basin: Enhanced Seismic image and field gravity data by NFG method," *Interpretation*, vol. 6, no. 4, pp. 1N-5Y, 2018.
- Zadeh, L.A., "Introduction to hybrid artificial intelligence systems in Tsoukalas", L.H. and Uhrig, R.E., eds., *Fuzzy and Neural Approaches in Engineering*: John Wiley & Sons, Inc., New York, pp.-7, 1997.
- Zhang, D., Yuntian, C. and Jin, M. "Synthetic well logs generation via recurrent neural networks." *Petroleum Exploration and Development*, vol. 45, no. 4, pp. 629–639, 2018.

شناسایی روند گسلش به کمک پروفیل لرزه ای قائم آفست دور

امیر احدی^۱

^۱مدیر بخش DCS - شرکت خدمات فنی میدین آسماری، A.Ahadi@Asmaryo.com

چکیده

در مطالعات ژئوفیزیکی و پتروفیزیکی به منظور اکتشاف منابع و ذخایر هیدروکربن یکی از اهداف اصلی شناسایی خواص فیزیکی سازند و عوارض زمین شناسی موجود در مجاورت چاه ها می باشد. عوارضی همچون شکستگی ها، گسل ها، چین خوردگی ها، شیب و امتداد لایه ها و پارامترهای مخزن را می توان به کمک مطالعات سطحی و درون چاهی شناسایی نمود. باتوجه به اینکه وجود گسل در ساختارهای زمین شناسی اجتناب ناپذیر می باشد، شناسایی محل و روند گسلش ها در جانمایی موقعیت چاههای نفت و گاز به منظور پیشگیری از بروز مشکلات حین حفاری و تولید دارای اهمیت بسیار می باشد. بدلیل محدودیت های رزولوشن امواج بازتابی لرزه ای سطحی در شناسایی پدیده های با شیب زیاد، روش پروفیل لرزه ای قائم آفست دور (Far-offset Vertical Seismic Profiling) یکی از کاربردی ترین روش ها جهت شناسایی شکستگی ها و گسل های موجود در محیط های ناهمگن اطراف چاه می باشد.

واژه های کلیدی: پروفیل لرزه ای قائم، لرزه نگاری، گسل، مدلسازی لرزه ای

Identification of the Faulting with the Far-offset Vertical Seismic Profiling

Amir Ahadi¹

¹DCS Manager- Asmary Field Services Co.

Abstract

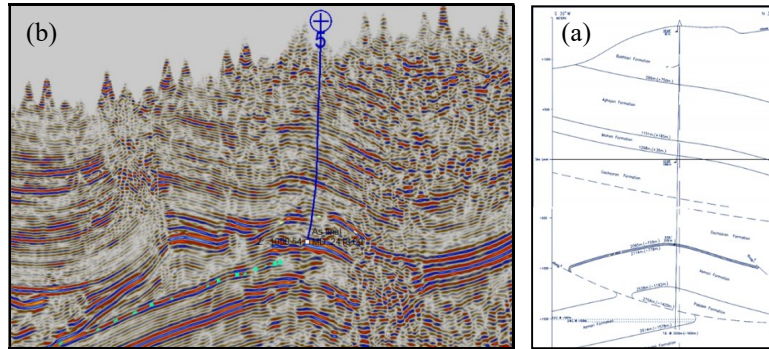
In geophysical and petrophysical studies in order to explore hydrocarbon sources and reserves, one of the main goals is to identify the physical properties of the formation and geological features in the vicinity of the wells. Complications such as fracture zones, faults, folds, slope and extension of layers, reservoir parameters, etc. can be identified with the help of surface and downhole studies. Considering that the existence of faults in geological structures is inevitable, it is very important to identify the location and trend of faults in the location of oil and gas wells in order to prevent problems during drilling and production. Due to the limited resolution of surface seismic reflection waves in identifying high-dip features, the Vertical Seismic Profile method with Far Offset (Offset-VSP) is one of the most useful methods to identify fractures and faults in heterogeneous environments around wells.

Keywords: Vertical Seismic Profiling, Seismology, Fault, Seismic Modeling

۱ مقدمه

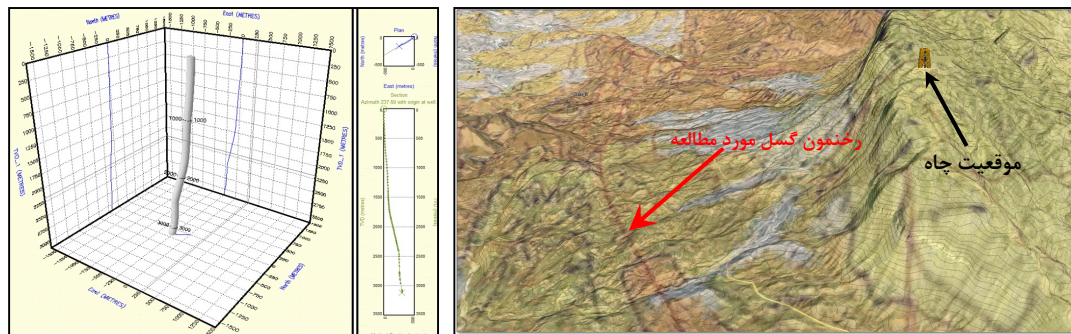
مقاطع لرزه ای بازتابی سطحی اغلب ناپیوستگی های با شیب بالا را تصویر می کنند. ولی مدل های ساختاری زمین شناسی ساخته شده از این داده های لرزه ای، عدم قطعیت بیشتری برای ساختارهای عمودی یا نزدیک به عمود را دارند. به منظور ارزیابی عدم قطعیت های مربوط به این ساختارهای نزدیک به عمود، به ویژه گسل ها، چندین نویسنده رویکردهای مدل سازی ساختاری را پیشنهاد کرده اند، هولدن و همکاران. (۲۰۰۳)؛ سوزوکی و همکاران (۲۰۰۸)؛ ولمن

و همکاران (۲۰۱۰)؛ چرپیو و همکاران (۲۰۱۲)؛ جولیو و همکاران (۲۰۱۵). در این مقاله پتانسیل روش پروفیل لرزه ای قائم جهت توصیف ساختارهای پیچیده زمین شناسی نشان داده خواهد شد. بدلیل حساسیت پروژه، پیش از انجام عملیات لرزه نگاری درون چاهی مدلسازی و رهگیری پرتو^۱ و طراحی عملیات مذکور با استفاده از مقاطع زمین شناسی و لرزه ای سطحی (شکل ۱)، مدل سرعت داده های لرزه ای سطحی، نگاره های درون چاهی، مسیر چاه حفاری شده و اطلاعات سر سازندها با در نظر گرفتن مقادیر رقومی ارتفاعی و مناطق مناسب جهت جانمایی نقطه یا نقاط چشمه انجام گرفت.



شکل ۱. مقطع زمین شناسی (a) و مقطع لرزه ای عبوری از چاه در امتداد گسل (b).

بعلاوه، مقاطع لرزه ای بدست آمده با کیفیت بالا در چاه های قائم و انحرافی می توانند جهت تفسیر بهتر ساختارهای مخزنی، شناسایی بهتر و دقیق تر گسل ها، تغییرات چینه شناسی و جانمایی جهت حفاری مسیر جانبی در چاه اصلی (Sidetrack) استفاده شوند (بریتون-۲۰۰۲). لرزه نگاری درون چاهی با آفست دور می تواند جهت تشخیص ساختارها و نواحی اطراف و نیز پیش روی مسیر چاه کمک کننده باشد. تکرار شدگی سازندهای آسماری و پابده حین حفاری چاه مورد مطالعه و عدم گزارش وجود گسل احتمالی در مسیر حفاری چاه، باعث گردید که جهت مشخص شدن دلیل این پدیده و شناسایی امتداد و جهت گسلش، لرزه نگاری درون چاهی با آفست دور در اطراف چاه انجام گیرد. در شکل ۲ نمایی از محدوده مورد مطالعه، زمین شناسی منطقه، رخنمون گسل و موقعیت و مسیر چاه مورد مطالعه نمایش داده شده اند.

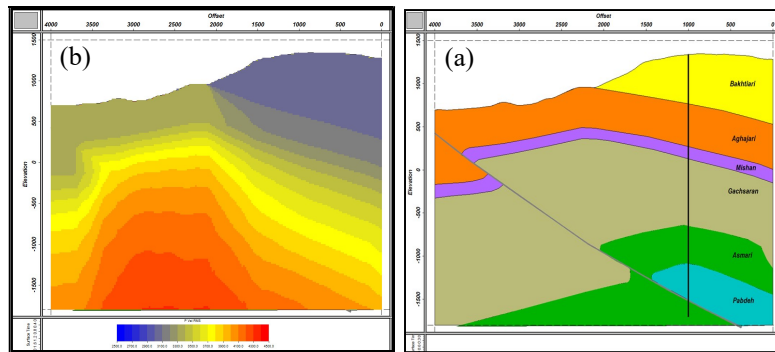


شکل ۲. موقعیت و مسیر چاه و رخنمون سطحی گسل نزدیک چاه.

۲ روش تحقیق

همانطور که اشاره شد در این پروژه شناسایی روند گسلش و امتداد آن جهت انتخاب بهترین مسیر جایگزین برای حفاری چاه، جزو اصلی ترین اهداف پروژه می باشد. گستره پوشش جانبی مقطع حاصل نیز از مواردی است که در ابتدای پروژه مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت با توجه به عمق چاه و حداکثر آفست مجاز نقطه چشمه، مقدار ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ متر بعنوان محدوده پوشش جانبی نهایی هدفگذاری شد. شکل ۳ مدل لرزه ای و مدل سرعت اولیه را نمایش می دهد که با استفاده از مقاطع زمین شناسی و لرزه ای سطحی و مدل سرعت داده های سطحی و نگاره های صوتی بدست آمده است.

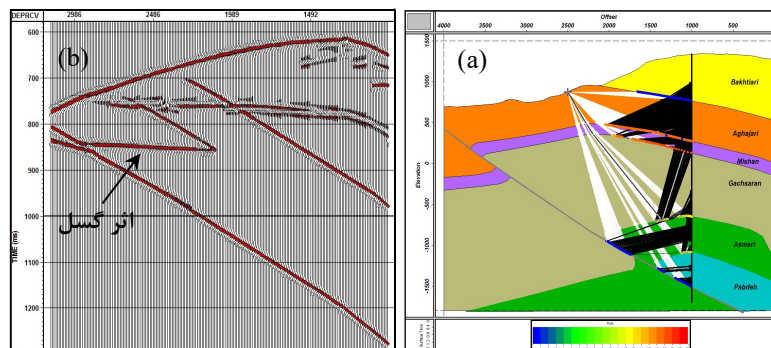
¹ Ray Tracing



شکل ۳. مدل لرزه ای (a) و مدل سرعت طراحی شده جهت مدلسازی و رهگیری پرتو (b).

پس از نهایی شدن مدل مصنوعی طراحی شده و جانمایی نقاط گیرنده درون چاهی، می توان تخمینی از بهترین موقعیت چشمه (چشمه های) لرزه ای، میزان محدوده پوشش جانبی^۲ و توزیع فولد براساس زوایای تابش و بازتابش پرتوها و شیب لایه ها پس از پروسه رهگیری پرتو در فواصل مختلف از چاه مطابق شکل ۴-a بدست آورد. همانطور که در شکل ۴ مشخص است بدلیل تباین سرعتی ایجاد شده مابین ساختارهای زمین شناسی در محل گسلش پیش بینی می گردد که از روند گسلش ایجاد شده نیز بازتاب امواج لرزه ای ایجاد گردد و توسط گیرنده های درون چاهی رکورد گردد. (آرویو و همکاران، ۲۰۰۳)

در شکل ۴-b داده لرزه ای مصنوعی VSP بدست آمده حاصل از مدلسازی و رهگیری پرتو شکل ۴-a نمایش داده شده است که اثر گسلش به وضوح در مقطع بدست آمده مشخص است. بدلیل توپوگرافی شدید منطقه و براساس جانمایی بهترین موقعیت چشمه های سطحی در مدل اولیه طراحی شده، نقطه چشمه لرزه ای سطحی (چشمه قرار گرفته در فاصله دور) و دکل حفاری حدود ۶۰۰ متر اختلاف ارتفاعی داشته که این باعث تفاوت در موقعیت و تعداد نقاط گیرنده جانمایی شده درون چاه در دو روش پروفیل لرزه ای قائم با دورافت صفر و همراه با دورافت می گردد.



شکل ۴. رهگیری پرتو و موقعیت نقطه چشمه انتخاب شده در پروژه (a) و داده لرزه ای مصنوعی بدست آمده براساس رهگیری پرتو (b).

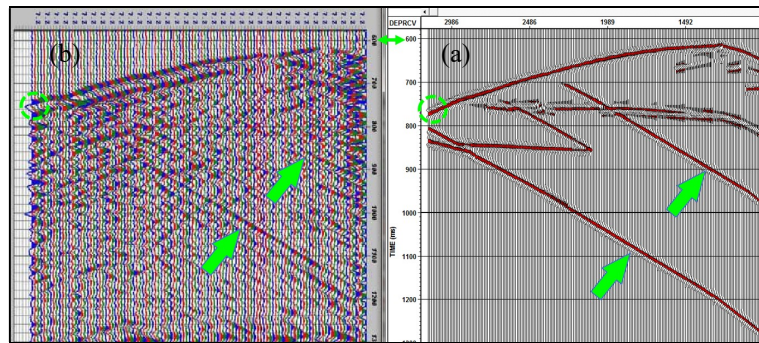
مطابق با موارد ذکر شده در بخش طراحی و مدلسازی پروژه، برداشت داده های لرزه ای در دو دورافت نزدیک و دور از چاه صورت گرفت. لازم به ذکر است جهت کم شدن زمان رکوردگیری و نیز صرفه جویی در هزینه های برداشت اطلاعات، از روش Flip-Flop Shots در این پروژه استفاده گردید. چاه مورد مطالعه دارای انحرافی حدود ۱۵ درجه ای بود که این باعث ایجاد فاصله ای حدود ۳۰۰ متر بین عمق نهایی چاه^۳ و ابتدای چاه^۴ گردید.

جهت کنترل مدل اولیه استفاده شده برای جانمایی نقاط گیرنده و چشمه، داده های رکورد شده و داده های مصنوعی تولید شده از مدل مصنوعی در شکل ۵ با یکدیگر قابل مقایسه هستند. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است روند رسیدهای اولیه (امواج پائین رونده)، بازتابهای رکورد شده (امواج بالارونده) و اثر احتمالی گسل تطابق بالایی را در داده مصنوعی و رکورد شده نشان می دهند.

² Lateral coverage area

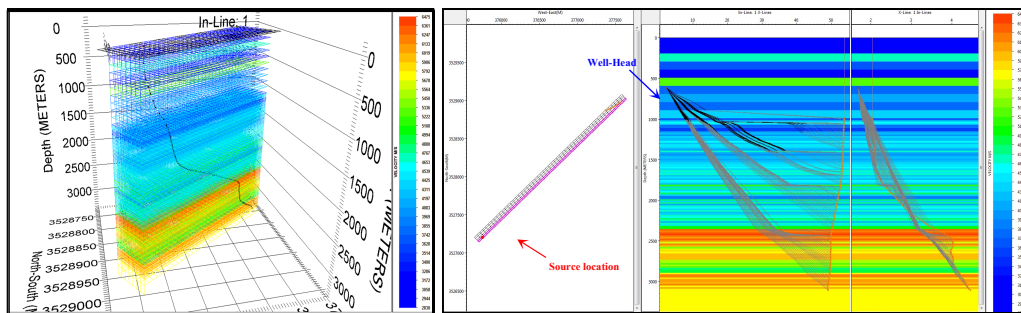
³ Total Depth

⁴ Well-head



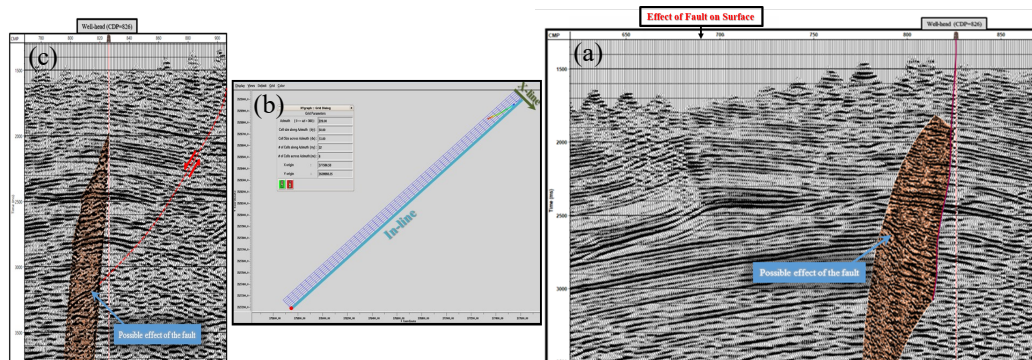
شکل ۵. داده لرزه ای مصنوعی (a) و داده لرزه ای واقعی رکورد شده در چاه مورد مطالعه (b).

در ادامه، آنالیزهای مربوطه براساس مقادیر سرعت تخمین زده شده در جهات In-line و X-line مطابق با شکل ۶ نمایش داده شده است. تکرار شدگی مدل سرعتی سازند های آسماری و پابده در اثر گسلس ایجاد شده در مدل سرعت شکل ۶ مشهود است.



شکل ۶. سرعت های تخمین زده شده از داده پروفیل لرزه ای قائم.

پس از پردازش داده های پروفیل لرزه ای قائم مقاطع لرزه ای بصورت شکل ۷ بدست آمد. با توجه به انحرافی بودن چاه، مقاطع لرزه ای حاصل در جهات In-line و X-line به ترتیب مطابق با شکل های a-Y و c-Y بدست می آید. همانطور که در شکل ها مشخص است لایه بندی ها و مسیر گسلس در آنها قابل شناسایی می باشند.



شکل ۷. مقاطع لرزه ای حاصل از پردازش داده پروفیل لرزه ای قائم همراه با دورافت در جهات In-line (a) و X-line (c).

۳ نتیجه گیری

می توان به کمک روش های پروفیل لرزه ای قائم از عوارض و مشکلات احتمالی موجود در اطراف چاه از جمله وجود گسلس، گنبدیا توده های نمکی، شیب و امتداد لایه ها، ساخت مدل سرعت و بهبود رابطه زمان-عمق جهت استفاده در داده ههای سطحی، تشخیص و پیش بینی رویدادهای لرزه ای پیش روی مته حفاری، استخراج موجک و نیز اپراتورهای مورد نیاز در سکانس های پردازش داده های سطحی و مواردی از این دست اطلاعات مفیدی کسب نمود. با استفاده از طراحی و مدلسازی پیش از انجام عملیات لرزه نگاری درون چاهی می توان ریسک های احتمال انجام چنین پروژه هایی را کاهش داد و بهترین روش را پیشنهاد داد.

با توجه به موارد مطرح شده و نیز نتایج حاصل شده از این مطالعه پیشنهاد می گردد به روش های لرزه نگاری درون

چاهی جهت تکمیل اطلاعات سطحی توجه بیشتری گردد و مشکلات و ابهامات موجود در نتایج اطلاعات سطحی را رفع و عدم قطعیت های موجود در این داده ها را کاهش داد.

منابع

- Arroyo, L., Breton, P., Dijkerman, H., Dingwall, S., Guerra, R. and Hope, R., 2003, Superior Seismic Data from the Borehole. *Oilfield Review* 23, no. 02, 16-17.
- Breton, P., Crepton, S., Perrin, J-C., Esmersoy, C., Hawthorn, A., Meehaan, R., Underhill, W., Frignet, B., 2002, Well-Positioned Seismic Measurements. *Oilfield Review* 14, no. 01, 32-45.
- Cherpeau, N., Caumon, G., Caers, J. and Levy, B. 2012 Method for Stochastic Inverse Modeling of Fault Geometry and Connectivity Using Flow Data. *Mathematical Geosciences*, **44**, 147-168.
- Holden, L., Mostad, P., Nielsen, B.F., Gjerde, J., Townsend, C. and Ottesen, S. 2003 Stochastic Structural Modeling. *Mathematical geology*, **35**(8).
- Julio, C., Caumon, G. and Ford, M. [2015] Sampling uncertainty about segmented normal fault interpretation using a stochastic downscaling method. *Tectonophysics*, **639**, 56-67.
- Suzuki, S., Caers, J. and Caumon, G. [2008] Dynamic data integration for structural modeling: model screening approach using a distance-based model parameterization. *Computational Geosciences*, **12**, 105-119.
- Wellmann, J., G.Horowitz, F., Schill, E. and Regenauer-Lieb, K. [2010] towards incorporating uncertainty of structural data in 3D geological inversion. *Tectonophysics*, **490**, 141-151.

تحلیل رخساره مخزنی براساس مدل سازی فیزیک سنگی با استفاده از نگارهای چاه

نعمت الله محمد رشید^۱، محمدعلی ریاحی^۲

دانشجوی دکتری^۱، دانشگاه سوران، nemat.rashid@soran.edu.iq

استاد^۲، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، mariahi@ut.ac.ir

چکیده

ارزیابی و شناسائی ناهمگنی رخساره های مخزنی زیر سطحی، همواره نقش اساسی در ارزیابی و مدیریت منابع هیدرو کربنی دارد. روش های متنوعی برای مدل سازی خصوصیات مخازن هیدروکربنی نظیر فیزیک سنگ توسعه یافته اند. روش های فیزیک سنگی به عنوان روشی نوین که نتایج آن تطابق بهتری با خصوصیات مخزنی دارد. روابط تجربی و مدرن متعددی جهت تخمین خصوصیات مخزنی با در نظر گرفتن فرضیاتی به منظور کاربردهای سطحی و عمیق ارائه شده است. هر کدام از این روابط دارای محدودیت هایی است به طوری که در مخازن هیدروکربنی وقتی با سیال، درز و شکاف های مخزن مواجه می شوند سبب بروز خطا در محاسبات می گردند. بنابراین ارزیابی دقیق این مطالعات با بهره گیری از تمامی پارامترهای مخزنی و غیر مخزنی می تواند در ارزیابی دقیق خصوصیات مخزنی از جمله رخساره مخزن کارآمد باشد. در این مطالعه از مدل سازی فیزیک سنگی به منظور ارزیابی رخساره مخزنی استفاده شده است.

واژگان کلیدی: ناهمگنی مخزنی، فیزیک سنگ، رخساره مخزنی، درز و شکاف.

Reservoir facies analysis based on rock physics modeling using well logs

The evaluation and recognition of the heterogeneity of subsurface reservoir facies always play a fundamental role in the evaluation and management of hydrocarbon resources. Various methods have been developed to model the properties of hydrocarbon reservoirs, such as rock physics. Rock physics methods are a new method whose results have a better match with reservoir characteristics. Several experimental and modern relations have been presented to estimate the reservoir properties by considering assumptions for surface and deep applications. Each of these relationships has limitations, so in hydrocarbon reservoirs, when they encounter fluid, leaks, and gaps in the reservoir, they cause errors in evaluation. Therefore, the accurate evaluation of these studies using all reservoir and non-reservoir parameters can be efficient in the accurate evaluation of reservoir characteristics, including reservoir facies. This study used rock physics modeling to evaluate the reservoir facies.

Keywords: Reservoir heterogeneity, Rock Physic, Reservoir facies, Fracture.

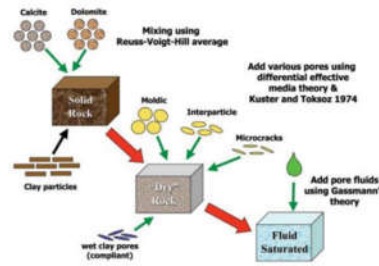
۱ مقدمه

فیزیک سنگ شاخه ای از علوم اکتشاف نفت است که بر مطالعه خصوصیات فیزیک سنگ ها و ارتباط آنها با داده های لرزه ای متمرکز است. این رویکرد که جنبه های زمین شناسی، فیزیک و مهندسی را برای درک رفتار سنگ ها در شرایط مختلف سنگ ادغام کند. هدف اصلی فیزیک سنگ پیش بینی پاسخ لرزه ای سنگ ها در محیط های زیرسطحی است که در بسیاری از کاربردها از جمله اکتشاف نفت و گاز، مطالعات زلزله و اکتشاف انرژی زمین گرمایی حائز اهمیت است. در مدل سازی خصوصیات سنگ و سیال یک مخزن، عموماً انواع مختلفی از داده ها از قبیل داده های لرزه ای و نگارهای چاه استفاده می شود. این داده ها، اندازه گیری های مستقیم خصوصیات سنگ و سیال زیرسطحی نیستند داده های لرزه ای اطلاعاتی در خصوص یک تفاوت در خواص کشسانی سرعت لرزه ای و چگالی یک لایه مرزی در زیر سطح را به دست می دهد، خواص کشسانی ذکر شده به خواص سنگ و سیال لایه های زیر سطح بستگی دارند. داده های لرزه ای تنها یک اندازه گیری غیر مستقیم از خواص سنگ و سیال زیر سطحی است [2, 3]. نگارهای چاه از قبیل نگارهای گاما، نوترون، چگالی، صوتی و مقاومت نیز اغلب به صورت ارزیابی غیر مستقیم از خواص سنگ و سیال لایه های زیرسطحی زیرزمین می باشند؛ به منظور تفسیر کمی داده های لرزه ای و چاه نگاری، میبایست یک سری روابط فیزیکی-ریاضیاتی تعریف می-شوند تا ارزیابی غیر مستقیم را به خواص سنگ و سیال مرتبط است. مدل های فیزیک سنگ برای پیش بینی چگونگی تأثیر ویژگی های مختلف سنگ بر داده های لرزه ای، از جمله سرعت، تضعیف، و دامنه بازتاب امواج لرزه ای استفاده می شوند (شکل ۱). این مدل ها برای تفسیر داده های لرزه ای و ایجاد تصاویر زیرسطحی از ساختار زمین استفاده می شوند. مدل های فیزیک سنگ را به سه دسته کلی به نام های مدل های نظری، تجربی و اکتشافی تقسیم می شوند که این طبقه بندی تمایز واضحی بین منابع مدل های مختلف و نحوه استخراج آنها ایجاد می کند [1, 2]. نگاه دقیق تر به جریان های کار و روش های مدل سازی کلی فیزیک سنگ روشن می کند که این طبقه بندی برای اهداف عملی باید اصلاح شود. برای کاربرد عملی تر، مدل های فیزیک سنگ را می توان به مدل های سیال منفذی، مدل های نظری، مدل های تجربی و اکتشافی و مدل های ترکیبی تقسیم کرد. (شکل ۲). این طبقه بندی منعکس کننده مراحل ضروری مورد نیاز در یک روش واقعی مدل سازی فیزیک سنگ است [1, 5]. در این مطالعه به بررسی رخساره مخزنی با استفاده از مدل سازی فیزیک سنگی پرداخته خواهد شد.

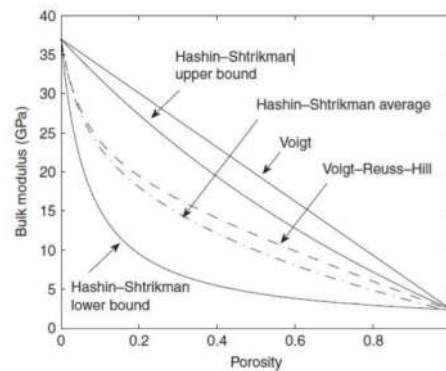
۲ روش تحقیق

در این مطالعه به بررسی و ارزیابی خصوصیات مرتبط با خصوصیات پتروفیزیکی و ژئوفیزیکی مربوط به رخساره مخزن هیدروکربنی پرداخته می شود. محور اصلی مطالعه تحلیل رخساره های سنگی و خصوصیات مرتبط با آنها است. از طریق

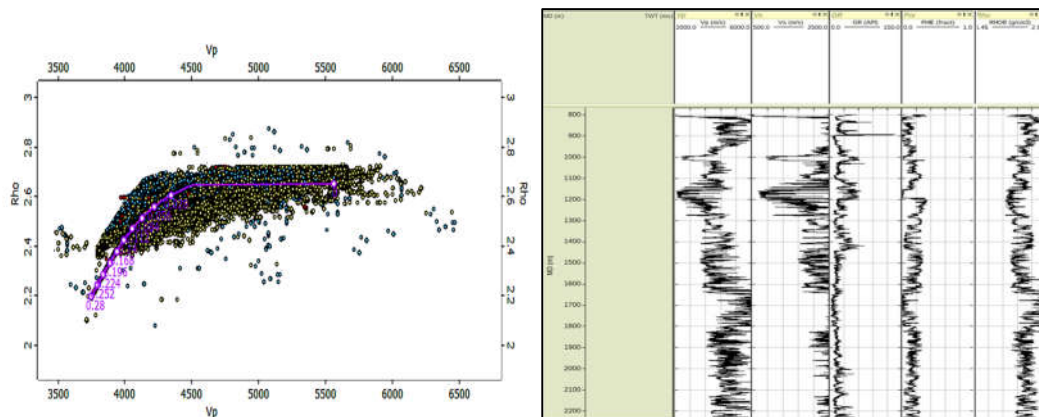
استفاده از نمودارهای کراس پلات، تحلیل داده‌های به دست آمده از چاه‌پیمایی و مطالعات سنگ شناسی و مدل‌سازی فیزیک سنگی به عمل می‌آید. این نمودارها نه تنها در شناسایی و تعیین رخساره‌های سنگی کاربرد دارند و در درک عمیق‌تری از ساختار و خصوصیات مخازن نیز مفید هستند. تحلیل داده‌های به دست آمده پس از بررسی اطلاعات آغاز می‌شود. در ابتدا، استفاده از نمودارهای متقاطع که مبتنی بر داده‌های به دست آمده از چاه‌پیمایی و مطالعات سنگ‌شناسی هستند، ما را در شناسایی و تعیین رخساره‌های سنگی یاری می‌دهد. کلیدی‌ترین برای تحلیل‌های بعدی و درک عمیق‌تری از ساختمان و خصوصیات مخزن‌های هیدروکربنی می‌باشد [1, 2, 4] نمودارهای متقاطع ابزارهای موثری در زمینه‌های تحلیل خصوصیات فیزیک سنگی بین دو یا چند متغیر است. مدل‌های مرزی محدوده‌ای را تعریف می‌کنند که حداکثر و حداقل خواص کشسانی یک سنگ معین می‌تواند به صورت فیزیکی وجود داشته باشد. الاستیک بالا و پایین ممکن است مرزها را می‌توان تنها با دانستن مدول‌های الاستیک و کسر حجمی آنها برای هر یک از اجزای سنگ پیش‌بینی کرد. رایج‌ترین مدل‌های مرزی هستند که پایین‌ترین و بالاترین حد ممکن را برای مخلوط کردن کانی‌ها و سیالات مختلف با یکدیگر مدل می‌کنند. شکل ۴ نمایانگر ارزیابی مدل‌سازی فیزیک سنگی در یک مخزن کربناته می‌باشد.



شکل ۱. مدل‌سازی فیزیک سنگ کربناته با استفاده از مدل شو و پین [1]



شکل ۲. شماتیک مدل‌سازی فیزیک سنگ با استفاده از مدل ویس-رویس-هیل [2]



شکل ۳. نگارهای چاه در محدوده مورد مطالعه.

شکل ۴. مدلسازی رخساره مخزنی با استفاده از مدل‌سازی فیزیک سنگی.

۳ نتیجه‌گیری

فیزیک سنگ شاخه‌ای از علوم اکتشاف نفت است که بر مطالعه خصوصیات فیزیک سنگ‌ها و ارتباط آنها با داده‌های لرزه‌ای متمرکز است. این رویکرد که جنبه‌های زمین‌شناسی، فیزیک و مهندسی را برای درک رفتار سنگ‌ها در شرایط مختلف سنگ ادغام کند. هدف اصلی فیزیک سنگ پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای سنگ‌ها در محیط‌های زیرسطحی است که در بسیاری از کاربردها از جمله اکتشاف نفت و گاز، حائز اهمیت است. در این مطالعه با بهره‌گیری از مدل‌سازی فیزیک سنگی به منظور ارزیابی رخساره مخزنی در یک مخزن کربناته مورد ارزیابی گرفته شد. نتایج مدلسازی فیزیک سنگی نشان داد که این مخزن ناهمگنی کمی در بخش‌های مختلف مخزنی دیده می‌شود.

منابع

1. Xu, S. and Payne, M. A., 2009, Modeling elastic properties in carbonate rocks: The Leading Edge, 28, 66–74.
2. Avseth, P., Mukerji, T., & Mavko, G. (2010). Quantitative seismic interpretation: applying rock physics tools to reduce interpretation risk. Cambridge University Press.
3. Safarpour, M., Riahi, M. A., Rahimi, M., 2023. 'Integration of Seismic Attributes and Wellbore Data of Ghar Formation in the Hindijan and Bahregansar Oilfields', Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology, 12(2), pp. 13-39. doi: 10.22050/ijogst.2022.336225.1634
4. Rahimi, M., Riahi, M. A., 2022. Application of instantaneous amplitude and spectral decomposition to determine the location and thickness of a hydrocarbon reservoir. Bulletin of Geophysics and Oceanography. DOI 10.4430/bgo00402.
5. Mohammad Rashid, N. A., Riahi, M. A., 2023. Integrating facies analysis and geostatistical methods in an onshore oil field using petrophysical groups, Interpretation 11: SA167-SA174.