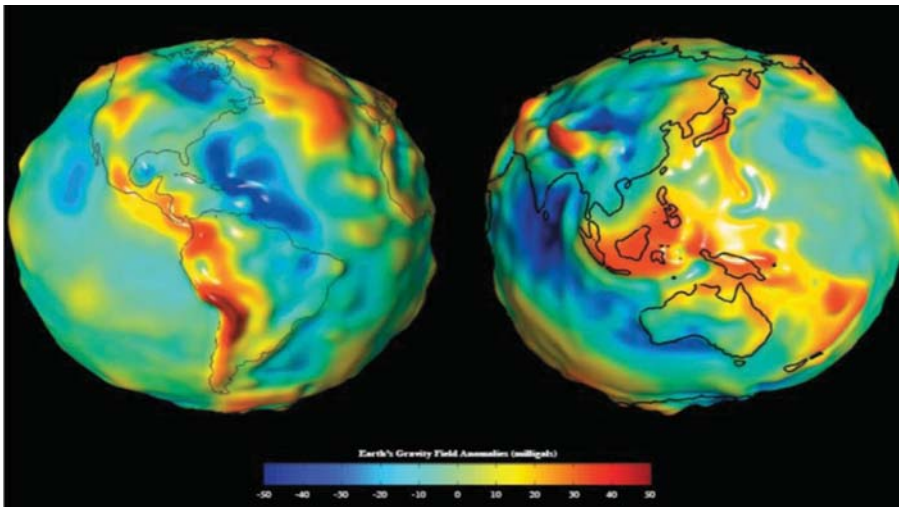
الاستكشاف التثاقلي

أ.د. محمد مصطفى غباشي



بدأ التنقيب باستخدام الطريقة التثاقلية (الجاذبية) خلال الثلث الأول من القرن العشرين، واستمر إلى يومنا هذا مشكلاً عنصرا مهما ومحوريا في العديد من عمليات الاستكشاف، وتعد قبة ناش بتكساس أول اكتشاف جيوفيزيائي في مجال البحث عن الغاز والبترول باستخدام قياسات التثاقلية بواسطة ميزان اللي، وهو من أوائل أجهزة قياسات التثاقلية الأرضية.

كانت بداية معرفة الإنسان بعلم التثاقلية عندما لاحظ أنه عند سقوط جسم ما سقوطاً حراً بالقرب من سطح الأرض فإن سرعته تزداد كلما اقترب منها، ومن ثم أطلق العلماء مصطلح العجلة (Acceleration) على معدل زيادة سرعة الجسم، والتي أثبت جاليليو أنها ثابتة لجميع الأجسام عند نفس النقطة على سطح الأرض، هذا ما فسر فيما بعد بالتجاذب البيني المتبادل بين الكتل إلى أن جاء نيوتن ووضع أول تصور رياضي لقانون التثاقلية العام مبنياً على الأسس التي وضعها كبلر في قوانينه الثلاثة عن حركة الكواكب في السماء، والتي توضح أنه لابد من وجود قوى تربط هذه الكواكب بعضها ببعض، كما تربط بينهم وبين الشمس، ووجد أن هذه القوى تتناسب طردياً مع كتل هذه الأجسام وعكسياً مع المسافة بينهما.

تتعدد أوجه استعمالات الطرق التثاقلية، فهي منذ نظرية **أينشتين** النسبية عن الترابط بين الزمان والمكان وعلاقة التثاقلية بهما محط أنظار الفيزيائيين وعلماء الرياضيات لفهم طبيعة هذا الترابط في الكون العظيم حتى وصلنا إلى النظرية الخيطية (String theory) التي تحاول فهم أصل التثاقلية. وعلى نطاق كرتنا الأرضية يمثل فهم مجالنا التثاقلي جزءاً أساسياً في التطبيقات العسكرية، ولولا اهتمام العسكريين بتطوير الأبحاث وإنفاق الأموال الكثيرة لتحديث أجهزة قياسها لما كان هذا التطور الذي نشهده حالياً منذ الحرب العالمية الثانية. كما استخدمت الطريقة التثاقلية – على نطاق استكشافي – في البحث عن البترول وتحديد أبعاد الأحواض الرسوبية وغيرها، وشملت هذه الطريقة استخدام العديد من أجهزة القياس بدءا من ميزان اللي للكشف عن القباب الملحية في خليج المكسيك بالولايات المتحدة الأمريكية، وحتى الأجهزة الحديثة المستخدمة حاليا، وبصفة عامة فقد انتشر تطبيقها في البحث عن أي أهداف تختلف في كثافتها عن كثافة الوسط المحيط بها.

كان من أهم القفزات العلمية في تطور طرق قياس التثاقلية ما بدأه **جيوج وولارد** في أربعينات القرن الماضي، واستمر حتى الستينيات، وتوج بإنشاء أول شبكة عالمية للتثاقلية العيارية (International Gravitational Standard net- IGSN) والتي تعد مرجعية لجميع مسوحات التثاقلية الحديثة في العالم أجمع. ومع دخول قياسات التثاقلية المشتقة من قياسات الارتفاع بواسطة الأقمار الاصطناعية حيز التنفيذ؛ زادت قياسات التثاقلية على مستوى العالم في جميع المحيطات والبحار والأماكن غير المأهولة – صعبة الوصول إليها بالطرق البرية أو الجوية – لرسم العديد من خرائط المجال الأرضي التثاقلي، مما أعطى للعلماء صورة واضحة عن حركة الصفائح على سطح الأرض، وتكتونية القارات، والعمليات الجيولوجية ذات النطاق القاري، وعلى حواف القارات والأرصفه القارية. و أصبح للتثاقلية ثقل علمي في دراسة ديناميكية الأرض.

أجهزة قياس التثاقلية

شهد العلم تطور أكثر من ٤٠ نوعا من أجهزة قياس التثاقلية ومعدلات تغيرها، كما يوجد ٣٠ نوعا آخر جاري تطويرها، ولعل أكبر دليل على تطور علم التثاقلية واستخدامها في أوجه الاستكشاف المختلفة والمتعددة هو زيادة أعداد فرق المسح التثاقلي – في بعض السنوات – عن مثيلاتها في طرق الاستكشاف السيزمية وغيرها.

يمكن تقسيم أجهزة قياس التثاقلية بصفة أساس إلى نوعين هما:

● أجهزة قياس مطلقة

تقيس هذه الأجهزة القيمة المطلقة لعجلة التثاقلية الأرضية عند كل نقطة قياس، وعلى الرغم من دقتها الشديدة إلا أن أجهزتها ما زالت مرتفعة الثمن، وكبيرة الحجم وتحتاج إلى وقت طويل نسبياً للوصول إلى الدقة المطلوبة، إلى جانب احتياجها لمهارة ودقة من الشخص الراصد. تتراوح القيمة المطلقة للجاذبية الأرضية من ٩٧٩ جال إلى ٩٨٣ جال – الجال نسبة للعالم الإيطالي **جاليليو** – أي ما يقرب من ١٠ ^{٣} ملليجال.

● أجهزة قياس نسبية

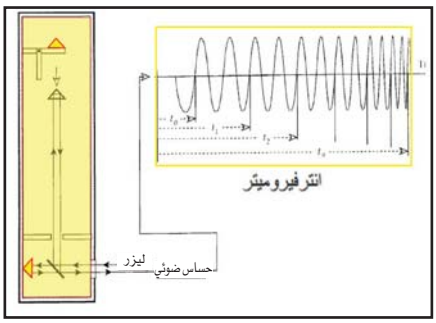
تقيس الأجهزة النسبية الفرق بين قياسات قيمة التثاقلية الأرضية من موقع لآخر – لا نهتم

هنا بالقيمة المطلقة - وهذا ما نحتاجه في عمليات الاستكشاف الجيوفيزيائي عن التراكيب الجيولوجية المختلفة وما تحتويها من ثروات معدنية ونفطية ومياه جوفية وغيرها. وغالبا ما تتراوح قيم شذات هذه التراكيب من ٠,١ إلى ٢٠ ملليجال طبقا لاختلاف كثافة الصخور المكونة لها من مكان لآخر.

يوجد العديد من أنواع أجهزه قياس التثاقلية يتم استخدامها في القياس، سواء على الأرض، أو في الآبار أو البحار، أو تحت الماء أو على قيعان المحيطات، أو في الجو على متن الطائرات، أو في الفضاء أوحتى على سطح القمر والمريخ، ومن أهمها وأكثرها شيوعا واستخداما - بعد البندولات - ما يلي:

■ **جرافيمترات السقوط الحر**: وتعتمد على زمن سقوط جسم ما سقوطاً حراً لمسافة محددة معروفة مسبقاً، ويجب أن يكون كل من الوقت والمسافة على درجة عالية من الدقة.

مرت هذه النوعية من الأجهزة بعدة مراحل للتطوير؛ ففي الخمسينات من القرن الماضي استخدم مايكلسون انترفيرومتر تردد الضوء الأبيض - جهاز تسجيل ضوئي - مع ساعة قياس زمن مصنوعة من الكوارتز، وقد وصلت دقة قياسه إلى واحد ملليجال. وفي الستينات تم استخدام مرآة مكعبة الزاوية للجسم الساقط وانترفيرومتر ليزري بدلاً من الضوء الأبيض. وبإضافة مكعب آخر للجهاز، شكل (١)، وبعض المنشورات أمكن تقسيم الشعاع إلى جزئين، أحدهما مرجعي لا يحدث فيه أي تغير والآخر مقاس، ويشكل كل شعاع أحد ذراعي **مايكلسون** إنترفيروميتر. ينعكس كل شعاع مباشره عائدا من المنشور المؤثر عليه، ويمر خلال المقسم



■ شكل (١) تركيب جرافيميتر السقوط الحر (معدل من لوري، ٢٠٠٧م).

حيث يتم تركيب الشعاعين بعضهما فوق البعض (Superimposed) مشكلين مايسمى بحلقات التداخل على لاقط ضوئي مناسب. ويتناسب تردد هذه الحلقات مع سرعة الجسم الساقط. وبمعلومية الزمن والمسافة يمكن بسهوله معرفة عجلة السقوط الحر.

تراوحت دقة جرافيمترات السقوط الحر في سبعينات القرن الماضي من ٠,٠١ إلى ٠٥ ملليجال، بينما وصلت دقتها في نهاية الثمانينات إلى ١ ميكروجال باستخدام أجهزة ميكرو-جيرافيتي.

■ **أجهزة ميزان اللي**: بدأ العمل بها من عام ١٩٠٨م واستمرت حتى أربعينات القرن الماضي، وتستخدم لقياس معدل تغير التثاقلية بين نقطتين - وليس القيمة المطلقة للتثاقلية - وتقاس بوحدة تسمى "اتفس" وهي تساوي ١٠$^{-٩}$ ثانيه -٢ ملليجال/كيلومتر. ونظراً للوقت والجهد المطلوبة للقراءة الواحدة (حوالي ٦ ساعات في الحقل)، فقد اندثرت هذه الأجهزة الآن بعد أن أدت العديد من القياسات الدقيقة خلال ثلاثينيات وأربعينات القرن الماضي.

■ **جرافيمترات الزنبرك**: ويقيس مقدار التغير في وضع اتزان كتلة ما - الناتج عن التغير في مجال التثاقلية بين المحطات المختلفة - وتتم هذه القياسات بأحد الطرق الآتية:

١- قياس الانحراف عن وضعية الاتزان آليا.

٢- قياس شدة القوة العكسية أو المرتدة اللازمة للعودة لوضع الاتزان.

٣- قياس مقدار التغير في القوة اللازمة للحفاظ على وضع الاتزان في نقطة الصفر.

يوجد نوعان من أجهزة جرافيمترات الزنبرك هما:

- **أجهزة القياس الثابت**: مثل الجرافيمترات الخطية، ويحتوي على عنصر مستجيب (مثل الزنبرك أو النابض) مع تغير في الإزاحة يتناسب - تقريباً - مع التغير في المجال التثاقلي، وتكبير هذه الإزاحة حتى يمكن قياسها.

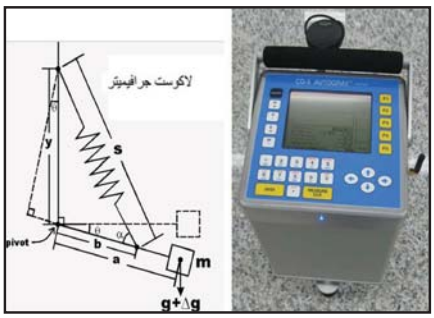
- **أجهزة القياس غير الثابت**: وتمثل حاليا معظم الأجهزة العاملة في مجال الاستكشاف التثاقلي، ومنها جرافيمترات زنبرك الطول الصفري (مثل لاكوست، ورومبرج، و وردون، وسنتريكس)، وهي مصممة بحيث إن أي تغير في التثاقلية عن قيمة التوازن تُدخل قوى أخرى في العمل تزيد من الإزاحة الناشئة من تغير التثاقلية بمفردها ومن ثم زيادة حساسية الجهاز.

استمر تطوير هذا النوع من الأجهزة خلال أربعينات القرن الماضي بواسطة **لاكوست و رومبرج** اللذين أبدعا في تصميم جرافيمترات الطول الصفري(zero length)، وتم قياس التثاقلية النسبية بدقة تصل إلى ٢٠ ميكروجال، و بعد عمل التصحيحات اللازمة وصلت دقته إلى ٠,٢ ميكروجال. من جانب آخر اخترع **سام وردون** في عام ١٩٤٨م جرافيمترات الطول الصفري المائلة، حيث صنع الزنبرك من الكوارتز بدلاً من المعدن، كما تغير وزن الكتلة العيارية من ١٥ ملليجرام إلى ٥ ملليجرام، مما كان له عظيم الأثر في تحسين قدرة الأجهزة وزيادة حساسيتها حتى وصلت إلى٠,٠١ في الحقل.

ظهرت - حالياً - أنواع جديده من جرافيمترات زنبرك الطول الصفري تتميز بصغر حجمها ودقتها العالية (مثل CG3 و CG5)، وتوازنها آليا، إلى جانب العديد من التصحيحات التي تتم داخلها آلياً عن طريق استخدام المعالجات الإلكترونية، شكل (٢).

■ **جرافيمترات الآبار** (BHGM): وتقيس التغيرات الطفيفة في المجال التثاقلي للأرض في أماكن مختلفة من البئر، وبذلك يمكن حساب كثافة التكوينات الجيولوجية المحيطة به بطريقة مباشرة.

بدأ ظهور هذه الأجهزة مع نهاية خمسينيات القرن الماضي، حيث تم صناعة أول جهاز بواسطة شركة إسو للبترول وكان يتكون من مستشعر ذي سلك مهتز يتناسب تردد اهتزازه مع الشد في



■ شكل (٢) رسم تخطيطي لووردن جرافيميتر.

السلك، وبدوره يتغير التردد مع تغير المجال التثاقلي، وقد وصلت دقة الجهاز إلى ٠,٠١ ملليجال، مع وقت قراءة حوالي ٢٠ دقيقة.

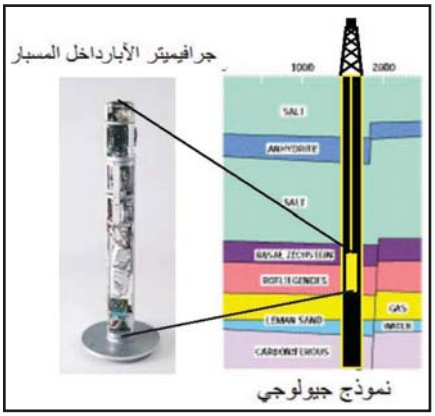
طورت هذه الأجهزة مع دقة في القياس تتراوح مابين ٥ إلى ٢٠ ميكروجال، ووصلت في بعض الأحوال إلى واحد ميكروجال، شكل (٣)، ومن ثم أمكن استخدامها ليس فقط لتعيين الكثافة الكلية للتكوينات الجيولوجية، ولكن أيضاً لاستشعار التغير في الأسطح الفاصلة بين السوائل خلف أنابيب التكسيه داخل الآبار. و على سبيل المثال السطح الفاصل بين الغاز والمياه أو الغاز والزيت. وقد وجد أنه يمكن تحديد هذه الأسطح الفاصلة بأجهزة تتراوح حساسيتها ما بين ٢ إلى ٥ ميكروجال، أما بالنسبة للسطح الفاصل بين الماء و الزيت فيكفي لتحديدها حساسية تتراوح ما بين ٧. إلى ٣ ميكروجال.

■ **أجهزة قياس التثاقلية في البحر**

تنقسم أجهزة قياس التثاقلية في البحر إلى نوعين هما:

■ **أجهزة الأعماق:** ويعد جهاز جلف (Gulf) أول جهاز تم تطويره واستخدامه لقياس التثاقلية في الأعماق عام ١٩٤١م، ويتميز بوجود غلاف لحمايته من الماء، مع ربطه في كابلات تتدلى من الباخرة حتى قاع البحر، ومحركات صغيرة لضبط توازنه، فضلا عن وجود أجهزة تحكم عن بعد.

■ **الأجهزة المحمولة بالباخرة:** ويتم من خلالها الحصول على قدر كبير من البيانات، إلا أن صعوبتها تكمن في نشوء مركبات تسارع

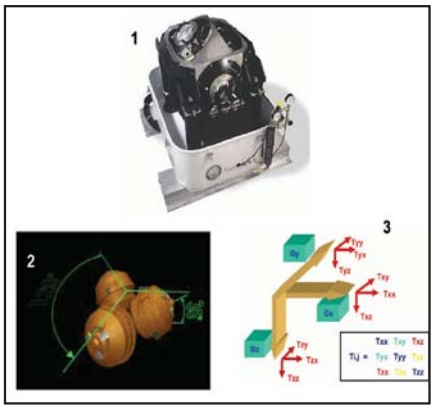


■ شكل (٣) رسم تخطيطي لعمل جهاز تثاقلية الآبار.

(Accelerated components) أخرى - ناتجة عن حركة الباخرة - تؤثر على قيمة المركبة التثاقلية الأصلية المقاسة للمجال الأرضي، والتي قد تنشأ من حركة الرياح في البحر، ونوع جهاز التثاقلية المستخدم. وللتخلص من تأثير مركبات التسارع يتم إجراء العديد من التصحيحات الخاصة بها، مثل تصحيح مركبة دوران الأرض الذي يلغي تأثير هذا الدوران من قيمة التثاقلية المقاسة.

● **أجهزة قياس التثاقلية في الجو**

ابتكر **لاكوست وروميرج** عام ١٩٥٩م أول أجهزة قياس التثاقلية في الجو، وطورت منه عدة أنواع منها الجرافيمتر المتوازن (S جرافيمتر) الذي دخل عالم الاستكشاف عام ١٩٦٥م. امتد استخدام هذه الأجهزة، بل وتعدى استخدامها من على الطائرات ذات الأجنحة إلى الطائرات المروحية. وكان أول جرافيمتر متوازن (S-meter) تم استخدامه من فوق مروحية كان في عام ١٩٧٩م، ووصلت دقته إلى ٣ ملليجال. ونظرا للتطور المذهل - حالياً - في دقة هذه الأجهزة (١ ملليجال/٢٠٠ كيلومتر نصف طول موجي)، وتطور أنظمة الإحداثيات الجغرافية؛ احتلت التثاقلية المقاسة في الجو أهمية قصوى في عمليات الاستكشاف الجيوفيزيائي الجوي، ويوضح، شكل (٤) أحد أحدث هذه الأجهزه والمجهز لقياس مركبات المجال التثاقلي الأساسية، ومن ثم يمكن



■ شكل (٤) المركبات المختلفة التي يمكن قياسها باستخدام أنظمة قياس التثاقلية الجوية الحديثة.(١) لثلاثة جرافيمترات مرتبة، صورة(٢) تستخدم لقياس المركبات الثلاث الأساسية Gx,Gy,Gz ومنها تحسب باقي مركبات المجال التثاقلي.

حساب باقي المركبات عدديا.

● **قياسات التثاقلية من الأقمار الصناعية**

لم يكن من الممكن - في بداية الأمر - قياس التثاقلية مباشرة عن طريق الأقمار الصناعية، أي لا يوجد جهاز تثاقلية يحمل على القمر الصناعي، إلا أن قيمتها قد اشتقت من تحليل الارتفاعات المقاسة من القمر الصناعي عن طريق الرادارات الحديثة، وقد بدأ ذلك منذ القمر البحري (Seasat)، عام ١٩٧٨م.

ظهرت حالياً أجيال جديدة من الأقمار الصناعية مثل شامب (Champ) الذي يقيس مباشرة قيمة عجلة التثاقلية الأرضية - من على ارتفاع ٤٠٠ كيلومتر - سواء فوق القارات أو أعلى البحار، واستكملت مسيرة الأقمار الحديثة بالقمرين GRACE و GDCE.

تصحيح قيم التثاقلية

على الرغم من التطور المذهل في طرق قياس التثاقلية الأرضية والأجهزة المستخدمة، إلا أن هناك عدة تصحيحات أساسية يجب أن تطبق على قياسات وبيانات التثاقلية قبل البدء في تفسيرها، وذلك لإزالة تأثيرات عديدة ليس لها علاقة بجيولوجية المنطقة المأخوذة منها هذه البيانات.

اتفق العلماء على تقسيم هذه التصحيحات إلى نوعين هما:

● **التصحيحات العيارية الأساسية**

تصنف التصحيحات العيارية الأساسية إلى أربعة أنواع هي:

■ **تصحيح اختلاف خط العرض:** ويتم إجراؤه بسبب زيادة قيمة التثاقلية مع زيادة خط العرض، ويرجع ذلك إلى شكل الأرض البيضاوي، وقد اتفق العلماء في المؤتمر الجيوفيزيائي الدولي في كانبيرا عام ١٩٨٠م على معادلة عامة - تصل دقتها إلى ٠,٧ ميكروجال - وذلك لحساب قيمة التثاقلية بمعلومية قيمة خط العرض عند محطات القياس.

■ **تصحيح تأثير الارتفاع عن سطح الأرض (تصحيح الهواء الحر):** ويتم اجراؤه إذا كانت نقطة

القياس على ارتفاع معين من السطح المرجعي - عادة سطح البحر أو بمعنى أدق الجيود (Geoid) - حيث يتم حساب الفرق في الارتفاع بالمتر - بين محطة القياس والسطح المرجعي - وضربه في مقدار معين (٠,٣٠٨٦)، ويتم إضافة الناتج إلى قيمة التثاقلية المقاسة إذا كانت محطة القياس فوق سطح البحر أو طرحه إذا كانت أسفله، شكل (٥).

■ **تصحيح بوجير (Bouguer correction):** ويختص بإزالة تأثير كثافة المادة المكونة للكتلة الصخرية (تل، جبل، هضبة) التي توضع فوقها أو أسفلها محطة قياس التثاقلية. قام العلماء بحساب معامل التصحيح اللازم لذلك، ووجدوا أنه يقدر بقرابة ٠,٠٤١٩ مضروبا في كل من ارتفاع محطة القياس عن السطح المرجعي وكثافة الصخور الموجودة أسفلها. كما أن القيمة الناتجة من التصحيح يتم طرحها من جميع القراءات المقاسة إذا كانت النقط فوق السطح المرجعي، وطرحها إذا كانت موجودة أسفله، شكل (٥).

■ **تصحيح نتيجة لشكل الأرض:** ويتم إجراؤه إذا كان سطح الأرض المحيط بنقطة القياس غير مستو، وهو عبارة عن حساب لتأثيرات الكتل المحيطة بنقطة القياس بعد حساب ارتفاعاتها جيداً وافتراض كثافتها أو حسابها بإحدى الطرق المعروفة. و يكون هذا التصحيح - دائماً - موجبا، ويضاف على قيمة التثاقلية المقاسة سواء كانت التضاريس أعلى أو أقل ارتفاعاً من نقطة القياس، و يتم إجراؤه عن طريق الحاسبات الآلية نظراً لما يتطلبه من جهد في حسابه.

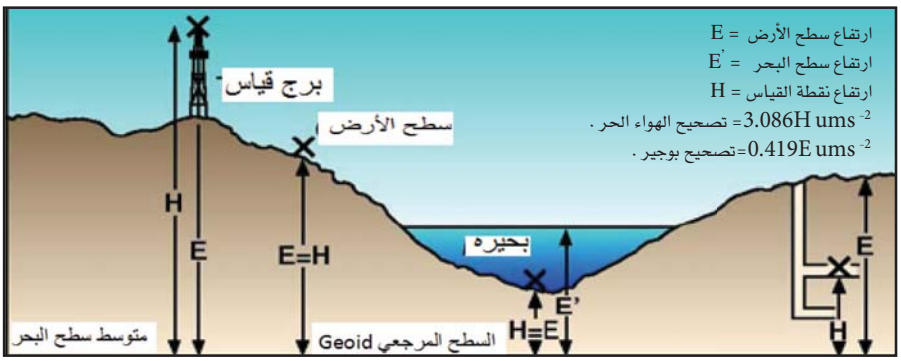
● تصحيح توازن القشرة الأرضية

يتم إجراء تصحيح توازن القشرة الأرضية (Isostatic correction)؛ لإزالة تأثير الكتل الصخرية الموجودة على أعماق كبيره من القشرة الأرضية أو حتى الجزء الأعلى من طبقة الوشاح (Upper mantle layer) الذي ربما يبرز لأعلى لموازنة نقص في كتلة القشرة الأرضية التي تعلوه. وهناك نموذجان لمعرفة كيفية تصرف القشرة الأرضية في حالة عدم الاتزان، شكل (٦). أولهما نموذج **برات** (Pratt, 1855)، و الآخر نموذج **إيري** (Airy, 1855) حيث رأى برات أن كثافة الأرض تحت المناطق الجبلية لابد أن تكون أقل منها تحت المناطق المحيطية. أما **إيري** فأشار إلى أن كثافة الأرض ثابتة، بينما يتغير شكل الكتلة الأرضية بحيث يقترب اللب الكثيف من سطح الأرض تحت المناطق الساحلية والمحيطات ويبتعد عنها تحت القارات والمناطق الجبلية، وبهذا يحدث توازن الكتلة.

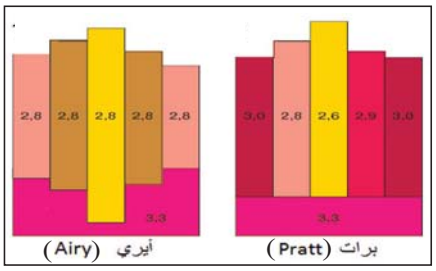
يتم هذا التصحيح باستخدام جداول وأشكال خاصة، ومن الضروري إجراؤه إذا كانت المنطقة جبلية، وعلى سبيل المثال الجزء الغربي من المملكة العربية السعودية أو ما يسمى بالدرع العربي.

● تصحيحات أخرى

هناك بعض التصحيحات الأخرى التي تعتمد على عامل الزمن، وليس لها علاقة بجيولوجية المكان تحت الدراسة، ويجب أن تتم حتى لا تتأثر دقة القياسات، ومن أهمها: تصحيح المد والجزر، وتأثير انحراف الجرافيمتر الناتج عن تغير مواصفات المرونة للزنبرك الموجود في الجهاز مع مرور الزمن، واختلاف درجة الحرارة والضغط الجوي.



■ شكل (٥) تصحيح الهوا الحر Free -air ، وتصحيح Bouguer .



■ شكل (٦) فرضيتا برات وإيري لتفسير توازن القشرة الأرضية.

فصل ومعالجة وتفسير البيانات التثاقلية

يتطلب الاستكشاف التثاقلي الناجح - بالإضافة إلى بيانات عالية الدقة - تطبيق العديد من المرشحات، ووسائل إظهار لخواص هذه البيانات، واستخدام طرق دقيقة لمعالجتها وتفسيرها للوصول إلى الهدف المنشود من المسح التثاقلي، وذلك من خلال التفسير الجيولوجي الموثوق به لهذه البيانات، ومن أهم هذه المعالجات والمرشحات ما يلي:

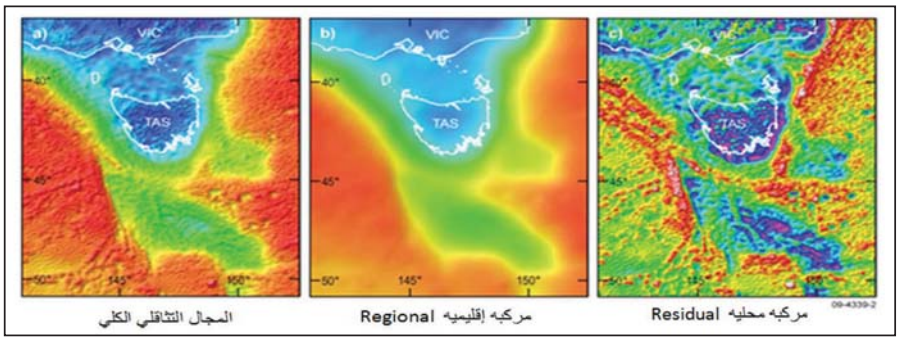
● فصل الشذات الإقليمية والمحلية

تتداخل الشذات المحلية أو المتبقية (Residual) ذات الأهمية الاقتصادية أو المرغوب في استكشافها، ومعرفة مصدرها مع الشذات الإقليمية (Regional) الأخرى الناتجة عن أجسام جيولوجية، إما ذات أبعاد كبيرة بالنسبة للشاذة المرغوب فيها، أو ذات عمق كبير لا يدخل في أهداف عمل المسح التثاقلي، لذلك يلزم فصل الشذة الأولى المحلية عن الثانية الإقليمية. يوضح شكل (٧) مثال لشذة إقليمية وأخرى محلية تم فصلهما من شذة بوجير لمنطقة ما في استراليا.

مرت طرق الفصل بعدة مراحل بداية من الطرق البيانية قليلة الدقة، ثم الطرق التحليلية (مثل جريفن و أقل المربعات)، وأخيرا استخدام الصفات الترددية للشذات في فصل مركباتها إلى محلية وإقليمية للاستفادة من كل منهما على حدة.

● النمذجة

يستلزم الوصول إلى المرحلة النهائية في التفسير التثاقلي وضع تصور واضح للتوزيع الدقيق لكثافات الصخور المكونة للتراكيب والتكوينات تحت السطح، وعلى الرغم من عدم وجود حل محدد لهذه الجزئية إلا أن معظمها حلول تقريبية تعتمد في



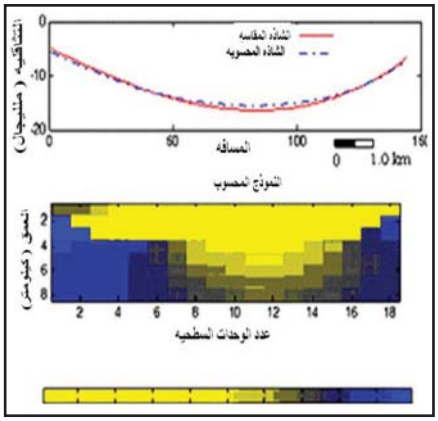
■ شكل (٧) مثال لشاذة إقليمية وأخرى محلية تم فصلها من شاذة المجال الكلي لمنطقة في إستراليا.

مجملها على عمل نموذج رياضي لتوزيعات الكثافات بالمنطقة تحت الدراسة، وتنقسم النمذجة بصفة عامة إلى نوعين هما:

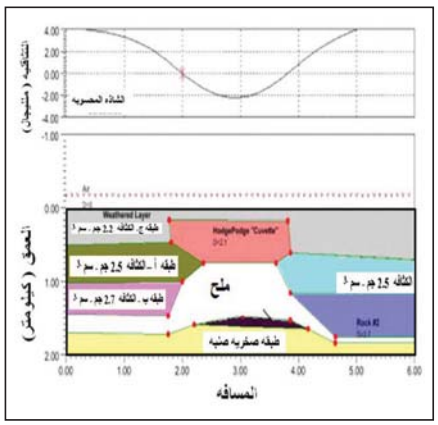
■ **مباشرة:** ويفترض فيها عمل نموذج بنائي مبدئي لجيولوجية تحت السطح، بناءً على جميع بيانات التحليلات السابقة، سواء الجيولوجية أو الجيوفيزيقية، ويتم حساب المجال التثاقلي الناتج، ويقارن بالمجال الذي تم رصده في الحقل، ويتم تعديل معاملات المجال الناتج يدويا حتى الوصول إلى التطابق التام بين المجالين المحسوب و المرصود، معطيا صورة جيدة إلى حد ما عن الجيولوجية تحت السطحية لمنطقة الدراسة، و يوضح شكل (٨) نموذج مباشر للتراكيب تحت السطحية لبناء جيولوجي مفترض.

■ **غير مباشرة أو عكسية:** وتستخدم للوصول إلى أدق تصور ممكن للتراكيب تحت السطحية؛ وذلك بتقسيم الأرض إلى عدد كبير من المنشورات أو المكعبات – سواء في البعد الثنائي أو الثلاثي – مع إعطاء كل منها قيمة كثافة مبدئية، وبحساب المجال التثاقلي الناتج عن كل عنصر وجمعهم سوياً لإعطاء التصور النهائي للمجال الناتج عن التركيب المقترح، ثم مقارنة ذلك بالمجال المرصود من الحقل وإذا لم يتحقق التطابق يعاد توزيع الكثافات مرة أخرى، وتكرار هذه العمليات مراراً و تكراراً حتى الوصول إلى حل تتطابق فيه بيانات المجال التثاقلي المرصود.

تختلف طريقة النمذجة المباشرة عن النمذجة العكسية في أن الأولى يجب أن تتم بمعرفة الشخص المفسر للبيانات يدوياً وتأخذ وقتاً طويلاً، إلى جانب صعوبة تحقيق المعاملات الرياضية فيها، أما الطريقة الثانية فهي آلية تماماً في كثير من الأحيان و تتقيد رياضياً و لا ينتج لها حل إلا إذا تحققت جميع الشروط الرياضية والجيوفيزيقية والجيولوجية وغيرها في الحل المطلوب. يبين شكل(٩) تحليل لبعض البيانات التثاقلية بطريقة العشوائية الصغرى لعمل النمذجة العكسية للمجال التثاقلي على نموذج جيولوجي مفترض لحوض رسوبي.



■ شكل (٩) مثال للنمذجة العكسية لمجال التثاقلية باستخدام الطريقة العشوائية على نموذج جيولوجي مفترض لحوض رسوبي، (غباشي ٢٠٠٧)..



■ شكل (٨) نموذج لعملية النمذجة المباشرة للمجال التثاقلي لتركيب جيولوجي تخيلي.

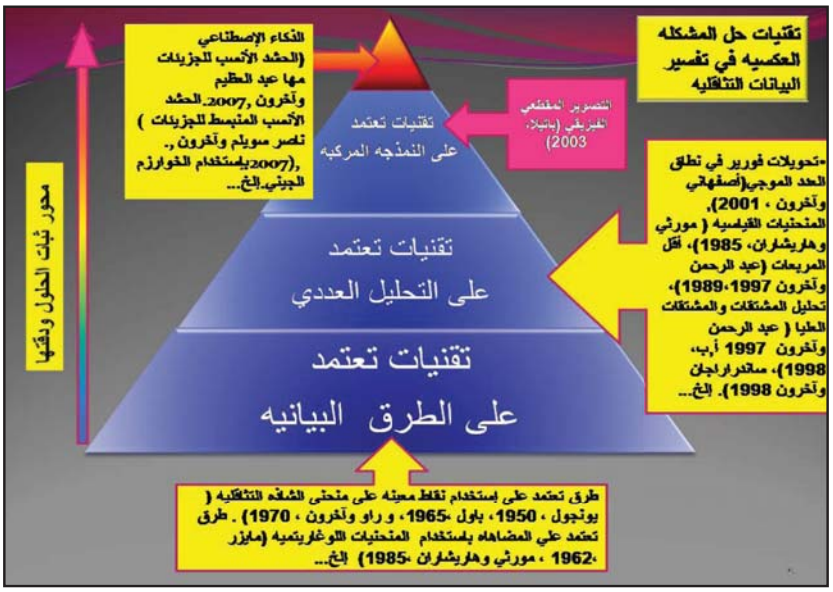
ومن الجدير بالذكر أن هناك العديد من الطرق البيانية والآلية التي ابتكرها العلماء لتفسير المجال التثاقلي وأيضاً المغناطيسي للأرض نظراً للتماثل الرياضي بين منشئهما، ويمكن تقسيمها إلى ثلاثة مسارات، شكل (١٠): **الأول:** ويعتمد على الطرق البيانية وهو أقلهم دقة، وقد استخدم في بدايات القرن الماضي منذ الخمسينات مثل: طرق **باول** (١٩٥٠م)، و**ماير** (١٩٦٢م)، و **هاريش** (١٩٨٥م). **الثاني:** يعتمد على استخدام التحليل العددي في إيجاد حلول تقريبية جيدة مثل: تحويلات **فورير**، وأقل المربعات، واستخدام المشتقات العليا. **الثالث:** وهو عبارة عن نظريات تعتمد على النماذج الرياضية المعقدة والمركبة نوعاً ما مثل: طرق التصوير المقطعي الفيزيائي، أوطرق الذكاء الاصطناعي مثل طرق الحشد الأنسب للجزيئات (Intelligence swarm)، والحشد المنبسط (Stretched swarm)، واستخدام الخوارزم الجيني ... إلخ.

تطبيقات الاستكشاف التثاقلي

ساهم الاستكشاف التثاقلي بدور محوري في جميع مجالات التنمية البشرية، وعلى جميع الأصعدة بدءاً من البحث عن البترول و الغاز، والمواد الخام كالحديد و الملح وغيره، كما تطرق إلى البحث عن تركيب القشرة الأرضية في الأعماق، حتى وصل إلى أكثر من ٩٠٠٠ متر تحت سطح الأرض، داخل القشرة الأرضية، وقريباً من الوشاح. و من أهم تطبيقات الاستكشاف التثاقلي مايلي:

● البحث عن النفط

تتمثل أهمية الاستكشاف التثاقلي في مجال البحث عن النفط في تحديد عمق وامتداد وسمك الأحواض الرسوبية المناسبة للتجمعات النفطية؛ مما ساهم في اكتشاف العديد من حقول النفط على مستوى العالم. ومثال ذلك فقد لعبت طرق الاستكشاف التثاقلي في مجال البحث عن النفط بالمملكة دورا مهما في اكتشاف العديد من الحقول البرية والبحرية مثل حقل الغوار – أهم حقل إنتاجي في المنطقة العربية بل والعالم أجمع

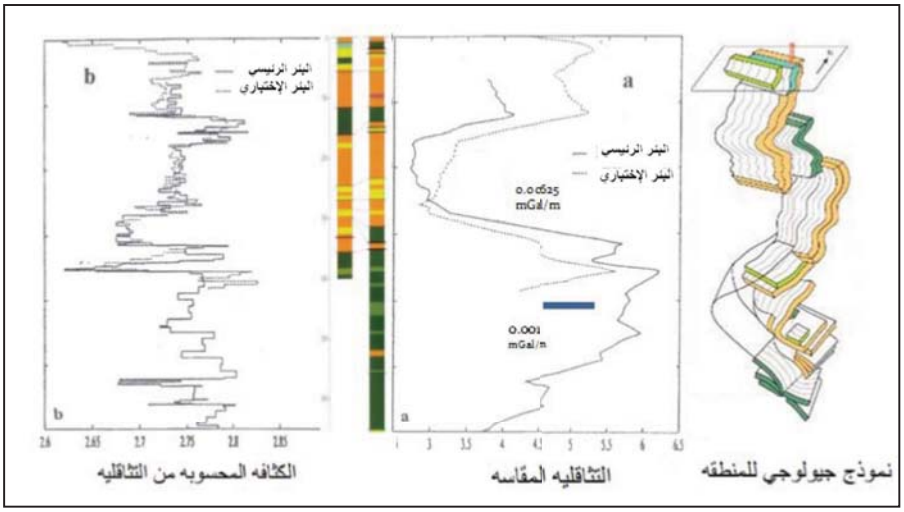


■ شكل (١٠) طرق تفسير المجال الثقالي والمغناطيسي على أساس ثبات الحلول ودقتها،(غباشي ٢٠٠٨م).

– بالإضافة إلى حقول خريص، و أبو جيفان، ومزالج، وجرابيات، وجهم، والهبا، وأرياه، وريمثان، وبكر، وفارزان، وحرملية ودبدبة.

● دراسة القشرة الأرضية

تمثل دراسات القشرة الأرضية حالياً هدفا لعدد أكبر من العلماء العاملين بدراسة الأرض. وبرز ذلك الاهتمام والتحدي في حفر عدة آبار عميقة على مستوى العالم، منها: البئر الروسي كولاس ج٣ في عام ١٩٨٥م بعمق حوالي ٩٥٨٣م، وبئر KTB في ألمانيا عام ١٩٩٤م بعمق ٩١٠١ متر داخل القشرة الأرضية. حاول العلماء من خلال هذه الآبار – عن طريق استخدام العديد من الطرق الجيوفيزيقية ومنها الطرق الثقالية – فهم العمليات الأساسية التي تتم داخل القشرة الأرضية ومنها: كيفية حدوث الزلازل، وتكوين الخامات والركاز، وتجميع أكبرقدر ممكن من البيانات الجيوفيزيئية عن كيفيه انتقال السوائل والتبادل والانتقال الحراري خلال الصخور ومجالات الإجهاد و تصرف الموجات السيزمية، وكذلك المجالات الكهربية العميقة. ويبين الشكل (١١) المجال الثقالي تحت السطحي لبئر (KTB) الرئيسي، وقد اتضح من تفسير بياناته سواء منفردة أو مع بيانات الثقالية السطحية أن هناك أجساما كبيرة جداً من صخر الأمفيبيولايت عالي الكثافة سواء على جانب البئر أو أسفله، وأطلق على الجسم السفلي أيربندورف (Erbendorf body)، وكان له عظيم الأثر في وضع تصور للشكل البنائي للمنطقة المحفور بها البئر.



■ شكل (١١) التثاقلية المقاسة داخل البئر العميق (KTB) ونموذج جيولوجي عام لمنطقة الدراسة بألمانيا (غباشي ٢٠٠٦م، وغباشي وآخرون ١٩٣).

● الأغراض البتروفيزيائية

استخدمت تثاقلية الآبار لتعيين قيم نفاذية الصخور من خلف الأنابيب الكاسية للآبار المحفورة، بالإضافة إلى قيم الكثافة الكلية للصخور، وكذلك ملاحظة تغير الحد الفاصل بين الغاز والماء، والماء والزيت في الحقول المنتجة للبترول بدقة متناهية، وهو ما يعد نقلة نوعية كبيرة ساعدت في تقدير احتياطي الخزانات البترولية تحت سطح الأرض.

● الهندسة البيئية

لجأ الإنسان إلى استخدام الطرق التثاقلية لحل العديد من المشاكل التي برزت حديثا، نتيجة استحداثه لأبنية شاهقة ومتعددة الطوابق، ومده لطرق سريعة تتحمل أوزان ناقلات عملاقة، ومد خطوط سكك حديدية و بناء مطارات. ومن أبرز استخدامات التثاقلية في الهندسة البيئية ما يلي:

١- تحديد و اكتشاف الفراغات تحت السطحية كالكهوف والممرات الأرضية.

٢- تحديد مقدار أو معدل الهبوط الأرضي في الأماكن المعرضة لذلك مع مرور الزمن.

٣- تعيين سمك التربة أو الرواسب الثلجية وطبوغرافية طبقة الصخر الصلبة التي تلي التربة السطحية.

٤- تحديد أماكن الأودية والقنوات المدفونة.

٥- كمية المياه الجوفية و مقدار التغير في مستوى سطح الماء مع الزمن في الوديان الرسوبية.

٦- رسم خرائط تحديد عمق و اتساع مرامي النفايات القديمة المدفونة و غير معروفة حالياً.

٧- تحديد أماكن و زوايا ميول الصدوع تحت المدن و الطرق.

مراجع مختاره

– **ناصر سويلم و محمد غباشي و تامر هاشم ٢٠٠٦**: استخدام طريقه الحشد الأنسب للجزيئات مع تقنيه تمديد الدالة لحل المشكلة العكسية للبيانات التثاقلية: :دراسة أوليه، حوليات الجمعية المصرية للرياضيات والفيزياء، المجلد ٨٦ رقم ٢، ص ٢٥٩-٢٨١.

– **محمد غباشي و و.كاستن و ف.م. نيوباور ١٩٩٣**، نتائج ثقالية الآبار في بئر الحفر العميق الرئيسي (KTB) ونموذج بنائي جديد. حوليه الجمعية الجيوفيزيقية الألمانية،٢٢-٢٧ مارس-كيل – ألمانيا الغربية.