# مبادئ الجيوفيزياء

# Principles of Geophysics

# فهرس المحتوى


علم الجيوفيزياء..... ٥

فروع الجيوفيزياء..... ٦

طرق الاستكشاف الجيوفيزيائي ..... ٨

نظرية المرونة .. مفهومها ومبادئها الأساسية .....١١

الموجات السيزمية .....١٧

واجهة الموجة ومسار الشعاع .....١٩

مبدأ هويجنز .....٢١

قانون سنيل .....٢٢

الانكسار السيزمي .....٢٣

مسارات الانكسار السيزمي .....٢٥

الانكسار الحرج.....٢٦

التقاطع عبر المسافة .....٢٨

اختيار الانكسار الأول .....٢٨

المنحنيات الزمنية للمسافة.....٣٠

الطبقات المتعددة .....٣١

الطبقات المنحدرة.....٣٣

أنواع المسوحات السيزمية الانكسارية .....٣٥

الانعكاس السيزمي.....٣٧

الفرق بين الإشارة والضوضاء.....٣٩

الانعكاس السيزمي الأفقي .....٤٠

الانعكاس السيزمي المتعدد .....٤١

معامل الانعكاس ..... ٤٢
معامل الانتقال ..... ٤٣
معامل المقاومة الصوتية ..... ٤٣
معادلات زوبيرتز ..... ٤٤
الانعكاس ذو القطبية السالبة ..... ٤٤
البنية الداخلية للأرض ..... ٤٥
نظرية الصفائح التكتونية ..... ٤٧
الزلازل ..... ٤٨
منطقة واداتي–بينيوف ..... ٥١
تصنيف الزلازل ..... ٥٢
كيفية تحديد موقع الزلزال ..... ٥٤
مقايس ريختر ومقياس ميركالي ..... ٥٥
المقاييس الزلزالية ..... ٥٦
الطاقة الزلزالية ..... ٥٩
تأثيرات الزلازل ..... ٥٩
الخصائص الكهربائية للصخور ..... ٦٠
الطرق الكهربائية والكهرومغناطيسية ..... ٦٣
العوامل التي تؤثر على المقاومة ..... ٦٥
قانون آرتشي ..... ٦٦
طرق المسح الكهربائي الأرضي ..... ٦٦
انكسار التيار ..... ٦٨
الاستطلاع الكهربائي الرأسي والتمثيل الكهربائي عالي الدقة ..... ٦٩

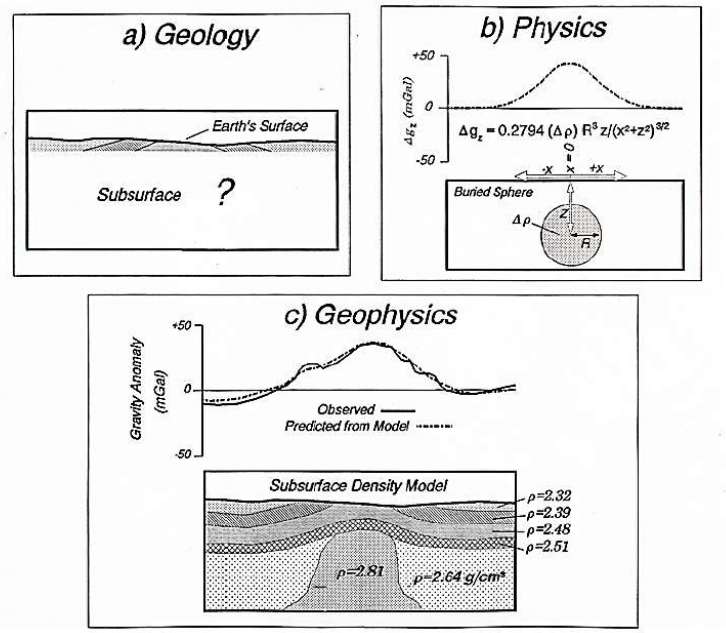
طريقة الجاذبية ..... ٧٠
مقياس الجاذبية ..... ٧٢
قانون الجذب الجاذبي والتسارع الجاذبي..... ٧٣
التباينات في الجاذبية..... ٧٦
العوامل التي تؤثر على الجاذبية ..... ٧٧
الطريقة المغناطيسية..... ٨٠
مغنطة الصخور..... ٨١
الميل المغناطيسي والانحراف المغناطيسي ..... ٨٣
أجهزة قياس المجال المغناطيسي..... ٨٥

# علم الجيوفيزياء

علم الجيوفيزياء (Geophysics) هو فرع من فروع علم الأرض "الجيولوجيا" يهتم بدراسة الخواص الفيزيائية للأرض ومكوناتها، وتفاعلاتها مع الطبيعة ومع العوامل الخارجية مثل، الزلازل والبراكين والتغيرات المناخية والكوارث الطبيعية الأخرى. يشمل هذا العلم الدراسات الجيوفيزيائية للصخور والتربة والمياه والهواء، بالإضافة إلى دراسة تأثير الأنشطة البشرية على البيئة. ويتناول أيضًا دراسة طبقات الأرض الداخلية وتركيبها الجيولوجي وتأثير القوى الداخلية والخارجية على تشكيل سطح الأرض وتغيراته، الذي يساهم باذن الله في فهم أسباب حدوث الكوارث الطبيعية وتوقعها ومحاولة الحد من تأثيراتها. يُستخدم علم الجيوفيزياء في دراسة تأثير الأنشطة البشرية على البيئة، مثل، تغيرات مستوى المياه الجوفية وتأثير الحفريات والتنقيبات النفطية والغازية على البيئة والتربة والمياه. يُستخدم علم الجيوفيزياء أيضاً في البحث عن الموارد الطبيعية مثل، النفط والغاز والمعادن والمياه الجوفية وذلك باستخدام التقنيات المختلفة. كما يساعد في تحديد خصائص التربة والصخور وتكوينها الجيولوجي مما يساعد على تطوير الزراعة والبناء والتعدين وغيرها من الأنشطة الاقتصادية. يُستخدم علم الجيوفيزياء أيضاً في دراسة التغيرات المناخية وتأثيرها على الأرض وذلك باستخدام التقنيات المختلفة لقياس درجات الحرارة والرطوبة والرياح والأمطار وغيرها من العوامل الجوية. ويساعد هذا العلم في تحديد الأسباب والتأثيرات المترتبة على التغيرات المناخية، وتطوير استراتيجيات لمواجهتها والحد من تأثيراتها على البيئة والإنسان. يعتبر علم الجيوفيزياء ذو أهمية عملية كبيرة حيث يساهم في فهم العديد من الظواهر الطبيعية والمشكلات البيئية التي تواجه الإنسان وتؤثر على حياته ومستقبله منها، الكشف عن الموارد الطبيعية مثل، النفط والغاز والمعادن والمياه الجوفية وتحديد مواقعها. الكشف عن المخاطر الطبيعية وذلك عن طريق تحديد المناطق التي تتعرض للزلازل والبراكين والانهيارات الأرضية وغيرها من الكوارث الطبيعية. الحفاظ على البيئة وذلك عن طريق فهم تأثير الأنشطة البشرية على البيئة وتحديد الآثار السلبية لهذه الأنشطة. التخطيط العمراني وذلك عن طريق تحديد خصائص التربة

والصخور وتكوينها الجيولوجي والذي يساعد في اتخاذ القرارات الصحيحة في التخطيط العمراني وتحديد المناطق المناسبة للبناء والتطوير.

**Geophysics = Geological Observations + Physical Laws**




## فروع الجيوفيزياء

تشمل الجيوفيزياء عدة تخصصات فرعية تركز على جوانب مختلفة من الأرض وخصائصها الفيزيائية. فيما يلي بعض الأقسام الرئيسية للجيوفيزياء، علم الزلازل (Earthquakes Seismology)، هو دراسة الزلازل (Earthquakes) والموجات السيزمية (Seismic Waves). وهو ينطوي على دراسة توليد (Generation) وانتشار (Propagation) وتأثيرات (Effects) الموجات الزلزالية في باطن الأرض. يستخدم علماء الزلازل الأدوات الزلزالية وتقنيات تحليل البيانات لفهم بنية باطن الأرض (Earth's Interior) وتقييم مخاطر الزلازل (Earthquake Hazards). الجيوديسيا (Geodesy)، تهتم الجيوديسيا بقياس وتمثيل شكل (Shape) الأرض وحجمها (Size) ومجال جاذبيتها (Gravity Field). يستخدم علماء الجيوديسيا أنظمة تحديد المواقع المعتمدة على الأقمار الصناعية، مثل نظام تحديد المواقع العالمي (Global Positioning System GPS)، لتحديد المواقع بدقة (Accurately Determine Positions) على سطح الأرض ودراسة تشوهها

(Deformation) بمرور الوقت. الجاذبية (Gravity) ومجالات الجهد الأرضي (Geopotential Fields)، يركز هذا القسم على قياس وتفسير الاختلافات في مجال الجاذبية الأرضية (Gravitational Field) ومجالات الجهد الأرضي (Geopotential Fields). تُستخدم بيانات الجاذبية لدراسة اختلافات الكثافة تحت السطح (Subsurface Density Variations)، ورسم خريطة لـ شذوذات/اختلالات جاذبية الأرض (Map the Earth's Gravitational Anomalies)، وفهم الشكل الجيودي العالمي (Understand the Global Geoid Shape). المغناطيسية (Magnetism) والمغناطيسية القديمة (Paleomagnetism)، تتضمن المغناطيسية والمغناطيسية القديمة دراسة المجال المغناطيسي للأرض (Study of Earth's Magnetic Field) وتغيراته (Variations) بمرور الوقت. يدرس الجيوفيزيائيون في هذا المجال أصل وسلوك المجال المغناطيسي الأرضي، والخصائص المغناطيسية للصخور، ويستخدمون البيانات المغناطيسية القديمة لإعادة بناء المجال المغناطيسي القديم للأرض. الطاقة الحرارية الأرضية (Geothermal) والتدفق الحراري (Heat Flow)، تركز دراسات الطاقة الحرارية الأرضية والتدفق الحراري على الخواص الحرارية (Thermal Properties) وآليات نقل الطاقة (Energy Transfer Mechanisms) داخل الأرض. يدرس الجيوفيزيائيون في هذا القسم توزيع الحرارة (Distribution of Heat) داخل باطن الأرض، ويدرسون موارد الطاقة الحرارية الأرضية (Geothermal Energy Resources)، ويقيمون التطور الحراري (Assess the Thermal Evolution) لقشرة الأرض ووشاحها. الكهرومغناطيسية (Electromagnetics)، الجيوفيزياء الكهرومغناطيسية تتضمن دراسة الخصائص الكهربائية (Electrical) والكهرومغناطيسية (Electromagnetic) للأرض. يستخدم الجيوفيزيائيون الطرق الكهرومغناطيسية لدراسة اختلافات الموصلية (Investigate Subsurface Conductivity Variations) تحت السطح، ورسم خرائط لموارد المياه الجوفية (Map Groundwater Resources)، واستكشاف الرواسب المعدنية (Explore for Mineral) والهيدروكربونية (Hydrocarbon Deposits). الاستشعار عن بُعد والجيوفيزياء الفضائية (Remote Sensing and Satellite Geophysics)، يستخدم هذا القسم تقنيات الاستشعار عن بُعد والمشاهدات الفضائية لدراسة مختلف جوانب سطح الأرض والغلاف الجوي. يقوم الجيوفيزيائيون بتحليل صور الأقمار الصناعية (Satellite Imagery) وبيانات الرادار (Radar Data) وغيرها من بيانات الاستشعار

عن بعد لدراسة التضاريس (Landforms) والغطاء النباتي (Vegetation) وأنماط المناخ (Climate Patterns) ومراقبة التغيرات البيئية (Environmental Changes). الجيوفيزياء التطبيقية (Applied Geophysics)، تتضمن الجيوفيزياء التطبيقية التطبيق العملي للطرق الجيوفيزيائية لحل مشاكل محددة في الهندسة (Engineering) والتقييمات البيئية (Environmental Assessments) واستكشاف الموارد (Resource Exploration) والتحقيقات الجيوتقنية (Geotechnical Investigations). يستخدم الجيوفيزيائيون في هذا المجال مزيج من التقنيات الجيوفيزيائية (Geophysical Techniques) المختلفة لتفسير وتحليل البيانات (Data Interpretation).

## Divisions of Geophysics

- **Global Geophysics:**
  Study of earthquakes, magnetic field, physical oceanography, Earth's thermal state and meteorology.
- **Exploration Geophysics:**
  Physical principles are applied to the search for, and evaluation of, resources such as oil, gas, minerals, water and building stone.

There are many divisions of geophysics, including: oceanography, atmospheric physics, climatology, petroleum geophysics, environmental geophysics, engineering geophysics and mining geophysics.

## طرق الاستكشاف الجيوفيزيائي

طرق الاستكشاف الجيوفيزيائي (Geophysical Exploration Methods) هي تقنيات تستخدم لدراسة باطن الأرض، عادة لغرض تحديد وتوصيف التراكيب الجيولوجية (Identifying and Characterizing Geological Features)، أو الموارد الطبيعية (Natural Resources)، أو الظروف البيئية (Environmental Conditions). تتضمن هذه الطرق قياس وتحليل الخصائص الفيزيائية للأرض (Physical Properties of the Earth) مثل، مجالها المغناطيسي (Magnetic)، ومجال الجاذبية (Gravitational)، والتوصيل الكهربائي (Electrical Conductivity)، والموجات السيزمية

(Seismic Waves)، والإشعاع الكهرومغناطيسي (Electromagnetic Radiation). فيما يلي بعض طرق الاستكشاف الجيوفيزيائية الشائعة الاستخدام، الانعكاس السيزمي (Seismic Reflection)، يعد الانعكاس السيزمي أحد أكثر الطرق الجيوفيزيائية استخداماً. وهو ينطوي على توليد وتسجيل الموجات السيزمية التي تنتشر عبر باطن الأرض. ومن خلال تحليل الموجات المنعكسة (Analyzing the Reflected Waves)، يمكن لعلماء الجيوفيزياء استنتاج معلومات حول التراكيب تحت السطحية (Subsurface Structures) مثل، موقع وهندسة طبقات الصخور (Location and Geometry of Rock Layers)، والفوالق (Faults)، والتراكيب الجيولوجية الأخرى. الانكسار السيزمي (Seismic Refraction)، الانكسار السيزمي هو طريقة سيزمية أخرى تركز على دراسة سرعات الموجات السيزمية. ويتضمن قياس زمن الوصول (Travel Times) وزوايا (Angles) الموجات السيزمية أثناء مرورها عبر طبقات مختلفة من الأرض. هذه الطريقة مفيدة بشكل خاص لتحديد عمق (Depth) وسرعة (Velocity) طبقات الصخور تحت السطحية وتحديد الاختلافات في خصائص الصخور (Delineating Variations in Rock Properties). التصوير المقطعي للمقاومة الكهربائية (Electrical Resistivity Tomography ERT)، يقيس المقاومة الكهربائية (Electrical Resistivity) للمواد الموجودة تحت السطح. يتضمن حقن التيارات الكهربائية (Injecting Electrical Currents) في الأرض وقياس الفولتية الناتجة (Measuring the Resulting Voltages). يمكن أن توفر الاختلافات في المقاومة معلومات حول وجود وتوزيع المواد تحت السطحية المختلفة، مثل المياه الجوفية (Groundwater)، والرواسب المعدنية (Mineral Deposits)، أو التراكيب الجيولوجية (Geological Structures). الرادار المخترق للأرض (Ground Penetrating Radar GPR)، يستخدم الرادار المخترق للأرض موجات كهرومغناطيسية عالية التردد (High-Frequency Electromagnetic Waves) لتصوير باطن الأرض (Image the Subsurface). تنبعث منه نبضات (Pulses) من الطاقة الكهرومغناطيسية (Electromagnetic Energy) ويسجل (Records) الانعكاسات الناتجة عن الواجهات تحت السطح. تُستخدم تقنية بشكل شائع لرسم خرائط للتراكيب السطحية الضحلة (Shallow Subsurface Features)، مثل المرافق المدفونة (Buried Utilities) والهياكل الأثرية (Archaeological Structures) والطبقات الجيولوجية (Geological Layers). المسوحات

المغناطيسية (Magnetic Surveys) تقيس المسوحات المغناطيسية التغيرات في المجال المغناطيسي للأرض (Variations in the Earth's Magnetic Field) الناتجة عن التراكيب تحت السطح. هذه الطريقة مفيدة بشكل خاص لتحديد مواقع المعادن المغناطيسية (Locating Magnetic Minerals)، ورسم خرائط التراكيب الجيولوجية (Mapping Geological Structures)، وتحديد الرواسب المعدنية المحتملة (Identifying Potential Mineral Deposits). مسوحات الجاذبية (Gravity Surveys)، تقيس مسوحات الجاذبية الاختلافات الصغيرة في مجال الجاذبية الأرضية (Variations in the Earth's Gravitational Field). ومن خلال تحليل هذه الاختلافات، يمكن لعلماء الجيوفيزياء استنتاج توزيع كثافة المواد الموجودة تحت سطح الأرض. تُستخدم مسوحات الجاذبية بشكل شائع في التنقيب عن النفط والغاز (Oil and Gas Exploration)، وكذلك لرسم خرائط للتراكيب الجيولوجية تحت السطحية (Mapping Subsurface Geological Structures). الطرق الكهرومغناطيسية (Electromagnetic Methods EM)، تتضمن طرق قياس استجابة المواد الموجودة تحت السطح (Response of Subsurface Materials) للمجالات الكهرومغناطيسية (Electromagnetic Fields). يتم استخدام تقنيات طرق كهرومغناطيسية مختلفة مثل، الطرق الكهرومغناطيسية في مجال التردد (Frequency-Domain EM) والطرق الكهرومغناطيسية في مجال الزمن (Time-Domain EM)، لدراسة الاختلافات في التوصيل الكهربائي (Electrical Conductivity) والخصائص الكهرومغناطيسية (Electromagnetic Properties) التحت سطحية. غالباً ما تُستخدم الطرق الكهرومغناطيسية في استكشاف المياه الجوفية (Groundwater Exploration) واستكشاف المعادن (Mineral Exploration) والدراسات البيئية (Environmental Studies). يعتمد اختيار الطرق الاستكشاف الجيوفيزيائي على أهداف الدراسة (Objectives of the Study)، والوضع الجيولوجي (Geological Setting)، والعمق المطلوب للبحث (Desired Depth of Investigation). غالباً ما يتم الجمع بين طرق متعددة للحصول على فهم أكثر شمولاً لباطن الأرض.

| Method | Measured parameter | Operative physical property |
|---|---|---|
| Seismic | Travel times of reflected/refracted seismic waves | Density and elastic moduli, which determine the propagation velocity of seismic waves |
| Gravity | Spatial variations in the strength of the gravitational field of the Earth | Density |
| Magnetic | Spatial variations in the strength of the geomagnetic field | Magnetic susceptibility and remanence |
| Electrical | | |
| Resistivity | Earth resistance | Electrical conductivity |
| Induced polarization | Polarization voltages or frequency-dependent ground resistance | Electrical capacitance |
| Self-potential | Electrical potentials | Electrical conductivity |
| Electromagnetic | Response to electromagnetic radiation | Electrical conductivity and inductance |
| Radar | Travel times of reflected radar pulses | Dielectric constant |

## نظرية المرونة .. مفهومها ومبادئها الأساسية

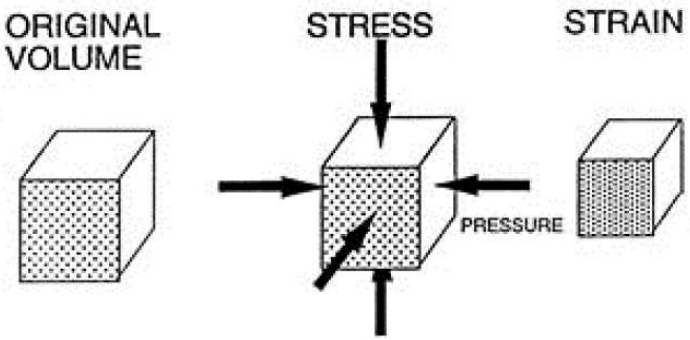
نظرية المرونة (Theory of Elasticity) هي فرع من ميكانيكا المواد الصلبة (Solid Mechanics) الذي يتعامل مع سلوك (Behavior) المواد الصلبة تحت تأثير القوى الخارجية (External Forces). فهو يصف كيفية تشوه (Deform) المواد واستجابتها (Respond) للأحمال المطبقة (Applied Loads) مع الحفاظ على شكلها الأصلي بعد إزالة الحمل (Load is Removed). تفترض النظرية أن المادة مرنة (Elastic)، أي أنها يمكن أن تعود إلى شكلها الأصلي (it can Return to its Original Shape) عند إزالة الحمل، وأنه لا يوجد أي تشوه دائم (Permanent Deformation). تشمل المفاهيم (Concepts) والمبادئ (Principles) الأساسية لنظرية المرونة ما يلي، الإجهاد (Stress)، الإجهاد هو مقياس للقوى الداخلية (Internal Forces) داخل المادة الناتجة عن الأحمال الخارجية (External Loads). يتم تعريفها على أنها القوة لكل وحدة مساحة (Force Per Unit Area) ويتم تمثيلها عادةً بالحرف اليوناني (σ). يمكن تصنيف الإجهاد أيضاً إلى إجهاد عادي (Normal Stress)، والذي يعمل بشكل عمودي (Perpendicular) على السطح، وإجهاد القص (Shear Stress)، الذي يعمل بالتوازي (Parallel) مع السطح. الانفعال (Strain)، الانفعال هو مقياس للتشوه (Deformation) الذي تتعرض له المادة استجابةً للإجهاد (Stress). وهو يمثل التغير النسبي (Relative Change) في شكل (Shape) أو حجم (Size) المادة ويتم تمثيله عادةً بالحرف اليوناني (ε). يمكن تصنيف الانفعال أيضاً إلى إجهاد عادي (Normal Strain)، والذي يصف التغيرات في الطول (Length) أو الحجم (Volume)، وإجهاد القص

(Shear Strain)، الذي يصف التغيرات في الشكل (Describes Changes in Shape).

## Theory of Elasticity:

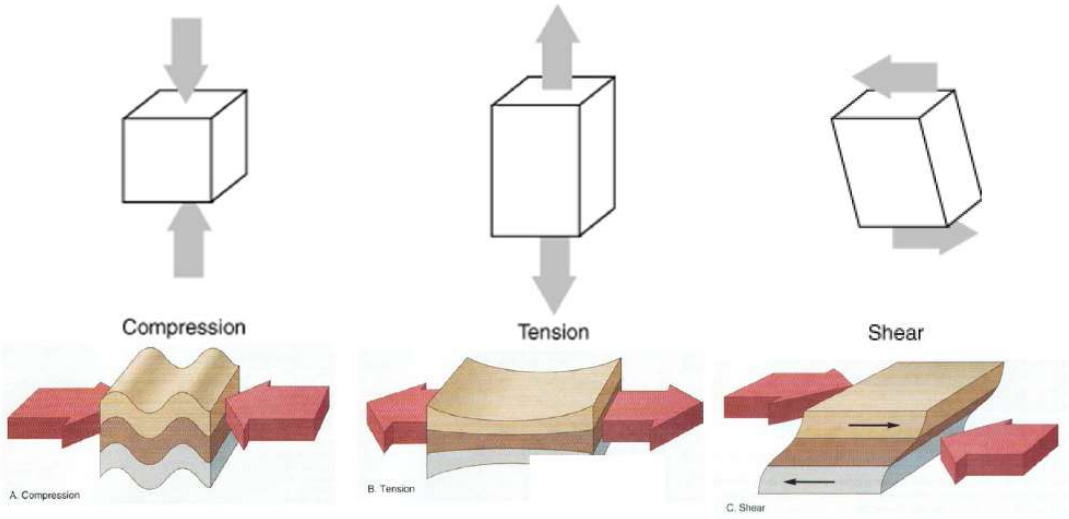
**Stress:** is the ratio of applied force (F) to the area across which it is acts.

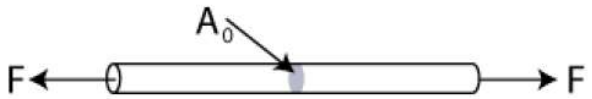
**Strain:** is the deformation caused in the body, and is expressed as the ratio of change in length (or volume) to the original length (or volume).



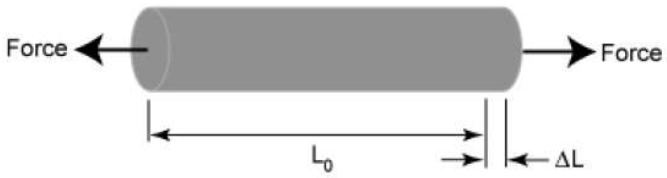

## Types of Stress:

1. **Compression:** causes a material to shorten.
2. **Tension:** causes a material to lengthen.
3. **Shear:** causes distortion of a material.






$$\text{Stress, } \sigma = \frac{\text{Force}}{\text{Cross-Sectional Area}} = \frac{F}{A_0}$$

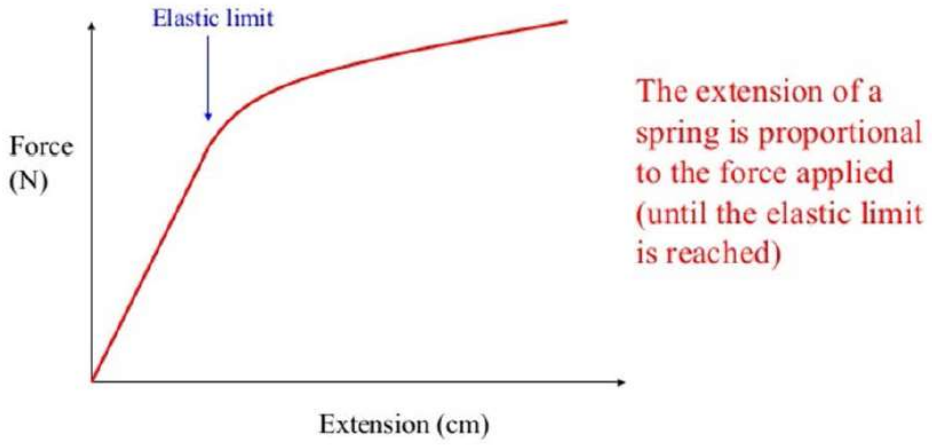



$$\text{Strain} = \frac{\text{Elongation}}{\text{Orininal Length}} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

قانون هوك (Hooke's Law)، قانون هوك هو مبدأ أساسي في المرونة ينص على أن الإجهاد المطبق (Stress Applied) على مادة ما يتناسب طردياً (Directly Proportional) مع الانفعال الناتج (Resulting Strain)، بشرط أن تظل المادة ضمن حد المرونة. يتم التعبير عن هذه العلاقة الخطية (Linear Relationship): $\sigma = E\varepsilon$، حيث E هو معامل يونغ (Young's Modulus)، وهي تميز صلابة (Stiffness) المادة.

## Hooke's Law

Hooke's Law essentially states that stress is proportional to strain.



## Hooke's Law

- Hooke's law states that:

$$F \propto e$$

المعاملات المرنة (Elastic Moduli)، المعاملات المرنة هي خصائص المواد (Material Properties) التي تحدد استجابة المادة للإجهاد (Quantify the Response of a Material to Stress). وهي تقاس لمعرفة صلابة المادة وقدرتها على مقاومة التشوه.

## Elastic Constants

Elastic constants describes the strain of a material due to applied stress.

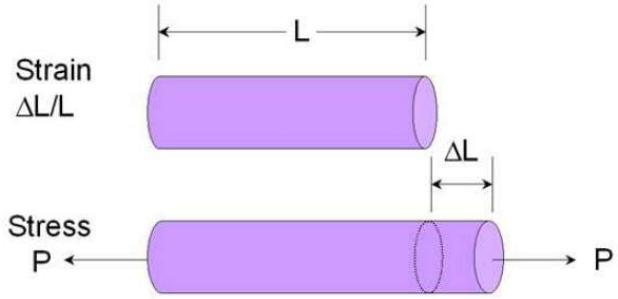
## Modulus = Stress/Strain

The higher the value of the modulus, the stronger the material, the smaller the strain produced by a given stress.

معامل يونغ (Young's Modulus)، يقيس صلابة المادة (Stiffness) في النطاق الخطي (Linear Range). يحدد نسبة الإجهاد إلى الانفعال (Ratio of Stress to Strain) ضمن الحد المرن للمادة (Within the Elastic Limit of a Material) في حالة شد (Tension) أو ضغط (Compression). معامل يونغ له نفس وحدات الإجهاد (الباسكال، Pascals Pa). وهو يصف مقاومة المادة للتشوه الطولي (Resistance to Longitudinal Deformation).

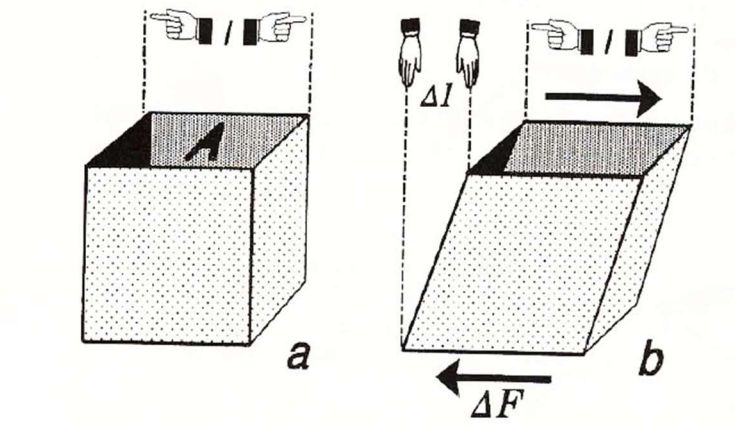
## Young's Modulus (E):

$$E = \frac{stress}{strain} = \frac{F/A}{\Delta l/l_o}$$




معامل القص (Shear Modulus)، يمثل مقاومة (Resistance) المادة للتشوه القصي ( Shear Deformation). يحدد نسبة الإجهاد القصي إلى الانفعال القصي ( Ratio of Shear Stress to Shear Strain) ضمن الحد المرن (Within the Elastic Limit) للمادة. معامل القص له نفس وحدات الضغط (الباسكال، Pascals Pa). ويصف مقاومة المادة للتشوه العرضي ( Transverse Deformation) أو تغيير الشكل (Shape Change).

## Shear Modulus (μ):




Measure of the effort needed to change the shape of a material without change of volume (μ =0 for liquid or gas).

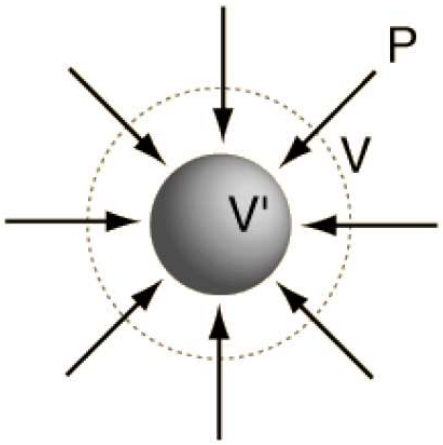
معامل الكتلة (Bulk Modulus)، يقيس مقاومة (Resistance) المادة للضغط الموحد (Uniform Compression). يحدد نسبة التغير في الضغط إلى التغير النسبي في حجم المادة (Ratio of the Change in Pressure to the Relative Change in Volume) تحت الضغط. معامل الكتلة له نفس وحدات الضغط (الباسكال، Pascals Pa). وهو يصف مقاومة المادة لتغير الحجم (Volume Change).

## Bulk Modulus (K):

Bulk modulus:

$$B = \frac{\Delta P}{\Delta V/V}$$

P = pressure
V = volume

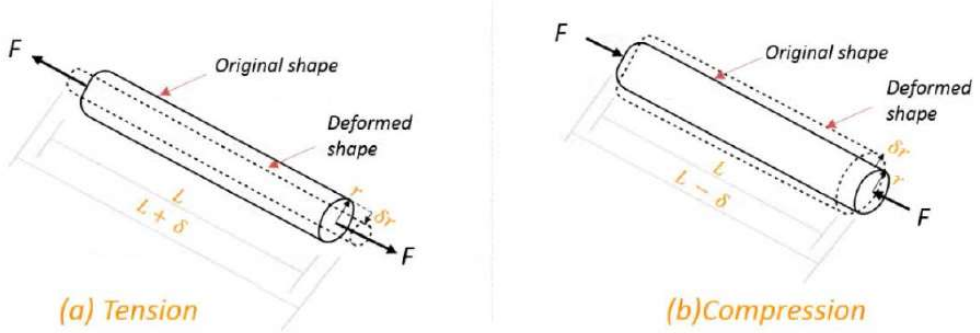



Measure of the capacity of the material to be compressed. It can be carried out for solid, liquid, and gas.

نسبة بواسون (Poisson's Ratio) هي خاصية مادية تصف العلاقة بين الانفعال الجانبي (Lateral Strain) "الانفعال المتعامد مع القوة المطبقة" والانفعال الطولي (Longitudinal Strain) "الانفعال الموازي للقوة المطبقة" لجسم ما. نسبة بواسون هي كمية بلا أبعاد (Dimensionless Quantity)، مما يعني أنها لا تحتوي على أي وحدات مرتبطة بها. يمكن أن تتراوح قيمة نسبة بواسون لمادة معينة بين −١ و٠,٥. ومع ذلك، فإن معظم المواد الشائعة لها نسب بواسون بين ٠ و٠,٥.

## Poisson's Ratio (σ):

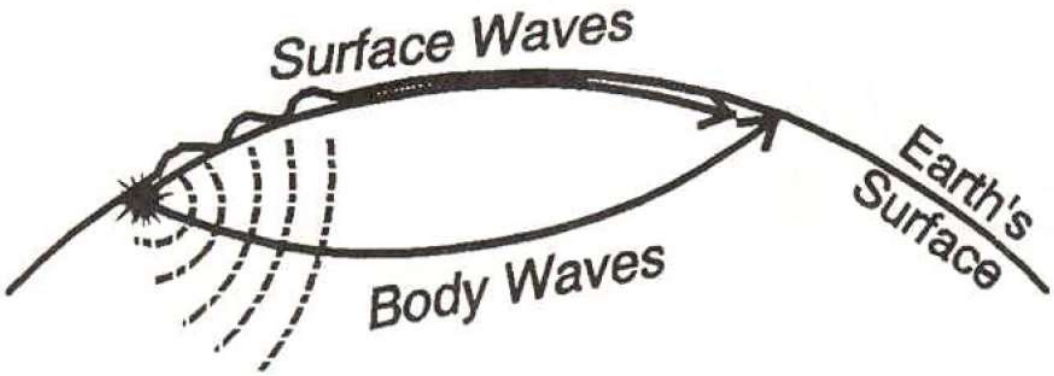
$$\vartheta = -\frac{Lateral\ strain}{Axial\ strain} = -\frac{\varepsilon_{Lateral}}{\varepsilon_{Axial}}$$

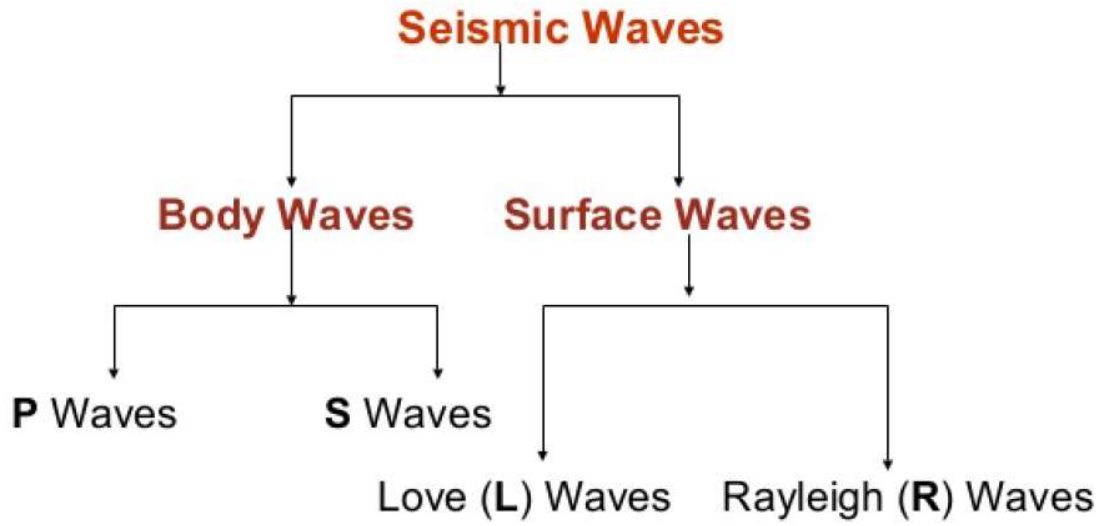



## الموجات السيزمية

الموجات الزلزالية أو السيزمية (Seismic Waves) هي موجات من الطاقة تنتقل عبر طبقات الأرض، وهي ناتجة عن الزلازل أو الانفجارات البركانية أو حركة الصهارة أو الانهيارات الأرضية أو التفجيرات الاصطناعية. علم الزلازل (Earthquake Seismology) هو العلم الذي يهتم بدراسة الموجات الزلزالية وذلك لمعرفة التفاصيل الدقيقة عن الصفات الطبيعية لباطن الأرض. تنتقل الموجات الزلزالية ويتم تسجيلها عن طريق "جهاز قياس الزلازل" (Seismograph). هناك عدة أنواع مختلفة من الموجات الزلزالية، كلها تتحرك بطرق مختلفة. النوعان الرئيسيان هما، "الموجات السطحية" (Surface Waves) و"الموجات الباطنية" (Body Waves). تنتقل الموجات السطحية في الطبقات العليا من القشرة الأرضية، ولهذا سُميت بالموجات السطحية، وتُسبب في إحداث حركات سطحية للقشرة الأرضية. تنقسم الموجات السطحية إلى نوعين هما، "موجات لوف" (Love Waves) و"موجات رايلي" (Rayleigh Waves). تتميز موجات لوف بأنها أسرع الموجات السطحية انتشاراً وتتحرك جزيئاتها على سطح الأرض بحركة أفقية جنباً إلى جنب. أما موجات رايلي فتنتشر بشكل إهليجي وذلك في مستوى رأسي موازٍ لحركه انتشار الموجه وبسرعة أقل من موجات لوف. السبب الرئيسي في التدمير الذي تسببه الزلازل هي الموجات السطحية بشكل عام، وموجات رايلي بشكل خاص. تتميز الموجات الباطنية بقدرتها على

الانتشار في باطن الأرض بسرعات تختلف باختلاف خواص الوسط الذي تمر فيه وتنقسم إلى نوعين هما، "الموجات الطولية" أو "الأولية" (Primary Waves) و"الموجات المستعرضة" أو "الثانوية" (Secondary Waves). الموجات الطولية هي أسرع وأول الموجات ظهوراً على جهاز قياس الزلازل، يمكن أن تنتقل عبر المواد الصلبة والسائلة وتحمل من الطاقة قدراً أقل من الموجات المولدة من نفس الزلزال. أما الموجات المستعرضة تكون سرعتها أقل من الموجات الطولية وتنتشر في المواد الصلبة فقط ولا تنتشر في السوائل، وهي تحمل من الطاقة قدراً أكبر من الموجات الطولية وتكون سعتها (Amplitude) أكبر من سعة الموجات الطولية.



## Relationship between Vp and Vs:

**Compressional Waves:**

$$V_p = \sqrt{\frac{(\frac{4}{3}\mu + k)}{\rho}}$$

**Shear Waves:**

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

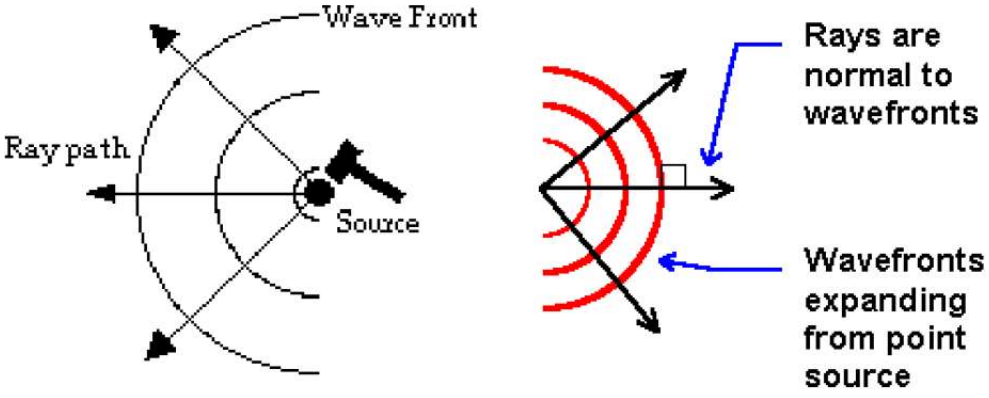
- Averaged Vp/Vs = 1.732 for the crust.
- For mafic rocks, Vp/Vs = 1.81.
- For felsic rocks, Vp/Vs = 1.70.

## واجهة الموجة ومسار الشعاع

في سياق انتشار الموجة (Wave Propagation)، فإن واجهة الموجة (Wavefront) ومسار الشعاع (Ray Path) هما مصطلحان يستخدمان لوصف سلوك الموجات (Describe the Behavior of Waves). واجهة الموجة (Wavefront)، عبارة عن خط يمثّل قمة الموجة في بُعدين في لحظة معينة من الزمن. يمكن أن يوفر شكل واجهات الموجات معلومات حول خصائص الموجة (Wave's Characteristics)، مثل اتجاهها (Direction) وسرعتها (Speed) وطول موجتها (Wavelength). على سبيل المثال، في الموجة المتقاربة، تصبح مقدمات الموجة أقرب لبعضها البعض عندما تقترب من نقطة محورية، بينما في الموجة المتباعدة، تنتشر مقدمات الموجة عندما تبتعد عن المصدر. مسار الشعاع (Ray Path)، هو خط أو منحنى يصف المسار (Path) الذي يتبعه شعاع الموجة أثناء انتشاره عبر وسط ما. يمثل الشعاع اتجاه تدفق الطاقة للموجة (Direction of Energy Flow of the Wave). على عكس واجهة الموجة، التي تمثل سطح واجهة الموجة بالكامل، يمثل مسار الشعاع خطاً واحداً أو منحنى واحداً يشير إلى مسار شعاع معين. من المهم ملاحظة أنه على الرغم من ارتباط واجهات الموجات ومسارات الأشعة، إلا أنها تمثل جوانب مختلفة من انتشار الموجة. تلتقط واجهات الموجة التوزيع المكاني لطور الموجة، بينما تصور مسارات الشعاع اتجاه انتشار الطاقة. كلا المفهومين لهما قيمة في فهم وتحليل سلوك

الموجة في سياقات مختلفة، سواء في البصريات، أو الصوتيات، أو غيرها من المجالات التي تنطوي على ظواهر الموجة.

- The **wave front** is the direct boundary between the seismic waves in the earth material, and the material that the seismic energy has not yet reached.
- **Ray** is the vector perpendicular to a wave front.

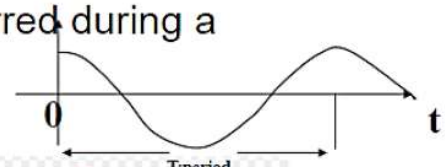


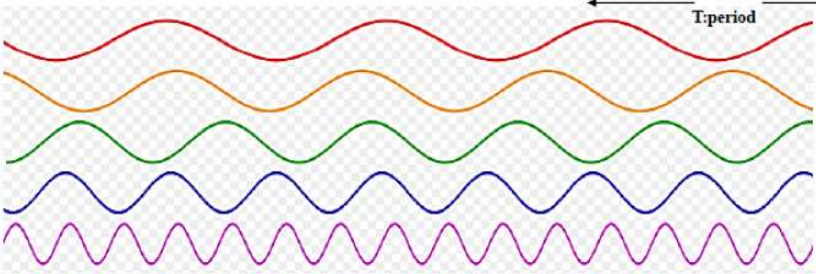

## Wave Parameters

- Wave speed (v): unit: m/s; $V = x/t = \lambda/T$
- Wave period (T): unit: s

  Time needed from one peak to another successive peak.
- Frequency (f): unit: Hertz; f=1/T

  Number of oscillations occurred during a standard interval of time
- Wave number: $K = 2\pi/\lambda$

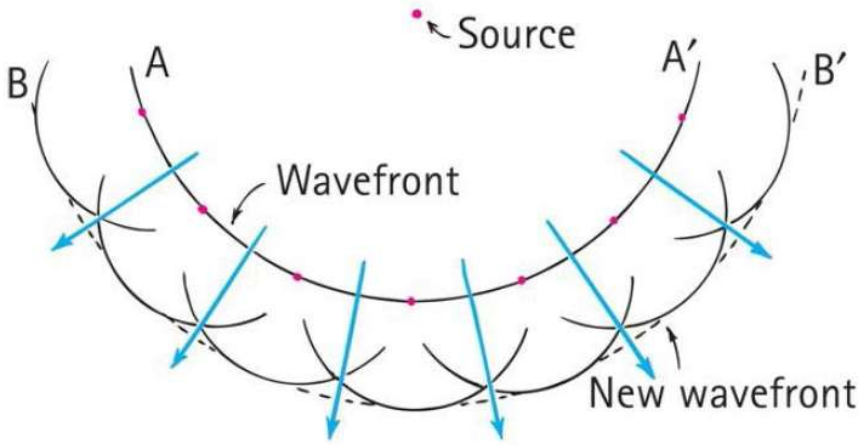


## مبدأ هويجنز

مبدأ هويجنز (Huygens's Principle) هو مفهوم أساسي في النظرية الموجية (Wave Theory) يوفر طريقة لفهم انتشار الموجات (Propagation of Waves)، خاصة في سياق واجهات الموجات (Wavefronts) وتداخل الموجات (Wave Interference). ينص مبدأ هويجنز على أن كل نقطة على جبهة الموجة تعمل كمصدر للمويجات الكروية الثانوية ( Every Point on a Wavefront Acts as a Source of Secondary Spherical Wavelets). بمعنى آخر، يمكن اعتبار كل نقطة على واجهة الموجة بمثابة مصدر نقطي يصدر مويجات ثانوية في جميع الاتجاهات. وفقاً لمبدأ هويجنز، تتشكل جبهة الموجة الجديدة في وقت لاحق من خلال الأسطح العرضية لهذه المويجات الثانوية. تتحرك جبهة الموجة للأمام حيث تتوسع كل من هذه المويجات كروياً بسرعة انتشار الموجة. يشرح مبدأ هيجنز أيضاَ انحناء الموجات أو انتشارها عندما تمر عبر أوساط مختلفة بسرعات مختلفة، كما هو الحال عندما ينتقل الضوء من وسط إلى آخر. يساعد هذا المبدأ في تحديد زوايا الانكسار والانعكاس عند السطح البيني بين الوسائط. يساعد هذا المبدأ في تفسير العديد من الظواهر الموجية، بما في ذلك الانعكاس (Reflection) والانكسار (Refraction) والحيود (Diffraction).

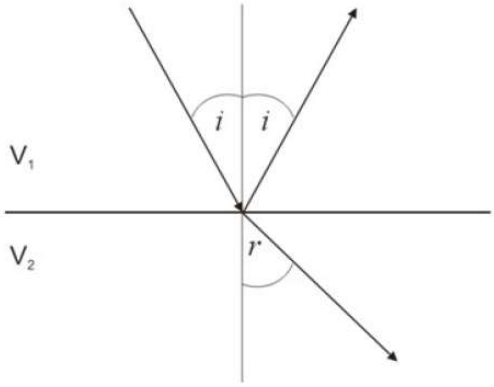
- **Huygens's Principle** is a method of analysis applied to problems of wave propagation.
- He proposed that every point on a wave-front may be considered a source of secondary spherical wavelets which spread out in the forward direction at the speed of light.



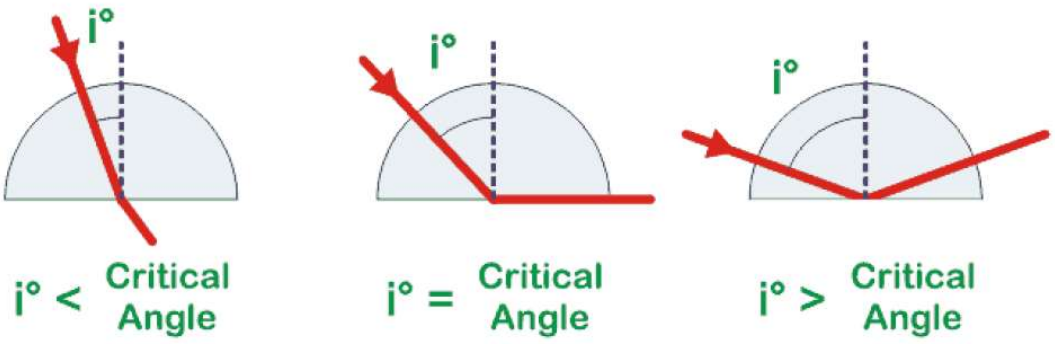
# قانون سنيل

يصف قانون سنيل (Snell's Law)، المعروف أيضًا باسم قانون الانكسار (Law of Refraction)، سلوك الموجات (Behavior of Waves) أثناء انتقالها من وسط إلى آخر. ويربط كمياً زوايا (Angles) السقوط (Incidence) والانكسار (Refraction) لوسطين مختلفين. قانون سنيل يصف سلوك الموجات عندما تنعكس عن السطح (Interface). عندما تنتقل الموجة من وسط ذو معامل انكسار أعلى إلى وسط ذو معامل انكسار أقل، يمكن أن تكون زاوية الانكسار أكبر من زاوية السقوط، مما يؤدي إلى ظاهرة تسمى الانعكاس الداخلي الكلي ( Total Internal Reflection).

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2}$$



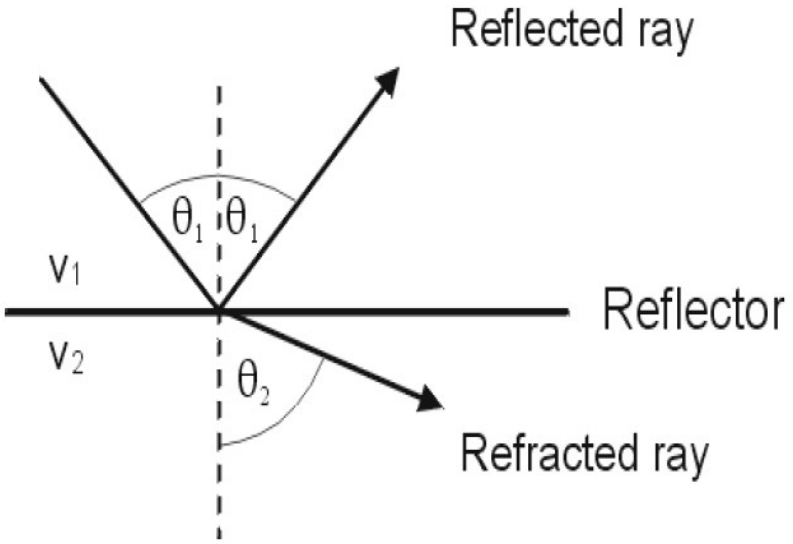

When V2 is greater than V1, the angle of refraction is greater than the angle of incidence, then the angle of incidence for which this occur us called the critical angle.

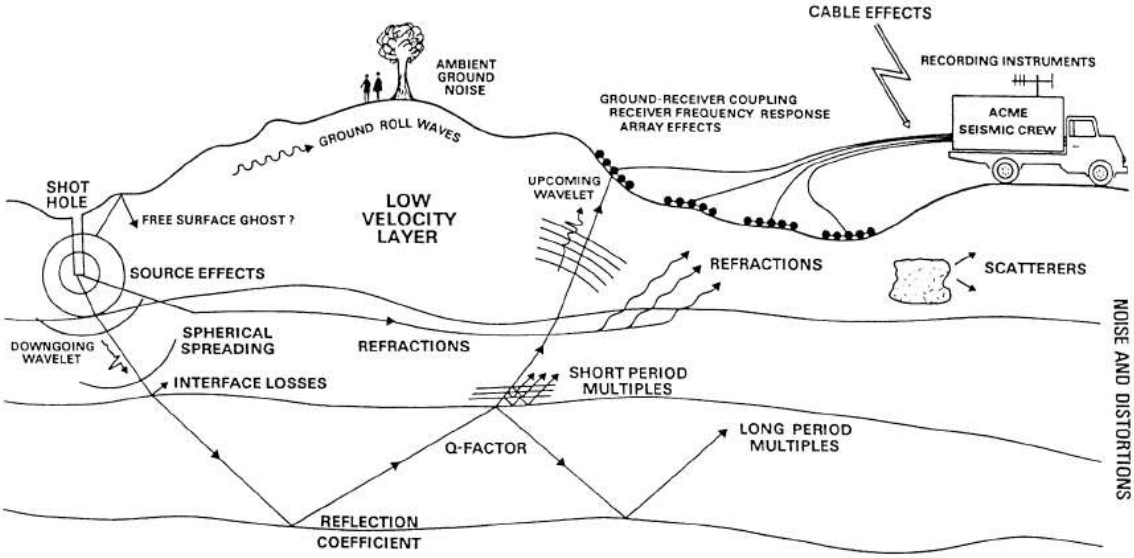


## الانكسار السيزمي

الانكسار السيزمي (Seismic Refraction) يستخدم لدراسة البنية الداخلية للأرض وخصائصها وذلك من خلال دراسة سلوك الموجات السيزمية أثناء انتقالها عبر طبقات مختلفة من القشرة الأرضية (Crust) والطبقة العليا من الوشاح (Upper Mantle). تُستخدم هذه الطريقة لدراسة عمق وسمك وسرعة الطبقات تحت السطحية وتحديد السمات الجيولوجية مثل التكوينات الصخرية والصدوع وخزانات المياه الجوفية. يعتمد الانكسار السيزمي على مبدأ أن الموجات السيزمية تغير اتجاهها وسرعتها عندما تواجه حدوداً بين الأوساط الجيولوجية المختلفة. عندما تنتقل موجة سيزمية من وسط إلى آخر بسرعة مختلفة، فإنها تتعرض للانكسار. في المسح السيزمي الانكساري، يولد المصدر السيزمي (Seismic Source)، مثل مطرقة (Hammer) أو متفجرات (Explosive) أو هزاز (Vibrator)، موجة سيزمية (Seismic Wave) تنتقل إلى الأرض. تنتقل الموجة عبر الطبقات الداخلية ويتم اكتشافها بواسطة سلسلة من أجهزة القياس الموضوعة على مسافات مختلفة من المصدر. يتم تسجيل وتحليل أوقات وصول وسعة الموجات السيزمية في الجيوفونات (Geophones) المختلفة لتحديد البنية الداخلية للأرض. تطبيقات الانكسار السيزمي (Applications) تشمل، رسم الخرائط الداخلية للأرض (Subsurface Mapping) وتحديد سمكها وعمقها. دراسة الخصائص الجيولوجية (Geological Setting Investigation) مثل، الصدوع والحدود الصخرية والتغيرات التركيبية وكذلك الحصول على نظرة ثاقبة للتاريخ الجيولوجي. الهندسة (Engineering) والبنية التحتية المدنية (Civil Infrastructure)، يُستخدم الانكسار السيزمي على نطاق واسع في مشاريع البنية التحتية الهندسية والمدنية. فهو يساعد في تقييم مدى ملاءمة الأرض للبناء (Assess the Suitability of the Ground for Construction)، وتقييم استقرار المنحدرات (Evaluate the Stability of Slopes)، وتحديد المعالم الداخلية للأرض (Locate Subsurface Features) التي يمكن أن تؤثر على تصميم وبناء إنشاءات مثل السدود (Dams) والجسور (Bridges) والأنفاق (Tunnels). الدراسات الهيدروجيولوجية (Hydrogeological Investigations) وذلك لتوصيف خزانات المياه الجوفية (Characterize Groundwater Reservoirs) وطبقات المياه الجوفية (Aquifers). من خلال تحديد عمق وسمك الطبقات الحاملة للمياه (Determining the Depth and Thickness of Water-Bearing layers)،

بالإضافة إلى خصائصها الهيدروليكية (Hydraulic Properties)، مثل المسامية (Porosity) والنفاذية (Permeability). استكشاف المعادن (Mineral Exploration)، يستخدم الانكسار السيزمي في استكشاف المعادن لتحديد التراكيب الداخلية للأرض المرتبطة بالرواسب المعدنية (Identify Subsurface Structures Associated with Mineral Deposits). ويساعد في تحديد المناطق الغنية بالمعادن المحتملة (Mineral-Rich Zones).



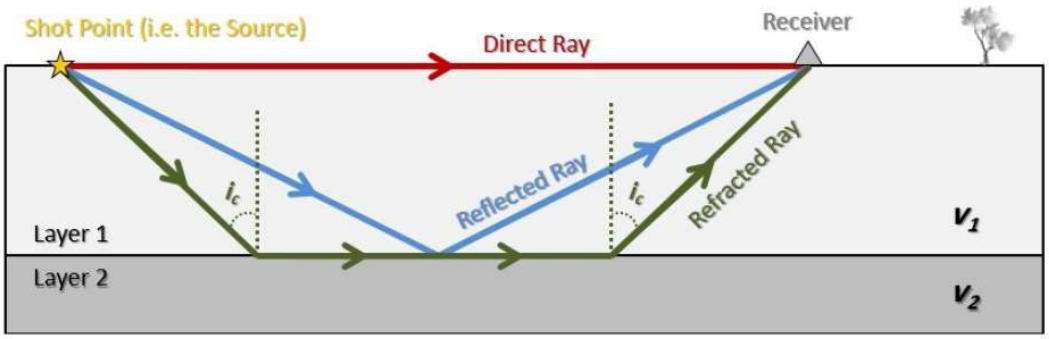



## مسارات الانكسار السيزمي

في المسوحات السيزمية الانكسارية، هناك ثلاثة مسارات رئيسية (Three Main Paths) يمكن أن تتبعها الموجات السيزمية، المسار المباشر (Direct Path)، والمسار المنكسر (Refracted Path)، والمسار المنعكس (Reflected Path). تصف هذه المسارات الطرق المختلفة التي يمكن أن تنتشر بها الموجات السيزمية عبر الطبقات تحت السطح. المسار المباشر (Direct Path)، يشير المسار المباشر إلى المسار الذي تسلكه الموجة السيزمية عندما تنتقل مباشرة (Directly) من المصدر السيزمي (Seismic Source) إلى جهاز الاستقبال "الجيوفون" (Geophone) دون مواجهة أي حدود داخل طبقات الأرض. في هذه الحالة، تنتقل الموجة عبر طبقة واحدة متجانسة (Homogeneous layer) بسرعة سيزمية ثابتة. يوفر وقت وصول الموجة المباشرة إلى جهاز الاستقبال معلومات حول سرعة الطبقة العليا (Velocity of the Uppermost Layer). المسار المنكسر (Refracted Path)، يحدث المسار المنكسر عندما تواجه موجة سيزمية حدوداً تحت السطح بين طبقتين بسرعات مختلفة. عندما تعبر الموجة الحدود (Boundary)، فإنها تغير اتجاهها وتدخل الطبقة الثانية. يُعرف هذا التغيير في الاتجاه بالانكسار (Refraction). تنتشر الموجة المنكسرة عبر الطبقة السفلية بزاوية مختلفة عن زاوية السقوط (Incident Angle). ومن خلال تحليل أزمن الوصول (Travel Times) وزوايا الموجات المنكسرة (Angles of the Refracted Waves) عند جيوفونات مختلفة، يتم تحديد أعماق الطبقات تحت السطح وسمكها وسرعاتها السيزمية. المسار المنعكس (Reflected Path)، يتضمن المسار المنعكس انعكاس الموجة السيزمية عندما تصطدم (Encounters) بحدود تحت السطح (Subsurface Boundary) وترتد (Bounces) باتجاه السطح. عندما تصل الموجة إلى الحد الفاصل (Interface) بين الطبقات حيث يوجد تباين في السرعات، ينعكس جزء من طاقة الموجة مرة أخرى. تنتقل الموجة المنعكسة إلى أعلى ويتم اكتشافها بواسطة الجيوفونات الموجودة على السطح. ومن خلال تحليل أزمنة وصول وسعة الموجات المنعكسة، يمكن استنتاج تحديد التراكيب الداخلية مثل، الطبقات الصخرية (Rock Layers)، أو الصدوع (Faults)، أو غيرها من التراكيب الجيولوجية الأخرى (Other Geological Features).

:

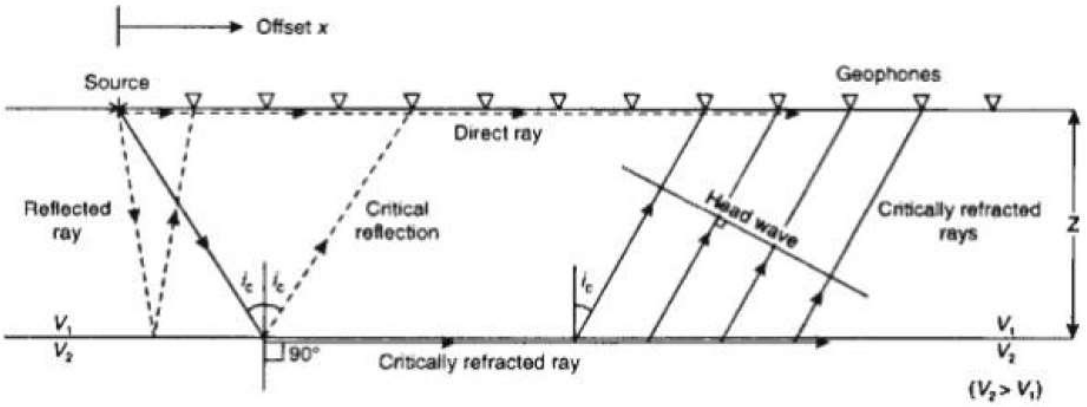
- When doing a seismic refraction survey, a recorded ray can come from three main paths:
  - The **direct ray.**
  - The **reflected ray.**
  - The **refracted ray.**
- Because these rays travel different distances and at different speeds, they arrive at different times.
- The direct ray and the refracted ray arrive in different order depending on distance from source and the velocity structure.




## الانكسار الحرج

الانكسار الحرج (Critical Refraction)، يُعرف أيضاً باسم المسافة الحرجة (Critical Distance)، يحدث عندما تواجه (Encounters) موجة حدوداً بين وسطين مختلفين. عندما تكون زاوية سقوط الموجة (Angle of Incidence) أكبر من زاوية حرجة معينة (Certain Critical Angle)، لا تنكسر الموجة (Wave is no Longer Refracted)، بل تنعكس (Reflected Back) مرة أخرى إلى الوسط الذي نشأت منه. على سبيل المثال، في حالة انتقال الضوء من وسط ذو معامل انكسار أعلى (مثل الماء) إلى وسط ذو معامل انكسار أقل (مثل الهواء). كلما زادت زاوية السقوط، زادت زاوية الانكسار أيضًا وفقاً لقانون سنيل. ومع ذلك، عندما تصل زاوية السقوط إلى زاوية حرجة، تصبح زاوية الانكسار ٩٠ درجة، ولا ينكسر الضوء بل ينعكس داخلياً بالكامل مرة أخرى في الماء. يمكن تحديد الزاوية الحرجة (Critical Angle) باستخدام قانون (Snell's law) سنيل والعلاقة بين معاملات الانكسار (Refractive Indices) للوسائط. من المهم ملاحظة أنه لكي يحدث الانعكاس الداخلي الكلي (Total Internal Reflection)، يجب أن تكون زاوية السقوط أكبر من الزاوية الحرجة. إذا كانت زاوية السقوط أقل من الزاوية الحرجة، فسوف تنكسر الموجة جزئياً (Partially Refracted) وتنعكس جزئياً (Partially Reflected).

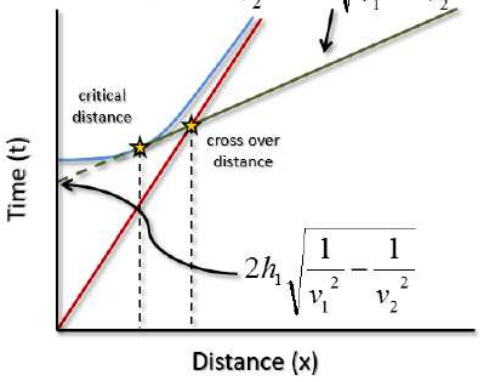
Refraction surveys use the process of **critical refraction** to infer interface depths and layer velocities. **Critical refraction** (**critical distance**) requires an increase in velocity with depth. If not, then there is no critical; refraction.

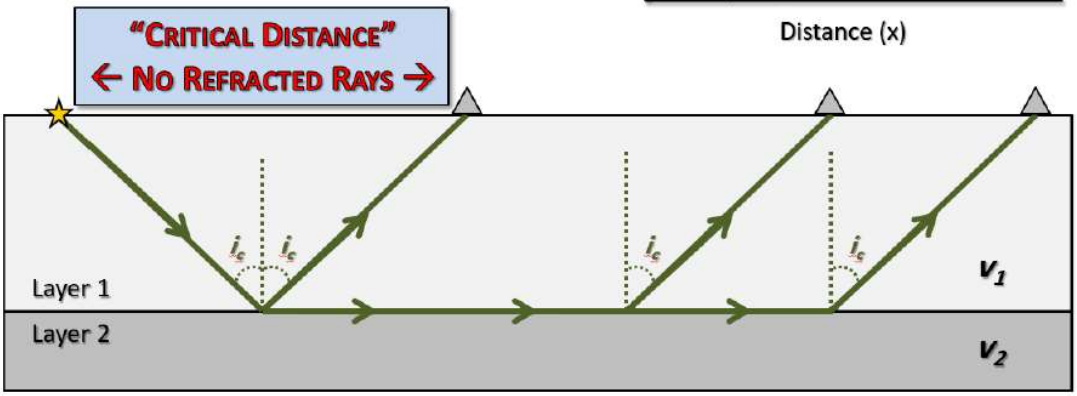



## The Refracted Ray

$$t = \frac{x}{v_2} + 2h_1\sqrt{\frac{1}{v_1^2} - \frac{1}{v_2^2}}$$

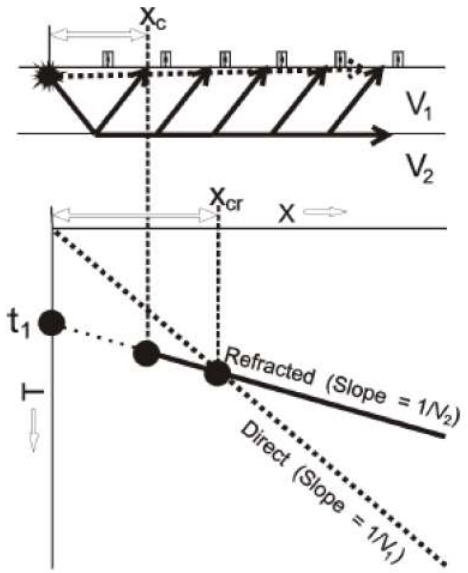
- The Refracted Ray Arrival Time:
  - Plots as a linear path on t-x diagram
    - Part travels in upper layer (constant)
    - Part travels in lower layer (function of x)
  - Only arrives after **critical distance**
  - Is first arrival only after **cross over distance**
    - Travels long enough in the faster layer



## التقاطع عبر المسافة

في الانكسار السيزمي، يشير مصطلح "التقاطع عبر المسافة" (Cross Over Distance) إلى المسافة التي تغير عندها الموجات السيزمية التي تنتقل عبر طبقات تحت سطحية مختلفة مسارها وتتقاطع. وتُعرف أيضًا باسم "المسافة الحرجة" (Critical Distance) أو "مسافة العبور" (Crossing Distance). يحدث التقاطع عبر المسافة عندما تتقاطع الموجات السيزمية المنكسرة من طبقة مع الموجات السيزمية المنكسرة من طبقة أخرى. عند هذه المسافة، تغير الموجات المنكسرة مساراتها (Paths)، وقد تظهر تغيرات واضحة في أزمنة وصول الموجات وزواياها إلى المستقبلات (Receivers).




The crossover distance (Xcr) can be computed from the following equation:

$$X_{cr} = 2h\sqrt{\frac{V_2 + V_1}{V_2 - V_1}}$$

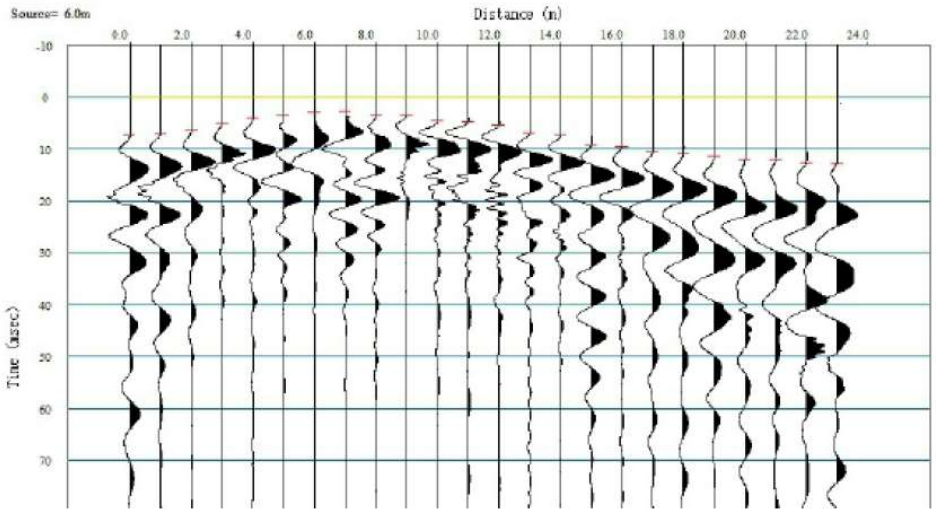
## اختيار الانكسار الأول

يُعد اختيار الانكسار الأول (First Break Picking) خطوة أساسية في معالجة البيانات السيزمية وتفسيرها. ويشير إلى عملية تحديد (Identifying) واختيار (Picking) وقت وصول أول (First) وأكبر (Significant) واجهة موجة (Wavefront)، والمعروفة باسم " الانكسار الأول" ( First Break)، على أثر سيزمي (Seismic Trace). عادةً، يرتبط الانكسار الأول بوصول الموجة

السيزمية المباشرة التي تسلك أقصر مسار من المصدر (Source) إلى المستقبل (Receiver)، دون وجود انعكاسات أو انكسارات كبيرة. يمثل وصول واجهة الموجة التي انتقلت عبر أقل عمق في الطبقة الجوفية. يتم جمع البيانات السيزمية (Seismic Data) عن طريق تسجيل انعكاسات الموجات (Reflections of Seismic Waves) التي تتولد (Generated) على السطح وتنتشر (Propagate) عبر باطن الأرض. تتكون البيانات المسجلة (Recorded Data)، والمعروفة باسم الآثار السيزمية (Seismic Traces)، من سلسلة (Series) من قياسات السعة (Amplitude) مع مرور الوقت (Over Time). يتوافق الكسر الأول (First Break) مع الوصول الأولي للموجة السيزمية (Initial Arrival of the Seismic Wave) إلى موقع استقبال محدد (at a Given Receiver Location). يُعد الانتقاء الدقيق للكسر الأول أمراً بالغ الأهمية لأنه يوفر معلومات أساسية في معالجة البيانات السيزمية وتفسيرها. فهو يساعد في تقدير (Estimating) عمق (Depth) وسرعة (Velocity) الطبقات تحت السطحية (Subsurface Layers)، تحديد (Identifying) توقيت (Timing) وتسلسل الأحداث (Sequence of Events) داخل باطن الأرض، وبناء (Constructing) نموذج السرعة السيزمية (Seismic Velocity Model) التصوير التتابعي (Subsequent Imaging) أو الانقلاب (Inversion).

**First Break Picking**

The onset of the first seismic wave, the first break, on each seismogram is identified and its arrival time is picked.

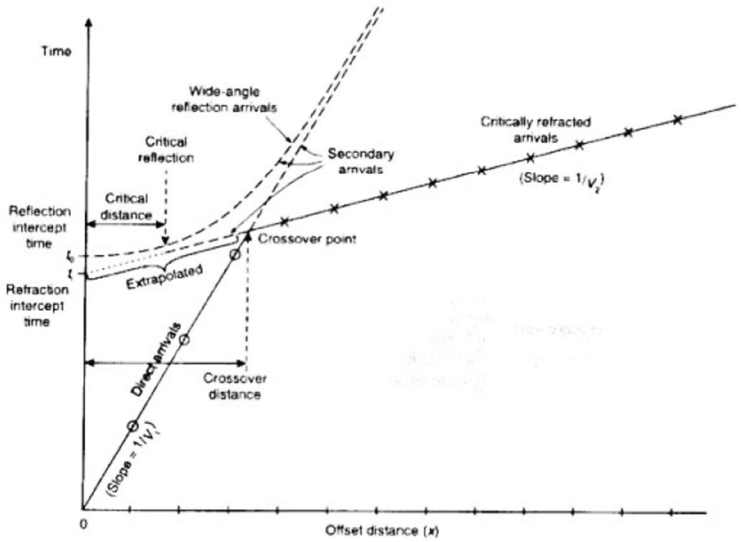


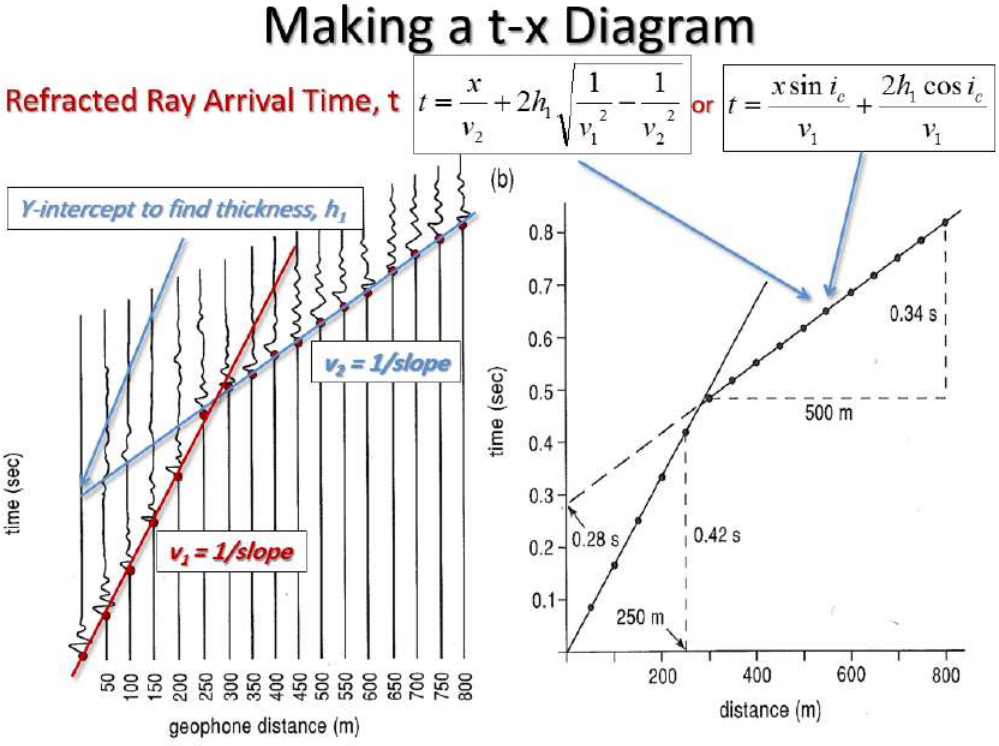
## المنحنيات الزمنية للمسافة

المنحنيات الزمنية للمسافة (Time-Distance Curves) أو المنحنيات الزمنية للوصول (Arrival Time Curves)، هي تمثيلات بيانية (Graphical) تُظهر العلاقة بين زمن سفر الموجات السيزمية (Travel Time of Seismic Waves) ومسافتها المنتشرة (Distance of Propagation). تُستخدم هذه المنحنيات عادة في معالجة وتفسير وتصوير البيانات السيزمية. يُشير زمن سفر الموجة (Travel Time) السيزمية إلى الوقت اللازم لانتقال الموجة من مصدر سيزمي (Seismic Source) إلى موقع المستقبل (Receiver) عند مسافة معينة (at a Given Distance). من خلال تحليل أوقات سفر الموجات السيزمية التي سُجلت في مواقع مستقبلة مختلفة، يمكن الحصول على تحليلات قيِّمة للتراكيب والخصائص الداخلية لطبقات الأرض. تُنشئ هذه المنحنيات (Curves) عادةً عن طريق رسم (Plotting) زمن سفر الموجات السيزمية على المحور الرأسي (Vertical Axis) والمسافة بين المصدر والمستقبل على المحور الأفقي (Horizontal Axis). شكل هذه المنحنيات يعتمد على توزيع السرعة في الطبقات الجوفية. في نموذج متعدد الطبقات بسيط، حيث تتكون الطبقات الجوفية من طبقات أفقية ذات سرعات ثابتة، قد تظهر المنحنيات على شكل خطوط مستقيمة بميل مختلف يتوافق مع سرعات الطبقات. ومع ذلك، في حالات السيناريوهات الجوفية المعقدة مع تغيرات في السرعة أو تراكيب غير منتظمة، قد تظهر منحنيات أكثر تعقيداً.

**Travel Time Curves**

Analysis of seismic refraction data is primarily based on interpretation of critical refraction travel times. Plots of seismic arrival times vs. source-receiver offset are called travel time curves.

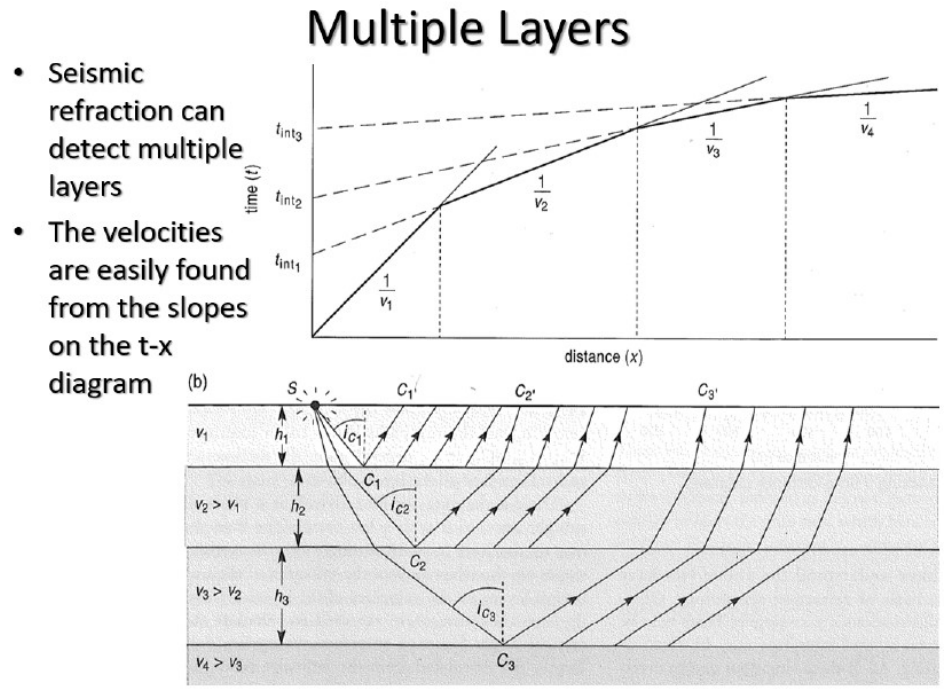





## الطبقات المتعددة

الكشف (Detecting) عن طبقات متعددة (Multiple Layers) في الانكسار السيزمي يتضمن تحليل أزمنة السفر (Analyzing the Travel Times) وواجهة الموجة (Waveforms) للموجات السيزمية أثناء انتشارها في الطبقات الجوفية. لكشف الطبقات المتعددة، يتضمن تطبيق الخطوات التالية، ١) وضع مصدر (Source) ومستقبل (Receiver)، يتم استخدام مصدر طاقة سيزمية مسيطر عليها وذلك لتوليد الموجات السيزمية. يتم وضع جيوفونات (Geophones) أو أجهزة قياس (Seismometers) في مسافات وتوجهات مختلفة من المصدر لتسجيل الموجات القادمة. ٢) جمع البيانات (Data acquisition)، تسلك الموجات السيزمية التي تم إنشاؤها بواسطة المصدر طريقها من خلال الأرض وتُسجل بواسطة المستقبلات. تسجل البيانات المسجلة أوقات الوصول (Arrival Times) وواجهات (Waveforms) الموجات السيزمية. ٣) معالجة البيانات (Data Processing)، يتم معالجة البيانات المسجلة لتحديد أوقات الوصول الأولي (First Arrival Times) للموجات السيزمية. من خلال تحليل ذلك، يمكن تمييز (Distinguished) الوصولات المنكسرة (Refracted Arrivals) عن وصول موجات أخرى (Other Wave Arrivals)، مثل الموجات المنعكسة (Reflected) أو المنحرفة (Diffracted).

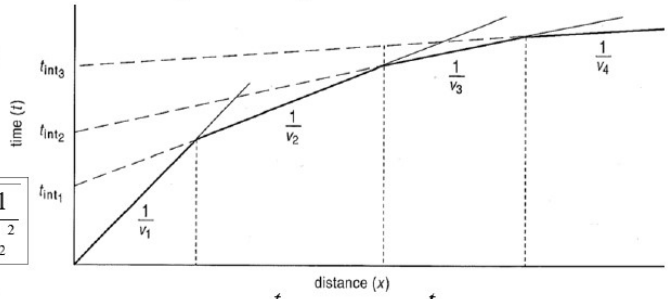
٤) تحليل السرعة (Velocity Analysis)، تُرسم (Plotted) أوقات السفر (Travel Times) المقاسة للوصولات المنكسرة (Refracted Arrivals) مقابل المسافات المقابلة (Corresponding Offsets) بين المصدر والمستقبلات. يُطلق على هذا الرسم المنحني الزمني (Travel Time Curve) أو الرسم الانكساري (Refractor Plot). من خلال دراسة شكل (Shape) وميل (Slope) المنحنى (Curve)، يمكن تقدير (Estimate) سرعة الطبقة الأولى (Velocity of the First Layer).
٥) تفسير الطبقات (Layers Interpretation)، بمجرد تحديد سرعة الطبقة الأولى، يُفترض أن الطبقات اللاحقة (Subsequent Layers) لها سرعات مختلفة. يتم بعد ذلك تحليل منحنى زمن الوصول (Travel Time Curve) لتحديد (Identify) وصولات منكسرة إضافية (Additional Refracted Arrivals) تتوافق (Corresponding to) مع الطبقات اللاحقة. يمكن تقدير عمق وسمك وسرعة كل طبقة باستخدام تقنيات الانعكاس الرياضي (Mathematical Inversion Techniques) أو الطرق الرسومية (Graphical Methods). ٦) بناء النموذج (Model building)، استنادًا إلى البيانات المفسرة، يمكن إنشاء نموذج متعدد الطبقات للطبقات الجوفية (Layered Model of the Subsurface)، ممثلًا للوحدات الجيولوجية أو التكوينات المختلفة. يمكن تقدير حدود الطبقات (Layer Boundaries) وخصائصها (Properties)، مثل السرعات، واستخدامها لأغراض تفسير جيولوجي أو هندسي.



## Multiple Layers

- The layer thicknesses are not as easy to find
- Recall...

$$t = \frac{x}{v_2} + 2h_1\sqrt{\frac{1}{v_1^2} - \frac{1}{v_2^2}}$$




$$t_{int_1} = 2h_1\sqrt{\frac{1}{v_1^2} - \frac{1}{v_2^2}}$$ Solve for $h_1$...→ $$h_1 = \frac{t}{2\sqrt{\frac{1}{v_1^2} - \frac{1}{v_2^2}}} = \frac{t}{2\sqrt{\frac{v_2^2 - v_1^2}{v_1^2 v_2^2}}}$$

Now, plug in h1 and solve the remaining layers one at a time...

$$t_{int_2} = 2h_1\sqrt{\frac{1}{v_1^2} - \frac{1}{v_2^2}} + 2h_2\sqrt{\frac{1}{v_2^2} - \frac{1}{v_3^2}}$$

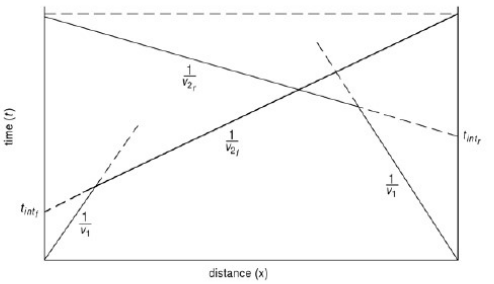
BEWARE!!! $h_1$, $h_2$, are layer thicknesses, not depth to interfaces.
So, depth to bottom of layer 3 /top of layer 4 = $h_1 + h_2 + h_3$

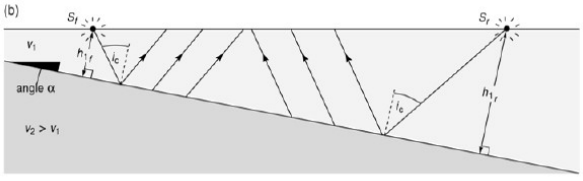
## الطبقات المنحدرة

تشير الطبقات المنحدرة (Dipping Interface) في التفسير السيزمي (Seismic Interpretation) إلى الطبقات التي ليست أفقية، بل لها بعض الانحدار (Some Dip) المرتبط بها. عندما تنحدر (Dipping) طبقة واحدة (Single Interface) بزاوية بالنسبة إلى المستوى الأفقي، فإن أوقات وصول الموجة المنكسرة ستظل تظهر كخط مستقيم على منحنى زمن الوصول. ومع ذلك، عندما تتحرك الموجة المنكسرة لأعلى، يكون للموجات مسافة أقل للانتقال إلى السطح، ويقل زمن الوصول، مما يؤدي إلى انخفاض ميل الخط (Reduced Slope of the Line).

## Dipping Interfaces

- What if the critically refracted interface is not horizontal?
- A dipping interface produces a pattern that looks just like a horizontal interface!
  - Velocities are called "apparent velocities"

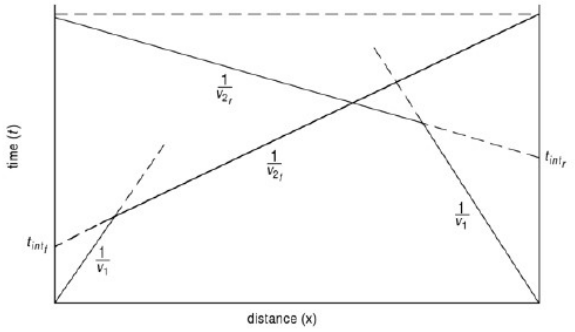


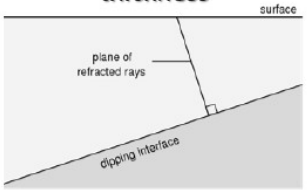



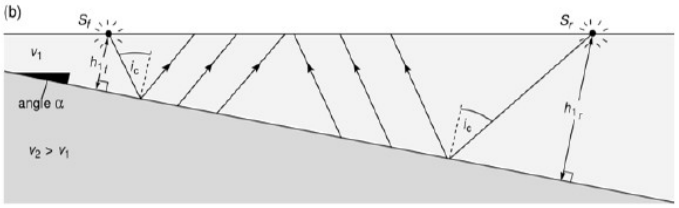

In this case, velocity of lower layer is underestimated

# Dipping Interfaces

- To determine if interfaces are dipping…
- Shoot lines forward and reversed
- If dip is small (< 5°) you can take average slope
- The intercepts will be different at both ends
  - Implies different thickness

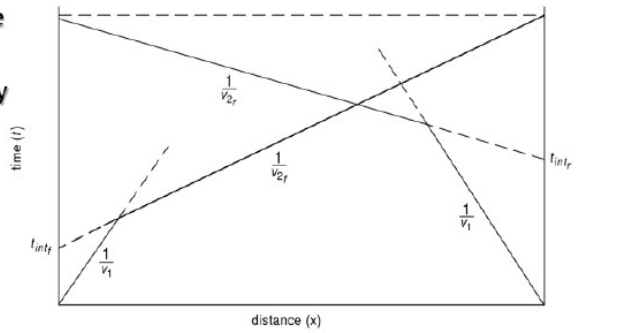


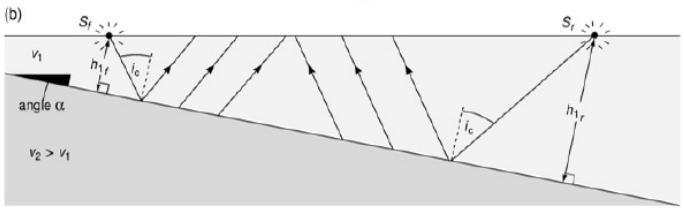




# Dipping Interfaces

- If you shoot down-dip
  - Slopes on t-x diagram are too steep
    - Underestimates velocity
  - May underestimate layer thickness
- Converse is true if you shoot up-dip
- In both cases the calculated direct ray velocity is the same.
- The intercepts $t_{int}$ will also be different at both ends of survey

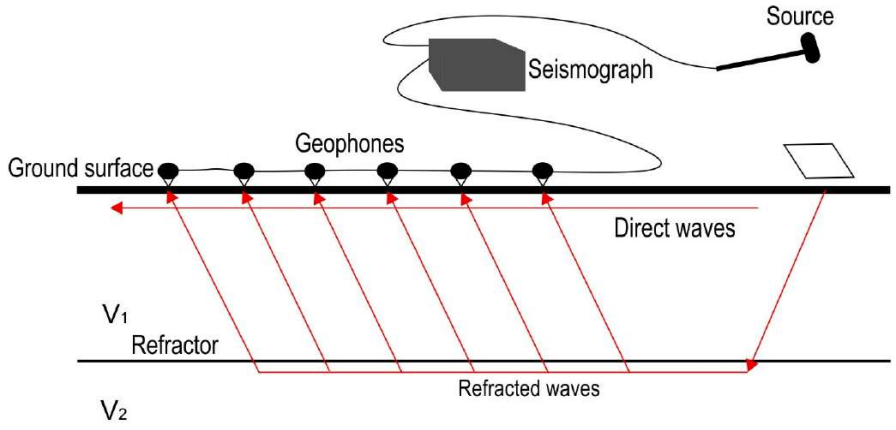


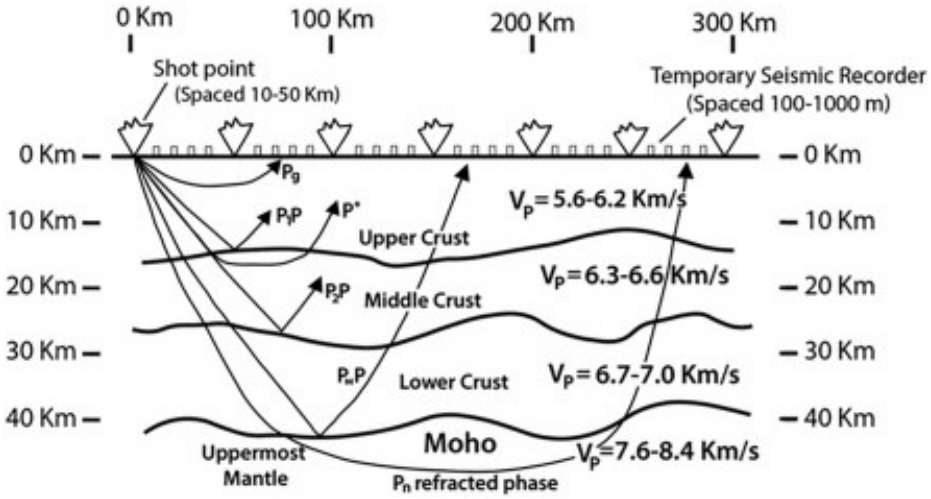



## أنواع المسوحات السيزمية الانكسارية

هناك أنواع مختلفة من المسوحات السيزمية الانكسارية (Seismic Refraction Surveys)، ١) المسح السيزمي الانكساري القياسي (Standard Seismic Refraction Survey)، وهو النوع الأكثر استخداماً والذي يتضمن نشر (Deploying) شبكة خطية (Linear Array) من الجيوفونات (Geophones) على طول قطاع (Along a Profile) وتوليد موجات سيزمية باستخدام مصدر طاقة مُوجّه (Controlled Energy Source). تنتشر الموجات خلال الطبقات الجوفية، ويتم تسجيلها بواسطة أجهزة الجيوفونات. يتم استخدام أوقات الوصول المسجلة (Recorded Travel Times) لتحديد السرعات الجوفية (Determine the Subsurface Velocities) واستنتاج عمق (Depth) وشكل الانتقالات (Geometry) بين الطبقات. ٢) المسح السيزمي الانكساري مُتسِعَ الزاوِية (Wide-Angle Seismic Refraction Survey)، يتم إجراء هذا المسح لدراسة التراكيب العميقة (Deeper Structures) أو الخصائص الجيولوجية (Geological Features) واسعة النطاق (Larger-Scale). يتضمن هذا النوع من نشر شبكة كثيفة (Dense Array) من الجيوفونات على مساحة واسعة (Wide Area)، عادةً في نمط شبكة (Grid Pattern). يتم وضع المصدر السيزمي (Seismic Source) في موقع مركزي (Central Location)، وتُسجل أوقات الوصول المسجلة للموجات المنكسرة عند الجيوفونات المختلفة لإنشاء نموذج للسرعة للطبقات الداخلية (Velocity Model of the Subsurface). توفر معلومات حول توزيع السرعة وخصائص التركيبات على عمق أكبر. ٣) المسح السيزمي الانكساري المقطعي (Tomographic Seismic Refraction Survey)، يتم استخدم شبكة كثيفة (Dense Network) من الجيوفونات لجمع البيانات السيزمية على طول عدة خطوط (Multiple Lines) أو قطاعات (Profiles). يتم استخدام هذه البيانات لإنشاء نموذج للسرعة (Velocity Model) ثنائي (2D) أو ثلاثي الأبعاد (3D) والذي يوفر معلومات مفصلة عن التباين في السرعة (Variation in Velocity) يساعد في رسم الهياكل الجيولوجية المعقدة (Complex Geological Structures) مثل، الصدوع (Faults) والشقوق (Fractures) والانحرافات (Anomalies) في الطبقات الجوفية. ٤) المسح السيزمي الانكساري المعكوس (Reverse Seismic Refraction Survey)، في هذا المسح، يتم وضع المصدر السيزمي (Seismic Source) في موقع ثابت (Fixed

Location) على قمة التركيب الجيولوجي (Top of the Feature)، ويتم ننشر الجيوفونات في صف (Array) على منحدر (Downslope). يتم تسجيل الموجات المنكسرة التي تنتشر صعوداً للأعلى (Upslope). يتم استخدام هذا النوع من أنواع المسح لدراسة عمق (Depth) وميل (Inclination) الطبقات الجوفية الموجودة تحت المعالم الطبوغرافية ( Beneath Topographic Features). ٥) المسح السيزمي الانكساري الدقيق (Refraction Microtremor ReMi Survey)، يركز هذا المسح على تحليل خصائص التشتت (Dispersion Characteristics) للموجات السطحية (Surface Waves) التي تُولد (Generated) بواسطة الضوضاء المحيطة ( Ambient Noise) أو مصدر مُوجّه (Controlled Source). من خلال دراسة منحنيات التشتت (Dispersion Curves)، يمكن توفير معلومات حول تركيب سرعة موجات القص السطحية (Near-Surface Shear-Wave Velocity Structure)، وهي مفيدة لتوصيف الموقع ( Site Characterization) والتطبيقات الهندسية (Engineering Applications).

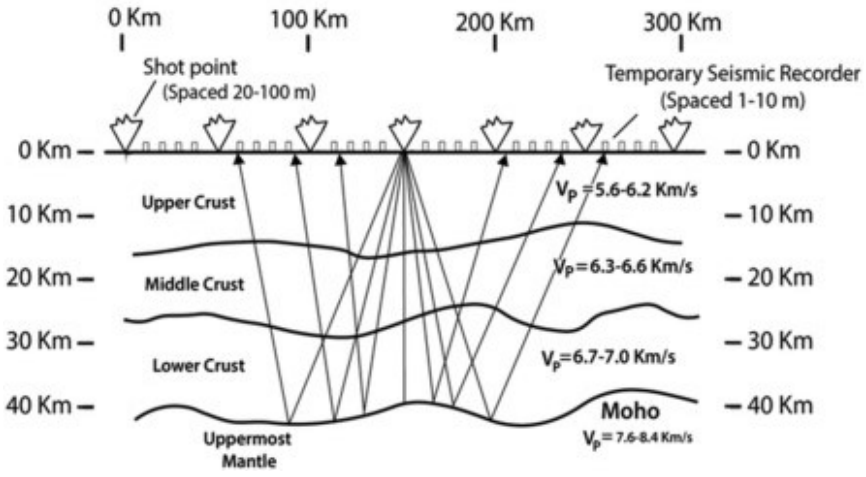


## الانعكاس السيزمي

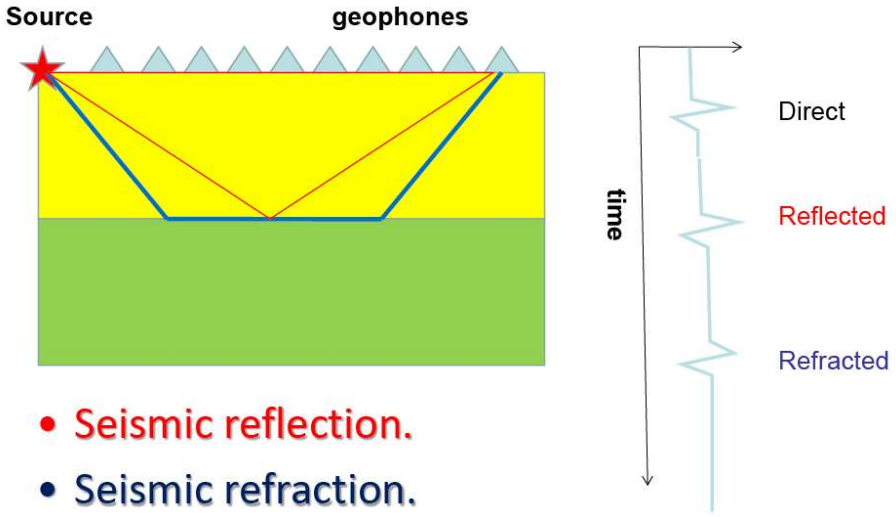
تُستخدم طريقة الانعكاس السيزمي (Seismic Reflection) لدراسة التراكيب التحت سطحية (Subsurface Structure) وتكوينها (Composition). تشمل هذه التقنية توليد (Generating) وتسجيل (Recording) الأمواج السيزمية التي تنتشر (Propagate) وتعود "تنعكس" ( Bounce Back/Reflect) عند مواجهة حدود الطبقات الصخرية أو التراكيب الجيولوجية الأخرى في الطبقات الداخلية. يتم تحليل هذه الأمواج المنعكسة (Reflected) لإنشاء صور (Images) أو مقاطع (Profiles) للطبقات الداخلية. تعتمد الفكرة على تفاعل الأمواج السيزمية مع الحدود الداخلية للطبقات. عندما تصل موجة سيزمية إلى حدود بين طبقتين صخريتين مختلفتين، يتم انعكاس جزء من طاقة الموجة العائدة إلى السطح، في حين يستمر الباقي في الانتشار إلى أعماق الأرض. يتم تسجيل الأمواج المنعكسة بواسطة الجيوفونات الموضوعة على السطح. يتم استخدام طريقة الانعكاس السيزمي في العديد من التطبيقات مثل، استكشاف النفط والغاز (Oil and Gas Exploration)، من خلال تحليل الأمواج المنعكسة، يمكن تحديد التكوينات الصخرية الداخلية التي قد تحتوي على النفط أو الغاز. رسم الخرائط الجيولوجية ( Geologic Mapping)، عن طريق إنشاء خرائط تفصيلية للهياكل الأرضية الجوفية مثل، الصدوع والطيات والقبب الملحية والمعالم الجيولوجية الأخرى. الهندسة وتطوير منشآت البنية التحتية (Engineering and Infrastructure Development)، عن طريق تقييم استقرار الأرضية (Stability of the Ground) وتحديد المخاطر المحتملة (Identify Potential Hazards)، تحديد عمق (Depth) وتركيب صخور الأساس (Composition of Bedrock)، وكشف الفراغات الجوفية (Detecting Underground Voids)، تخطيط (Planning) وإنشاء (Construction) الأنفاق (Tunnels) والسدود (Dams) والجسور (Bridges) والصروح الكبيرة الأخرى ( Other Large Structures). الدراسات البيئية (Environmental Studies)، عن طريق استكشاف خزانات المياه الجوفية (Investigate Groundwater Reservoirs)، ومراقبة تلوث المياه الجوفية ( Monitor Underground Water Pollution)، وتقييم سلامة المستودعات الأرضية ( Assess the Integrity of Landfills) أو مواقع تخزين النفايات (Waste Storage Sites). الدراسات الأثرية (Archaeological Surveys)، عن طريق تحديد (Identify) الهياكل المدفونة (Buried Structures)

والبحث الآثري للبيئة الطبيعية (Landscape Archaeology) أو القطع الأثرية (Artifacts). تقييم المخاطر الزلزالية (Seismic Hazard Assessment)، تعتبر البيانات الانعكاسية الزلزالية بالاشتراك مع المعلومات الجيوفيزيائية والجيولوجية الأخرى، مهمة لتقييم المخاطر الزلزالية في المناطق النشطة زلزالياً. تساعد في فهم أنظمة الصدوع الداخلية (Subsurface Fault Systems)، وتحديد مصادر الزلازل المحتملة (Identifying Potential Earthquake Sources)، وتقدير خصائص اهتزازات الأرض (Estimating Ground Shaking Characteristics).




**Seismic Refraction:** the signal returns to the surface by refraction at subsurface interfaces, and is recorded at distances much greater than depth of investigation.

**Seismic Reflection:** the seismic signal is reflected back to the surface at layer interfaces, and is recorded at distances less than depth of investigation.




- Seismic reflection.
- Seismic refraction.

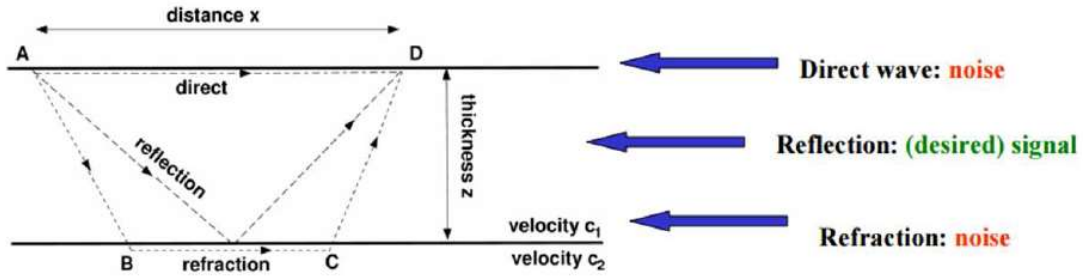
## الفرق بين الإشارة والضوضاء

الإشارة (Signal) والضوضاء (Noise) هما مكونان أساسيان يجب تمييزهما عند تحليل البيانات. الإشارة (Signal)، تشير إلى معلومات (Information) ذات دلالة (Meaningful) أو مرغوب فيها (Desired) ضمن مجموعة البيانات. الإشارة تحمل المعلومات القيمة التي نرغب في استخلاصها (Extract) أو تفسيرها (Interpret). تعتبر الإشارة عادةً محور التحليل الأساسي (Primary Focus of Analysis)، حيث تحتوي على الأفكار القيمة (Valuable Insights) أو المعرفة (Knowledge) التي نحاول كشفها. الضوضاء (Noise)، تشير إلى التباينات (Variations) غير المرغوب فيها (Unwanted) أو التشويش (Disturbances) أو الأخطاء (Errors) الموجودة في البيانات والتي ليست جزءاً من الإشارة الأساسية. تمثل المعلومات غير ذات الصلة أو الزائدة التي تحجب (Obscures) أو تتداخل (Interferes) مع الإشارة. يمكن أن تنشأ الضوضاء من مصادر مختلفة مثل أخطاء في القياس (Measurement Errors)، أو قيود المستشعر (Sensor Limitations)، أو تداخل البيئة (Environmental Interference)، أو مشاكل نقل البيانات (Data Transmission Issues)، أو التباين الأساسي في البيانات (Inherent Variability in the Data). عادةً ما تُعتبر الضوضاء عشوائية (Random) أو غير قابلة للتنبؤ (Unpredictable)، وتعوق (Hinders) وضوح ودقة تحليل البيانات (Clarity and Accuracy of Data Analysis). يُعد التمييز (Distinguishing) بين الإشارة والضوضاء أمراً حاسماً في تحليل البيانات. يهدف الأمر إلى فصل (Separate) وإزالة (Remove) الضوضاء من البيانات لاستخلاص (Extract) الإشارة الحقيقية (True Signal). تساعد هذه الطريقة، المعروفة بتقليل الضوضاء (Noise Reduction) أو إزالة الضوضاء (Denoising)، في تعزيز جودة وموثوقية نتائج التحليل. يمكن استخدام مختلف التقنيات وطرق تصفية البيانات (Filtering Methods) أو خوارزميات معالجة الإشارة (Signal Processing Algorithms) للتخفيف أوإزالة الضوضاء من البيانات، مما يسمح بتحديد الإشارة الحقيقية بشكل أكثر دقة واستدلالاً.

## Signal and Noise

Signal: desired
Noise: not desired

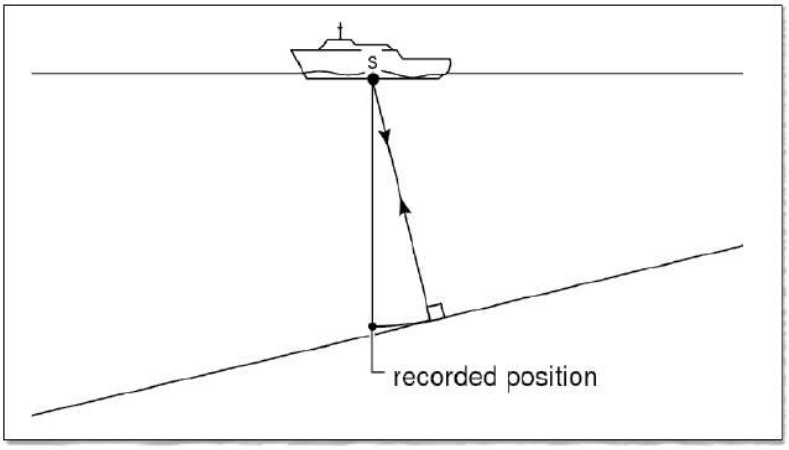
So for reflection seismology:
- Primary reflections are signal
- Everything else is noise!




## الانعكاس السيزمي الأفقي

الانعكاس الأفقي (Horizontal Reflection)، المعروف أيضاً بالانعكاس غير الرأسي (Non-Vertical Reflection)، هو نوع من التحويل (Transformation) يقوم بقلب (Flips) جسم أو صورة أفقياً، عادةً عبر خط أفقي. ويُطلق عليه "غير الرأسي" لأنه لا يتضمن قلب الجسم عمودياً. لإجراء انعكاس غير رأسي، يمكنك تخيل وضع مرآة أفقية على طول خط الانعكاس. يتم بعد ذلك انعكاس كل نقطة من الجسم أو الصورة عبر هذا الخط، مما ينتج عنه صورة مرآة على الجانب الآخر. يشير الانعكاس السيزمي الأفقي إلى انعكاس الموجات السيزمية عند الحدود (Interfaces) غير عمودية أو رأسية على سطح الأرض. في الدراسات التقليدية للانعكاس السيزمي، تسجل البيانات السيزمية تحديدًا الانعكاسات من واجهات طبقات أفقية أو قريبة من العمودية. ومع ذلك، يمكن أن تواجه الموجات السيزمية حدود مائلة (Tilted) أو ذات زوايا مائلة (Oblique Angles) بالنسبة لسطح الأرض. يمكن أن تنتج من طبقات صخرية مائلة (Tilted Rock Layers) أو صدوع (Faults) أو تراكيب معقدة (Structural Complexities) في طبقات الأرض الداحلية.

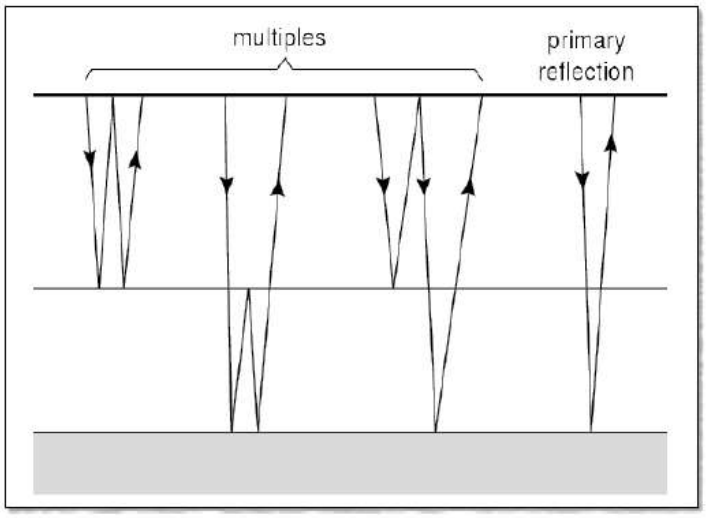
- Reflected rays travel back to the source following a path perpendicular to the interface
  - The receiver will record an arrival time that is too short and a dip that is too shallow




## الانعكاس السيزمي المتعدد

الانعكاس السيزمي المتعدد (Multiple Seismic Reflection)، المعروف أيضاً بالانعكاسات المتعددة (Multiple Reflections)، يشير إلى الظاهرة التي تحدث في البيانات السيزمية حيث تنعكس (Reflect) الموجات عدة مرات (Multiple Times) بين الطبقات التحت سطحية قبل وصولها إلى أجهزة التسجيل. عندما تنتشر موجات السزمية في باطن الأرض، فإنها تواجه حدوداً (Boundaries) بين طبقات صخرية مختلفة. في كل حد من هذه الحدود، ينعكس جزء من الطاقة السيزمية مرة أخرى نحو السطح. هذه الانعكاسات الأولية (Primary Reflections) هي الإشارات المرغوب فيها المستخدمة لتصوير باطن الأرض. ومع ذلك، يمكن أن يتم انعكاس بعض الطاقة من الانعكاسات الأولية مرة أخرى عند حدود أخرى وتسافر مرة أخرى نحو السطح كانعكاسات ثانوية (Secondary Reflections). هذه الانعكاسات الثانوية تتداخل مع الانعكاسات الأولية ويمكن أن تخلق ضوضاء غير مرغوب (Unwanted) فيها أو آثار زائفة (Artifacts) في البيانات السيزمية. وجود الانعكاسات المتعددة يمكن أن يعقد تفسير البيانات السيزمية ويؤثر على دقة تصوير باطن الأرض. يتم استخدام طرق وتقنيات مختلفة، مثل إزالة تشوش الصورة (Deconvolution) وخوارزميات النزوح (Migration Algorithms)، لتخفيف تأثير الانعكاسات المتعددة في معالجة البيانات السيزمية.

- On their return to the surface...
  - Reflected rays can also reflect back down and then later be reflected back up
- This causes a single reflector to potentially produce several "multiples"
- Short path (less reflections) multiples are usually stronger
- These artifacts can be removed by migration




## معامل الانعكاس

يشير معامل الانعكاس (Reflection Coefficient) إلى نسبة (Ratio) سعة تذبذب الموجة السيزمية المنعكسة (Amplitude of the Reflected Seismic Wave) إلى قيمة سعة الموجة السيزمية الواقعة (Amplitude of the Incident Seismic Wave) عند الحد الفاصل (Interface) بين طبقتي صخور أو تركيبات جيولوجية مختلفة. يعتبر مقياس لقدرة الانعكاس (Reflectivity) في الطبقات الجوفية وتوفر معلومات قيمة حول خصائص وحدود الطبقات الجوفية. عندما يكون هناك اختلافات في الكثافة (Density) والسرعة (Velocity)، يتم انعكاس جزء من طاقة الموجة العائدة إلى السطح، في حين يستمر الطاقة المتبقية في الانتشار في الطبقات الجوفية. يقيس معامل الانعكاس كمية الطاقة المنعكسة. غالباً ما يتم تعبير معامل الانعكاس كمقدار (Quantity) بلا بُعد (Dimensionless) بين −١ و +١، أو كنسبة بين −١٠٠٪ و +١٠٠٪. يشير معامل الانعكاس الإيجابي إلى زيادة في قيمة الموجة المنعكسة مقارنة بالموجة الواقعة، بينما يشير معامل الانعكاس السالب إلى انخفاض في قيمة الموجة. يعتمد معامل الانعكاس على عوامل مختلفة، بما في ذلك زاوية السقوط (Angle of Incidence)، وخصائص طبقات الصخور ( Properties of the Rock Layers)، وتردد الموجة (Frequency). من خلال تحليل معاملات الانعكاس عند

الواجهات المتعددة وتغييراتها بالنسبة لزاوية السقوط والتردد، يمكن تحديد المعالم الجيولوجية (Identify Geological Features) وتحديد الآبار المحتملة للهيدروكربونات (Locate Potential Hydrocarbon Reservoirs) أو الموارد الأخرى تحت الأرض (Other Underground Resources).

## معامل الانتقال

معامل الانتقال (Transmission Coefficient)، المعروف أيضاً بعامل النقل (Transmission Factor)، هو مقياس لكسر (Fraction) الطاقة الواقعة (Incident Energy) التي تمر عبر حد فاصل (Interface) بين وسطين مختلفين. يُرمز لمعامل الانتقال بالرمز "T"، ويُعرف كنسبة (Ratio) الطاقة المنتقلة (Transmitted Energy) إلى الطاقة المستقبلة (Incident Energy). يقيس مدى كفاءة أو احتمالية الانتقال عبر الحدود. يمكن أن يتراوح معامل الانتقال بين الصفر والواحد، حيث يُمثل الصفر عدم الانتقال (No Transmission) "انعكاس كامل" (Complete Reflection) والواحد يُمثل الانتقال الكامل (Full Transmission) "عدم انعكاس" (No Reflection).

## معامل المقاومة الصوتية

معامل المقاومة الصوتية (Acoustic Impedance) يشير إلى مقدار المقاومة (Opposition) التي يقدمها وسط ما لانتقال الموجات. يصف كيفية انتشار الموجات من خلال مواد (Materials) أو حدود (Interfaces) مختلفة. يُرمز لمقاومة الصوتية للوسط بالرمز "Z" ويُعرف كضرب كثافة الوسط (ρ) بالسرعة في ذلك الوسط (c). المعامل يلعب دوراً حيوياً في فهم انتقال (Transmission) وانعكاس (Reflection) وامتصاص (Absorption) الموجات في وسطين مختلفين.

The **reflection co-efficient** is the ratio of the amplitudes of the reflected and incident waves: **R = Ar/Ai**
Similarly, the **transmission co-efficient** is the ratio of the amplitudes of the transmitted and incident waves: **T = At/Ai**
The amount of energy that is partitioned into transmission and reflection depend on **the angle** between the incident wave and interface and on the **acoustic impedance (Z)** of each layer:
**Z1 = ρ1v1 and Z2 = ρ2v2**

## معادلات زوبيرتز

معادلات زوبيرتز (Zoeppritz Equations)، والتي تحمل اسم الجيوفيزيائي الألماني كارل زوبيرتز، هي مجموعة من المعادلات الرياضية التي تصف تغيرات سعة (Amplitude) ومرحلة (Phase) الموجات السيزمية عند واجهة (Interface) بين طبقتين جيولوجيتين مختلفتين. توفر هذه المعادلات إطاراً نظرياً لفهم سلوك موجات السيزمية عند مواجهة حدود داخل باطن الأرض. تعتمد معادلات زوبيرتز على عدة عوامل، بما في ذلك زاوية السقوط للموجة السيزمية وخصائص المرونة للطبقتين المتفاعلتين، مثل الكثافة وسرعة الانتشار للموجات السيزمية. تسمح هذه المعادلات بحساب معاملات الانعكاس والانتقال للموجات السيزمية، مما يمكن من تحديد كمية الطاقة التي تنعكس أو تنتقل عبر الواجهة.

For **normal incident waves**, it can be shown that:

$$R = \rho_2 v_2 - \rho_1 v_1 / \rho_2 v_2 + \rho_1 v_1 = Z_2 - Z_1 / Z_2 + Z_1$$

$$T = 2\rho_1 v_1 / \rho_2 v_2 + \rho_1 v_1 = 2Z_1 / Z_2 + Z_1$$

These are the **Zoeppritz equations**. There are also more complicated forms of the Zoeppritz equations that can be used for any angle of incidence.

## الانعكاس ذو القطبية السالبة

الانعكاس ذو القطبية السالبة (Negative polarity reflection) يشير إلى نوع من الانعكاس السيزمي حيث تكون سعة الموجة المنعكسة (Amplitude of the Reflected) على عكس (Opposite in Sign) ذروة الموجة الواقعة (Incident Wave). ببساطة، إذا كانت ذروة الموجة

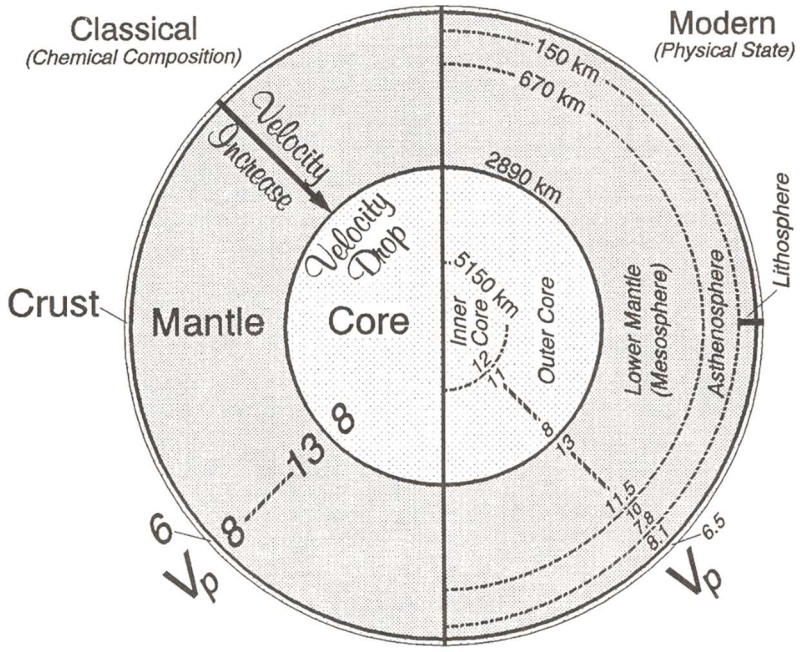
الساقطة إيجابية، فإن ذروة الموجة المنعكسة ستكون سالبة، والعكس صحيح أيضاً. يمكن أن تكون الانعكاسات ذات القطبية السالبة مؤشراً على بعض التراكيب أو الظروف الجيولوجية. على سبيل المثال، في بعض الحالات، قد تحدث انعكاسات سالبة عند واجهة بين طبقة ذات انبعاث منخفض (مثل حقل السوائل) وطبقة ذات انبعاث عالي (مثل صخرة كثيفة). يمكن أن يكون هذا مفيداً في تحديد حقول الهيدروكربونات، حيث يمكن أن يتسبب وجود السوائل في انخفاض الانبعاث وتسبب انعكاسات ذات قطبية سالبة.

- if Z1 = Z2, there is no reflection. All energy is transmitted into the second layer. This does not mean that ρ1=ρ2 and v1= v2! All that matters is that $\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2$.
- **R** can have a value of +1 to -1. **R** will be negative when $Z_1 > Z_2$. A negative value means that there will be a phase change of 180° in the phase of the reflected wave (a peak becomes a trough). This is called a **negative polarity reflection**.
- **T** is always positive – transmitted waves have the same phase as the incident wave. **T** can be larger than 1.
- Reflection coefficients for the Earth are generally less than ±0.2, with maximum values of ±0.5. Most energy is transmitted, not reflected.

## البنية الداخلية للأرض

يتكون الهيكل الداخلي للأرض من عدة طبقات، لكل منها تكوينها وخصائصها المختلفة. بداية من الطبقة الخارجية، هناك القشرة الأرضية (Crust) وهي القشرة الصلبة الرقيقة التي تشكل سطح الكوكب وهي رقيقة نسبياً مقارنة بالطبقات الأخرى. وتتكون بشكل أساسي من الصخور الصلبة مثل، الجرانيت والبازلت. تنقسم القشرة إلى، قشرة قارية (Continental Crust) توجد أسفل القارات، وقشرة محيطية (Oceaninc Crust) تقع تحت أحواض المحيطات. يوجد تحت القشرة ما يمسى بالوشاح (Mantle)، وهي طبقة سميكة من الصخور الساخنة وشبه الصلبة تمتد إلى عمق حوالي ٢٩٠٠ كلم، وتُشكل جزءاً كبيراً من حجم الأرض. يتكون الوشاح من الصخور الصلبة، ولكن بسبب ارتفاع درجات الحرارة والضغط، فإنه يتصرف مثل مادة لزجة وشبه صلبة على مدى فترات طويلة. يتكون الوشاح من معادن السيليكات وهو مسؤول عن تيارات الحمل الحراري (Convection Currents) التي تُحرك الصفائح التكتونية. في مركز الأرض

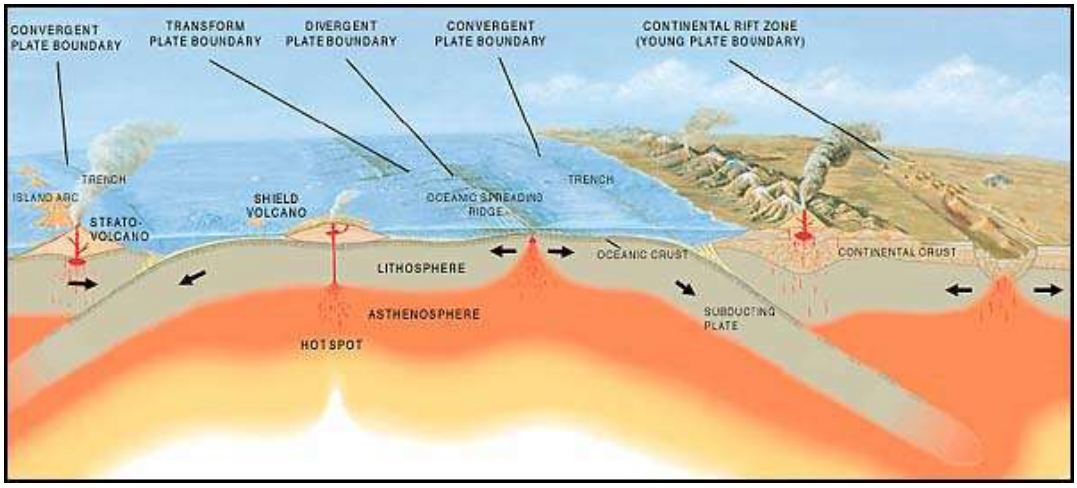
يقع اللب (Core)، الذي ينقسم إلى اللب الخارجي (Outer Core) والنواة الداخلية (Inner Core). اللب الخارجي عبارة عن طبقة سائلة تتكون أساساً من الحديد المنصهر والنيكل (يبلغ سمكها حوالي ٢٣٠٠ كلم)، بينما اللب الداخلي عبارة عن كرة صلبة تتكون من الحديد الصلب والنيكل بسبب الضغط الهائل (يبلغ نصف قطرها حوالي ١٢٢٠ كلم). يولّد اللب المجال المغناطيسي للأرض من خلال حركة اللب الخارجي المنصهر.




| Continental Crust | Oceanic Crust |
|---|---|
| Thick crust (average 35-40 km) | Thin crust (roughly 7 km thick) |
| Less dense ( 2.7 g/cm^3) | More dense ( 3.0 g/cm^3) |
| Old (4 Ga years old) | Young (180 Ma years old) |
| Composed of granitic rocks | Composed of igneous rocks |

## نظرية الصفائح التكتونية

نظرية الصفائح التكتونية (Plate Tectonic Theory) تفسر حركة وتفاعل الغلاف الصخري للأرض، والذي يتكون من صفائح تكتونية صلبة. ينقسم الغلاف الصخري للأرض إلى عدة صفائح كبيرة وصغيرة تطفو على الغلاف الموري (Asthenosphere) شبه السائل تحتها. تتكون هذه الصفائح من القشرة والجزء العلوي من الوشاح (Upper Mantle). تتفاعل الصفائح عند حدود (Plate Boundary) يمكن تصنيفها إلى ثلاثة أنواع رئيسية، ١) الحدود المتباعدة (Divergent Plate Boundary)، حيث تتحرك الصفائح بعيداً عن بعضها البعض مما يخلق فجوة تسمح للصهارة من الوشاح بالارتفاع وتشكيل قشرة جديدة. تُعرف هذه العملية باسم انتشار قاع البحر (Sea Floor Spreading) وتؤدي إلى تكوين تلال وسط المحيط (Mid Ocean Ridge). ٢) الحدود المتقاربة (Convergent Plate Boundary)، تحدث عندما تصطدم الصفائح. اعتماداً على نوع القشرة المعنية، يمكن أن تتشكل ثلاثة أنواع من الحدود المتقاربة: حدود محيطية–قارية (Ocean-Continent)، محيطية–محيطية (Ocean-Ocean)، وقارية–قارية (Continent-Continent). يحدث الاندساس (Subduction) غالباً عند الحدود المتقاربة، حيث يتم دفع صفيحة تحت أخرى داخل الوشاح. تتشكل مناطق الاندساس عندما تغوص القشرة المحيطية الأكثر كثافة تحت القشرة القارية أو المحيطية الأقل كثافة، يمكن أن تسبب نشاطًا بركانياً وزلازل وتكوين سلاسل جبلية. ٣) حدود الصفائح التحويلية أو الانزلاقية (Transform Plate Boundary)، حيث تنزلق الصفائح فوق بعضها البعض أفقياً. يمكن للحركة على طول هذه الحدود أن تسبب زلازل كبيرة ولكنها لا تؤدي عادة إلى تكوين القشرة أو تدميرها. تشرح نظرية الصفائح التكتونية حركة الصفائح من خلال مفهوم الحمل الحراري للوشاح (Mantle Convection Currents). تدفع الحرارة الصادرة من باطن الأرض تيارات الحمل الحراري في الوشاح الأساسي، والذي بدوره يسحب ويحرك الصفائح المغطاة. كذلك، توفر نظرية الصفائح التكتونية إطاراً شاملاً لفهم الظواهر الجيولوجية المختلفة مثل، الزلازل والبراكين والسلاسل الجبلية وتكوين أحواض المحيطات. كما تلعب دوراً حيوياً في شرح الطبيعة الديناميكية لسطح الأرض وتساعد على تفسير الأحداث الجيولوجية الماضية والتنبؤ بالتغيرات المستقبلية.

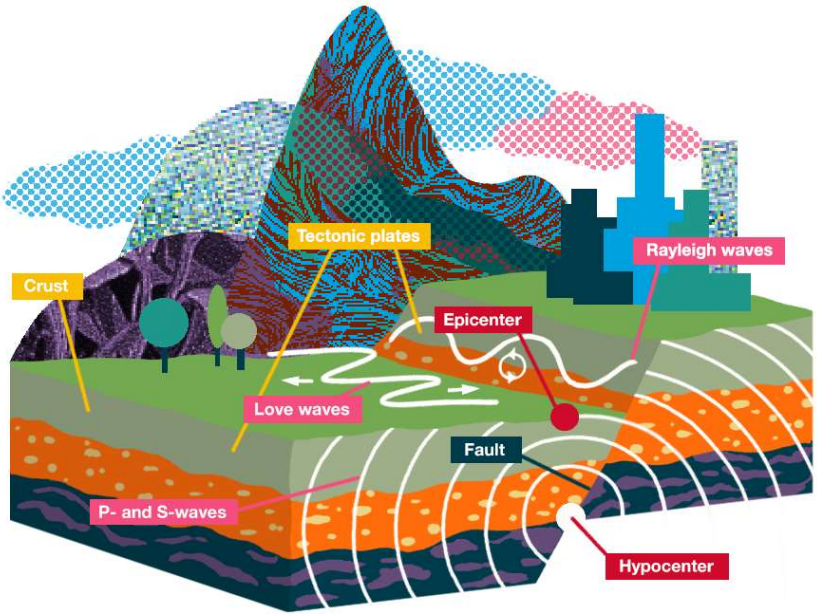



## الزلازل

الزلزال (Earthquake) هو اهتزاز مفاجئ وعنيف لسطح الأرض، ينتج عادة عند إطلاق الطاقة في القشرة الأرضية بسبب حركات الصفائح التكتونية أو النشاط البركاني. وهي ظاهرة طبيعية تحدث عندما يحدث تمزق مفاجئ أو انزلاق على طول خط الصدع، مما يؤدي إلى موجات زلزالية تنتشر عبر الأرض. ينقسم الغلاف الصخري للأرض إلى عدة صفائح تكتونية كبيرة تتحرك باستمرار. تحدث الزلازل في المقام الأول على طول حدود هذه الصفائح، حيث تتفاعل الصفائح. يمكن أن يؤدي إطلاق الضغط المتراكم على طول هذه الحدود إلى حدوث زلازل. النقطة داخل الأرض التي ينشأ فيها الزلزال تسمى البؤرة (Focus) أو مركز الزلزال (Hypocenter)، هو الموقع الفعلي الذي يحدث فيه انزلاق الصدع ويتم إطلاق الطاقة الزلزالية. المركز السطحي للزلزال (Epicenter)، هي النقطة الموجودة على سطح الأرض مباشرة فوق البؤرة. وهو الموقع الذي يستخدم عادة لوصف وتحديد موقع الزلزال. الموجات الزلزالية أو السيزمية ( Seismic Waves) هي موجات من الطاقة تنتقل عبر طبقات الأرض، وهي ناتجة عن الزلازل أو الانفجارات البركانية أو حركة الصهارة أو الانهيارات الأرضية أو التفجيرات الاصطناعية. علم الزلازل (Earthquake Seismology) هو العلم الذي يهتم بدراسة الموجات الزلزالية وذلك لمعرفة التفاصيل الدقيقة عن الصفات الطبيعية لباطن الأرض. تنتقل الموجات الزلزالية ويتم تسجيلها عن طريق "جهاز قياس الزلازل" (Seismograph). هناك عدة أنواع مختلفة من الموجات الزلزالية،

كلها تتحرك بطرق مختلفة. النوعان الرئيسيان هما، "الموجات السطحية" (Surface Waves) و"الموجات الباطنية" (Body Waves). تنتقل الموجات السطحية في الطبقات العليا من القشرة الأرضية، ولهذا سُميت بالموجات السطحية، وتُسبب في إحداث حركات سطحية للقشرة الأرضية. تنقسم الموجات السطحية إلى نوعين هما، "موجات لوف" (Love Waves) و"موجات رايلي" (Rayleigh Waves). تتميز موجات لوف بأنها أسرع الموجات السطحية انتشاراً وتتحرك جزيئاتها على سطح الأرض بحركة أفقية جنباً إلى جنب. أما موجات رايلي فتنتشر بشكل إهليجي وذلك في مستوى رأسي موازٍ لحركه انتشار الموجه وبسرعة أقل من موجات لوف. السبب الرئيسي في التدمير الذي تسببه الزلازل هي الموجات السطحية بشكل عام، وموجات رايلي بشكل خاص. تتميز الموجات الباطنية بقدرتها على الانتشار في باطن الأرض بسرعات تختلف باختلاف خواص الوسط الذي تمر فيه وتنقسم إلى نوعين هما، "الموجات الطولية" أو "الأولية" (Primary Waves) و"الموجات المستعرضة" أو "الثانوية" (Secondary Waves). الموجات الطولية هي أسرع وأول الموجات ظهوراً على جهاز قياس الزلازل، يمكن أن تنتقل عبر المواد الصلبة والسائلة وتحمل من الطاقة قدراً أقل من الموجات المولدة من نفس الزلزال. أما الموجات المستعرضة تكون سرعتها أقل من الموجات الطولية وتنتشر في المواد الصلبة فقط ولا تنتشر في السوائل، وهي تحمل من الطاقة قدراً أكبر من الموجات الطولية وتكون سعتها (Amplitude) أكبر من سعة الموجات الطولية. يستعمل في الوقت الحاضر نوعان من وحدات قياس الزلازل الأرضية، الأول هو "مقياس وصفي"، أي أن الزلازل يتم قياس شدتها عن طريق مشاهدة ووصف التأثيرات الناتجة عنها. وفي هذه الحالة تكون شدة الزلزال مختلفة حسب القرب أو البعد عن البؤرة. ويمكن أن تصنف الزلازل وفق الشدة الزلزالية وحسب درجة الدمار الذي تحدثه في موقع ما. أهم مقاييس الشدة الزلزالية وأكثرها شيوعاً هو "مقياس ميركالي المعدل" (Mercalli Intensity Scale) الذي يقسم إلى ١٢ قسماً يكون تأثير الزلزال في الشدة رقم ١ قليلاً إلى درجة قد لا يُشعر بها بدون جهاز تسجيل زلزلي. ويتدرج المقياس في تصنيف درجات

الدمار، وصولا إلى الرقم ١٢ الذي يعكس تدميراً كاملاً للمنشآت. أما المقياس الآخر، فهو "مقياس حسابي"، أي أن الزلزال يقاس باستعمال معادلات رياضية خاصة تعتمد على سعة الموجة المسجلة. وهذا المقياس لا يتغير نتيجة القرب والبعد عن بؤرة الزلزال، وإنما يُعطي قياساً لطاقة الزلزال في البؤرة نفسها. وأكثر المقاييس الرياضية استعمالاً في الوقت الحاضر هو "مقياس ريختر" (Richter Scale)، حيث يصنف الزلزال اعتماداً على الكمية المطلقة للطاقة المتحررة عند حصول الزلزال، وتسمى هذه القيمة بـ "المقدار الزلزالي". تظهر الزلازل بصورة مُنتظمة أو فُجائية، بناءً على طبيعة المنطقة الجيولوجية، أو قد تحدث في "أوقات غير متوقعة وأماكن غير متوقعة". الزلازل عبارة عن اهتزازات في القشرة الأرضية تحدث بسبب التحرر السريع للطاقة المجتمعة في الصخور، من أسباب حدوثها: حركة الألواح القارية المشكلة للأرض، ثوران البراكين، الصُدُوع النشِطة، ضُعف في القشرة الأرضية، نشاطات بشرية مثل: التفجيرات النووية، بناء السدود، تكوين البحيرات الصناعية، والسحب الزائد للسوائل من باطن الأرض. "راصد الزلازل" (Seismometer) هو الجزء الحساس للغاية، الموجود داخل "جهاز قياس الزلازل" (Seismograph)، الذي يتكون من كتلة معدنية ثقيلة معلقة بواسطة سلكين زنبركيين. يقوم راصد الزلازل برصد حركات الأرض الطبيعية مثل الزلازل وثوران البراكين، أو الصناعية الناتجة عن الأنشطة البشرية مثل الانفجارات. يتم تثبيت جهاز قياس الزلازل بشكل آمن على سطح الأرض بحيث تهتز الوحدة بأكملها باستثناء الكتلة المعدنية الثقيلة المعلقة، والتي تظل في نفس المكان عندما تهتز الأرض. تعتمد أجهزة القياس الزلزالية على مبدأ "القصور الذاتي"، كما يصفه قانون نيوتن الأول، والذي ينص على أن الأجسام الساكنة تظل ساكنة والأجسام المتحركة تظل متحركة على خط مستقيم وبسرعة ثابتة ما لم تؤثر عليها قوة خارجية. "مرسمة الزلازل" (Seismogram) هي البيانات التي نحصل عليها وتكون على شكل "تسجيلات زلزالية" وخطوط متذبذبة. المحور الأفقي يمثل الزمن ويقاس بالثواني، والمحور العمودي يمثل الإزاحة الأرضية ويقاس بالمليمتر. يتم استخدام البيانات في تحديد وتوصيف الزلازل ودراسة التراكيب الداخلية للأرض.




## Relationship between Vp and Vs:

**Compressional Waves:**

$$V_p = \sqrt{\frac{(\frac{4}{3}\mu + k)}{\rho}}$$

**Shear Waves:**

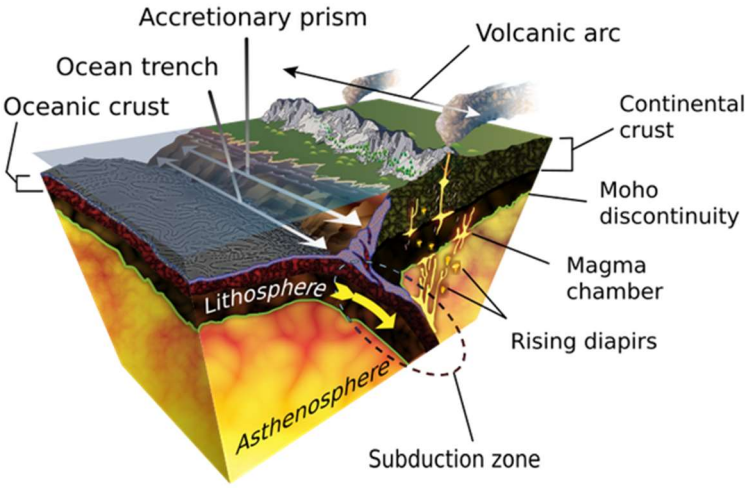
$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

- Averaged Vp/Vs = 1.732 for the crust.
- For mafic rocks, Vp/Vs = 1.81.
- For felsic rocks, Vp/Vs = 1.70.

## منطقة واداتي–بينيوف

منطقة واداتي–بينيوف (Wadati-Benioff Zone)، هي منطقة نشطة زلزالياً في مناطق الاندساس حيث تحدث الزلازل فيها، تم تسميتها على اسم علماء الزلازل هوغجو بينيوف وكيو واداتي، الذين أدركوا بشكل مستقل أهمية هذه المنطقة في أوائل القرن العشرين. تتميز منطقة واداتي–بينيوف بنمط من الزلازل التي تحدث بسبب الضغط والاحتكاك الناتج عن غرق الصفيحة المندسة في الوشاح، مما يشكل مستوى مائلاً من النشاط الزلزالي. يمكن أن تتراوح قوة الزلازل داخل هذه المنطقة من صغيرة نسبياً إلى كبيرة جداً، بما في ذلك بعض أقوى الزلازل المسجلة

على الأرض. وترتبط هذه المنطقة عادةً بالزلازل العميقة البؤرة، وهي زلازل تحدث على أعماق أكبر من ٧٠ كلم تحت سطح الأرض. توفر منطقة واداتي–بينيوف رؤى مهمة حول ديناميكيات الصفائح التكتونية وعملية الاندساس. وهو دليل على التفاعل والحركة بين الصفائح التكتونية وما يرتبط بها من إجهاد وتشوه يحدث أثناء الاندساس. تساعد دراسة منطقة واداتي–بينيوف العلماء على فهم القوى العاملة في مناطق الاندساس وتساهم في معرفتنا بتوليد الزلازل والعمليات الجيوفيزيائية التي تحدث في أعماق الأرض.




## تصنيف الزلازل

يمكن تصنيف الزلازل (Earthquakes Classification) إلى عدة أنواع بناءً على أسبابها وخصائصها الأساسية. الزلازل التكتونية (Tectonic Earthquakes)، هي النوع الأكثر شيوعاً وتحدث بسبب حركة الصفائح التكتونية. تحدث هذه الزلازل عند حدود الصفائح، بما في ذلك الحدود المتباعدة (حيث تتحرك الصفائح بعيداً عن بعضها البعض)، والحدود المتقاربة (حيث تتصادم الصفائح فيما بينها)، والحدود المتحولة (حيث تنزلق الصفائح فوق بعضها البعض أفقياً). يمكن أن تتراوح الزلازل التكتونية في الحجم من الهزات الصغيرة إلى الأحداث المدمرة الكبرى. زلازل منطقة الاندساس (Subduction Zone Earthquakes)، تحدث عند حدود الصفائح المتقاربة حيث يتم دفع إحدى الصفائح التكتونية إلى أسفل أخرى. غالباً ما ترتبط

هذه الزلازل بمنطقة واداتي-بينيوف وتتميز بالزلازل العميقة التركيز التي تحدث في الصفيحة المندسة. يمكن أن تولد زلازل منطقة الاندساس أحداثاً قوية وربما تسونامي (Tsunami). الزلازل داخل الصفائح (Intraplate Earthquakes)، تحدث داخل الجزء الداخلي من الصفائح التكتونية، بعيداً عن حدود الصفائح. تحدث بسبب إطلاق الضغط المتراكم داخل الصفيحة، والذي غالباً ما يرتبط بالصدوع القديمة أو مناطق ضعف. تعتبر الزلازل داخل الصفائح أقل تواتراً من الزلازل التكتونية ولكنها لا تزال قادرة على التسبب في أضرار كبيرة في المناطق المأهولة بالسكان والتي لا تعتبر عادةً نشطة زلزالياً. الزلازل الانزلاقية الضاربة (Strike-Slip Earthquakes)، تحدث على طول حدود الصفائح التحويلية، حيث تنزلق الصفائح أفقياً متجاوزة بعضها البعض. تتميز هذه الزلازل بحركة أفقية في الغالب على طول مستوى الصدع. يعد صدع سان أندرياس في كاليفورنيا (San Andreas Fault) مثالاً معروفاً لحدود الصفائح المتحولة حيث تحدث الزلازل. الزلازل العكسية والدافعة (Reverse and Thrust Earthquakes)، تحدث عند حدود الصفائح المتقاربة حيث يتم دفع إحدى الصفائح تحت الأخرى في حركة دفع أو صدع عكسي. ترتبط هذه الزلازل بارتفاع وضغط كبير لقشرة الأرض. عادة ما تكون الزلازل العكسية والزلازل الدافعة قادرة على إحداث أحداث قوية ومدمرة. الزلازل الصدعية العادية (Normal Fault Earthquakes)، تحدث عند حدود الصفائح المتباعدة حيث تتحرك الصفائح بعيداً عن بعضها البعض، مما يخلق قوى شد تؤدي إلى تمزق القشرة الأرضية. وترتبط هذه الزلازل بالحركة على طول الصدوع العادية، حيث يتحرك الجدار المعلق إلى الأسفل بالنسبة إلى جدار القدم. تتميز الزلازل العادية عادة بالإزاحة العمودية. يساعد تصنيف الزلازل العلماء على فهم العمليات والآليات والإعدادات الجيولوجية الأساسية المرتبطة بالنشاط الزلزالي، والذي يساهم بدوره في مراقبة الزلازل وتقييم المخاطر وجهود الاستعداد.

## Depth of Earthquakes:

**1. Shallow earthquakes:**
(Depth between 0 and 70 km).

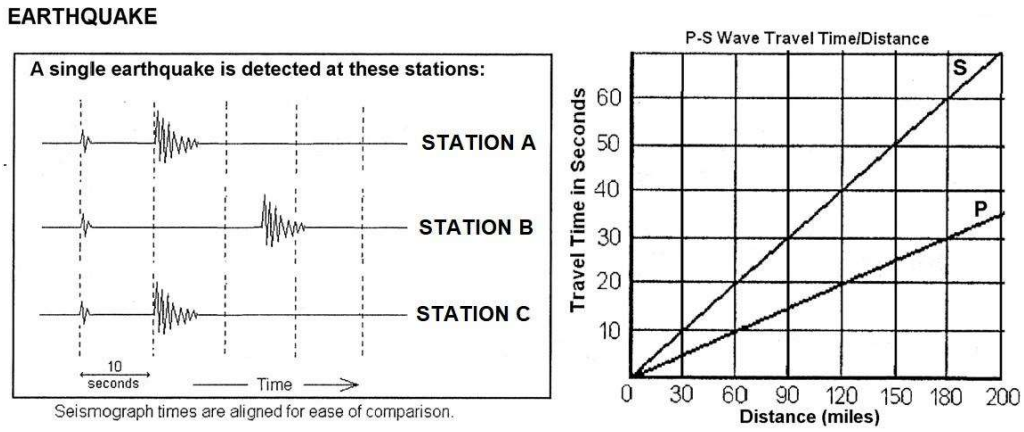
**2. Intermediate earthquake:**
(Depth between 70 and 300 km).

**3. Deep earthquakes:**
(Depth is greater than 300 km).

## كيفية تحديد موقع الزلزال

إن موقع المركز السطحي للزلزال ووقت حدوثه يكونان في البداية غير معروفين، ولكن يمكن تحديدهما باستعمال المخطط الزلزالي (Seismogram) وكذلك عن طريق منحنيات المسافة–زمن الوصول (P-S Arrival Times).حيث يتم تسجيل الزمن المستغرق بين وصول أول الموجات الأولية وكذلك أول الموجات الثانوية. ويستطيع العلماء الزلازل معرفة بُعد المركز السطحي للزلزال بقياس الفرق بين زمني وصول الموجتين في المخطط الزلزالي ثم تحديد الفرق الزمني نفسه على منحنى المسافة ومن ثم استخراج بُعد الزلازل. فعلى سبيل المثال، إذا كان الفارق الزمني يساوي ٦ دقائق، لذا فإن المسافة بين المركز السطحي للزلزال ومحطة رصد الزلازل تساوي ٤٣٠٠ كلم بحسب منحنى المسافة بزمن الوصول، حيث يتضح من المنحنى أن الموجات الأولية استغرقت حوالي ٨ دقائق حتى وصلت إلى محطة الرصد، بينما الأمواج الثانوية استغرقت حوالي ١٤ دقيقة. فكلما زاد بُعد الزلزال، زاد الفرق الزمني بين وصول الموجات الأولية والموجات الثانوية. يحلل علماء الزلازل بيانات مخططات زلزالية عديدة لتحديد موقع المركز السطحي للزلزال وذلك عن طريق حساب المسافة بين المركز السطحي للزلزال وبين محطة الرصد، ولكن هذا لا يُحدد الاتجاه الذي يقع المركز السطحي فيه بالنسبة إلى محطة الرصد. ويمكن التعبير عن ذلك بدائرة مركزها محطة الرصد ونصف قطرها بُعد المركز السطحي عن المحطة. ولو مثلنا بُعد المركز عن محطة أخرى بدائرة ثانية، فسوف تتقاطع الدائرتان في نقطتين، ولا نعرف أيهما يقع المركز

السطحي فيه. ولو مثلنا بُعد محطة ثالثة بدائرة ثالثة، فعندئذ تتقاطع الدوائر الثلاث في نقطة، وتمثل هذه النقطة المركز السطحي. يوفر الفرق الزمني بين وصول الأمواج الزلزالية معلومات حول بُعد المركز السطحي. كما يستعمل علماء الزلازل المخطط الزلزالي في معرفة زمن حدوث الزلزال في البؤرة بدقة. تُسجل محطات الرصد زمن وصول أول الموجات الأولية وأول وصول الموجات الثانوية بدقة متناهية. ويستطيع العلماء قراءة الزمن الذي استغرقته هذه الأمواج من المركز السطحي إلى محطة الرصد عن طريق استخدام رسوم بيانية. فعلى سبيل المثال، إذا افترضنا إذا كان زمن وصول الموجات الأولية في تمام الساعة ١٠:٠٠ صباحاً باستعمال منحنى المسافة– زمن الوصول، يمكن استخراج قيمة المسافة التي قطعتها الأمواج الأولية في ٨ دقائق وهي ٤٥٠٠ كلم، فهذا يعني أن الزلزال قد حدث عند البؤرة في الساعة ٩:٥٢ صباحاً.




## مقياس ريختر ومقياس ميركالي

مقياس ريختر (Richter Scale) ومقياس ميركالي (Mercalli Scale) هما مقياسان مختلفان يستخدمان لقياس (Measure) ووصف (Describe) شدة (Intensity) وتأثيرات (Effects) الزلازل (Earthquakes). على الرغم من أن كلاهما يقدم معلومات عن الزلازل، إلا أنهما يخدمان أغراض مختلفة ولهما خصائص متميزة. مقياس ريختر (Richter Scale)، الذي تم تطويره بواسطة تشارلز ريختر في عام ١٩٣٥، يقيس قوة الزلزال. يقيس كمية الطاقة (Energy Released) التي يطلقها الزلزال، المعروفة باسم العزم الزلزالي (Seismic Moment) ويتم قياسه على مقياس عددي من ٠ إلى ٩ مع كل زيادة في العدد الكامل تشير إلى زيادة بمقدار عشرة أضعاف في شدة

الزلازل. يعتمد مقياس ريختر على قياسات الموجات الزلزالية التي يتم تسجيلها بواسطة أجهزة الزلازل. يحسب المقياس القوة عن طريق مراعاة قمة الموجات الزلزالية والمسافة بين مصدر الزلزال وجهاز الزلازل ولوغاريتم هذه القيم. يكون المقياس الناتج عبارة عن قيمة عددية تمثل حجم الزلزال. يخصص مقياس ريختر قيمة عددية لكمية الطاقة المنبعثة من ١ إلى ١٠، حيث تمثل كل وحدة زيادة بمقدار عشرة أضعاف في الطاقة. مقياس ميركالي (Mercalli Scale)، الذي طوره عالم الزلازل الإيطالي جوزيبي ميركالي في عام ١٩٠٢، يقيس شدة الزلزال بناءً على تأثيره الملاحظ على الناس والمباني والبيئة. على عكس مقياس ريختر الذي يقدم قياساً كمياً (Quantitative Measurement)، يعتبر مقياس ميركالي مقياساً وصفياً (Descriptive Scale) يصنف الزلازل بناءً على تأثيرها. يتألف مقياس ميركالي من سلسلة من الأرقام الرومانية (Roman Numerals) من I إلى XII، حيث يمثل كل رقم مستوى محدد من شدة الزلزال. يأخذ المقياس في الاعتبار عوامل مختلفة مثل شدة الهزة والضرر الناتج على المباني وتأثر البشر. يوفر مقياس ميركالي معلومات قيمة حول خطورة وتأثير الزلزال في المواقع المحددة، حيث يركز على التأثير الملموس والمرئي على الناس والبيئة.

| MODIFIED MERCALLI SCALE | | RICHTER SCALE | |
|---|---|---|---|
| I. | Felt by almost no one. | 2.5 | Generally not felt, but recorded on seismometers. |
| II. | Felt by very few people. | | |
| III. | Tremor noticed by many, but they often do not realize it is an earthquake. | 3.5 | Felt by many people. |
| IV. | Felt indoors by many. Feels like a truck has struck the building. | | |
| V. | Felt by nearly everyone; many people awakened. Swaying trees and poles may be observed. | | |
| VI. | Felt by all; many people run outdoors. Furniture moved, slight damage occurs. | 4.5 | Some local damage may occur. |
| VII. | Everyone runs outdoors. Poorly built structures considerably damaged; slight damage elsewhere. | | |
| VIII. | Specially designed structures damaged slightly, others collapse. | 6.0 | A destructive earthquake. |
| IX. | All buildings considerably damaged, many shift off foundations, Noticeable cracks in ground. | | |
| X. | Many structures destroyed. Ground is badly cracked. | 7.0 | A major earthquake. |
| XI. | Almost all structures fall. Very wide cracks in ground. | 8.0 and up | Great earthquakes. |
| XII. | Total destruction. Waves seen on ground surfaces, objects are tumbled and tossed. | | |

## المقاييس الزلزالية

هناك العديد من أنواع المقاييس الزلزالية (Types of Magnitudes) المستخدمة لقياس وتحديد جوانب مختلفة للزلازل. فيما يلي بعض أنواع المقاييس المستخدمة، ١) مقياس العزم (Moment

Magnitude Mw)، هو مقياس لإجمالي الطاقة التي تطلقها الزلزال. يعتبر الأكثر دقة وموثوقية للزلازل الكبيرة والمتوسطة. يأخذ في الاعتبار مساحة الصدع (Area of the Fault) التي حدث به الانزلاق، متوسط كمية الانزلاق (Average Amount of Slip)، وصلابة الصخور (Rigidity of the Rocks). ٢) مقياس الموجات السطحية (Surface Wave Magnitude Ms)، يعتمد على سعة موجات لوف (Love) وموجات رايلي (Rayleigh)، وهي الموجات الزلزالية التي تنتقل على سطح الأرض. يتم استخدامه عادةً للزلازل الإقليمية (Regional Earthquakes). ٣) مقياس الموجات الباطنية (Body Wave Magnitude Mb)، يعتمد على سعة الموجات الأولية (P-waves) والموجات الثانوية (S-waves)، وهي الموجات الزلزالية التي تنتقل داخل الأرض. يتم استخدامه عادةً للزلازل الأصغر حجماً. ٤) مقياس المدة (Duration Magnitude Md)، يأخذ في الاعتبار مدة الاهتزاز (Duration of Shaking) الناجمة عن الزلزال. يوفر تقديراً لحجم الزلزال بناءً على مدة استمرار حركة الأرض (Based on the Length of Time the Ground Motion Lasts). ٥) مقياس العزم "قوة اللحظة" (Moment Tensor Magnitude Mw or Mt)، هي قياس لقوة اللحظة الزلزالية الكاملة (Full Seismic Moment Tensor) للزلزال. يوفر معلومات حول الاتجاه (Orientation) والحركة النسبية (Relative Motion) على مستوى الصدع (on the Fault Plane).

**Types of magnitudes**

Nowadays there are different ways to determine the magnitude of an earthquake:

**Body wave magnitude ($m_b$)** depends on the amplitude of a particular P or S wave :

$$m_b = \log_{10}(A/T) + \alpha$$

where : $m_b$ - body wave magnitude

**A**- ground displacement in microns (10-6m)

**T-**period of selected( P or S) wave in seconds

$\alpha$-factor correcting the epicentral distance, focal depth, and type of wave

## Types of magnitudes

**Surface wave magnitude ($M_s$)** is a function of the observed amplitude of Rayleigh waves :

$$M_s = \log_{10} A + 1.656 \log_{10} \Delta + 1.818$$

where : $M_s$ - surface wave magnitude

**A**- Amplitude of horizontal component of 20s period Rayleigh wave

$\Delta$- Epicentral distance in degrees period of selected surface wave

Body and surface wave magnitudes are related by the relationship :

$$m_b = 0.56\, M_s + 2.9$$

## Moment magnitude

For very large earthquakes , $M_b$ and $M_s$ saturate: amplitudes cease to increase dramatically with increasing energy. It is more useful to use moment magnitude ($M_w$)

$$M_w = [(\log_{10} M_o)/1.5] - 10.73$$

where :

$$M_o = (A)(u)(\mu)$$

represents seismic moment

**A** -area of fault that ruptures during earthquake

**u** -average displacement across the fault during earthquake

$\mu$ -shear modulus (rigidity) of the rock

This equation illustrates that the larger the area of rupture(**A**) and fault displacement(**u**), the larger the earthquake.

## الطاقة الزلزالية

الطاقة التي تطلقها الزلازل (Energy of Earthquakes) يمكن أن تختلف بشكل كبير اعتماداً على قوتها. يتم تقدير طاقة الزلزال عادة باستخدام مقياس العزم، والتي تأخذ في الاعتبار مساحة الصدع التي حدث فيها الانزلاق والمقدار المتوسط للانزلاق وصلابة الصخور. إن كمية الطاقة المنبعثة من زلزال قوته سبع درجات بمقياس رختر تساوي ٣٢ مرة (تقريباً) من كمية الطاقة المنبعثة من زلزال بقوة ست درجات.

**Energy of earthquakes (E)**

The energy released by an earthquake (**E**, in units of Joules) relates to the surface wave magnitude $\mathbf{M_s}$:

$$\log_{10} E = 5.24 + 1.44\, M_s$$

or :

$$E = 10^{(5.24+1.44\, Ms)}$$

## تأثيرات الزلازل

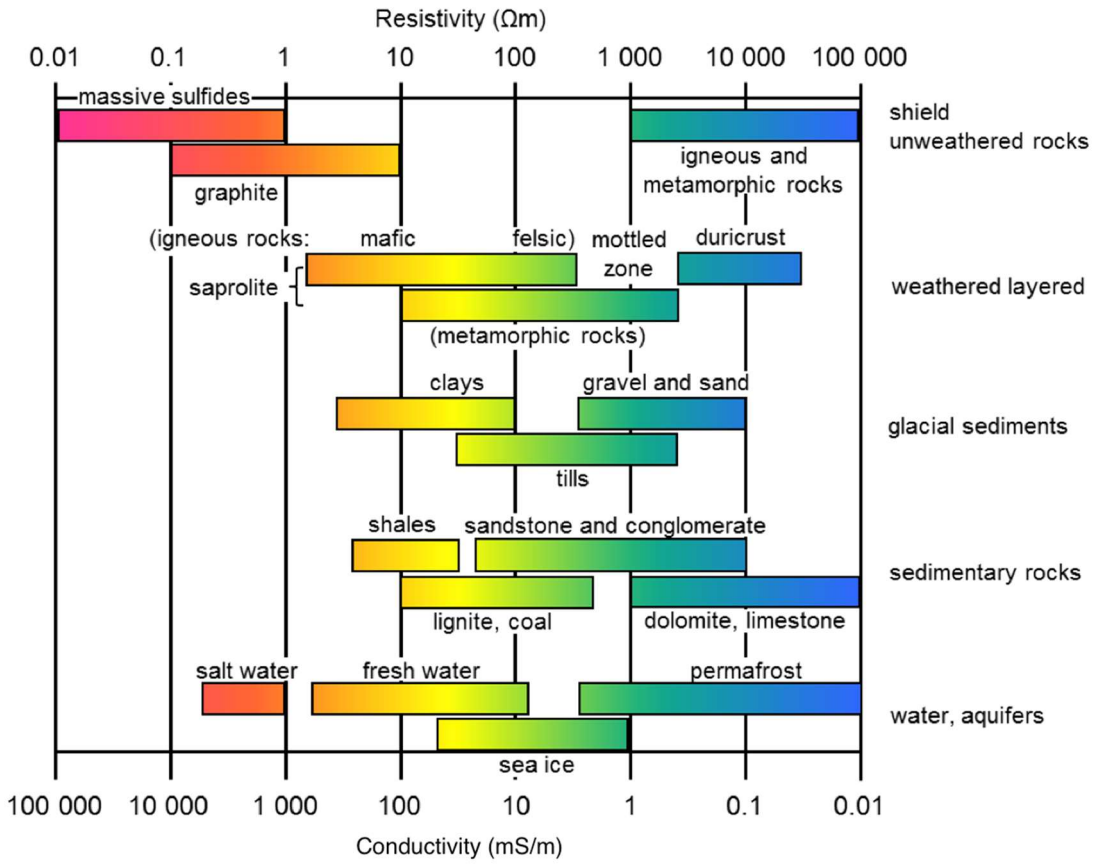
تتسبب الزلازل في مجموعة واسعة من التأثيرات، سواء على المدى القصير أو الطويل، على البيئة والبنية التحتية والبشر. ومن بين التأثيرات الرئيسية للزلازل، اهتزاز الأرض ( Ground Shaking)، التأثير الأساسي للزلزال هو اهتزاز الأرض. قوة الاهتزاز تعتمد على قوة الزلزال وقربه من المنطقة المتأثرة. يمكن أن يتسبب الاهتزاز الشديد في تلف المباني والجسور والطرقات والهياكل الأخرى. تشققات سطحية (Surface Rupture)، في بعض الحالات، يمكن للزلازل أن تتسبب في تشقق الأرض على طول خط الصدع. هذا يمكن أن يؤدي إلى ظهور شقوق وانفصال في سطح الأرض، مما يتسبب في تلف البنية التحتية. الانهيارات الأرضية (Landslides)، يمكن أن تؤدي الزلازل إلى حدوث انهيارات أرضية في المناطق الجبلية أو التلالية. يمكن أن يسبب الاهتزاز تراخي التربة والصخور، مما يؤدي إلى انزلاقها نحو الأسفل، مما يتسبب في تلف المباني وعرقلة الطرق. التسونامي (Tsunami)، يمكن للزلازل البحرية أن تولد التسونامي، وهي أمواج كبيرة في المحيط. يمكن أن تتسبب في تدمير كبير عندما تصل إلى المناطق الساحلية. تلف البنية التحتية (Damage to Infrastructure)، يمكن أن تتسبب الزلازل في تلف كبير للبنية التحتية، بما في

ذلك المباني والطرق والجسور والأنابيب والمرافق. يمكن أن يؤدي هذا التلف إلى توقف الخدمات الأساسية مثل إمدادات المياه والكهرباء وشبكات الاتصالات. الخسائر البشرية والإصابات (Casualties and Injuries)، يمكن أن تؤدي الزلازل إلى حدوث إصابات وفقدان للأرواح. تعتمد شدة التأثير على عوامل مثل كثافة السكان في المنطقة المتأثرة وجودة البنية التحتية وقدرة المجتمعات المتأثرة على الاستعداد والاستجابة. التأثير الاقتصادي (Economic Impact)، يمكن أن تكون العواقب الاقتصادية للزلازل كبيرة. تكاليف إعادة بناء البنية التحتية المتضررة وتعويض الخسائر وتوفير جهود الإغاثة والتعافي يمكن أن تكون ملحوظة وتؤثر على الاقتصادات المحلية والإقليمية على المدى الطويل. من المهم أن ملاحظة أن تأثيرات الزلازل يمكن أن تختلف اعتماداً على عوامل مثل، عمق الزلزال، المسافة عن مركز الزلزال، التضاريس المحلية، ومستوى الاستعداد والمرونة للمجتمعات المتأثرة.

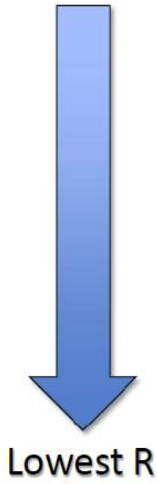
## الخصائص الكهربائية للصخور

الخصائص الكهربائية (Electrical Properties) للصخور قد تختلف بشكل واسع اعتماداً على تركيبها (Composition) ومساميتها (Porosity) ومحتوى السوائل (Fluid Content). تشمل بعض الخصائص الكهربائية الرئيسية للصخور، ١) المقاومة (Resistivity)، وهي مقياس لمدى مقاومة الصخر لتدفق التيار الكهربائي (Electrical Current). ويتم قياسها عادة بالأوم.متر (Ωm)، ويتأثر بعوامل مثل، تركيب المعادن (Mineral Content) وتشبع السوائل المسامية ( Pore Fluid Saturation) في الصخر. تشير قيم المقاومة العالية (High Resistivity) إلى توصيل كهربائي منخفض (Low Conductivity) والعكس صحيح. ٢) التوصيل (Conductivity)، هو عكس المقاومة وهو مقياس لسهولة تدفق التيار الكهربائي ( How Easily Electrical Current can Flow) في الصخر. ويعبر التوصيل عادة بالسيمنز للمتر (S/m) ويتأثر بعوامل مثل، وجود المعادن الموصلة (Presence of Conductive Minerals) وتشبع السوائل المسامية ( Saturation of Pore Fluids). ٣) الثابت الكهربائي (Dielectric Constant)، وهو مقياس لقدرة الصخر على تخزين الطاقة الكهربائية (Ability to Store Electrical Energy) في حقل كهربائي (Electric Field). ويعرف أيضاً باسم الثابت النسبي للتحمل (Relative Permittivity) ويشير عادة بالرمز εr ويتأثر بتركيب المعادن (Mineral Composition) ومحتوى الماء (Water Content) في الصخر.

٤) الاستقطاب المستحث (Induced Polarization)، وهو مقياس لقدرة الصخر على تخزين الشحنة الكهربائية (Ability of a Rock to Store Electrical Charge) عند تطبيق حقل كهربائي (Electric Field is Applied). ويتأثر بعوامل مثل، تركيب المعادن (Mineralogy) والمسامية (Porosity) ومحتوى السوائل (Fluid Content) في الصخر. يمكن استخدام هذه الخصائص الكهربائية (Electrical Properties) للمساعدة في تحديد أنواع الصخور المختلفة ( Identify Different Rock Types) ولتحديد التراكيب تحت السطحية (Subsurface Structures) مثل، حقول الهيدروكربونات (Hydrocarbon Reservoirs) أو رواسب المعادن (Mineral Deposits). ويتم استخدام طرق جيوفيزيائية مختلفة مثل، التصوير المقاوم (Resistivity Imaging) والاستقطاب المستحث (Induced Polarization) والمسح الكهرومغناطيسي ( Electromagnetic Survey) بشكل شائع لقياس هذه الخصائص.



## General Rules of Thumb For Resistivity



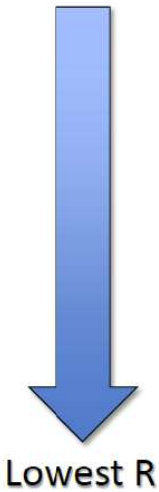

Igneous Rocks
Why? Only a minor component of pore water

Metamorphic Rocks
Why? Hydrous minerals and fabrics

Sedimentary Rocks
Why? Abundant pore space and fluids

Clay: super low resistivity

## General Rules of Thumb For Resistivity



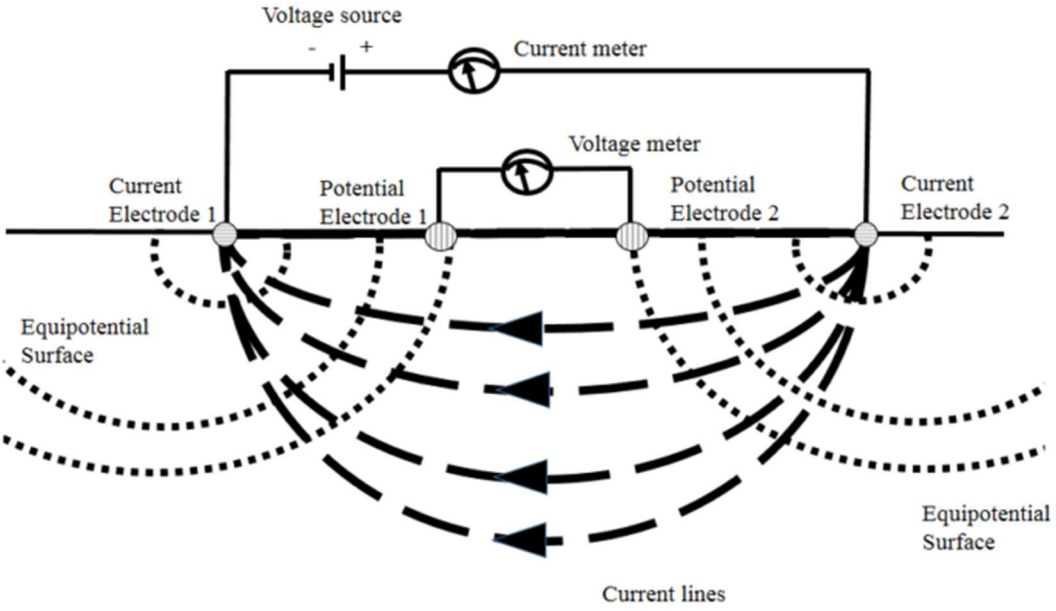

Older Rocks
Why? More time to fill in fractures and pore space

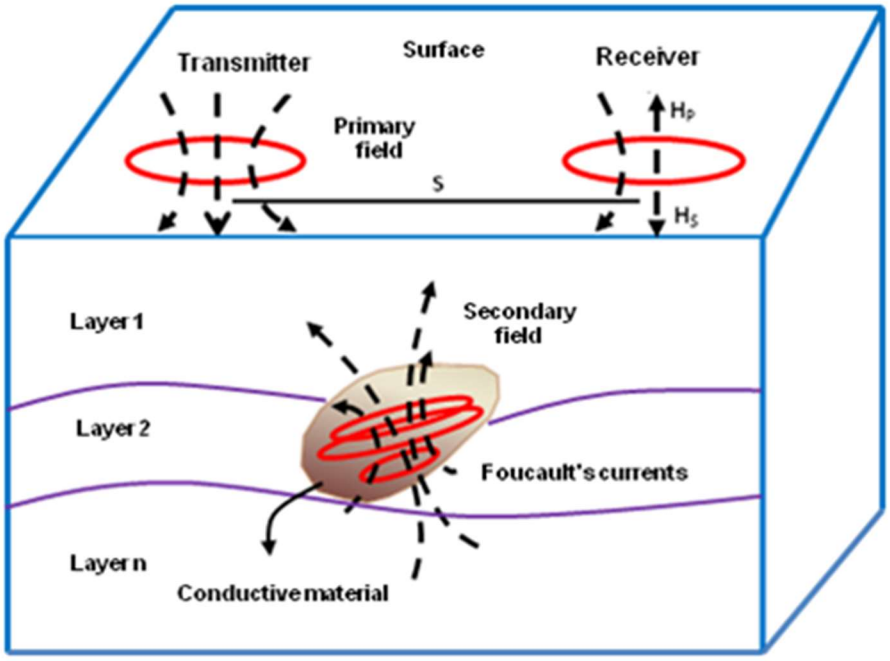
Younger Rocks
Why? Abundant fractures and/or pore space

## الطرق الكهربائية والكهرومغناطيسية

الطرق الكهربائية (Electrical) والكهرومغناطيسية (Electromagnetic) هي تقنيات جيوفيزيائية (Geophysical Techniques) تستخدم لتصوير التراكيب (Subsurface Structures) والخصائص (Properties) الداخلية للأرض. تستفيد هذه الطرق من الخصائص الكهربائية للصخور والتربة للكشف عن التغيرات (Variations) في المقاومة الداخلية (Subsurface Resistivity) والتوصيلية (Conductivity) والثابت الكهربائي (Dielectric Constant) للأرض. واحدة من أشهر الطرق الكهربائية هي تصوير المقاومة الكهربائية (Electrical Resistivity Imaging ERI) والتي تقيس المقاومة الداخلية (Resistivity of the Subsurface) للأرض باستخدام سلسلة من الأقطاب الكهربائية (Series of Electrodes). كذلك تستخدم هذه الطريقة لتحديد الخصائص الجيولوجية (Geological Features) مثل الصدوع (Faults) والكسور (Fractures) ورواسب المعادن (Mineral Deposits)، فضلاً عن تحديد موارد المياه الجوفية (Locate Groundwater Resources). تستخدم طريقة الاستقطاب المستحث (Induced Polarization IP) لتحديد قدرة الصخرة على تخزين الشحنة الكهربائية (Ability of a Rock to Store an Electrical Charge) استجابة (Response to) على حقل كهربائي مطبق (Applied Electric Field). تستخدم هذه الطريقة عادةً لتحديد رواسب المعادن (Mineral Deposits) مثل، النحاس (Copper) والذهب (Gold) والنيكل (Nickel). من ناحية أخرى، تستخدم الطرق الكهرومغناطيسية ( Electromagnetic Methods) الاختلافات (Variations) في حقول الكهرومغناطيسية (Electromagnetic Fields) لتصوير التراكيب الداخلية (Image the Subsurface) للأرض. ومن أمثلة الطرق الكهرومغناطيسية هي طريقة الرصد المغناطيسي الأرضي (Magnetotelluric MT)، التي تقيس الاختلافات في الحقول الكهرومغناطيسية الطبيعية للأرض وتستخدم لتحديد الخصائص الجيولوجية (Identify Subsurface Features) مثل الصدوع (Faults) والكسور (Fractures) وغُرف الصهارة (Magma Chambers). وتستخدم طريقة الرادار الأرضي-(Ground-Penetrating Radar GPR) كطريقة كهرومغناطيسية أخرى، حيث ترسل موجات كهرومغناطيسية عالية التردد (High-Frequency) إلى باطن الأرض وتقيس الانعكاسات (Reflections) التي ترتد (Bounce Back) إلى السطح وتستخدم لتصوير الخصائص الداخلية

للأرض مثل المرافق المدفونة (Buried Utilities) والمقتنيات الأثرية (Archaeological Artifacts) والهياكل الجيولوجية (Geological Structures). بشكل عام، تعتبر الطرق الكهربائية والكهرومغناطيسية أدوات قيمة لاستكشاف باطن الأرض، ويمكنها توفير معلومات مهمة لمجموعة واسعة من التطبيقات، من استكشاف المعادن إلى رصد البيئة وإجراء المسوحات الأثرية.



## العوامل التي تؤثر على المقاومة

يمكن أن تؤثر العديد من العوامل على المقاومة (Resistivity)، من بين هذه العوامل، التركيب (Composition)، يمكن أن يؤثر نوع (Type) وكمية المعادن (Abundance of Minerals) الموجودة في الصخر (Present in the Rock) على المقاومة. على سبيل المثال، قد تكون للصخور ذات المعادن المعدنية عالية (High Content of Metallic Minerals) مثل الكبريتيدات (Sulfides) مقاومة أقل (Lower Resistivity) من الصخور التي لا تحتوي على هذه المعادن. المسامية (Porosity)، يمكن أن تؤثر كمية (Amount) وحجم المسام (Size of Pores) أو الفراغات (Voids) داخل الصخر على المقاومة. تميل الصخور ذات المسامية العالية (High Porosity) إلى وجود مقاومة أقل (Lower Resistivity) لأن المسام (Pores) يمكن أن يمتلئ بالسوائل التي توصل الكهرباء (Conduct Electricity). محتوى الماء (Water Content)، يمكن أن يؤثر كمية الماء الموجودة في الصخر بشكل كبير على مقاومتها. يعتبر الماء موصلاً جيداً للكهرباء، لذلك فإن زيادة محتوى الماء عادة ما يؤدي إلى انخفاض المقاومة. درجة الحرارة (Temperature)، يمكن أن تؤثر درجة حرارة الصخر على المقاومة. بشكل عام، تنخفض المقاومة (Resistivity Decreases) مع زيادة درجة الحرارة (Increasing Temperature) بسبب زيادة الطاقة الحرارية ( Increased Thermal Energy) التي يمكن أن تؤدي إلى زيادة توصيلية المعادن الكهربائية ( Conductivity of Minerals to Increase). الضغط (Pressure)، يمكن أن يؤدي الضغط العالي ( High Pressure) إلى تغيير التركيب البلوري للصخور (Changes in Their Crystal Structure)، مما يمكن أن يؤثر على توصيلية المعادن الكهربائية (Electrical Conductivity) والمقاومة (Resistance). تردد القياس (Frequency of Measurement)، يمكن أن تتغير مقاومة الصخر اعتماداً على تردد الحقل الكهربائي المطبق (Applied Electrical Field). في الترددات المنخفضة (Low Frequencies)، قد تكون المقاومة تحكمها (Dominated by) توصيلية السائل المسامي (Conductivity of the Pore Fluid)، بينما في الترددات العالية (High Frequencies)، قد تكون المقاومة متأثرة أكثر (Influenced More by) بتوصيلية معادن الصخر ( Conductivity of the Rock Minerals).

## قانون آرتشي

قانون آرتشي (Archie's Law) هو عبارة عن علاقة رياضية (Mathematical Relationship) تربط بين مقاومة الصخرة الكهربائية (Electrical Resistivity R) ونسبة المسامية (Porosity φ) ونسبة الموصلية الأيونية للماء في المسام ( Electrical Conductivity of the Fluid in its Pores m)، ويمكن استخدامه لتقدير (Estimate) محتوى المياه الجوفية في الصخور ( Water Content in Rocks). يتم قياس المقاومة الكهربائية (Electrical Resistivity) باستخدام تقنيات الطرق الكهربائية، ثم يتم حساب نسبة المسامية ومعامل الأيونية. ومن خلال تطبيق قانون آرتشي، يمكن تقدير محتوى المياه الجوفية.

### Archie's Law

Porous, water-bearing rocks / sediments may be ionic conductors. Their "formation resistivity" is defined by *Archie's Law*: $\rho_t = a\rho_w\phi^{-m}s_w^{-n}$

$\phi \equiv$ porosity

$s_w \equiv$ water saturation

$a \approx 0.5 - 2.5$

$n \approx 2$ if $s_w \geq 0.3$

$m \equiv$ cementation $\approx$ 1.3 (Tertiary) – 2.0 (Palaeozoic)

– Archie's law is an empirical model

## طرق المسح الكهربائي الأرضي

١) طريقة Schlumberger Arrangement والتي تعتبر من أساليب القياس الكهربائي الرأسي (Vertical Electrical Sounding VES) والتي تنطوي على وضع أربعة أقطاب ( Four Electrodes) في خط مستقيم (Straight Line)، حيث تعمل الأقطاب الخارجية ( Outer Electrodes) كأقطاب التيار (Current Electrodes) والأقطاب الداخلية (Inner Electrodes) كأقطاب الجهد (Potential Electrodes). يتم زيادة المسافة بين الأقطاب تدريجياً لقياس المقاومة الكهربائية (Electrical Resistivity) في أعماق مختلفة (Different Depths). تستخدم هذه الطريقة عادة لاستكشاف الطبقات الجوفية العميقة (Deep Subsurface Exploration) ويمكن أن توفر معلومات مفصلة حول مقاومة الطبقات المختلفة (Resistivity of Different Layers).

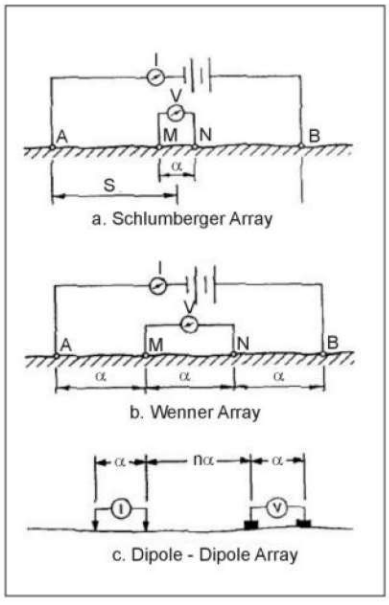
٢) طريقة Wenner Arrangement يتم فيها وضع أربعة أقطاب بمسافات متساوية ( Four

(Equally Spaced Electrodes) في خط مستقيم (Straight Line)، حيث توضع أقطاب التيار (Current Electrodes) في الأطراف الخارجية (Outer Ends) وتوضع أقطاب الجهد (Potential Electrodes) في المنتصف (Middle). يمكن قياس مقاومة تكوينات الطبقات الجوفية في أعماق مختلفة عن طريق تغيير مسافة الأقطاب (Varying the Electrode Spacing). تستخدم هذه الطريقة عادة لاستكشاف الطبقات الباطنية الضحلة (Shallow Subsurface) ويمكن أن توفر بيانات عالية الدقة. ٣) طريقة Dipole-Dipole Array تنطوي على وضع زوجين من الأقطاب (Two Pairs of Electrodes) في خط مستقيم (Straight Line)، حيث توضع أقطاب التيار (Current Electrodes) في الأطراف الخارجية (Outer Ends) وأقطاب الجهد (Potential Electrodes) في الأطراف الداخلية (Inner Ends). توفر هذه الطريقة تصوير مفصل للتراكيب الجوفية (Subsurface Structures)، مثل الكسور (Fractures) والصدوع (Faults) وترسبات المعادن (Mineral Deposits)، من خلال تغيير المسافة بين أقطاب (Electrodes) التيار (Current) والجهد (Potential). يعتمد الاختيار بين هذه الطرق على الأهداف المحددة للدراسة والظروف المحيطة. تُستخدم طريقة Schlumberger عادة لاستكشاف الطبقات الجوفية العميقة، في حين تُستخدم طريقة Wenner لاستكشاف الطبقات الجوفية السطحية ويمكن أن يوفر بيانات عالية الدقة. تُستخدم طريقة Dipole-Dipole عادة لتصوير التراكيب الجوفية ويمكن أن يوفر بيانات عالية الدقة.

**1- Schlumberger Arrangement:**
This array is the most widely used in the electrical prospecting. Four electrodes are placed along a straight line in the same order.

**2- Wenner Arrangement:**
The four electrodes A , M , N , B are equally spaced along a straight line.

**3- Dipole – Dipole Array:**
The distance between the current electrode A and B (current dipole) and the distance between the potential electrodes M and N (measuring dipole) are significantly smaller than the distance , between the centers of the two dipoles.

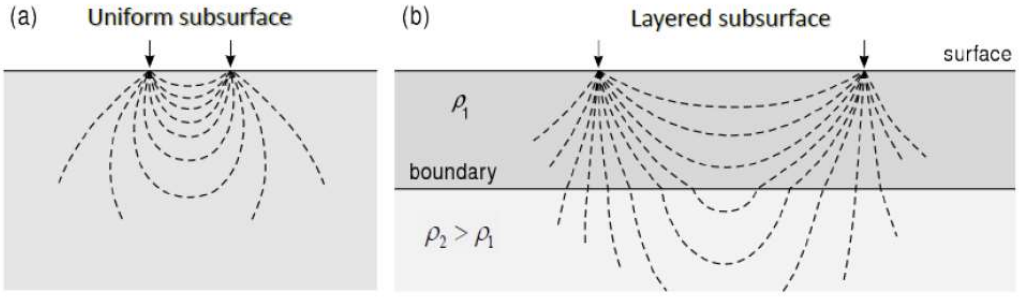


## انكسار التيار

انكسار التيار (Current Refraction) طريقة تُستخدم لتحديد عمق (Depth) وسمك (Thickness) الطبقات الجوفية (Subsurface Layers) عن طريق قياس (Measuring) زاوية الانكسار (Angle of Refraction) لتيار كهربائي (Electrical Current) يمر عبر مواد مختلفة تتميز بمقاومية متغيرة (Varying Resistivity). تعد هذه الطريقة مفيدة بشكل خاص في رسم الحدود (Mapping the Boundaries) بين طبقات الصخور المختلفة، وتحديد (Identifying) وجود التراكيب الجوفية مثل الصدوع (Faults) والكسور (Fractures). يتم وضع قطبين ( Two Electrodes) على السطح ويتم تمرير تيار كهربائي مباشر (Direct Current DC) عبر الأرض بينهما. يتبع التيار مسار المقاومة الأقل (Least Resistance)، والذي يتأثر بمقاومية (Resistivity) المواد التي يمر بها. عندما يصل التيار إلى حدود بين مواد ذات مقاوميات مختلفة، يتم انكسار (Refracted) جزء من التيار (Some of the Current)، مما يتسبب في تغير اتجاه تدفق التيار (Causing a Change in the Direction of the Current Flow). من خلال قياس زاوية الانكسار (Angle of Refraction)، يمكن حساب عمق وسمك الطبقات المختلفة. تعتمد دقة هذه المسوحات على عدة عوامل بما في ذلك، مسافة القطبين عن بعضهما (Electrode Spacing)، وقوة التيار (Current Strength)، والظروف الجيولوجية (Geologic Conditions) للطبقات الجوفية. بشكل عام، تكون الطريقة أكثر فعالية في المناطق التي تتميز بفروقات كبيرة في مقاومية (Significant Differences in the Resistivity) طبقات الأرض الداخلية، وحيث تكون الطبقات أفقية (Relatively Horizontal) ومستمرة (Continuous) نسبياً. يمكن أن تكون الطريقة أقل فعالية في المناطق التي تحتوي على تراكيب جوفية غير منتظمة بشكل كبير ( Highly Irregular Subsurface Structures) أو حيث تكون الطبقات ملتوية (Folded) أو متصدعة (Faulted) بشكل كبير.

## Current Refraction

- Because refraction changes the distribution of current in a layered subsurface
  - The ratio of V/I changes
  - We can therefore measure changes in resistivity with depth




## الاستطلاع الكهربائي الرأسي والتمثيل الكهربائي عالي الدقة

الاستطلاع الكهربائي الرأسي (Vertical Electrical Sounding VES) والتمثيل الكهربائي عالي الدقة (High-Resolution Electrical Profiling HEP) تستخدمان لاستكشاف (Exploration) ورسم خرائط (Mapping) الأرضية الجوفية (Subsurface). الاستطلاع الكهربائي الرأسي (VES)، تستخدم لتحديد عمق (Depth) وسمك (Thickness) الطبقات الجوفية عن طريق قياس مقاومة المواد (Measuring the Resistivity). يتم تمرير تيار كهربائي مباشر ( Direct Electrical Current) عبر الأرض باستخدام قطبين (Two Electrodes)، ويتم قياس الجهد (Voltage) بين قطبين آخرين يتم وضعهما على بعد متغير (Varying Distances) من القطبين الأولين. من خلال تحليل التغيرات في الجهد (Analyzing the Changes in Voltage)، يمكن تحديد (Determined) مقاومة الطبقات المختلفة (Resistivity of Different Layers) وحساب عمق وسمك هذه الطبقات. تستخدم هذه الطريقة عادة في استكشاف المياه الجوفية ( Groundwater Exploration) واستكشاف المعادن (Mineral Exploration) والدراسات البيئية (Environmental Studies). التمثيل الكهربائي عالي الدقة (HEP) هي طريقة تستخدم لرسم التغيرات الجانبية (Lateral Variations) في توصيلية (Electrical Conductivity) الأرضية الجوفية.

يتم وضع سلسلة من القطبين (Series of Electrodes) على طول خط المسح (Along a Survey Line) ويتم تمرير تيار كهربائي عبر الأرض بين القطبين. يتم قياس الجهد (Voltage) في كل قطب، ومن خلال تحليل التغيرات في الجهد (Analyzing the Changes in Voltage)، يمكن تحديد توصيلية (Electrical Conductivity) الطبقات الجوفية. تستخدم هذه الطريقة عادة في الدراسات البيئية (Environmental) والهندسية (Engineering). تعتبر كلا الطريقتين (VES and HEP) من الطرق الجيوفيزيائية التي توفر معلومات قيمة حول الظروف الجوفية. ومع ذلك، فإن الاستطلاع الكهربائي الرأسي (VES) عموماً أكثر مناسبة لتحديد عمق وسمك الطبقات الجوفية.

## Survey Design

Two categories of field techniques exist for conventional resistivity analysis of the subsurface:

**1- Vertical Electric Sounding (VES):** The object of (VES )is to deduce the variation of resistivity with depth below a given point on the ground surface and to correlate it with the available geological information in order to infer the depths and resistivities of the layers present.

**2- Horizontal Electrical Profiling (HEP):** The object of (HEP) is to detect lateral variations in the resistivity of the ground, such as lithological changes & near- surface faults.

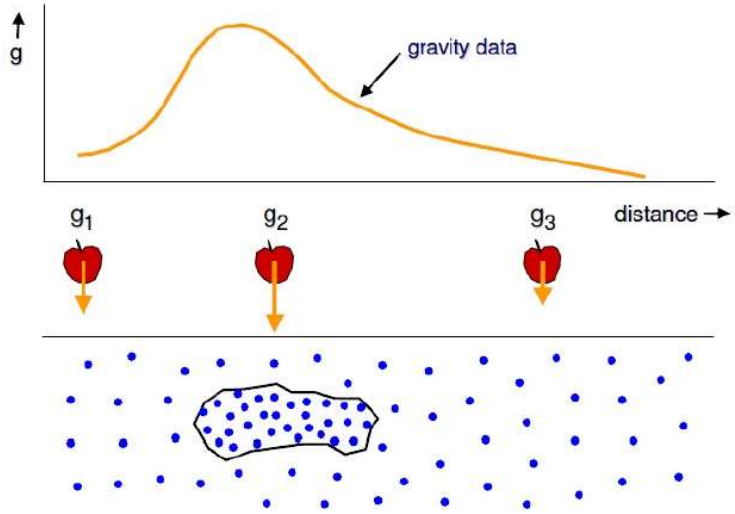
## طريقة الجاذبية

طريقة الجاذبية (Gravity Method)، تُعرف أيضاً برصد الجاذبية (Gravity Surveying) أو رسم الجاذبية (Gravity Mapping)، هي تقنية جيوفيزيائية تُستخدم لقياس (Measure) الحقل الجاذبي للأرض (Gravitational Field of the Earth). تعتمد على مبدأ أن التغيرات (Variations) في توزيع الكثافة (Density Distribution) في الطبقات الأرضية تسبب تغيرات صغيرة (Small Variations) في التسارع الجاذبي (Gravitational Acceleration) عند سطح الأرض. المبدأ الأساسي لطريقة الجاذبية هو أن المناطق ذات كثافة أعلى (Higher Density)، مثل الصخور

أو رواسب المعادن، تمارس جاذبية أقوى قليلاً (Slightly Stronger Gravitational) من المناطق ذات كثافة أقل (Lower Density). من خلال قياس هذه التغيرات الجاذبية ( Gravitational Variations)، يمكن استنتاج معلومات حول الجيولوجيا الداخلية (Subsurface Geology) والقيام بتفسيرات (Interpretations) حول توزيع (Distribution) التراكيب الجيولوجية ( Geological Structures) والموارد (Resources). بعض التطبيقات (Applications) الرئيسية لطريقة الجاذبية، استكشاف المعادن (Mineral Exploration)، تُستخدم الدراسات التي تعتمد على الجاذبية بشكل شائع في استكشاف المعادن لتحديد وتوصيف رواسب المعادن. تختلف المعادن في كثافتها، ويمكن للانحرافات في الجاذبية (Gravity Anomalies) أن تشير إلى وجود رواسب معدنية كثيفة مثل الذهب أو الحديد أو النحاس. من خلال رسم هذه الانحرافات، يمكن تحديد حجم وشكل وعمق رواسب المعادن. استكشاف النفط والغاز (Oil and Gas Exploration)، تلعب الدراسات التي تعتمد على الجاذبية دوراً في استكشاف الهيدروكربونات أيضاً. غالباً ما يظهر الحوض الرسوبي (Sedimentary Basins) الذي يحتوي على رواسب النفط والغاز انحرافات في الجاذبية بسبب التغيرات في كثافة الصخور. تساعد بيانات الجاذبية في تحديد التكوين التركيبي للحوض وتقييم جاذبية المنطقة بشكل عام. الخرائط الجيولوجية (Geologic Mapping)، تُساهم دراسات الجاذبية في رسم وفهم الجيولوجيا الداخلية. تساعد في تحديد أنواع الصخور المختلفة والملامح التركيبية مثل الصدوع والطيات والإطار الجيولوجي العام للمنطقة. يمكن توحيد بيانات الجاذبية مع أساليب جيوفيزيائية أخرى مثل الدراسات الزلزالية للحصول على صورة شاملة عن البنية الداخلية للأرض. الاستكشاف الهندسي والتحقيقات الجيوتقنية ( Engineering and Geotechnical Investigations)، تُفيد قياسات الجاذبية في المشاريع الهندسية، خاصة في تقييم استقرار المنشآت تحت الأرض مثل الأنفاق والسدود. التغيرات في الجاذبية يمكن أن تشير إلى التغيرات في كثافة الصخور، والتي قد تؤثر على استقرار مواقع البناء أو تشير إلى فراغات داخلية محتملة تحت السطح. رصد البراكين (Volcano Monitoring)، يتم استخدام مراقبة الجاذبية لدراسة النشاط البركاني وتقييم المخاطر المحتملة. يمكن أن تشير التغيرات في الجاذبية إلى حركة الصهارة تحت البركان، مما يساعد على مراقبة التوتر البركاني وتوقع الانفجارات. توفر الدراسات الطويلة الأجل للجاذبية بيانات قيمة لفهم العمليات البركانية. الدراسات البيئية

(Environmental Studies)، يمكن لدراسات الجاذبية أن تساهم في الدراسات البيئية، مثل استكشاف وإدارة المياه الجوفية. يمكن أن تشير التغيرات في الجاذبية إلى تجمعات المياه تحت الأرض، وهو أمر هام لفهم أنظمة الأحواض الجوفية (Subsurface Water Accumulations) وتحسين إدارة موارد المياه (Water Resource Management).

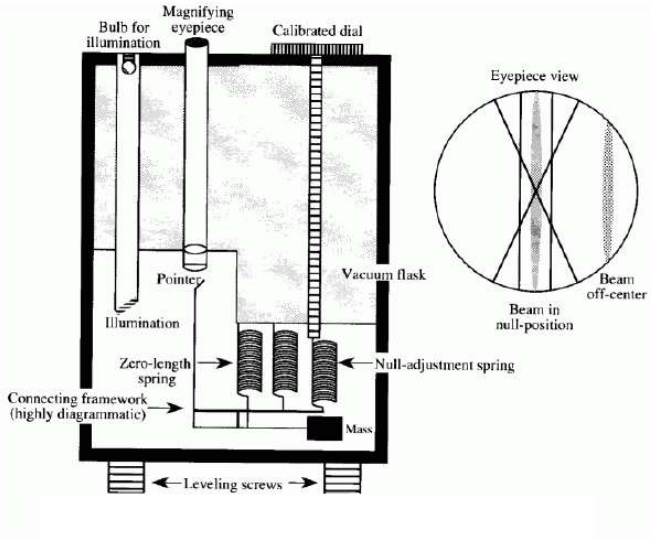
The success of the gravity method depends on the different earth materials having different bulk densities (mass) that produce variations in the measured gravitational field.




## مقياس الجاذبية

مقياس ووردين للجاذبية (Worden Gravimeter) هو نوع من الأدوات المستخدمة لقياس (Measure) وتحديد (Quantify) تغيرات الجاذبية (Gravity Variations). يعمل مقياس الجاذبية على أساس مبدأ (Based on) سقوط الكتلة الحرة (Principle of a Free-Falling Mass). مقياس الجاذبية يعتبر أداة محمولة وبسيطة نسبياً، مما يجعلها مناسبة للعمل الميداني. ويشيع استخدامه في المسوحات الجيوفيزيائية والتنقيب عن المعادن والمشاريع الهندسية التي تتطلب قياسات دقيقة للجاذبية. يمكن استخدام بيانات الجاذبية المجمعة لإنشاء خرائط الجاذبية، وتحديد التراكيب الجيولوجية، والمساعدة في تفسير المعالم تحت السطحية.

# Worden Gravimeter

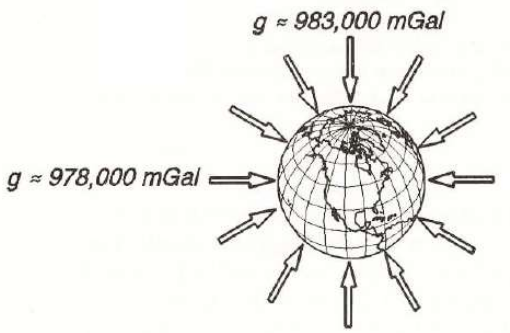



## قانون الجذب الجاذبي والتسارع الجاذبي

الجاذبية (Gravity) هي قوة أساسية في الطبيعة تجذب الأجسام (Attracts Objects) ذات الكتلة (With Mass) نحو بعضها البعض (Towards Each Other). وهي المسؤولة عن ظاهرة الوزن (Weight) وحركة الأجرام السماوية (Motion of Celestial Bodies). قانون الجذب الجاذبي لنيوتن (Newton's Law of Gravitational Attraction)، الذي صاغه إسحاق نيوتن في أواخر القرن السابع عشر، ينص على أن كل جسيم من المادة في الكون يجذب كل جسيم آخر بقوة متناسبة مباشرة بضرب الكتلتين وعكسيا بمربع المسافة بينهما. يشرح هذا القانون لماذا تسقط الأجسام إلى الأرض، وتدور الكواكب حول الشمس، وتدور القمر حول الأرض. التسارع الجاذبي (Gravitational Acceleration)، يشير إلى التسارع الذي يتعرض له جسم نتيجة للقوة الجاذبية. قرب سطح الأرض، التسارع الجاذبي يكون حوالي ٩٫٨ متر في الثانية المربعة. هذا يعني أن جسماً في حالة سقوط حر قرب سطح الأرض سيتسارع بمعدل ٩٫٨ م لكل ثانية مربعة نحو الأرض. يجب ملاحظة أن قيمة التسارع الجاذبي يمكن أن تختلف اعتمادًا على المسافة عن الجسم السماوي وكتلة الجسم نفسه. على سبيل المثال، التسارع الجاذبي على القمر يكون حوالي سدس قيمته على الأرض.

# Gravity

- A force of attraction between all objects with mass (which pulls us down on to earth).
- Strength and direction of field depend on position of observation within the field.
- For gravity field, lines of are directed toward the center of the earth.

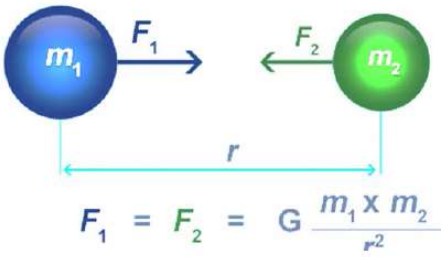



Gravity is the attraction of one body due to mass of another body given by **Newton's Law of gravitational attraction:**

$F = G\, m_1 m_2 / r^2$

F = force of attraction.
G = universal gravitational constant ($6.67 \times 10^{-11}\ Nm^2/kg^2$)
$m_1$ $m_2$ = mass of 2 objects
r = distance between the centers of mass

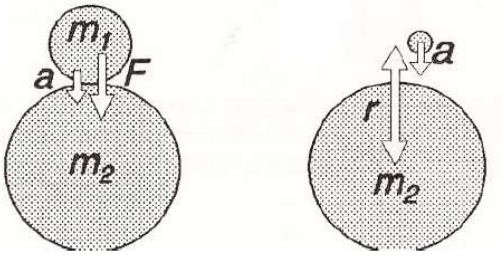
Note the units: F – Newton, m1 and m2 – kg, r -- meters



## Gravitational Acceleration:

Is given by Newton's second law of motion:

$F = m_1 a$




Solving for acceleration

$a = F/m_1$

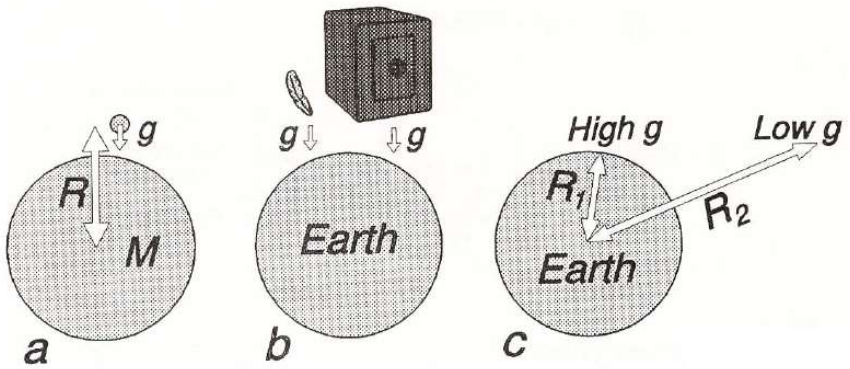
Because $F=G*m_1*m_2/R^2$

we have: $a=Gm_2/R^2$

For the Earth, use g for gravity acceleration, M for its mass, we have:

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

- Mass of earth and radius determines the gravitational acceleration of objects at and on the surface of the earth = $9.83 m/s^2$
- Acceleration (g) is the same regardless of the mass of the object.
- Objects at Earth's surface have greater acceleration than objects some distance away.



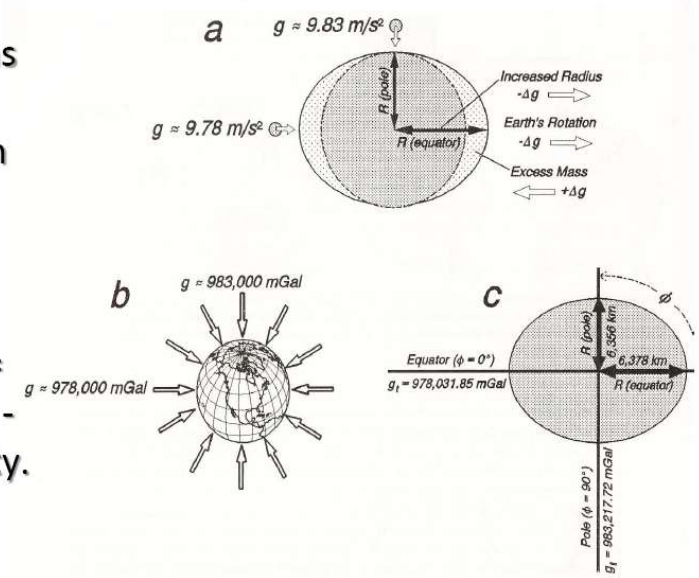
## التباينات في الجاذبية

تشير تباينات الجاذبية (Gravity Anomalies) إلى الاختلافات (Variations) في مجال الجاذبية الأرضية (Earth's Gravitational Field) عما يمكن توقعه (Expected) بناءً على التوزيع الموحد للكتلة (Based on a Uniform Distribution of Mass). يمكن أن تحدث هذه الاختلافات بسبب الاختلافات في كثافة المواد وتوزيعها داخل الأرض. غالباً ما يتم التعبير عن القياسات من حيث المللي جال (mGal)، وهي وحدة التسارع. تشير تباينات الجاذبية الإيجابية (Positive Gravity Anomalies) إلى المناطق التي يكون فيها تسارع الجاذبية أقوى (Stronger) من المتوقع، بينما تشير شذوذات الجاذبية السلبية (Negative Gravity) إلى المناطق التي يكون فيها تسارع الجاذبية أضعف (Weaker) من المتوقع. يمكن أن يكون لتباينات الجاذبية أسباب مختلفة، بما في ذلك الاختلافات في كثافة الصخور والمعادن، والتراكيب الجيولوجية تحت السطح، ووجود سمات تحت السطحية مثل الجبال والوديان والتجاويف. يمكن أن توفر معلومات قيمة حول الجيولوجيا تحت السطح وتساعد في رسم الخرائط الجيولوجية واستكشاف المعادن وفهم العمليات التكتونية. تُستخدم تباينات الجاذبية في الجيوفيزياء والجيوديسيا لإنشاء خرائط الجاذبية، والتي تعرض التوزيع المكاني للجاذبية عبر منطقة ما أو الأرض بأكملها. يمكن لهذه الخرائط أن تكشف عن سمات جيولوجية مهمة، مثل الصدوع، والهياكل المدفونة، والتغيرات في سمك القشرة الأرضية.

# Gravity Anomalies

Gravity observations can be used to interpret changes in subsurface mass distribution.

Gravity anomalies = observed gravity - theoretical gravity.

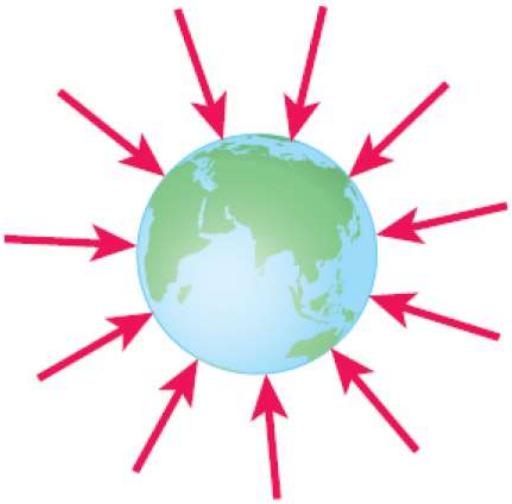


## العوامل التي تؤثر على الجاذبية

هناك عدة عوامل تؤثر في حقل الجاذبية منها، التوزيع الجغرافي للمادة، يؤثر التوزيع الجغرافي للمادة في الجاذبية، حيث يوجد تركيز أكبر للكتلة في بعض المناطق مقارنة بالمناطق الأخرى. على سبيل المثال، تكون الجبال والسهول والوديان والبحيرات والمحيطات والقارات جميعها عوامل تؤثر في توزيع الكتلة وبالتالي في حقل الجاذبية. الكثافة، يتأثر حقل الجاذبية أيضاً بكثافة المواد الموجودة في المنطقة. المادة ذات الكثافة العالية ستسبب انحناءاً أكبر في حقل الجاذبية، بينما المواد ذات الكثافة المنخفضة ستسبب انحناءاً أقل. التغيرات في الكتلة الصخرية، التغيرات في كتلة الصخور والمعادن في القشرة الأرضية يمكن أن تؤثر على حقل الجاذبية. على سبيل المثال، وجود تكوينات صخرية ثقيلة مثل الجبال أو الحفر الصخرية يمكن أن يسبب انحناءاً أكبر في حقل الجاذبية في تلك المنطقة. التركيب الجيولوجي، التركيب الجيولوجي للمنطقة يمكن أن يؤثر أيضاً في حقل الجاذبية. وجود تراكيب جيولوجية مثل الشقوق والطيات والانكسارات يمكن أن يؤدي إلى تغيرات في توزيع الكتلة وبالتالي في حقل الجاذبية. الارتفاع الجغرافي، الارتفاع الجغرافي للمنطقة يمكن أن يؤثر في قيمة الجاذبية. على سبيل المثال، تتأثر الجاذبية باتجاه الأعلى كلما زاد ارتفاع المنطقة عن سطح الأرض.

**Three factors determining the "normal" gravity field:**

1. Latitudinal variation of earth's radius.
2. Latitudinal change in the linear velocity of earth's rotation.
3. The rocks in the "bulged" layer increases attraction.



## The (1967) International reference gravity formula:

$$g_t = g_e(1 + 0.005278895\sin^2\phi + 0.0002346\sin^4\phi)$$
$$g_e = 978{,}031.85 mGal$$

**Note:**

Φ is latitude in degrees.

1 mGal = 0.001 Gal = 0.00001 m/s/s

Gal is from Galileo, a famous Italian

The main purpose of obtaining gravity anomalies is to detect changes in the density of underground rocks.

## Theoretical gravity has three main components:

1) Change of gravity as a function of latitude (increasing toward the poles):

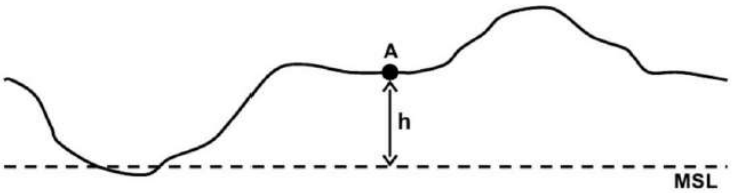
$$g_t = g_e(1 + 0.005278895\sin^2\phi + 0.0002346\sin^4\phi)$$
$$g_e = 978{,}031.85 mGal$$

2) The measuring point is not exactly at zero elevation (sea-level). For instance, if the point is above sea-level, the measured gravity is smaller than the actual value, and therefore a certain among of gravity should be added to the observed value. This correction is called **"Free-Air Correction".**

**Free-air correction**

**To compensate the height of gravity stations above sea-level (level of reference)**

$$g_{FA} = -0.3086 \times h$$

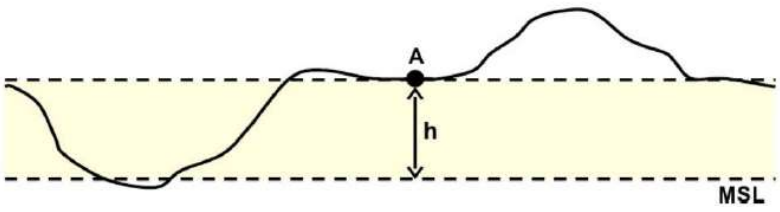



3) For positive elevation, there is a rock layer between the measuring point and sea-level, and this rock layer causes excessive gravity that should be removed from the observed value. For negative elevation (that is, the measuring point is below the sea-level), a certain amount of gravity should be added to the observed value. This correction is called **"Bouguer Correction".**

**Bouguer correction**

**To compensate the rock mass between sea-level to station's elevation (level of reference).**

$$g_B = +0.04193 \times \rho \times h$$ ← Bouguer slab formula



## الطريقة المغناطيسية

تعتبر الطريقة المغناطيسية (Magnetic Method) تقنية استكشاف جيوفيزيائية تستخدم لاستكشاف الطبقات الجوفية من خلال قياس التغيرات (Variations) في حقل الجاذبية المغناطيسية للأرض (Earth's Magnetic Field). تعتمد هذه الطريقة على حقيقة أن الصخور والمعادن لها خصائص مغناطيسية مختلفة (Different Magnetic Properties)، ويمكن كشف (Detected) ورسم (Mapped) هذه التغيرات. يستند مفهوم الطريقة المغناطيسية إلى مبدأ أن بعض الصخور والمعادن تحتوي على معادن مغناطيسية مثل المغنتيت (Magnetite) أو الهيماتيت (Hematite)، والتي تظهر خصائص مغناطيسية. عند تعرض هذه الصخور لحقل الجاذبية المغناطيسية للأرض، تصبح ممغنطة (Magnetized) في اتجاه الحقل ( in the Direction of the Field). ومع ذلك، يمكن تعديل (Altered) أو تشويه (Distorted) الممغنطة بواسطة العمليات الجيولوجية مثل الطي (Folding) والتصدع (Faulting) أو وجود رواسب معدنية ( Presence of Mineral Deposits). تُستخدم الطريقة المغناطيسية في استكشاف المعادن والدراسات الأثرية ورسم الخرائط الجيولوجية. إنها مفيدة بشكل خاص في تحديد وتحديد رواسب خام الحديد، وكذلك المعادن المعدنية الأخرى المرتبطة بتباينات المغناطيسية.

## *Magnetic prospecting*

- **Magnetic prospecting is used to explore for both oil and minerals.**

- **It gives information to determine depth to basement rocks, locate and define the extent of sedimentary basins. This information is of importance in previously unexplored areas such as continental shelves newly opened for prospecting.**

- **Sedimentary rocks exert a very small magnetic effect compared to igneous rocks.**

- **Virtually all variations in magnetic intensity result from topographical or lithlogic changes associated with the basement or from igneous intrusive.**
- **Today, all magnetic surveys are done from air or from ships due to speed, economy and convenience.**

## مغنطة الصخور

مغنطة الصخور (Magnetization of rocks) تشير إلى العملية التي يكتسب فيها الصخور مجالاً مغناطيسياً أو يحتفظ به. تحتوي بعض المعادن الموجودة في الصخور، مثل المغنتيت أو الهيماتيت، على خصائص مغناطيسية. عند تعرض هذه المعادن لمجال مغناطيسي خارجي، تتمَّ مغنطة الصخور (Magnetized) في اتجاه المجال (Direction of the Field). تحدث مغنطة الصخور عن طريق آليات مختلفة منها، المغنطة المتبقية (Remanent Magnetization)، تكتسب الصخور هذا النوع من المغنطة عندما تبرد الصخور تحت درجة حرارة كُورِى المغْنطيسية (Curie Temperature) في وجود مجال مغناطيسي. تتحدَّد المعادن المغناطيسية في الصخور في اتجاه مجال الأرض المغناطيسي أثناء التبريد وتحتفظ بهذه المغنطة حتى بعد إزالة المجال الخارجي. توفر المغنطة المتبقية معلومات قيمة عن مجال الأرض المغناطيسي في وقت تشكُّل الصخور، وتستخدم في دراسات المغناطيسية القديمة (Paleomagnetic) لدراسة حركة الألواح التكتونية وإعادة بناء الأحداث الجيولوجية السابقة. المغنطة المستحثة (Induced Magnetization)، تحدث عندما تتعرض الصخور لمجال مغناطيسي خارجي، مثل مجال الأرض المغناطيسي. تتوجَّه المعادن المغناطيسية في الصخور في اتجاه المجال، مما يؤدي إلى حدوث مغنطة مستحثة. هذه المغنطة مؤقتة (Temporary) وتختفي عند إزالة المجال الخارجي. المغنطة الترسبية (Detrital Magnetization)، تكتسب الصخور الرسوبية هذا النوع من المغنطة عندما يتم ترسب جسيمات مغناطيسية، مثل المغنتيت أو الهيماتيت، مع الرواسب. تتحدَّد هذه الجسيمات في الصخور في اتجاه مجال الأرض المغناطيسي أثناء الترسُّب، مما يؤدي إلى حدوث مغنطة ترسبية. من المهم ملاحظة أن مغنطة الصخور يمكن أن تتأثَّر أو تتغير بواسطة العمليات الجيولوجية. يمكن أن تؤثِّر الحركات التكتونية والتسخين والتعرُّض للعوامل الجوية والتغيُّرات الكيميائية في المغنطة الأصلية للصخور. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تتعرَّض الصخور لفقدان جزئي أو كامل للمغنطة نتيجة للعمليات الحرارية أو الكيميائية.

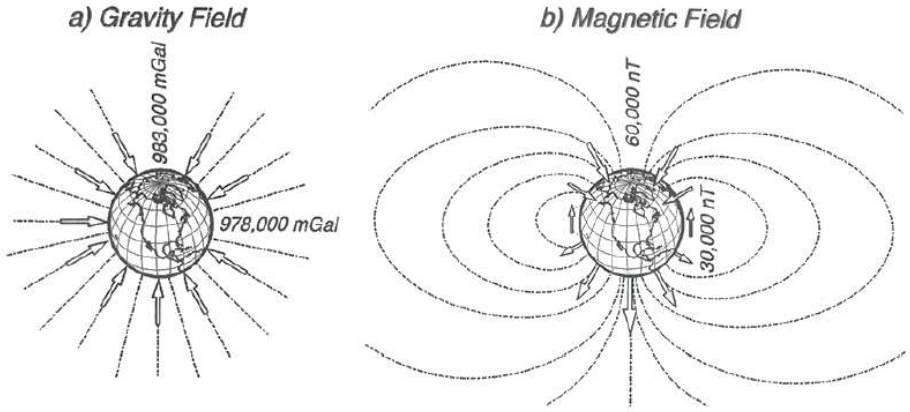
## Magnetization of rocks

**Magnetic rocks have almost always acquired their polarization from the earth's field.**

**If the rock is igneous, its direction of magnetization will be that of the earth's field at the time it cooled from its initial molten state to a temperature below the Curie point. This is called thermo remnant magnetization.**

**If the rock is sedimentary, any orientation of its magnetic grains during deposition would have been in alignment with the field that existed when the deposition occurred. This is depositional remnant magnetization.**

Relative to the Earth's gravity field, the magnetic field changes rapidly in both magnitude and direction. Horizontal near the equator, vertical near the poles. The strength at the poles is about twice as that at the equator.

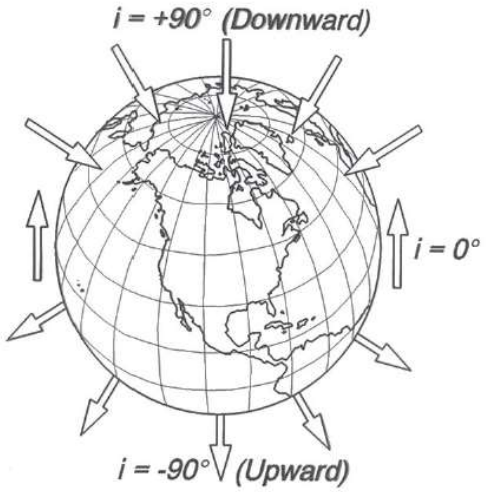


## الميل المغناطيسي والانحراف المغناطيسي

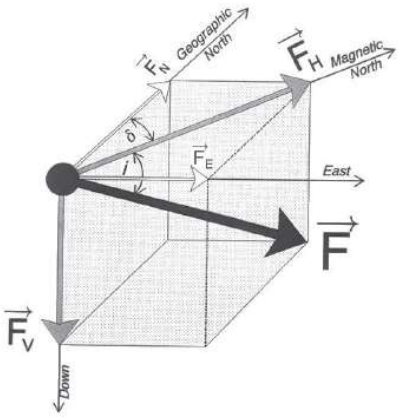
الميل المغناطيسي (Magnetic Inclination) يشير إلى الزاوية (Angle) بين خطوط المجال المغناطيسي للأرض (Earth's Magnetic Field Lines) والمستوى الأفقي (Horizontal Plane) في موقع محدد (Specific Location). يمثل إمالة (Tilt) المجال المغناطيسي بالنسبة لسطح الأرض. الميل المغناطيسي يتغير اعتماداً على خط العرض (Latitude) في الموقع. في خط الاستواء المغناطيسي، تكون خطوط المجال المغناطيسي متوازية (Parallel) لسطح الأرض، مما يؤدي إلى إمالة (Inclination) بزاوية قدرها صفر. كلما اقتربت من القطبين المغناطيسيين، زادت الإمالة حتى تصل إلى قيمته القصوى وهي ٩٠ درجة عند القطبين المغناطيسيين. في نصف الكرة الشمالي (Northern Hemisphere)، يشير طرف البوصلة المغناطيسية الشمالية ( Magnetic Compass Needle) نحو الأسفل بسبب الميل، في حين في نصف الكرة الجنوبي ( Southern Hemisphere)، يشير طرف البوصلة المغناطيسية الشمالية نحو الأعلى. زاوية الميل مهمة في الملاحة (Navigation) ودراسات حقل المجال المغناطيسي (Magnetic Field Studies)، حيث توفر معلومات حول مجال المجال المغناطيسي للأرض وتساعد في تحديد موقع القطبين المغناطيسيين. الانحراف المغناطيسي (Magnetic Declination)، المعروف أيضاً بالتغير المغناطيسي (Magnetic Variation)، يشير إلى الزاوية بين اتجاه الشمال الحقيقي (True North) والشمال المغناطيسي (Magnetic North) في موقع محدد. الشمال المغناطيسي هو الاتجاه الذي يشير إليه إبرة البوصلة المغناطيسية، في حين الشمال الحقيقي هو الاتجاه نحو القطب الشمالي الجغرافي (Geographic North Pole). حقل الأرض المغناطيسي (Earth's Magnetic Field) ليس متوازياً (Not Aligned) مع المحور الجغرافي (Geographic Axis)، مما يتسبب في انحراف القطب المغناطيسي عن القطب الحقيقي. هذا الانحراف، الممثل بالانحراف المغناطيسي، يتغير اعتماداً على الموقع على سطح الأرض. يمكن أن يكون الانحراف المغناطيسي إلى الشرق أو الغرب، مشيراً إلى ما إذا كان الشمال المغناطيسي هو شمال الشرق أو الغرب من الشمال الحقيقي. يتم قياس الانحراف المغناطيسي بالدرجات والدقائق ويشير إلى القيمة الموجبة أو السلبية. الانحراف المغناطيسي ليس ثابتاً ويتغير مع مرور الوقت بسبب حركة القطبين المغناطيسيين للأرض.

Magnetic inclination (i): The angle between the magnetic line and the horizontal. i=0 at the equator, and i=90 at the poles.

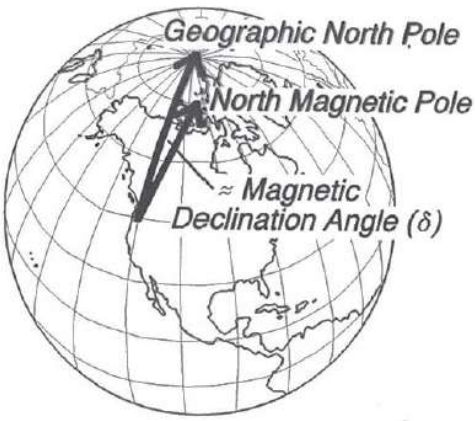
tan(i)=2tan(Φ) where Φ is the geographic latitude



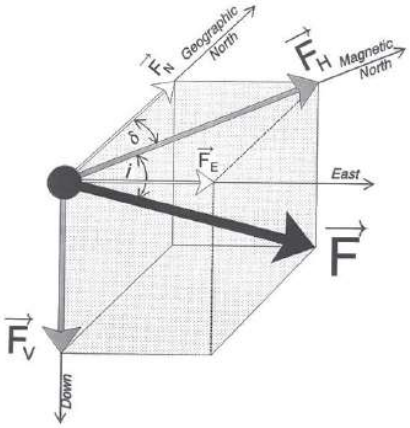

a) Magnetic Inclination




Magnetic declination (δ): The horizontal angle between the local magnetic line and the geographic north




b) Magnetic Declination



## أجهزة قياس المجال المغناطيسي

هناك عدة أنواع من جهاز قياس المجال المغناطيسي (Magnetometer) تشمل، Fluxgate Magnetometer، يستخدم مبدأ حلقات النواة المشبعة بالمجال المغناطيسي لقياس القوة والاتجاه للمجال المغناطيسي. يتكون من نواة مغناطيسية حلقية تتعرض لتيار كهربائي يتكون نتيجة للتغير في المجال المغناطيسي. يستخدم على نطاق واسع في البحوث الجيولوجية والملاحة والمجالات الصناعية. Proton Precession Magnetometer، يعتمد على حركة البروتونات في المجال المغناطيسي لقياس شدة المجال. يستخدم مغناطيس قوي لتحويل البروتونات إلى حالة محددة، ثم يتم قياس التغيرات الصغيرة في تردد الدوران للبروتونات. يستخدم في الأبحاث الجيولوجية والاستكشافات الجيوفيزيائية. Overhauser Magnetometer، يعتمد على تفاعل بين إشارة وجزيئات النيتروكسيد المشبعة الموجودة في الحساس. يستخدم في القياسات البيئية والجيولوجية والملاحة. Superconducting Quantum Interference Device – SQUID، يستخدم في الأبحاث الجيولوجية والفيزيائية والطبية، حيث يقدم دقة عالية في قياسات المجال المغناطيسي الضعيفة. Gyroscope Magnetometer، يحتوي على مادة مغناطيسية تعكس تأثير اتجاه المجال المغناطيسي وتسجل الدوران حول محور محدد.

**Magnetic Surveying**

**Instruments**

**Three types of magnetometers are frequently used in magnetic surveying:**

- **Proton magnetometer**
- **Cesium vapor magnetometer (optically pumped)**
- **Fluxgate magnetometer**