Al-Farouk journal of sciences
Volume (٢), Issue (3) (JUNE, ٢٠٢٦)
ISSN: 3135-2359

مجلة الفاروق للعلوم
المجلد (2) العدد ٣ يونيو ٢٠٢٦
ردمد: 3135-2359

الأسس الفيزيائية وتطبيقها في علم الجيوفيزياء

فريحة محمد اعكاف عبيد
قسم الفيزياء – كلية الآداب والعلوم بدر – جامعة الزنتان

Physical Foundations and Their Application in Geophysics

Fariha Mohammed Akaaf Obeid – Department of Physics – Faculty of Arts and Sciences, Badr University of Zintan
fareha.abied@uoz.edu.ly
https://orcid.org/0009-0003-0662-5976

تاريخ الاستلام: ٢٠٢٦/٠٤/٠٦ تاريخ المراجعة ٢٠٢٦ /٠٥/٠٨ تاريخ القبول:٢٠٢٦/٠٥/١٩- تاريخ النشر: ٢٠٢٦ /٠٦/٠٧

الملخص:

يعتبر علم الجيوفيزياء من أهم العلوم التطبيقية التي تعتمد على استخدام القوانين والأسس الفيزيائية لدراسة الأرض وتركيبها وبنيتها الداخلية و العوامل الطبيعية المؤثرة فيها، ويهتم هذا العلم على فهم الخصائص الفيزيائية للصخور والتراكيب الجيولوجية عن طريق قياس وتحليل المجالات الجاذبية و المغناطيسية و الزلزالية و الكهرومغناطيسية و الحرارية.

في هذه الورقة يتم عرض وتوضيح الأسس الفيزيائية الرئيسية التي يعتمد ويقوم عليها علم الجيوفيزياء، بالإضافة إلى التركيز على المبادئ النظرية و التطبيقات العملية في استكشاف الموارد الطبيعية، وتهدف هذه الورقة إلى توضيح مدى أهمية استخدام الذكاء الاصطناعي في معالجة البيانات وتفسيرها وأن التكامل بين الأسس الفيزيائية والتقنيات الرقمية الحديثة ساهم بشكل كبير في تحسين دقة البيانات والدراسات الجيوفيزيائية.

الكلمات المفتاحية:

الجيوفيزياء، الجاذبية الأرضية، المغناطيسية الأرضية، الموجات الزلزالية، الكهرومغناطيسية.

المقدمة:

يعرف علم الجيوفيزياء بأنه العلم الذي يطبق المبادئ و القوانين الفيزيائية لدراسة الأرض وبنيتها الداخلية وخصاصها المختلفة (Lowrie & Fichtner, 2020)، وقد أصبح هذا العلم أداة أساسية في استكشاف الموارد الطبيعية ودراسة الظواهر الجيولوجية مثل الزلازل و البراكين وحركة الصفائح التكتونية (Kearey *et al*, 2013) .

تعتمد الجيوفيزياء على فهم ودراسة الاستجابات الفيزيائية للمواد والتراكيب الموجودة تحت سطح الأرض، مما يساهم ويساعد في الحصول على معلومات تفصيلية عن ماهية التراكيب الجيولوجية الداخلية و العميقة دون الحاجة إلى الحفر المباشر. وقد ساهم التطور المستمر في أجهزة القياس و الحوسبة الرقمية في زيادة أهمية الجيوفيزياء في المجالات الاكاديمية و الصناعية (Reynolds, 2011).

شهد علم الجيوفيزياء خلال العقود الأخيرة تطورا ملحوظا نتيجة التقدم في العلوم الفيزيائية وتقنيات القياس والحوسبة الرقمية. وقد أدى هذا التطور إلى توسيع نطاق استخدام الأساليب الجيوفيزيائية لتشمل مجالات متعددة مثل استكشاف النفط والغاز والمعادن والمياه الجوفية، إضافة إلى الدراسات البيئية والهندسية ورصد المخاطر الطبيعية. وتكمن أهمية الجيوفيزياء

في قدرتها على توفير معلومات تفصيلية عن البنية الداخلية للأرض دون الحاجة على الحفر المباشر، مما يجعلها من أكثر الوسائل كفاءة واقتصادا في دراسة التراكيب الجيولوجية وتقييم الموارد الطبيعية (Burger *et al*, 2022).

وتعتمد جميع التقنيات الجيوفيزيائية على مبدأ أساسي يتمثل في قياس التباين في الخصائص الفيزيائية للصخور والتراكيب الجيولوجية، مثل الكثافة والقابلية المغناطيسية و المرونة والمقاومة النوعية والتوصيلية الكهربائية. ومن خلال تحليل هذه التباينات يمكن استنتاج طبيعة الطبقات الجيولوجية وتحديد مواقع الخزانات والصدوع والتراكيب التكتونية المختلفة بدرجة عالية من الدقة (Kearey *et al*, 2013).

إن الهدف من هذه الورقة هو مراجعة و توضيح أهم أساسيات الفيزياء الرئيسية التي يعتمد عليها علم الجيوفيزياء وتوضيح تطبيقاتها في هذا المجال والتحديات المستقبلية في ظل التطور الذي تشهده كل العلوم مع أدوات الذكاء الاصطناعي.

منهجية المراجعة:

في هذه الورقة تم الاعتماد على منهج المراجعة الوصفية و التحليلية للأدبيات العلمية التي تتعلق بأساسيات الفيزياء لعلم الجيوفيزياء، حيث تمت الاستعانة بالكتب المرجعية المتعلقة بهذا المجال، بالإضافة إلى بعض المقالات العلمية المنشورة خلال السنوات الماضية، وتم ترتيبها في هذه الورقة على محاور وهي الجاذبية و المغناطيسية والطرق الزلزالية والكهربائية والكهرومغناطيسية ومن ثم الفيزياء الحرارية كونها أهم محاور علم الجيوفيزياء.

مفهوم علم الجيوفيزياء وفروعه:

يضم علم الجيوفيزياء مجموعة واسعة من التخصصات التي تهدف إلى دراسة الأرض باستخدام الأسس والأدوات الفيزيائية. ومن أبرز فروعه الجيوفيزياء الاستكشافية والجيوفيزياء الهندسية والجيوفيزياء البيئية. وقد تطورت هذه الفروع بصورة كبيرة نتيجة التقدم في القياسات الميدانية ومعالجة البيانات الرقمية (Mussett & Khan, 2000) .

أولا: الأساس الفيزيائي للجاذبية الأرضية

تعتمد طرق الجاذبية على الاختلافات في كثافة الصخور الموجودة تحت سطح الأرض (Telford *et al*, 1990) . حيث يتم استخدام القياسات الجاذبية لغرض الكشف عن الاحواض الرسوبية والتراكيب الجيولوجية وكذلك الكشف عن الخامات المعدنية الموجودة تحت سطح الأرض، وتعتبر هذه الطريقة من أفضل و أكثر الطرق استخداما للمسوحات واسعة النطاق لأنها منخفضة التكلفة وسهلة التطبيق.

يعتمد تفسير قياسات الجاذبية بالدرجة الأولى على قانون نيوتن بالإضافة إلى قوانين أخرى كما هو موضح أدناه:

- قانون الجذب العام لنيوتن:

$$F = G\,\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

- شدة مجال الجاذبية:

$$g = \frac{F}{m} = G\,\frac{M}{r^2}$$

- الجهد الثقالي:

$$V = -\int_{\infty}^{r} g\,dr = -G\,\frac{M}{r}$$

- شذوذ الجاذبية:

$$\Delta g = g_{\mathrm{obs}} - g_{\mathrm{th}}$$

- شذوذ الجاذبية الحر (بوغيه):

$$\Delta g_B = \Delta g + 2\pi G\,\rho h$$

حيث: G ثابت الجذب العام، M كتلة الأرض، m كتلة الاختبار، r المسافة، ρ الكثافة، h الارتفاع.

حيث تستخدم هذه العلاقة في تفسير شذوذات الجاذبية الناتجة عن اختلاف كثافات الصخور تحت سطح الأرض.

ثانيا: الأساس الفيزيائي للمغناطيسية الأرضية

ينشأ المجال المغناطيسي للأرض نتيجة حركة المواد المنصهرة الموصلة للكهرباء داخل اللب الخارجي للأرض (Lowrie & Fichtner, 2020). يتم استخدام الطرق المغناطيسية لغرض الكشف عن الصخور النارية و الخامات المعدنية بالإضافة إلى دراسة التراكيب التكتونية المختلفة. كما ساهمت البيانات المغناطيسية في دعم نظرية الصفائح التكتونية (Turcotte & Schubert, 2014).

تعتمد الطرق المغناطيسية على العلاقة بين شدة المجال المغناطيسي و المغنطة داخل الصخور :

- القوة على شحنة متحركة في مجال مغناطيسي:

$$\vec{F} = q\,(\vec{v} \times \vec{B})$$

- قانون أمبير:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$$

- قانون جاوس للمغناطيسية:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

- العلاقة بين المجال B والمغنطة M:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

- المغنطة المستحثة:

$$\vec{M} = \chi \vec{H}$$

- شذوذ المجال المغناطيسي:

$$\Delta T = T_{\text{obs}} - T_{\text{IGRF}}$$

حيث: نفاذية الفراغ، χ القابلية المغناطيسية، T الشدة الكلية للمجال.

وتستخدم هذه العلاقة في تفسير الشذوذات المغناطيسية المرتبطة بالخامات المعدنية والصخور النارية.

ثالثا: الأساس الفيزيائي للطرق الزلزالية

تعتمد الطرق الزلزالية على دراسة انتشار الموجات المرنة خلال الصخور (Sheriff & Geldart, 1995). حيث تتقسم الموجات الزلزالية إلى موجات أولية وموجات ثانوية وموجات سطحية. وتعد المسوحات الزلزالية الأداة الأكثر دقة في استكشاف النفط و الغاز وتحديد التراكيب الجيولوجية العميقة (Yilmaz, 2001) . ويمكن احتساب سرعة الموجات الزلزالية باستخدام الأسس الفيزيائية التالية:

- سرعة الموجات في وسط مرن متجانس:
  - سرعة الموجات الأولية (P):

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

  - سرعة الموجات الثانوية (S):

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

حيث: K معامل الإنضغاط الحجمي، μ معامل القص، ρ الكثافة.

- علاقة بواسون:

$$\sigma = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{V_P^2 - V_S^2}$$

- طول الموجة والتردد:

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

- معادلة الموجة الزلزالية:

$$\nabla^2 \psi = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$

حيث: نسبة بواسون، λ طول الموجة، f التردد، ψ الإزاحة.

وتستخدم هذه العلاقات في تحديد طبيعة الطبقات الجيولوجية وخصائصها الميكانيكية.

رابعا: الأساس الفيزيائي للطرق الكهربائية و الكهرومغناطيسية

تقوم الطرق الكهربائية على قياس المقاومة النوعية للصخور، بينما تعتمد الطرق الكهرومغناطيسية على دراسة التوصيلية الكهربائية باستخدام الحث الكهرومغناطيسي (Reynolds, 2011). حيث يتم استخدام هذه الطرق لغرض الكشف عن المياه الجوفية وكذلك الخامات المعدنية بالإضافة إلى الدراسات البيئية. وتعتمد فعالية هذه الطرق على العلاقة بين المحتوى المائي للصخور وخصائصها الكهربائية (Parasnis, 1997).

حيث تعتمد الطرق الكهربائية على قانون أوم:

- قانون أوم في وسط متجانس:

$$V = IR$$

- العلاقة بين المقاومة والمقاومية النوعية:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

- فرق الجهد لنصف فضاء متجانس (مصدر نقطي):

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

- السطح المتساوي الجهد حول قطب نقطي:

$$r = \frac{\rho I}{2\pi V}$$

حيث: V فرق الجهد، I شدة التيار، R المقاومة، ρ المقاومية النوعية، L طول المسار، A مساحة المقطع، r المسافة.

وتعتمد الطرق الكهرومغناطيسية على معادلات ماكسويل:

• معادلات ماكسويل الاساسية (في وسط خطي متجانس):

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_s \quad (1)$$
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$
$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$
$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4)$$

• العلاقة بين المجالات:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \vec{J} = \sigma \vec{E}$$

• معادلة الموجة الكهرومغناطيسية:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

حيث: ε سماحية الوسط، μ نفاذية الوسط، σ التوصيلية الكهربائية.

خامسا: الفيزياء الحرارية للأرض

إن الحرارة الداخلية للأرض تلعب دور مهم وكبير في العديد من العمليات الجيولوجية، حيث تنشأ هذه الحرارة بسبب التحلل الإشعاعي للعناصر المشعة والحرارة المتبقية منذ تكوين الأرض. وتستخدم الدراسات الحرارية في استكشاف الطاقة الحرارية الأرضية وفهم النشاط التكتوني و البركاني (Turcotte & Schubert, 2014) .

يعتمد انتقال الحرارة في الصخور على قانون فوربيه:

• قانون فوربية للتوصيل الحراري:

$$\vec{q} = -k\nabla T$$

• معادلة انتقال الحرارة:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k\nabla^2 T + H$$

• التدفق الحراري:

$$Q = -kA\frac{dT}{dz}$$

• الزيادة الحرارية مع العمق (التدرج الحراري):

$$G = \frac{dT}{dz}$$

حيث: $\vec{q}$ التدفق الحراري، k معامل التوصيل الحراري، T درجة الحرارة، ρ الكثافة، c السعة الحرارية النوعية، H إنتاج الحرارة.

جدول (١): مقارنة بين أهم الطرق الجيوفيزيائية.

الطريقة الجيوفيزيائية	المبدأ الفيزيائي	الخاصية المقاسة	أهم التطبيقات	المزايا	العيوب
الجاذبية	قانون الجذب العام لنيوتن	اختلاف الكثافة	استكشاف المعادن والنفط ودراسة القشرة الأرضية	منخفضة التكلفة وتغطي مساحة واسعة	دقة محدودة في تحديد العمق
المغناطيسية	المجال المغناطيسي للأرض	القابلية المغناطيسية للصخور	استكشاف الخامات المعدنية ورسم التراكيب الجيولوجية	سريعة التنفيذ	تتأثر بالتشويش المغناطيسي
الزلزالية	انتشار الموجات المرنة	سرعة وانتشار الموجات	النفط و الغاز ودراسة البنية الداخلية للأرض	أعلى دقة تصويرية	مرتفعة التكلفة
الكهربائية	انتقال التيار الكهربائي	المقاومة النوعية	المياه الجوفية والدراسات البيئية	جيدة للأعماق الضحلة والمتوسطة	تتأثر بظروف التربة
الكهرومغناطيسية	الحث الكهرومغناطيسي	التوصيلية الكهربائية	التعدين والمياه الجوفية	سرعة جمع البيانات	صعوبة تفسير بعض النتائج

الخصائص الفيزيائية للصخور:

كل الطرق الفيزيائية التي سبق ذكرها تعتمد على الاختلافات والتباين في الخصائص الفيزيائية للصخور، وتشمل هذه الخصائص الكثافة والمرونة والمسامية والنفاذية والمقاومة النوعية والتوصيلية الكهربائية. وتؤثر هذه الخصائص بصورة مباشرة في تفسير القياسات الجيوفيزيائية (Burger *et al*, 2022) .

جدول (٢): الخصائص الفيزيائية للصخور وعلاقتها بالطرق الجيوفيزيائية.

الخاصية الفيزيائية	تعريفها	الطريقة الجيوفيزيائية المرتبطة بها
الكثافة	كتلة وحدة الحجم	الجاذبية
القابلية المغناطيسية	قدرة الصخر على التمغنط	المغناطيسية
المرونة	مقاومة الصخر للتشوه	الزلزالية
المقاومة النوعية	مقاومة مرور التيار الكهربائي	الكهربائية
التوصيلية الكهربائية	قدرة الصخر على نقل التيار	الكهرومغناطيسية
الموصلية الحرارية	قدرة الصخر على نقل الحرارة	الدراسات الحرارية
المسامية	نسبة الفراغات في الصخر	الزلزالية والكهربائية
النفاذية	قدرة الموائع على الحركة داخل الصخر	الدراسات الهيدروجيولوجية

تطبيقات علم الجيوفيزياء :

تطبيقات الجيوفيزياء تستخدم في العديد من المجالات و الأغراض والتي من أهمها استكشاف النفط والغاز والمعادن والمياه الجوفية إضافة إلى الدراسات الهندسية و البيئية. كما تلعب دورا مهما في تقييم المخاطر الطبيعية و دراسة الزلازل والبراكين (Kearey *et al*, 2013).

التكامل بين الطرق الجيوفيزيائية:

تعتمد الدراسات الجيوفيزيائية الحديثة بصورة متزايدة على مبدأ التكامل بين أكثر من طريقة جيوفيزيائية بهدف الحصول على تصور أكثر دقة وشمولية للبنية الجيولوجية تحت سطح الأرض. ويرجع ذلك إلى أن كل طريقة جيوفيزيائية تستجيب لخاصية فيزيائية معينة للصخور، حيث تعتمد طرق الجاذبية على تباين الكثافة، بينما تعتمد الطرق المغناطيسية على الاختلاف في القابلية المغناطيسية، في حين تستند الطرق الزلزالية إلى التباين في الخصائص المرنة للصخور، وتعتمد الطرق الكهربائية والكهرومغناطيسية على الاختلاف في المقاومة النوعية والتوصيلية الكهربائية (Reynolds, 2011).

وعلى الرغم من الأهمية الكبيرة لكل طريقة على حدة، فإن الاعتماد على طريقة منفردة قد يؤدي إلى تفسيرات غير دقيقة أو غير مكتملة نتيجة التشابه في الاستجابة الجيوفيزيائية لبعض التراكيب الجيولوجية المختلفة. لذلك أصبح دمج البيانات الناتجة عن عدة طرق جيوفيزيائية من الأساليب الأساسية المستخدمة في برامج الاستكشاف الحديثة، حيث يساهم هذا التكامل في تقليل درجة عدم اليقين وتحسين موثوقية النتائج التفسيرية (Kearey *et al*, 2013).

فعلى سبيل المثال، يمكن دمج البيانات الزلزالية مع بيانات الجاذبية والمغناطيسية للحصول على فهم أكثر تفصيلا للأحواض الرسوبية والتراكيب التركيبية العميقة المرتبطة بتجمعات النفط والغاز. كما يمكن استخدام نتائج الطرق الكهربائية والكهرومغناطيسية بالتكامل مع المعلومات الجيولوجية والهيدروجيولوجية لتحديد مواقع المياه الجوفية وتقييم امتداد الخزانات المائية وخصائصها الفيزيائية بصورة أكثر دقة (Reynolds, 2011).

وقد أسهم التطور المتسارع في تقنيات الحوسبة والنمذجة العددية خلال العقود الأخيرة في تعزيز مفهوم التكامل الجيوفيزيائي، حيث أصبح بالإمكان بناء نماذج جيولوجية ثلاثية الأبعاد تجمع البيانات المستمدة من عدة طرق جيوفيزيائية ضمن إطار تفسيري موحد. ويساعد هذا النهج في تحسين جودة النماذج الجيولوجية وتقليل الأخطاء الناتجة عن الاعتماد على مصدر بيانات واحد فقط (Lowrie & Fichtner, 2020).

وتشير الدراسات الحديثة إلى أن التكامل بين الطرق الجيوفيزيائية يمثل أحد اهم الاتجاهات العلمية في مجال الاستكشاف الجيوفيزيائي، نظرا لدوره في رفع كفاءة عمليات البحث عن الموارد الطبيعية، وتحسين تقييم المخاطر الجيولوجية، وتعزيز القدرة على توصيف التراكيب تحت السطحية المعقدة. ومن المتوقع ان يزداد الاعتماد على هذا النهج مستقبلا بالتزامن مع التطورات المتواصلة في الذكاء الاصطناعي ومعالجة البيانات الضخمة والنمذجة الجيوفيزيائية المتقدمة (Burger *et al*, 2022).

الاتجاهات الحديثة في الجيوفيزياء:

شهدت السنوات الأخيرة قفزة علمية غير مسبوقة وتطورا كبيرا في استخدام أدوات الذكاء الاصطناعي في الفهم العميق وتفسير البيانات الجيوفيزيائية، كما أصبحت النمذجة ثلاثية الأبعاد والحوسبة عالية الأداء من اهم الأدوات الأساسية المستخدمة في الدراسات الحديثة، حيث ساهمت هذه التطورات في تحسين دقة النتائج والتفسير في الدراسات الجيولوجية.

المناقشة:

بينت هذه الدراسة أن أساسيات الفيزياء للجاذبية و المغناطيسية و الزلزالية والكهرومغناطيسية لاتزال تشكل ركائز أساسية لعلم الجيوفيزياء، كما تدعم وتؤكد ان دمج أكثر من طريقة جيوفيزيائية يؤدي إلى تحسين جودة النتائج وتقليل الأخطاء، حيث تؤكد الدراسات الحديثة أهمية دمج الأسس الفيزيائية التقليدية مع تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحقيق نتائج أكثر دقة وكفاءة.

الخاتمة:

خلصت هذه الدراسة إلى تأكيد أن علم الجيوفيزياء يعتمد بشكل أساسي على مجموعة من الأسس و المبادئ الفيزيائية التي تساعد في دراسة باطن الأرض وفهم خصائصه المختلفة، كما بينت أن التطورات الحديثة في الحوسبة والذكاء الاصطناعي لها دور كبير في تحسين قدرتها على استكشاف الموارد الطبيعية ودراسة الظواهر الجيولوجية المعقدة.

المراجع:

1. Burger, H. R., Sheehan, A. F., & Jones, C. H. (2022). *Introduction to Applied Geophysics: Exploring the Shallow Subsurface* (3rd ed). Cambridge University Press.
2. Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2013). *An Introduction to Geophysical Exploration* (3rd ed.). Wiley-Blackwell.
3. Lowrie, W., & Fichtner, A. (2020). *Fundamentals of Geophysics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
4. Mussett, A. E., & Khan, M. A. (2000). *Looking into the Earth: An introduction to geological geophysics*. Cambridge University Press.
5. Parasnis, D. S. (1997). *Principles of Applied Geophysics* (5th ed.). Chapman & Hall.
6. Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
7. Sheriff, R. E., & Geldart, L. P. (1995). *Exploration Seismology* (2nd ed.). Cambridge University Press.
8. Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
9. Turcotte, D. L., & Schubert, G. (2014). *Geodynamics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
10. Yilmaz, O. (2001). *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data* (2nd ed.). Society of Exploration Geophysicists.

المراجع (المقالات العلمية) ذات الصلة:

1. Capurso, A., Morelli, G., Fischanger, F., & Santarelli, G. (2024*). Detection of archaeological structure on the slope ground using geophysical methods*. Journal of Applied Geophysics, 230, Article 105521.
2. Chen, W., Zhang, J., Li, C., & Ma, X. (2024). *Exploring neuro-symbolic AI applications in geoscience: implications and future directions for mineral prediction*. Earth Science Informatics, 17(2), 1-15.
3. Krichene, E., Hmadi, M. S. A., & Al-Gajamiya, S. K. (2026). A Fair Comparative Framework for Time-Series Forecasting Using ARIMAX, XGBoost, and LSTM: Evidence from Libya. *Al-Farooq Journal of Sciences*, *2*(3), 69-85.
4. Kubo, H., Naoi, M., & Kano, M. (2024*). Recent advances in earthquake seismology using machine learning*. Earth, Planets and Space, 76(1), Article 36.
5. Sheng, H., Wu, X., Si, X., Li, J., Zhang, S., & Duan, X. (2023). *Seismic Foundation Model (SFM): A new generation deep learning model in geophysics*.
6. Tuia, D., Schindler, K., Demir, B., Zhu, X. X., Kochupillai, M., Džeroski, S., van Rijn, J. N., Hoos, H. H., Del Frate, F., Datcu, M., Markl, V., Le Saux, B., Schneider, R., & Camps-Valls, G. (2023). *Artificial intelligence to advance Earth observation: A review of models, recent trends, and pathways forward.*
7. Yu, S., & Ma, J. (2020). *Data-driven geophysics: From dictionary learning to deep learning*.
8. Zeng, L., Niu, Y., Ren, W., Tang, H., & Liu, X. (2024). *A method for intelligent identification of faults in seismic using an attention-based ES-UNet network with model re-training learning*. Journal of Applied Geophysics, 222, Article 105300.
9. Zerafa, C., Galea, P., & Sebu, C. (2025). *Synergizing Deep Learning and Full-Waveform Inversion: Bridging Data-Driven and Theory-Guided Approaches for Enhanced Seismic Imaging*.