الجامعة السورية الخاصة كلية هندسة البترول

الجيولوجيا البنيوية

م. ج. يوسف رضوان

2021

Youssef Radwan

الفصل الأول

الجيولوجيا البنيوية بين علوم الأرض

Structural Geology in Earth Sciences

Dr. Youssef Radwan

العلم هو البحث عن المعرفة المتعلقة بالكون وأصله وتطوره وكيفية عمله. وعلم الجيولوجيا هو أحد تخصصات العلوم الأساسية، ويبحث إلى جانب علوم الفيزياء والكيمياء والأحياء، في معرفة كيفية تشكل الأرض تحديداً، وتطورها، وكيفية عملها. ومن هذه التخصصات، الجيولوجيا البنيوية structural geology وهو تخصص يدرس تشوهات الصخور والتشكيلات الصخرية ويعتمد بالدرجة الأولى على الأدلة الحقلية الجيولوجية الملاحظة على سطح الأرض، بهدف فهم البنى الجيولوجية بشكل ثلاثي الأبعاد، وذلك من خلال ملاحظة وتحليل كل من:

1. المظاهر الجيولوجية geological features المرئية على سطح الأرض.
2. المشهد الطبيعي landscape العام لذاك السطح.

Boushra Alhamad

الجيولوجيا البنيوية والتكتونيك والجيوديناميك

تهدف الجيولوجيا البنيوية (*structural geology*)إلى توصيف البنى التشوهية (علم الهندسة *geometry*)، وتمييز مسارات ومسارات الجسيمات أثناء التشوه (علم الحركة *kinematics*)، واستقراء اتجاه ومقدار القوى المسببة للتشوه والتحكم به (علم الديناميك *dynamics*). وكعلم يعتمد بالدرجة الأولى على الأدلة الحقلية الملاحظة، تعمل الجيولوجيا البنيوية بمقاييس متعددة تتراوح من 100ميكرون *microscopic scale* مقياس مجهري إلى ≤ 100م (أي من مقياس الجسيمات المكونة للصخر إلى مقياس جهري *macroscopic scale* التكشفات الصخرية).

بينما يهدف التكتونيك (*tectonics*) إلى كشف السياق الجيولوجي الذي حدث فيه التشوه، ويتضمن بالتالي مكاملة معطيات الجيولوجيا البنيوية في الخرائط، والمقاطع، والمخططات ثلاثية الأبعاد، بالإضافة إلى معطيات تخصصات علوم الأرض الأخرى بما في ذلك علم الرواسب والبترولوجيا، وعلم الطبقية، والجيوكيمياء، والجيوفيزياء. لذا يعمل التكتونيك على نطاقات تتراوح من ≤ 100متر إلى ≤ 1000 كم، ويركز على عمليات مثل التصدع القاري، وتكون الأحواض، وعمليات الانغراز وارتطام الصفائح، وبناء الجبال.

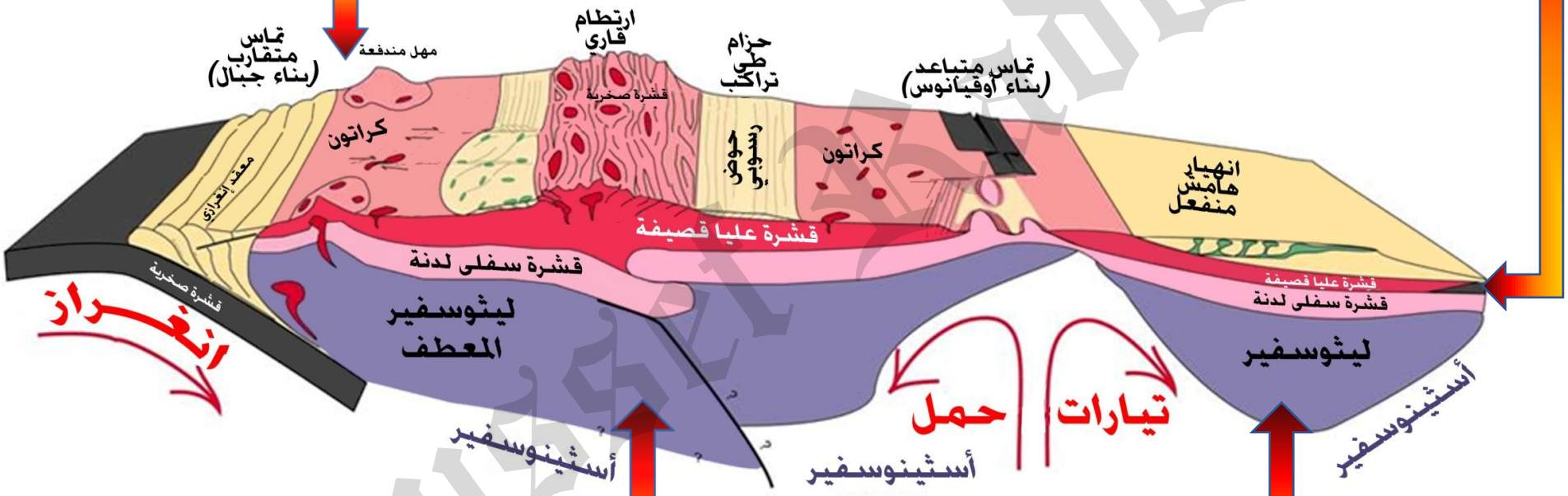
في حين يركز الجيوديناميك (*Geodynamics*)على القوى الدافعة لتيارات الحمل الحراري في المعطف وعلى حركة الصفائح وتشوه مواد الكرة الأرضية، فهو يهتم بالعمليات التي تحدث في أعماق المعطف، والانخسافات الباردة، والأعمدة الساخنة وصلتها بحركة الصفائح، بما في ذلك التهابط والنهوض الديناميكيين، والعمليات التكتونية للصفائح. لذا يعمل الجيوديناميك بمقاييس> 1000 كم. وتمثل النمذجة الرقمية جوهر الجيوديناميك المعاصر.

تكتونيك

يدرس التشوه بمقياس من 100 متر إلى 1000 كم، ويركز على التصدع القاري، وتكون الأحواض، وعمليات الانغراز وارتطام الصفائح، وبناء الجبال.

بنيوية

توصيف البنى التشوهية ومسارات التشوه واستقراء اتجاه ومقدار القوى المسببة للتشوه بناء على الملاحظة والأدلة الحقلية، مقياس من 100 ميكرون إلى 100 متر



معدّل ومعرب من موقع جامعة أوبسالا، السويد
https://www.geo.uu.se/research/min-pet-tek-en/research-topics/tectonics-and-geodynamics/

جيوديناميك

يركز على تحليل القوى الدافعة لتيارات الحمل الحراري و العمليات الجارية في أعماق المعطف وحركة الصفائح على نطاقات أعمق من 1000كم

Bushra Arabian

أهمية الجيولوجيا البنيوية ومجالاتها التطبيقية

1. تشكل الجيولوجيا البنيوية جوهر أنشطة الاستكشاف عن المواد الهيدروكربونية والخامات المعدنية، إذ تتحكم البنى في هجرة الهيدروكربون والمحاليل المعدنة واصطيادها وهجرتها. فالجيولوجيا البنيوية هي المرحلة الأولى التي تسبق المسوحات الجيوفيزيائية والجيوكيميائية التي تهدف إلى تحديد الأقاليم المعدنية الجديدة، كما أنها ضرورية للغاية في تفسير القياسات والمعلومات الجيوفيزيائية والجيوكيميائية والجيوكرونولوجية.

2. الجيولوجيا البنيوية مكون أساسي في دراسات اختيار وتقييم مواقع إشادة الجسور والسدود والأنفاق والمفاعلات النووية ودفن النفايات المشعة وغيرها.

3. الجيولوجيا البنيوية أساس علم الزلازل ودراسات تخفيف المخاطر الزلزالية، بسبب الارتباط الوثيق والواضح بين الفوالق وبين الزلازل.

4. الجيولوجيا البنيوية ركيزة دراسات الأحزمة الجبلية والأحواض الرسوبية ماضياً وحاضراً. فلا يمكن إنجاز أي دراسة جيولوجية أو جيوكيميائية أو جيوفيزيائية بدون الاعتماد على معطيات الجيولوجيا البنيوية .

Bussam Rahhal

تسلسل مهام الجيولوجيا البنيوية والتكتونيك

تدمج الجيولوجيا البنيوية والتكتونيك مابين وصف وتحليل بنى ثلاثية الأبعاد، وبنى مجهرية (الجيولوجيا البنيوية بمعناها الضيق). وعليه يهتم الجيولوجيون البنيويون بـ:

1. ملاحظة وتوثيق البنى الناتجة عن التشوه، والتي تشمل الطيات folds والفوالق faults (الكسور fractures)، وغيرها كما سنرى في الدروس القادمة
2. تحليل هذه البنى للتمكن من فهم الانفعال النهائي finite strain (أي الشكل النهائي الناتج إما عن تاريخ تشوه deformation طويل الأمد أو عن انفعال متزايد incremental strain.
3. فهم "حقول الانفعال strain fields" من خلال رسم خرائط لمظاهر التشوه.
4. دراسة حركيات الفوالق ومقادير الإزاحات الناتجة.
5. استقراء مناحي اتجاهات الإجهاد الأعظمي والأصغري، من ملاحظة وتحليل مظاهر التشوه الصغيرة
6. تصميم نماذج تكتو نية تشرح تاريخ التشوه الذي أدى إلى وجود حقول الانفعال ثلاثية الأبعاد الملاحظة.

Dusan Raman

طرائق الجيولوجيا البنيوية والتكتونيك

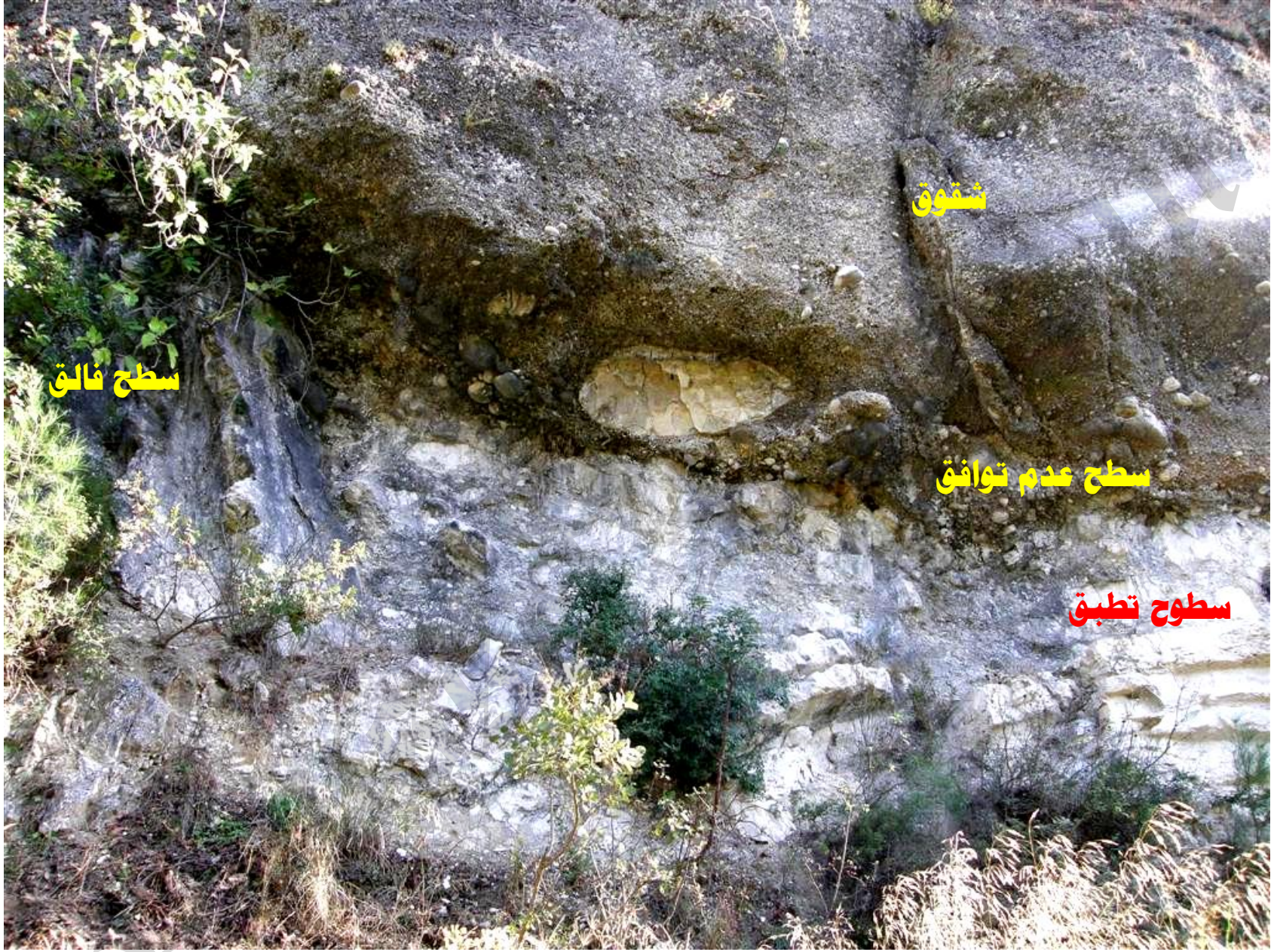
أولاً: الحصول على البيانات

1.الجيولوجيا الحقلية

الجيولوجيا البنيوية بطبيعتها ثلاثية الأبعاد، وللكشف عن الهندسة ثلاثية الأبعاد للبنى المختلفة، يقوم الجيولوجيون البنيويون:

1. بقياس ومعالجة مضارب strike، وميول dip angle، واتجاهات ميل dip direction القسمات المستوية planar features (سطوح التطبق، سطوح الانفصام، سطوح الفوالق، المستويات المحورية للطيات).
2. بقياس ومعالجة غوص plungeواتجاهات غوص plunge direction القسمات الخطية linear features (محاور الطي، الخدوش التحززات، وغيرها).
3. تحديد الاتجاهات النسبية للإزاحات displacementsالناتجة عن الفوالق ونطاقات القص.
4. تحديد تسلسل الأحداث الجيولوجية والتشوهية deformationalاستناداً على علاقات التقاطع.

Dr. Yousef Radwan



Geology is at best an imprecise science in which it is seldom to make deterministic statements. We deal in probabilities rather than certainties.

طرائق الجيولوجيا البنيوية والتكتونيك

أولاً: الحصول على البيانات:

2. الجيوفيزياء والاستشعار عن بعد

تتطور تقنيات الاستشعار عن بعد (بالطائرات والأقمار الصناعية) بسرعة كبيرة. وتقدم للجيولوجيين صوراً عالية الدقة تسمح برسم خرائط لتوزع التكشفات الصخرية على سطح الأرض .

1. **إما بشكل غير مباشر عن طريق جمع المعلومات حول الجيولوجيا العميقة عبر الطرائق الجيوفيزيائية، كالمسح الجاذبي والمغنطيسي والإشعاعي والسيزمي. و تعد الطريقة السيزمية الإنكسارية إحدى الركائز الرئيسة للاستكشاف عن النفط والغاز، لقدرتها على كشف التشكيلات الصخرية المتنوعة على أعماق كبيرة.**
2. **أو بشكل مباشر عن طريق حفر آبار إستكشافية.**

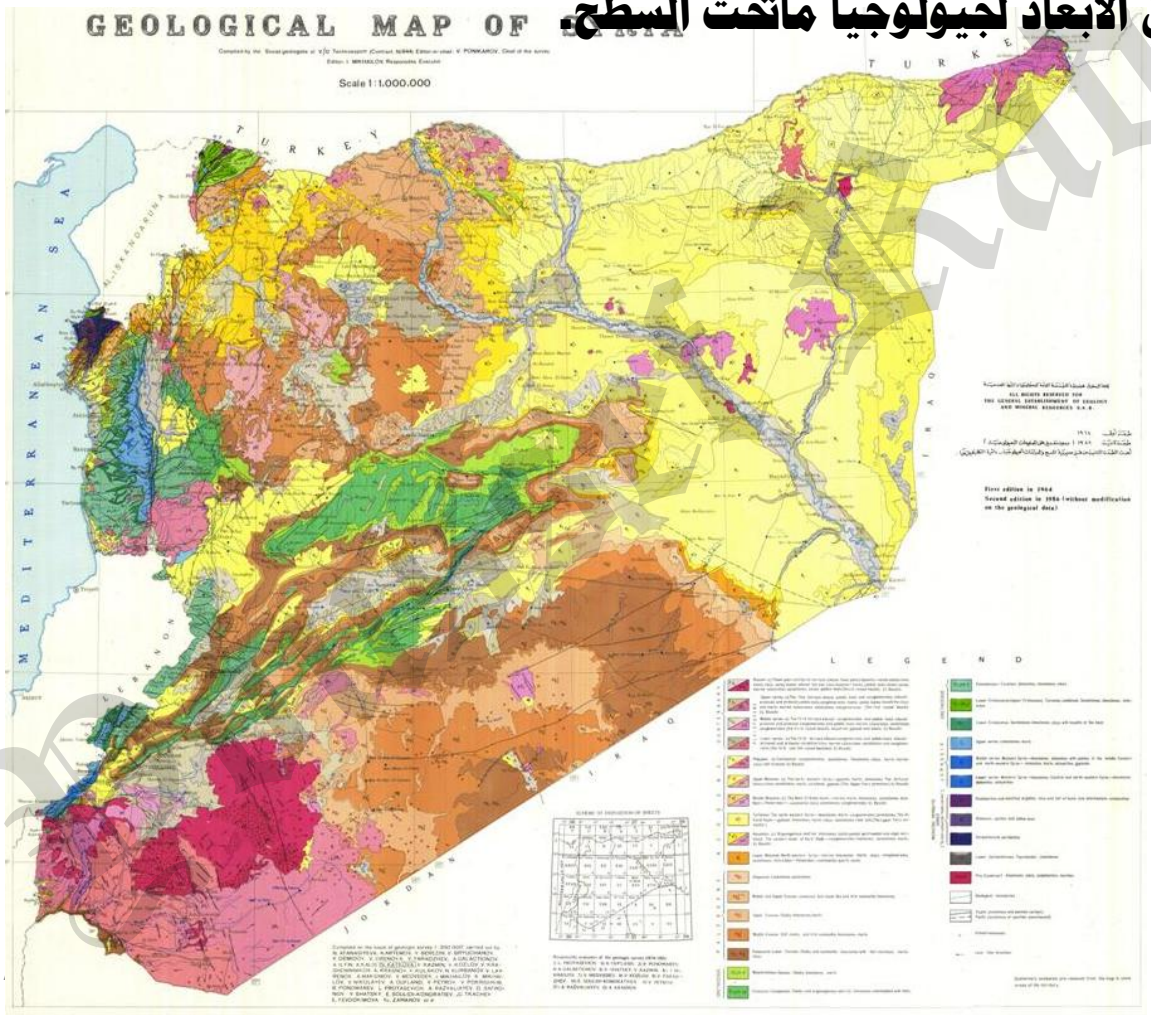
Youssef Radwan

ثانياً.

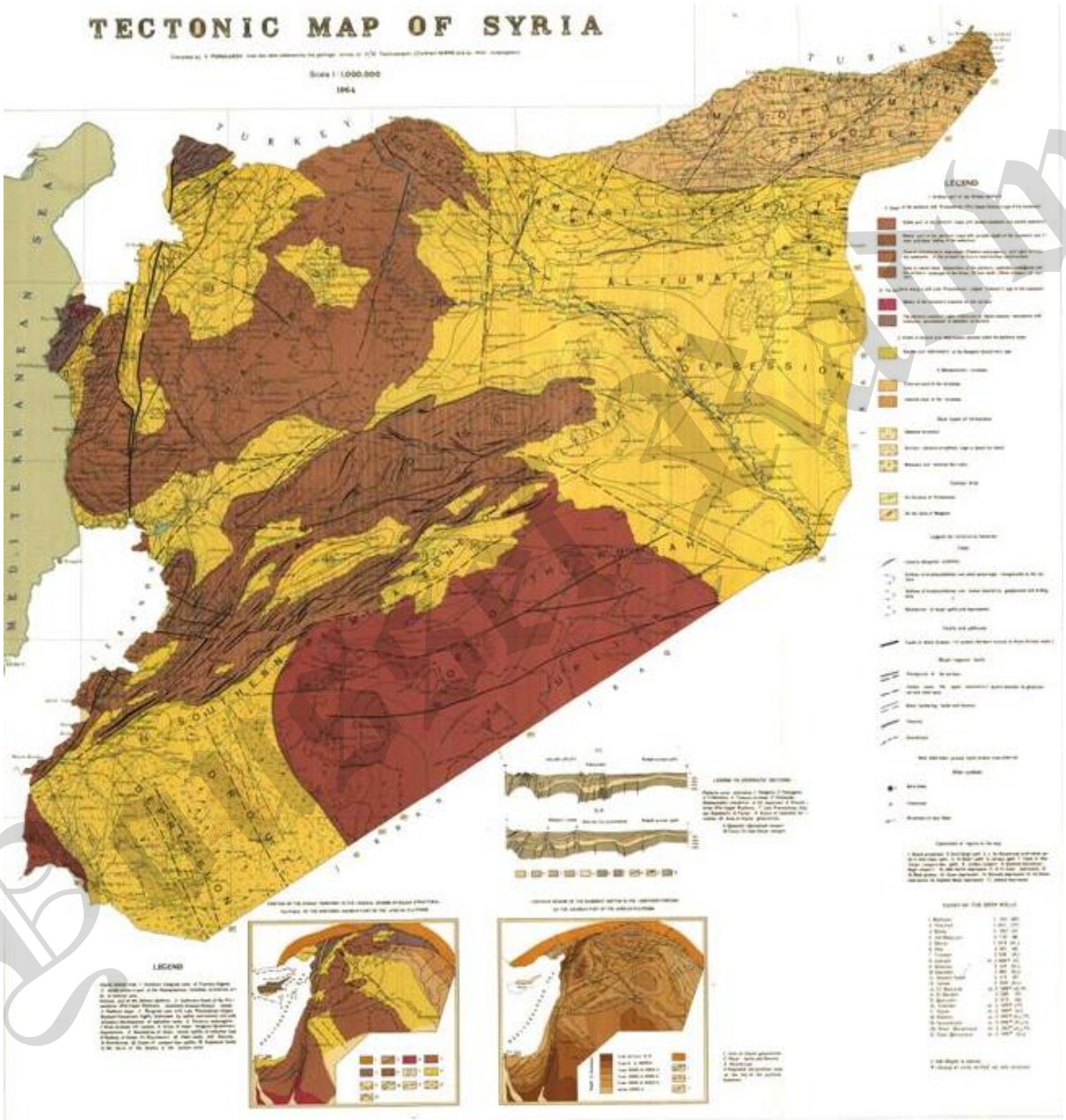
مكاملة وتحليل وعرض البيانات:

يتم تلخيص البيانات البنيوية في الوثائق الآتية المختلفة:

1. خرائط ومقاطع جيولوجية geologic maps &sections توضح توزع التشكيلات الصخرية والبنى (طيات، فوالق، وغيرها) على سطح الأرض. وتعد الخريطة الجيولوجية وثيقة قوية للغاية إذ تمكن من إعادة بناء ثلاثي الأبعاد لجيولوجيا ماتحت السطح.



2. خرائط تكتونية tectonic maps ومقاطع بنيوية structural sections توضح توزع البنى المرتبطة بالتشوهات، كنطاقات الفوالق والقص، والتورق والخطوط، وتوزع محاور الطيات، مقدار الإجهاد، وغيرها.



2. خرائط تكتونية tectonic maps ومقاطع بنيوية structural sections توضح توزع البنى المرتبطة بالتشوهات، كنطاقات الفوالق والقص، والتورق والخطوط، وتوزع محاور الطيات، مقدار الإجهاد، وغيرها.

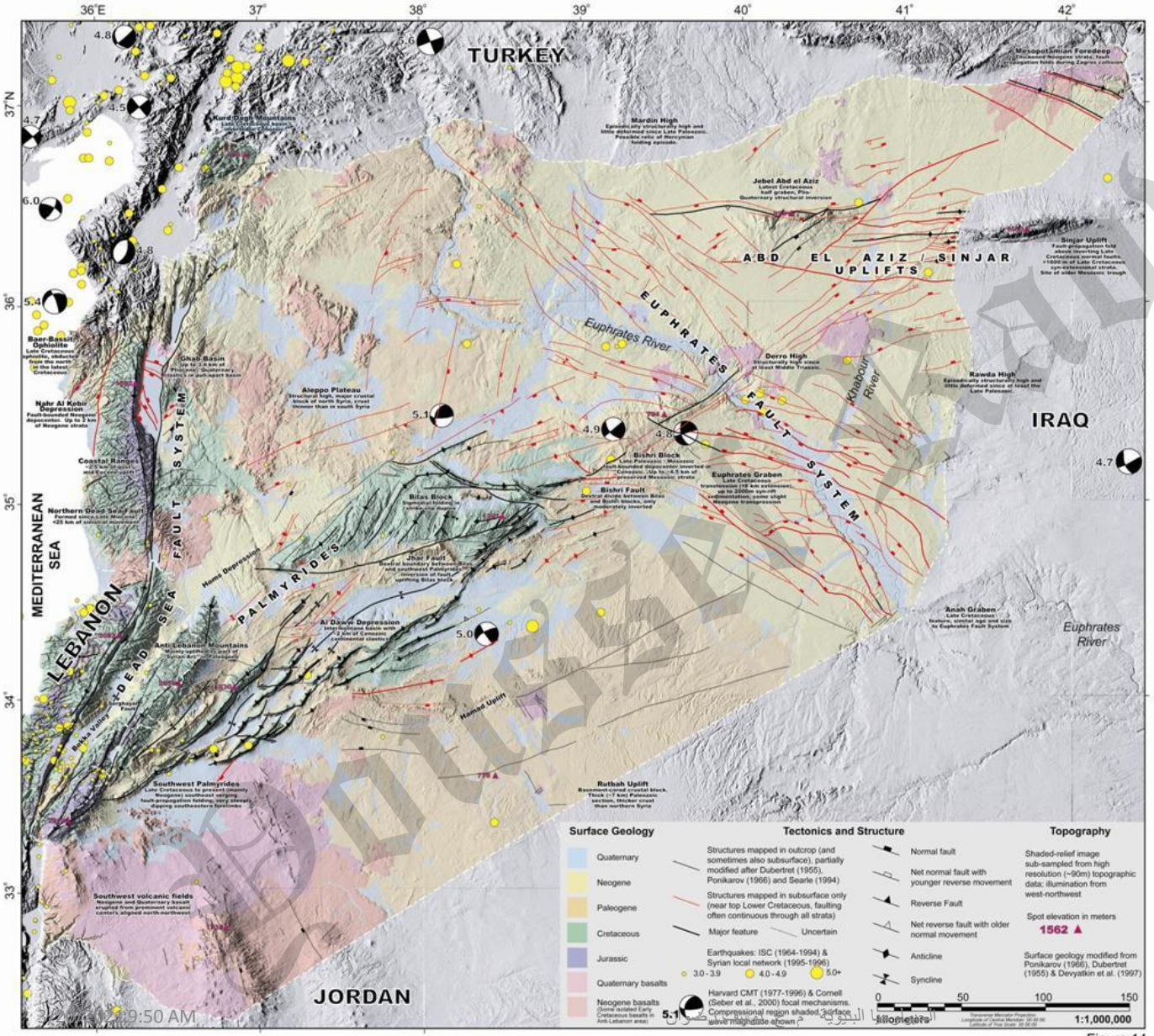
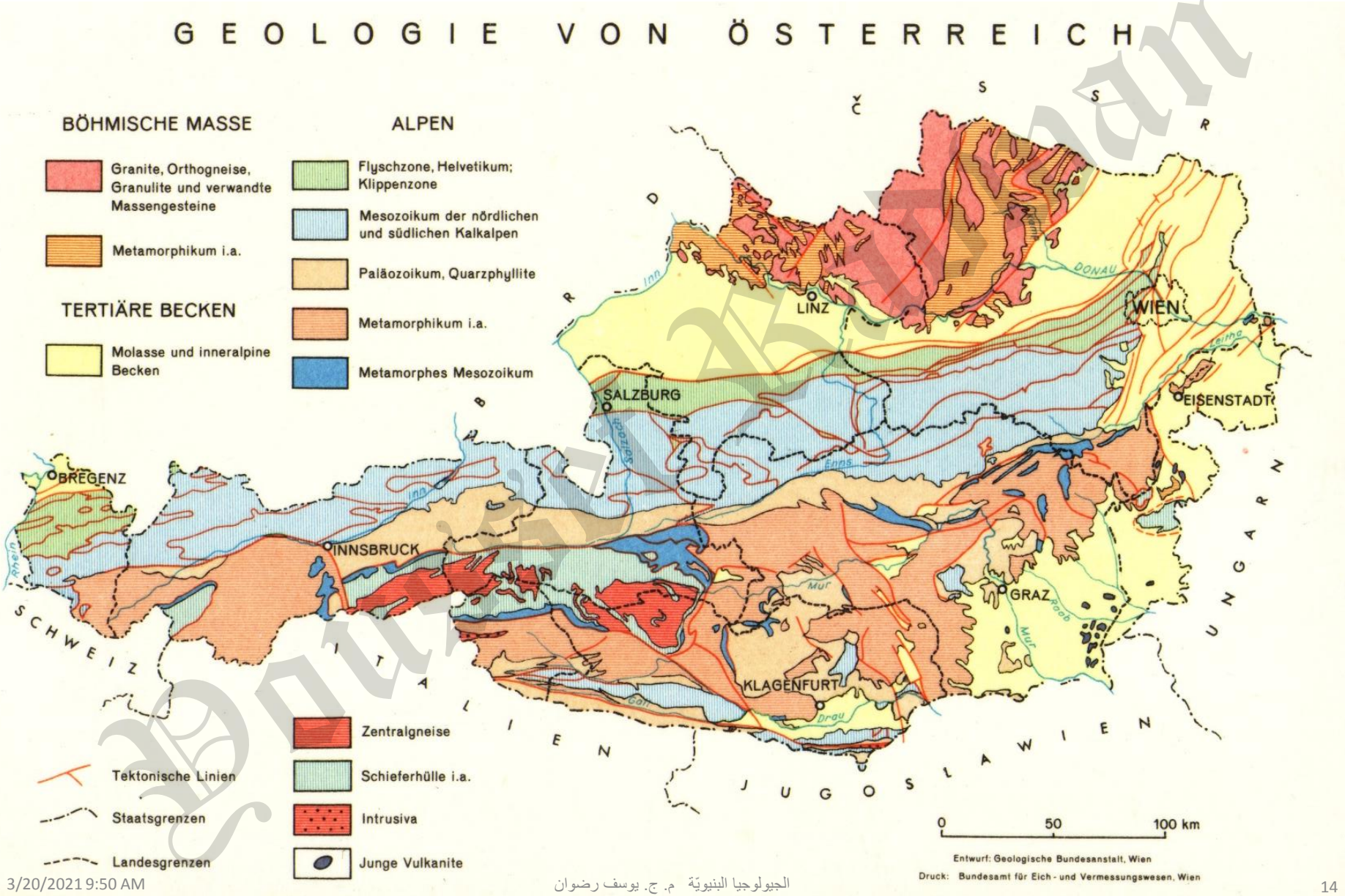


Figure 14

3. خرائط بنيوية تخطيطية sketch maps وهي خرائط جيولوجية مبسطة تجمع فيها تشكيلات صخرية لها نفس التاريخ التكتوني في زمر تفصلها عن بعضها سطوح عدم توافق.

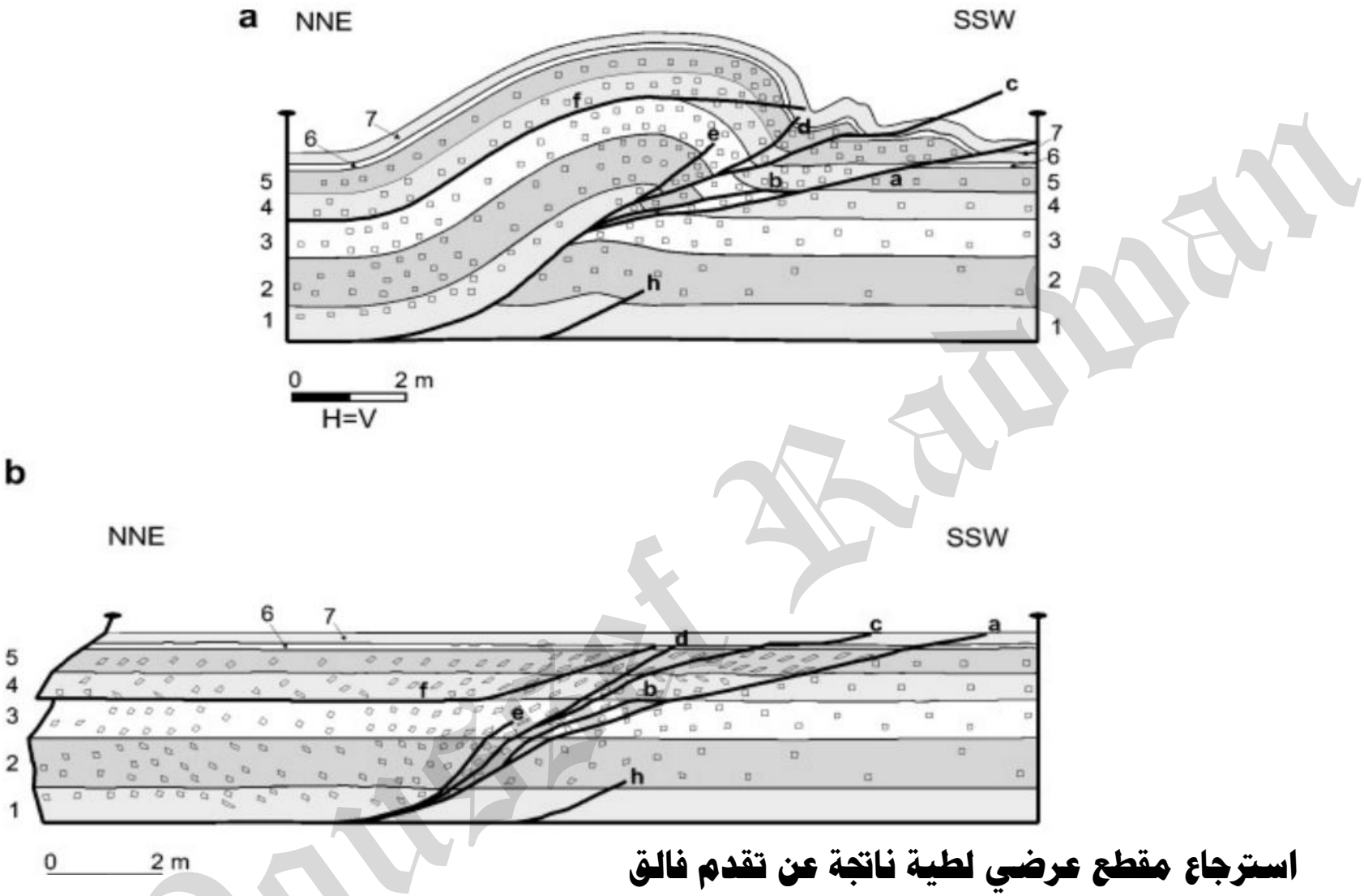


ثالثاً
وضع نموذج تكتوني والتحقق من صحته:

الخرائط الجيولوجية والمقاطع العرضية هي في الواقع نماذج، فهي تجمع قياسات وملاحظات سجلت بشكل مباشر حقلياً، وكذلك غير مباشر من لباب الحفر وفرضيات، إذ ينبغي على الجيولوجيين وضع فرضيات لملء الثغرات الناتجة نتيجة غياب الملاحظات في الأماكن التي لا تتكشف فيها الصخور.

للتحقق من صحة الخرائط والمقاطع العرضية، يستخدم الجيولوجيون مفهوم الحفاظ على السطح *surface conservation*، والذي يعتمد على فرضية أن الطبقة الصخرية تحافظ على مساحة تكشفها على السطح أثناء التشوه. وتظل هذه الفرضية صحيحة طالما بقيت التشكيلات الصخرية تتشوه مع انتقال قليل للكتلة ضمن الطبقة (عبر الانحلال مثلاً). فيقال أن مقطعاً عرضياً متوازن *balanced* (أي متسق هندسيا) عندما تستعيد السطوح الليثولوجية البينية مواضعها الأفقية الأولية عبر عملية الاسترجاع *restoration* عبر تشوه رجعي (أي إعادة الأمور إلى ما كانت عليه قبل التشوه)، وإلغاء تأثير وجود أي تراكب *overlap*(تكرار تشكيلات صخرية بتاثير تصدع، أو وجود ثغرة طبقية *stratigraphic gap* (نتيجة توقف الترسيب أو الحت والتعرية).

غالبا ما يقدّم النموذج التكتوني رباعي الأبعاد (ثلاثي الأبعاد إضافة لبعد الزمن)، على شكل لمخططات الكتلة متتابعة زمنياً ومتسقة حراريا وميكانيكيا. يتطلب التحقق من هذين الأمرين نمذجة رقمية بحوسب ضخمة، تمكن من تقديم ميزة تنبؤية تضاف إلى قدرتها على التحقق من صحة النموذج.



استرجاع مقطع عرضي لطية ناتجة عن تقدم فالق

من:

Masini et al., journal of structural geology, 2010

Bouzaf Kaban

الفصل الثاني

القوة، الشد، الإجهاد

Force ,Traction and Stress

Youssef Radwan

تحدث التشوهات الصخرية الرئيسة التي يصادفها علماء الأرض في مختلف التشكيلات الصخرية (طي، تصدّع، تورّق) بتأثير:

1. القوة Force
2. أو الشد Traction
3. أو الإجهاد Stress

وبالتالي يستخدم الجيولوجيون البنيويون قياسات اتجاهات مظاهر هذه التشوهات كالفوالق والكسور والطيات المتشكلة أو المتجددة النشاط لاستقراء وتحديد اتجاهات محاور الإجهاد الرئيسة المتسببة بحدوث هذه التشوهات.

ولما كانت هذه المؤثرات (القوة، الإجهاد، الشد) مفاهيم فيزيائية فمن الضروري تذكر التعريفات الآتية:

1. مقدار scalar هو كمية عددية مجردة.
2. مُتَّجِه (أو الشعاع) vector هو سهم يتجه من إلى نقطة أخرى. يتحدد بثلاثة عناصر:
   - ❖المقدار : إضافة إلى كمية قياسية تُمَثَّل طول المتجه، (28 كم)
   - ❖نقطة التأثير: وهي النقطة التي ينطلق منها المتجه (موقع SPU كمثال).
   - ❖اتجاه المتجه الذي يتحرك وفقه اعتباراً من نقطة التأثير والذي يمكن تحديده في فضاء ثلاثي الأبعاد (من موقع SPU باتجاه دمشق كمثال).

مفهوم القوة Force

القوة F وفقاً لقانون نيوتن الثاني للحركة، هي ما يؤدي إلى تغيير كيان فيزيائي (جسم) أو تغيير اندفاعه وذلك :

1. إما من حالة سكون (جسم متوقف) .
2. أو من حالة حركة منتظمة (جسم متحرك) إلى حالة حركة على خط مستقيم.

وكون القوة متناسبة مع معدل تغير الاندفاع مع الزمن فتوصف بالتالي بمتجه (شعاع)،

واحدة القوة في الجملة الدولية SI هي نيوتن (N) ويساوي مقدارها معدل تغير عزم (قوة دفع) Fجسمٍ ما.

تتسبب القوة F بتسارع a مقداره ($m. s^2$) لجسم مقدار كتلته m يساوي 1 kg)، لذا تحدد القوة بالمعادلة: $F = m. a$

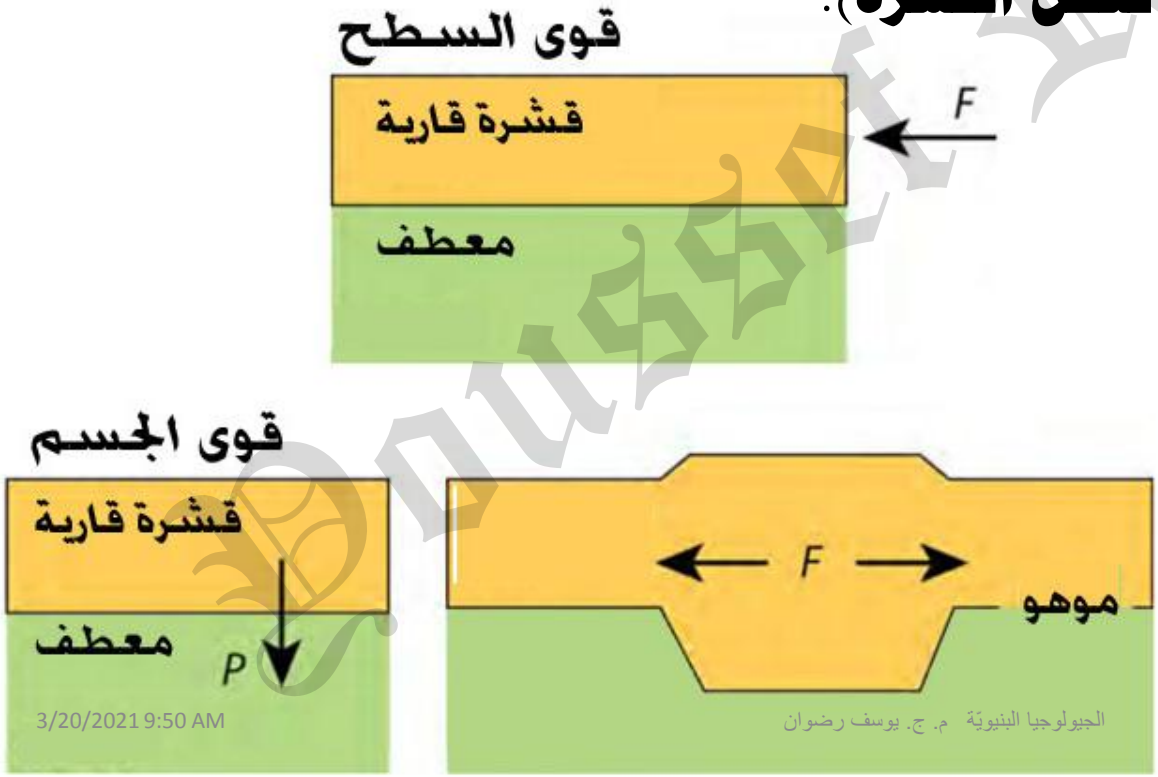
ومن ثم، فإن قوة مقدارها 1 نيوتن تسرع جسماً كتلته 1 كجم بمقدار 1م في الثانية خلال ثانية واحدة.

Youssef Rabban

هناك نوعان من القوى:

قوى السطح *Surface forces* وهي تؤثر على سطح الجسم. ومثالها القوى التكتونية (كنهوض المتون الجبلية وشد الألواح الصخرية) التي تؤثر على صفيحة غلاف صخري، وهي قوى سطحية، وغالبا ما تدعى بالقوى الخارجية external forces.

وقوى الجسم *Body forces* وهي تعمل ضمن الجسم وغالباً ما تدعى القوى الداخلية. تنشأ قوى الجسم في صفيحة ليثوسفيرية عن الجاذبية التي تجذب أي جزيء نحو مركز الأرض (P)، وعن عدم تجانس الكثافة (ومثالها، تغيرات الكثافة جانبياً بسبب تثخن القشرة).

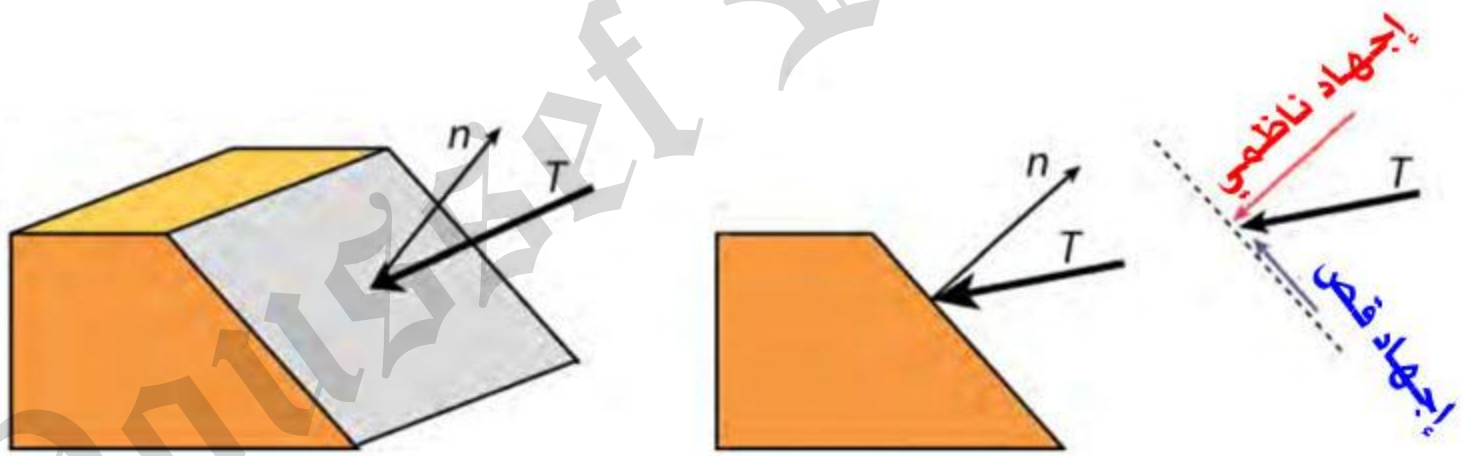


Traction الشد

الشد T أو الجذب هو قوة تؤثر على سطح ما (ومثالها قوة الجاذبية الأرضية). يمثل الجذب في الميكانيك بمتجه (شعاع) يمثل القيمة الحدية لنسبة القوة إلى مساحة منطقة ما عندما تتناهى هذه المساحة إلى الصفر، ويمكن أن يكون لهذه القوة أي منحى بالنسبة للسطح.) ويمكن أن يحلل الجذب إلى مركبتين: مركبة إجهاد قص (موازية للسطح)، ومركبة إجهاد (شد أو ضغط) ناظمي

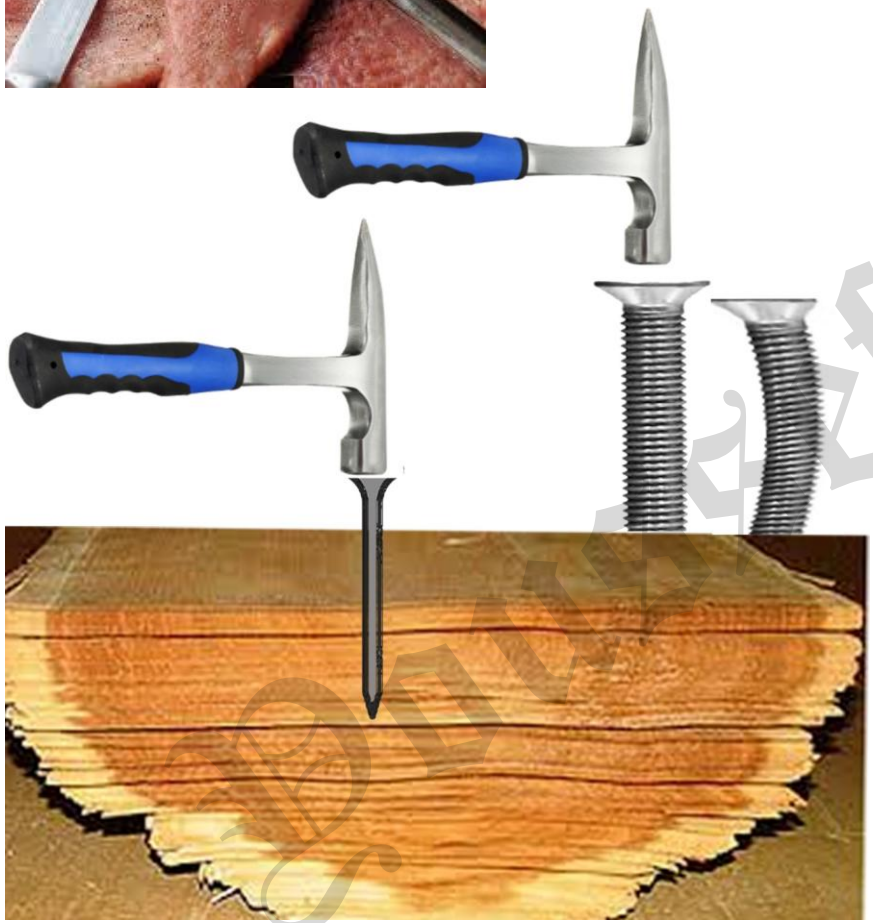
T : الجذب: n : الناظم (عمود على السطح)

معرب من
Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology. https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-iTunes-pdf, 17.01.2020



إجهادا الشد و الضغط: قوتان ناظميتان على السطح
إجهاد القص: قوة مماسية للسطح

مفهوم الإجهاد Stress



الإجهاد σ *Stress* هو القوة المؤثرة في واحدة السطح من الجسم، والتي تسعى إلى تغيير أبعاده. وهي تعبر عن عن تولد قوى داخلية بين الجسيمات تقاوم الانفصال.

ومثاله:

1. **إجهاد الشد وإجهاد الضغط وكلاهما قوتان تؤثران ناظمياً (عمودياً) على واحدة مساحة السطح، و يساوي مقدار كل منهما σ = F / A**
2. **إجهاد القص: قوة مماسية للسطح.**

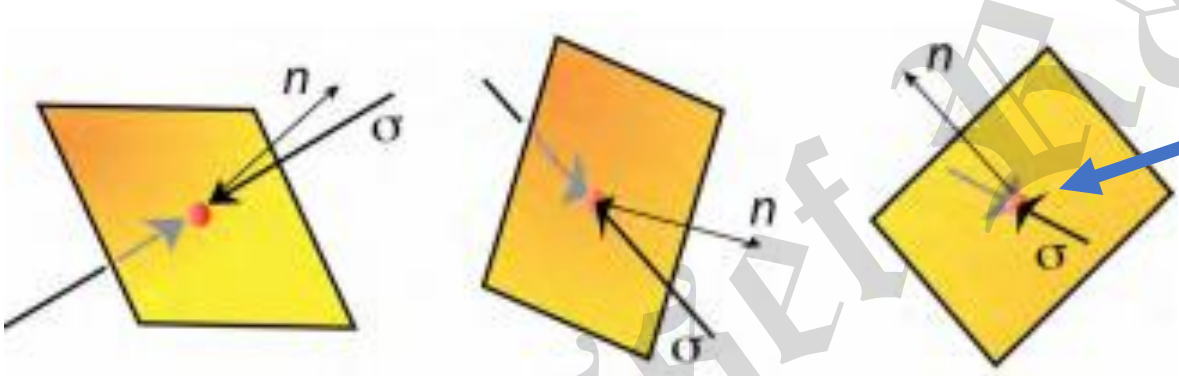
ويصل الإجهاد إلى قيمته العظمى لحظة الانقطاع.

فكلما كانت المساحة الخاضعة للشد والضغط أصغر ،كان الإجهاد أكبر

Prof Baroun

مفهوم الإجهاد Stress

إذا افترضنا وجود نقطة مادية في حالة السكون ضمن كتلة صخرية، وافترضنا وجود سطح صغير متمركز على تلك النقطة. فإن منحى هذا السطح سيتحدد بمستقيم عمودي عليه (معامد n ,,*normal* أي بمتّجه (شعاع) عمودي على السطح ويتناسب طوله مع مساحة هذا السطح. يتحدد الإجهاد المؤثر عبر هذا السطح بواسطة مزدوجة شعاع (متجه) σ تؤثر على جانبي السطح المتقابلين.



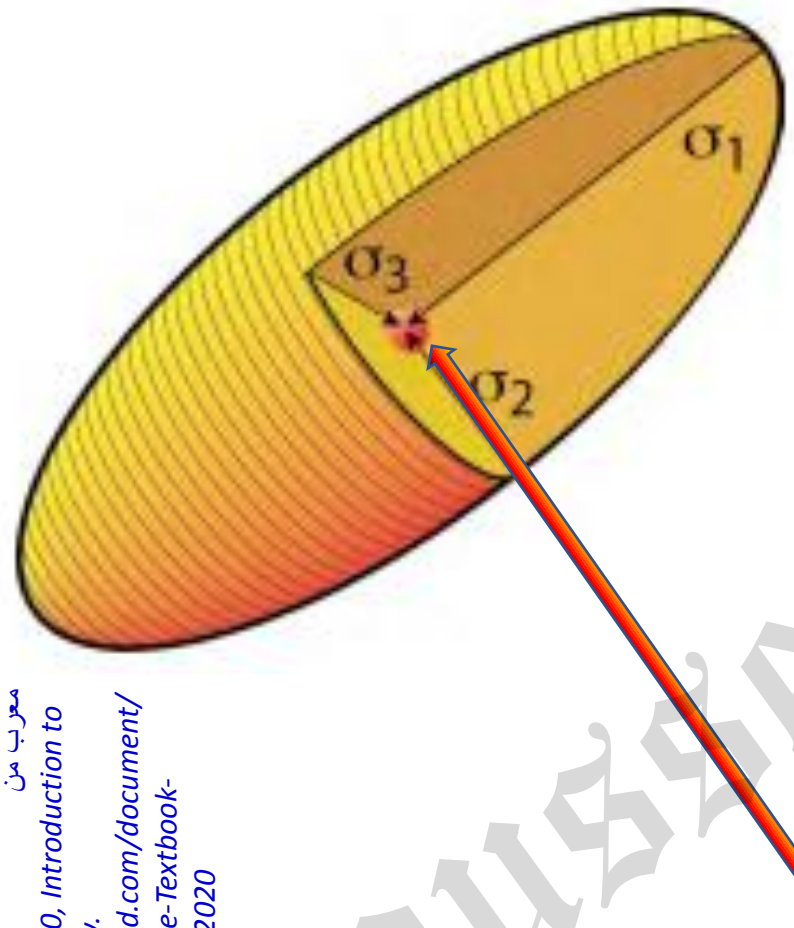
Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology.
https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-iTunes-pdf, 17.01.2020

فإن كان الجذب المؤثر على سطح ما غير متوازن (مضطرب) unbalanced فلن يتسبب بتشكل إجهاد. وبالتّالي فإن مفهوم الإجهاد لا ينطبق إلا على جسم في حالة توازن equilibrium، موجود إما في حالة سكون أو في حالة حركة مستقيمة متجانسة.

نظراً لكون السطح في حالة سكون، فإن هذين الجذبين على جانبي سطح ما لهما نفس المقادير (أي نفس الأطوال) ولكن منحًييهما متعاكسان.

يتغير مقدار ومنحى الإجهاد بتغير منحى السطح الصغير. فإن كان بالإمكان قياس منحى الإجهاد وطوله أثناء دوران السطح حول مركزه، فسيكون ممكناً إدراك أن أطراف الإجهاد النهائية سترسم **إهليلج إجهاد** يتحدد بثلاثة إجهادات σ1، σ2، σ3 رئيسة متعامدة (أي 3 أزواج شد متساوية لكنها متعاكسة) وبحيث يكون σ1 ≥ σ2 ≥ σ3. ولا يوجد سوى **ثلاثة مواضع** على السطح يكون الإجهاد فيها **عمودياً**، وبحيث تكون σ1، σ2، σ3 هي أشعة (متجهات) الإجهاد العمودية.

تتميز حالة الإجهاد المؤثرة على نقطة مادية بكونها إهليلجية وتدعى هذه الحالة: **إهليلج الإجهاد *stress ellipsoid*** والذي يتحدد من خلال ثلاثة محاور متعامدة تدعى الجهود الرئيسة σ1 و σ2 و σ3 وجميعها ذات مقادير موجبة (أي تتجه نحو النقطة المادية). تنتج البنى المتطاولة عن تحرك أو انسياب المادة في منحى الإجهاد الأقل. تكون حالة الإجهاد على سطح الأرض أندرسونية ***Andersonian*** أي أن أحد محاور الجهود الرئيسة شاقولياً (أي نحو مركز الأرض).



معرب من
Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology. https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-iTunes-pdf, 17.01.2020

Dr. Youssef Ramadan

تتميز حالة الإجهاد المؤثرة على نقطة في الأرض بإهليلج إجهاد. وأبسط شكل لإهليلج الإجهاد هو شكل كرة أي أن $\sigma 1 = \sigma 2 = \sigma 3$. وفي مثل هذه الحالة تكون الجهود متساوية في كافة المناحي وتكون حالة الإجهاد متماثلة (موحدة) الخواص isotropic، وتدعى هذه الحالة هيدروستاتيكية أو ليثوستاتيكية. ومقدار الإجهاد (أي نصف قطر الكرة) هو ببساطة الضغط الناتج عن وزن عمود الصخر الموجود فوق النقطة المدروسة. وهذا الضغط، الذي يسمى غالبا الضغط الحاصر confining pressure، متساوي الشدة في جميع المناحي ويتحدد قدره من خلال جداء: $\rho.g.z$، حيث ρ الكثافة، و g تسارع الجاذبية و z العمق. ولا يتسبب الضغط الليثوستاتيكي بحدوث تشوه.

وعندما تكون حالة الإجهاد متباينة الخواص anisotropic، يمكن تحليل إهليلج الإجهاد إلى:

- مركبة إجهاد موحد الخواص *isotropic stress*

$$\sigma i = (\sigma 1 + \sigma 2 + \sigma 3) / 3$$

- ومركبة إجهاد منحرف *deviatoric stress*.

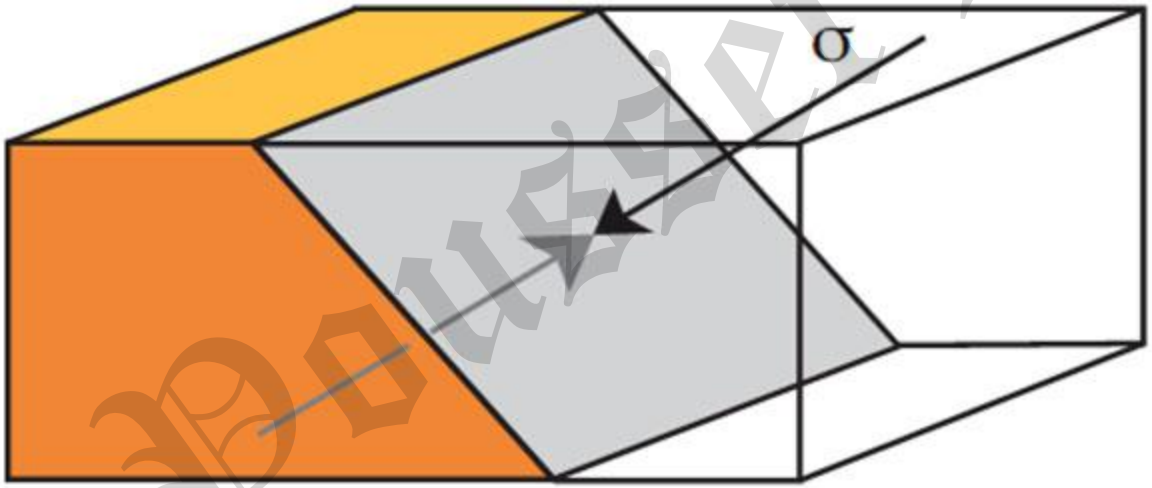
و يعبر هذا الإجهاد في هذه الحالة عن الفرق بين الإجهاد الكلي والإجهاد المتماثل الخواص، وهو الإجهاد المسبب للتشوه.

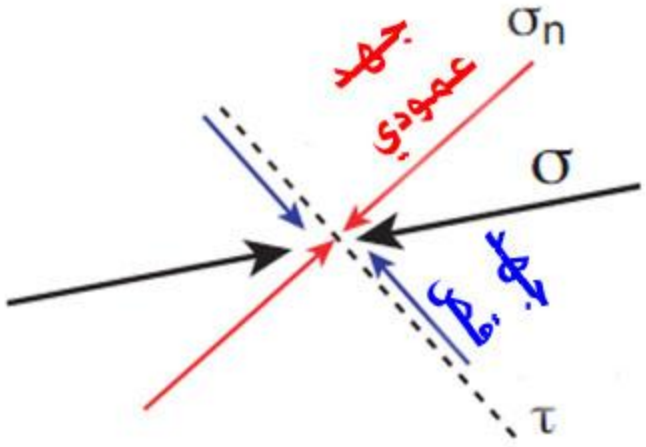
Yousef Rajeh

يتم تمثيل الإجهاد المؤثر على سطح فالق موجود مسبقاً بزوج أشعة (متجهات) جذب لهما نفس المقادير (أي الطول) إنما لهما اتجاهان متعاكسان.

وللتبسيط، يمكن تحليل هذا الإجهاد إلى: مركبة إجهاد قص (τ)، ومركبة إجهاد عمودي (σn) يمثل كلاهما بشعاعين (متجهتين). يميل الإجهاد العمودي إلى منع حدوث تصدع نظراً لكونه يدفع كلا الكتلتين تجاه بعضهما بعضاً. وعلى النقيض يحرض إجهاد القص حدوث تصدع.

الجهد **Stress** هو زوج جذب **Traction** يؤثران على سطح





Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology. معرب عن
https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-iTunes-pdf, 17.01.2020

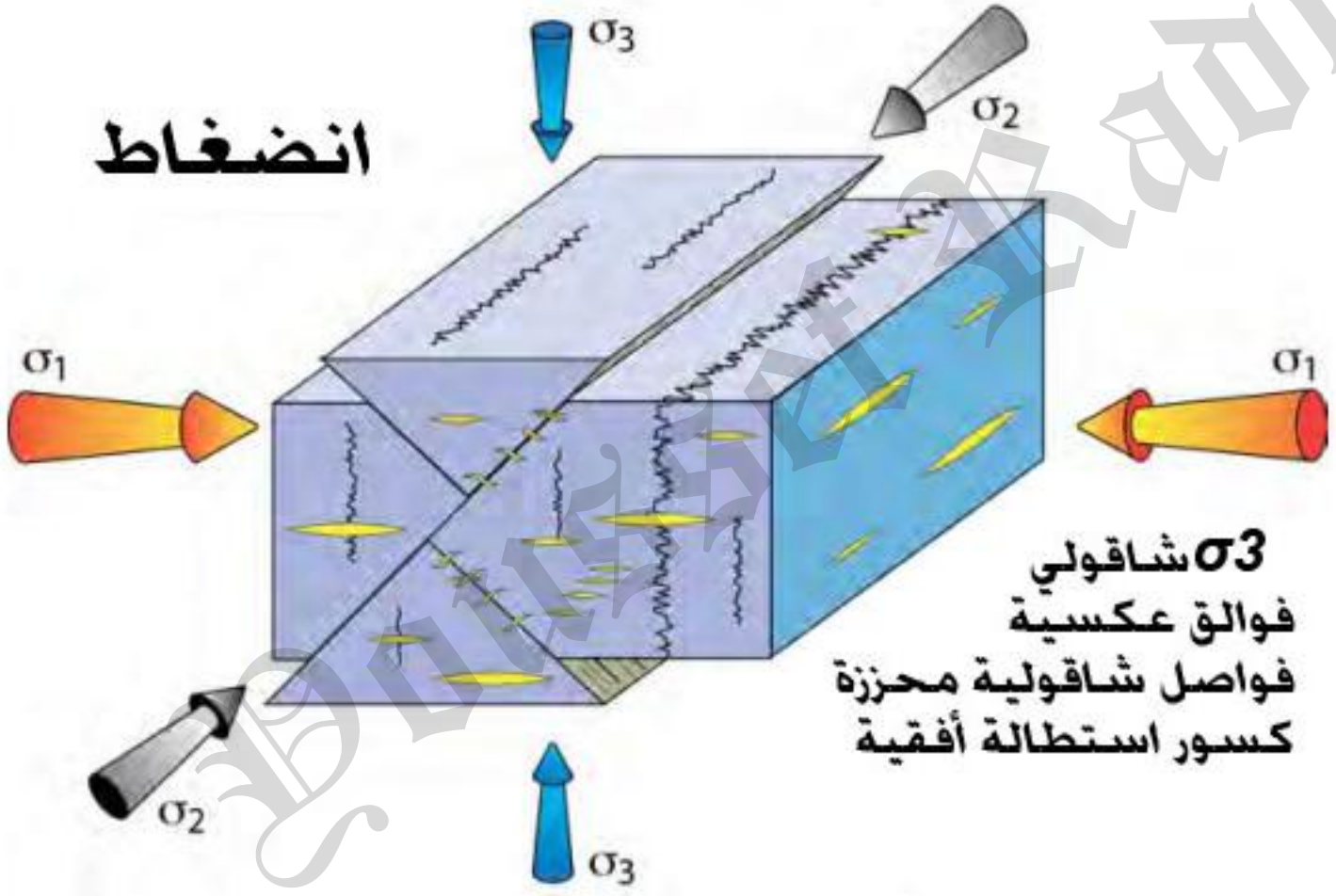
Yousef Kabbani

تحليل الإجهاد القديم Analysis Paleostress

يمكن حقلياً تحديد منحى إهليلج الإجهاد القديم paleostress المتسبب بتشكل الفواصل والكسور والفوالق، من خلال العلاقات بين منحى إهليلج الإجهاد و منحى الفواصل الستيلوليت ية، والكسور القصية، والكسور الشدّية التي تتطور استجابة للإجهاد المطبق، توضحها المخططات الآتية:

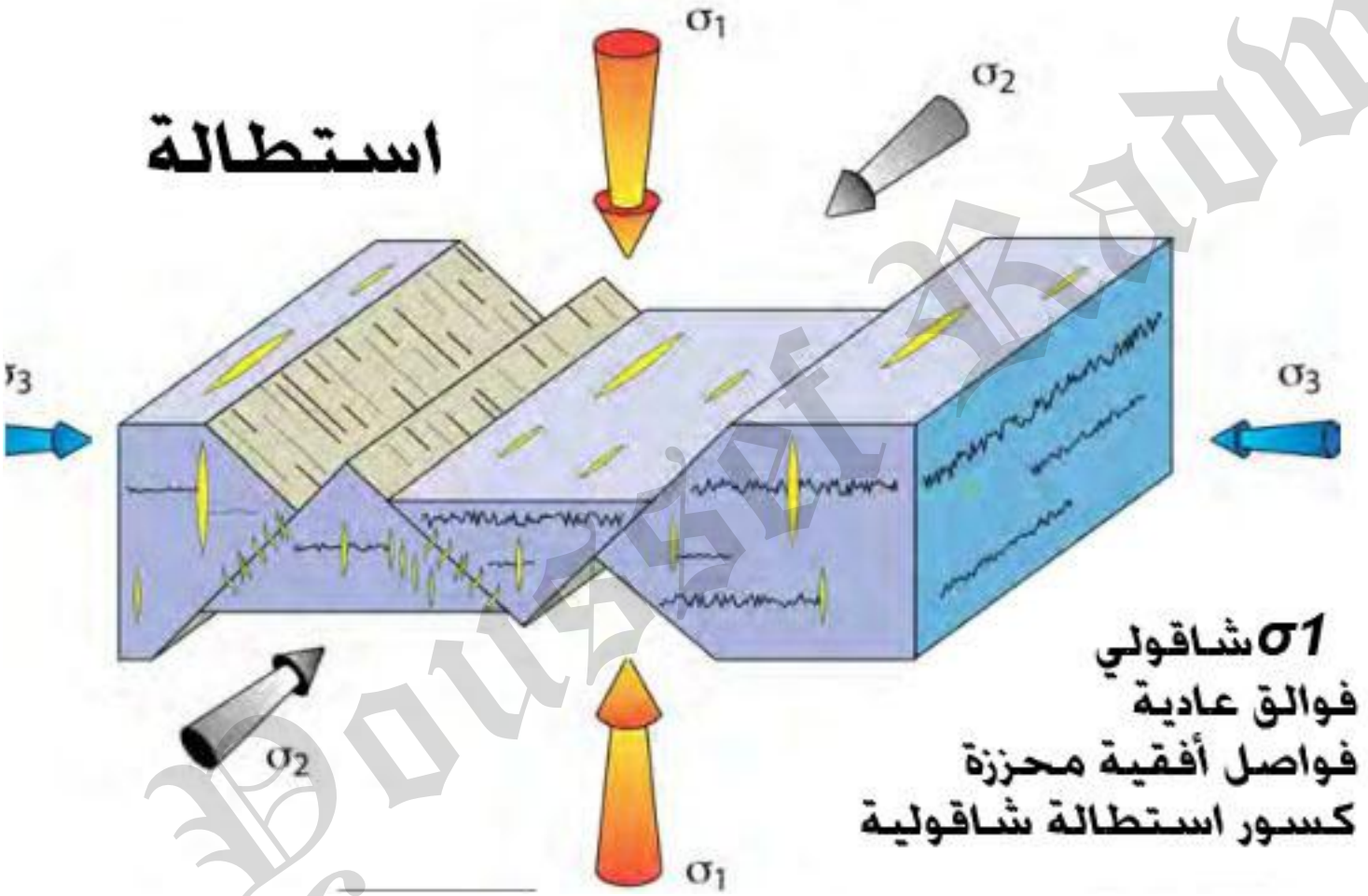
Youssef Kassem

1. تتطور بنى دقيقة بتأثير نظام تكتوني انضغاطي compressional tectonic regime والذي يتميز عن منظور الإجهاد stress، بأن σ3 هو محور الإجهاد الشاقولي. أما من منظور الانفعال strain، يتميز النظام التكتوني الانضغاطي بفواصل محززة شاقولية وكسور شدية أفقية. تشير المخاريط الفواصل الستيلوليتية إلى اتجاه σ1، بينما يكون المنحى المعامد للكسور الشدية موازياً لـ σ3، ويكون الإجهاد المتوسط σ2 عمودياً على كلٍ من من σ1 و σ3.



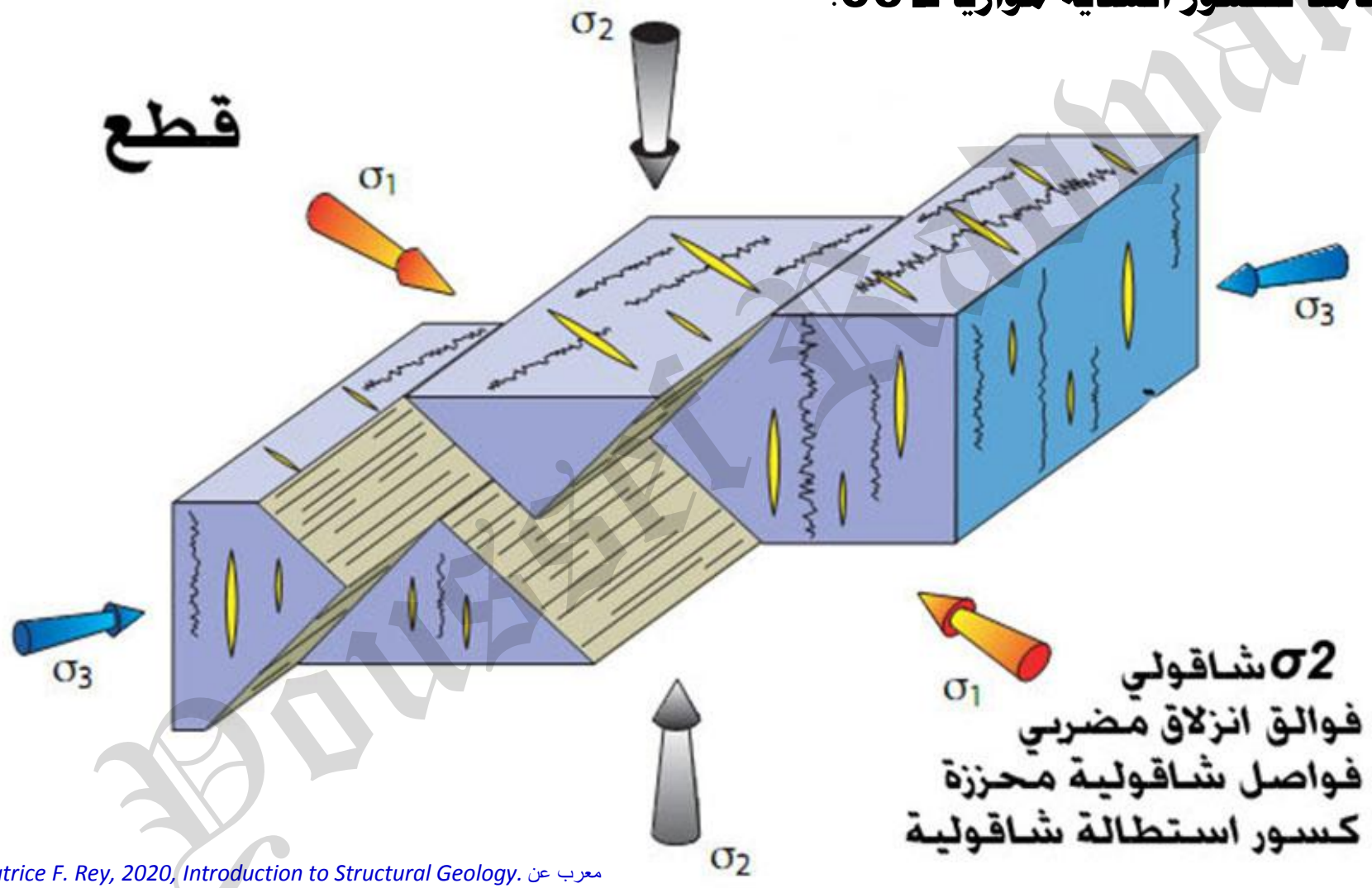
Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology. معرب عن https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-iTunes-pdf, 17.01.2020

2. وفي النظام التكتوني الشدّي extensional tectonic regime، يكون σ1 شاقولياً. لذلك تكون الفواصل الستيلوليتية أفقية، بينما تكون الكسور الشدّية شاقولية. ويلاحظ أن الفواصل الستيلوليتية الأفقية أما الكسور فشاقولية.ويمكن أن بتطورا أيضاً نتيجة تراص الرسوبات أثناء طمرها تحت الرسوبات الأحدث.



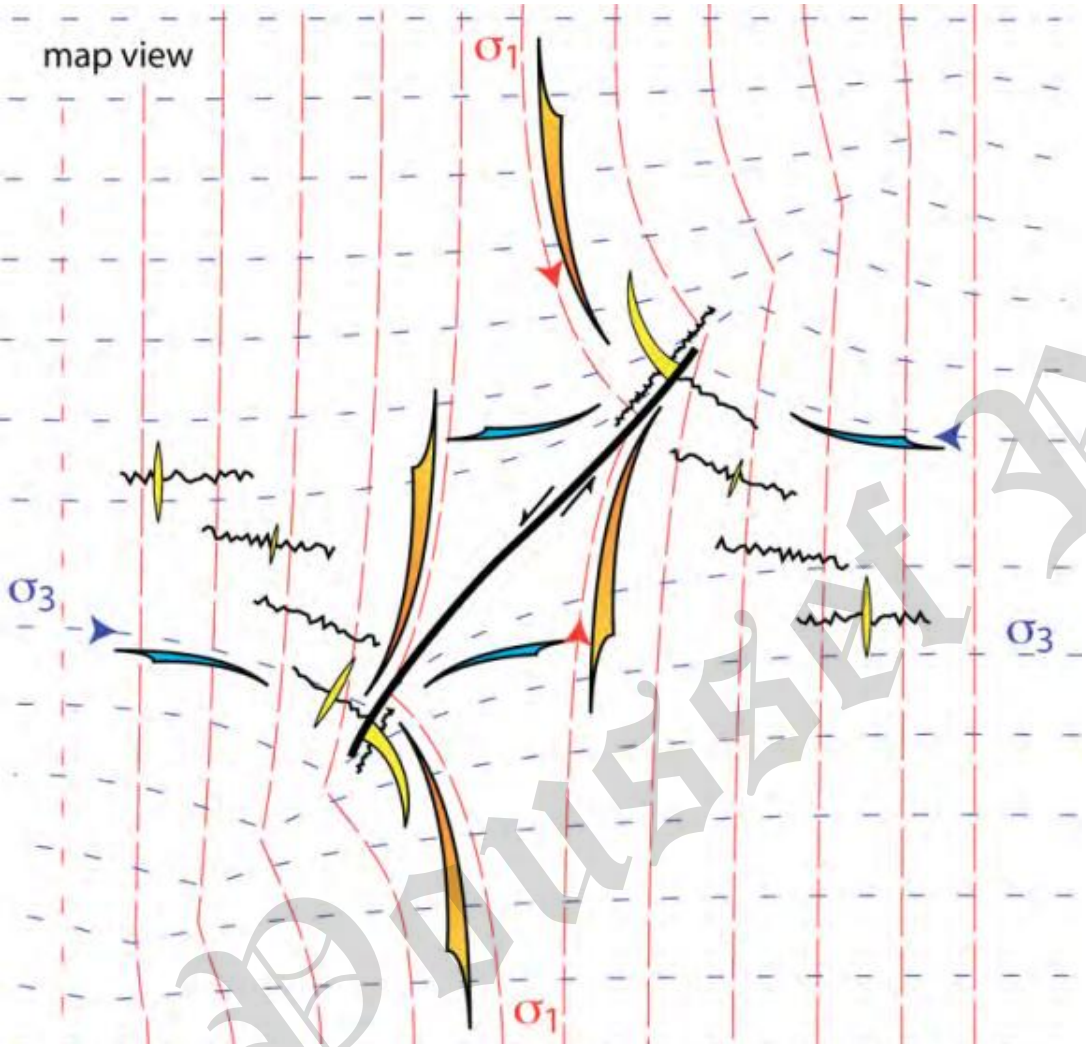
Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology. معرب عن
https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-iTunes-pdf, 17.01.2020

3. أما في النظام التكتوني القاطع transcurrent tectonic regime (المائل) فيكون σ2 شاقولياً، لذا تكون الفواصل الستيلوليتية شاقولية كما تكون أيضاً الكسور الشدية شاقولية. تشير مخاريط الفواصل الستيلوليتية إلى اتجاه σ1، بينما يكون المنحى المعامد للكسور الشدية موازياً لـ σ3.



معرب عن *Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology.*
https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-iTunes-pdf, 17.01.2020

اضطراب الإجهاد



1. ينتقل الإجهاد عبر الصخور دون اضطراب طالما كانت المادة التي ينتقل عبرها متماثلة (موحدة) الخواص الميكانيكية. ولكن ذلك نادر في الطبيعة. ومن ثم، يتغير مقدار ومنحى حقل الإجهاد بجوار النطاقات متباينة الخواص الميكانيكية كالفوالق.

2. يوضح الرسم المجاور هذه النقطة. إذ يظهر الدوران التدريجي لكل من الكسور الشدية والفواصل المحززة بأن σ1 (مسارات حمراء) و σ3 (مسارات زرقاء) تدور حول σ2 بجوار الفالق .

3. يمكن أن تتسبب تداخلات (تراكبات) الفوالق باضطرابات إجهاد شديدة في منطقة تداخلها كما يبدو في الشكل.

Dr. Yousef Radwan

Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology. معرب عن
https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-iTunes-pdf, 17.01.2020

الفصل الثالث

الانفعال وتحليل الانفعال

Strain and Strain Analysis

Youssef Ramadan

انفعال مستمر Continuous strain
انفعال متقطع Disontinuous strain

غالباً ما تقسم سطوح الانقطاعات (فوالق ونطاقات قص) الأقاليم الكبرى إلى أقاليم أصغر يكون فيها التشوه مستمرا

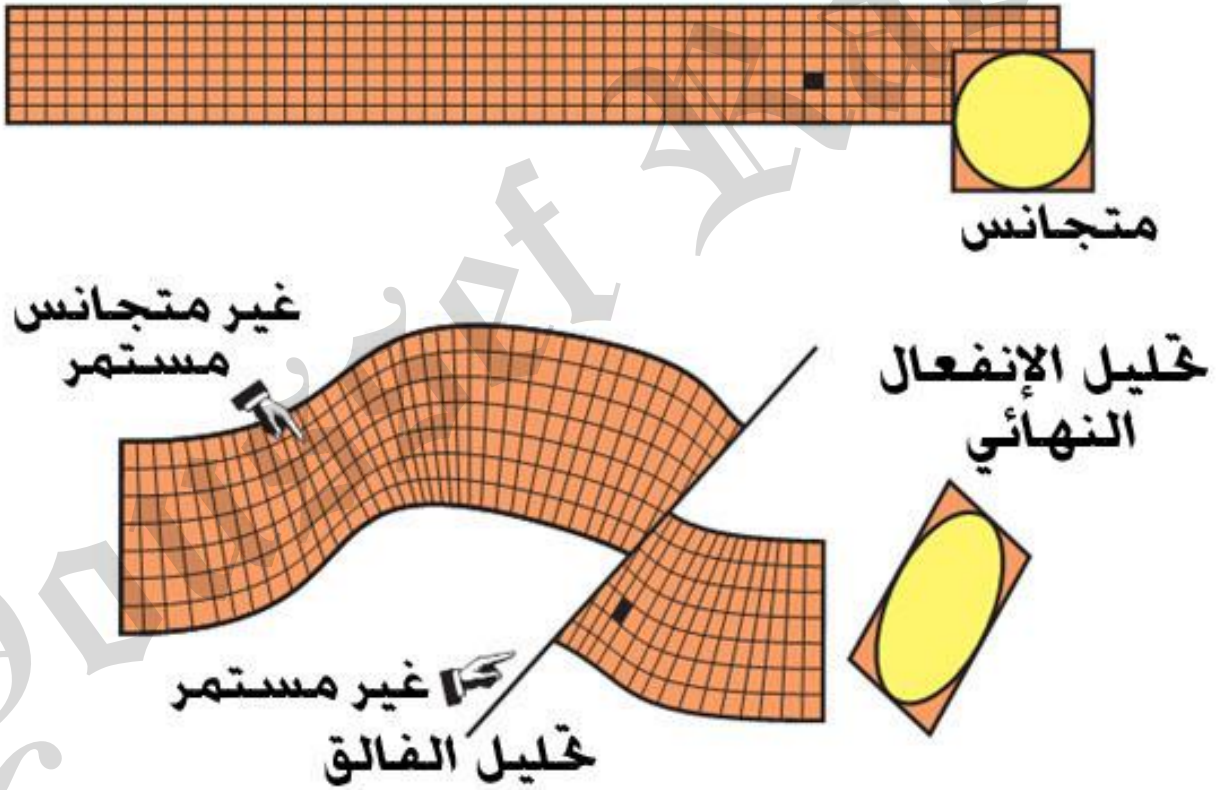
يسمح تحليل الانفعال النهائي ***finite strain*** بتوصيف الحالة النهائية للإنفعال المستمر ***continuous strain*** في بعض الأقاليم مسبباً فيها تشوها (***deformation***) مستمراً (طيات).

في حين يرتبط تحليل الانفعال المتقطع discontinuous strain بسطوح الانقطاع (فوالق) وكلا التحليلان ضروريان لتوصيف حقول الانفعال النهائي تماماً.

يتكون تحليل الانفعال النهائي من قياس محلي لاتجاه التقصير والتطاول الأعظميين اللذان يميزان هندسة الانفعال (تسطيح ***flattening***، والتقلص ***constriction***، ومستوى الانفعال، إلخ)، تحديد شدة الانفعال، وتقييم تاريخ الانفعال (اعتصار أو قص شديدين)، وتحديد حركية الانفعال أنى كان ذلك ممكناً.

بينما يتكون تحليل الفوالق ونطاقات القص من توثيق محلي لاتجاهاتها (مضرب، زاوية واتجاه الميل)، ولثخانتها، وهندستها (مستوى الانقطاع الوحيد ، ولشبكة نطاقات القص المتداخلة أو الفوالق القصيفة، ولأقسام الفوالق المتراكبة، إلخ)، ولحركيتها ولتاريخها الحركي (الاتجاه النسبي للإزاحة عبر الزمن)، ولمقدار إزاحتها، وصولاً أخيراً لاشتقاق اتجاه الإجهاد القديم ***paleostress*** الذي تسبب بتشكل نطاقات الفالق أو القص الملاحظة حقلياً عبر الزمن الجيولوجي.

يُظهِر الرسم كتلة قبل التشوه وبعده. تم استيعاب التقصير عبر فالق وتشوه داخلي معقد نوعاً ما ولكنه مستمر. ولوصف التشوه الداخلي للكتلتين نقسمهما إلى عدد من الخلايا الصغيرة للتمكن من دراسة الانفعال فيها من خلال مقاربة أولى يكون فيها الانفعال متجانس (أي لا يوجد فيها تدرج انفعال)، وهنا فإن كل كرة وهمية محتواة ضمن كل خلية من الكتلة قبل التشوه ستتحول إلى شكل إهليلجي يمكن من خلاله تمييز وتوصيف الانفعال بسهولة. ولا يكون تحليل الانفعال النهائي صحيحاً إلاّ إذا درس بمقياس يكون فيه الانفعال متجانس. إن قياس خصائص الانفعال في عدد كبير من الخلايا عبر كامل الكتلة يميز حقل الانفعال النهائي تماماً.



Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology. معرب عن
https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-Tunes-pdf, 17.01.2020

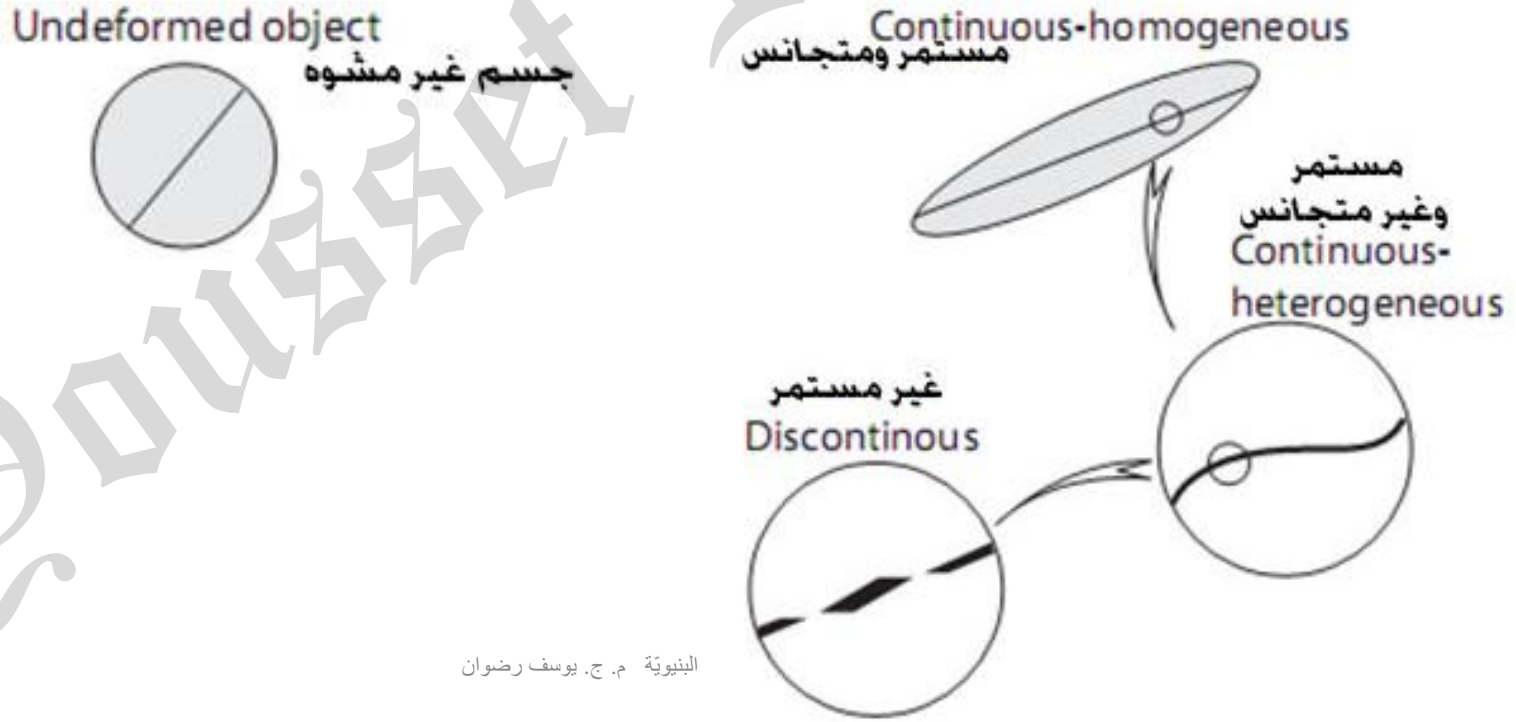
انفعال متجانس homogeneous strain مقابل انفعال غير متجانس heterogeneous strain

ليس مصطلحا "التشوه" و"الانفعال" مترادفين في الجيولوجيا البنيوية.

إذ يتضمن مصطلح "التشوه" *deformation* الانتقال، والدوران، وتغير الحجم والشكل.

بينما يشير مصطلح "انفعال" *strain* إلى تغير الشكل فقط، والمصطلح المرادف له سيكون بالتالي" التواء "*distortion*"

لذلك، فإن الانفعال هو مركبة واحدة فقط من مركبات التشوه. ومن الصعب حقلياً تقييم الانتقال والدوران وتغير الحجم. فتحليل الانفعال يركز على توصيف تغير الشكل.



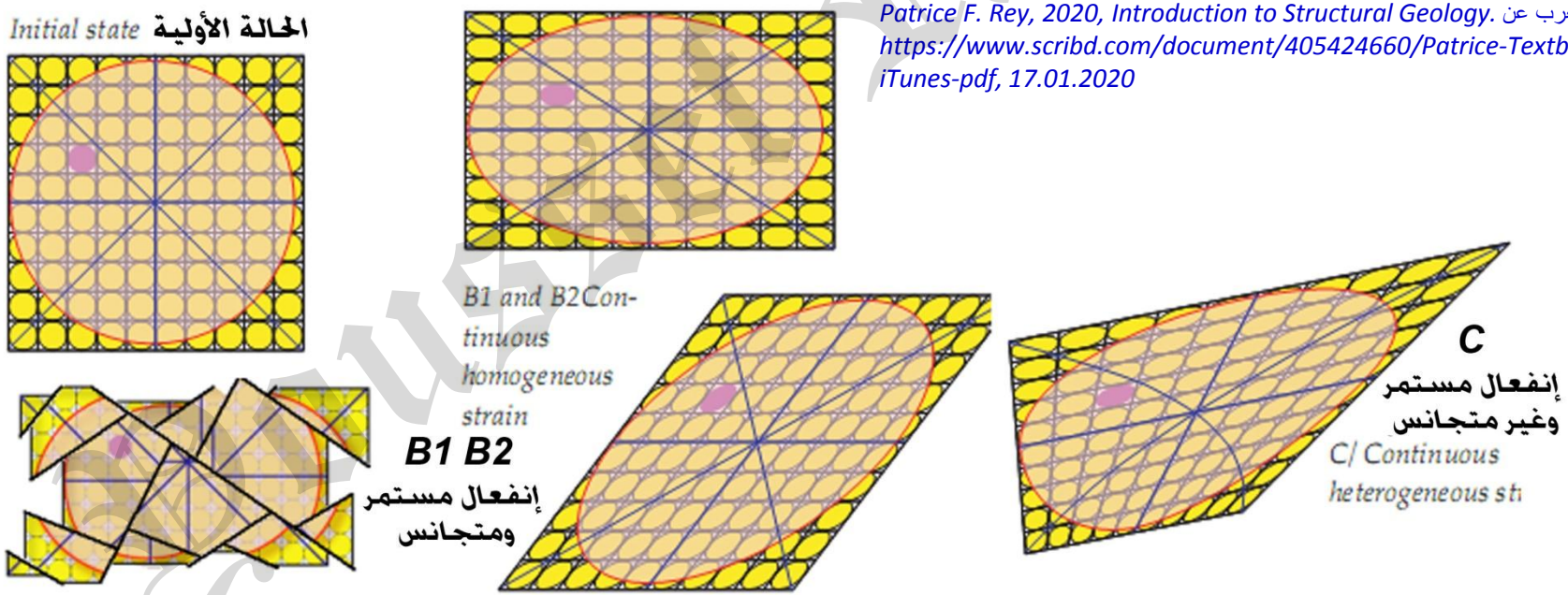
Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology. معرب عن
https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-iTunes-pdf, 17.01.2020

Youssef Radwan

الوصف الهندسي للانفعال geometric description of strain

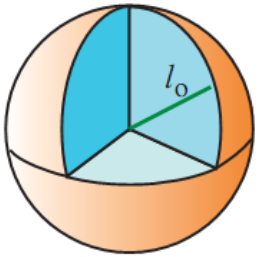
تتسبب الفوالق والكسور بحدوث انفعال متقطع. وفي هذه الحالة، يتم تقييم الانفعال عبر وصف شبكة الفوالق والكسور وكذلك دوران وانتقال الكتل الفردية.

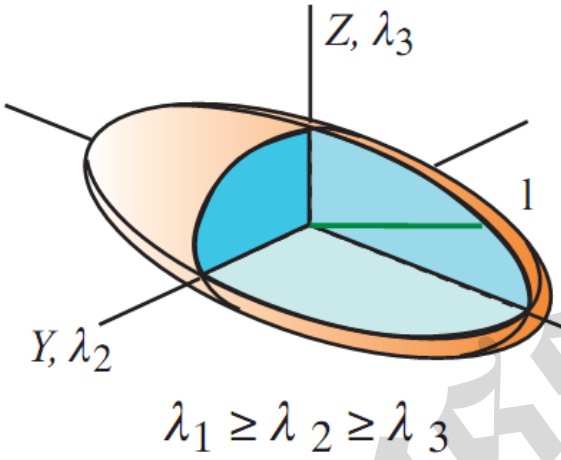
أما عندما يتضمن الانفعال انسياباً "لدناً" عندها يُقال أن الانفعال مستمر (الحالتان B و C). ويكون الانفعال هو ذاته في أي موضع من الجسم المشوه (أي لا يوجد تدرج انفعال كما في B، ويوصف بالتالي بأنه متجانس). وعلى العكس، إذا اختلف شكل أو شدة الانفعال من مكان إلى آخر، عندها سيكون هناك تدرجات انفعال ويوصف الانفعال بأنه غير متجانس (الحالة C).



معرب عن *Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology.* *https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-iTunes-pdf, 17.01.2020*

إهليلج الانفعال النهائي
finite strarin ellipsoid





$$K = \frac{ln\,[\lambda_1/\lambda_2\,]}{ln\,[\lambda_2/\lambda_3\,]}$$

$$D = \sqrt{[\,ln\,[\lambda_1/\lambda_2\,]\,]^2 + [\,ln\,[\lambda_2/\lambda_3\,]\,]^2}$$

عندما يكون الانفعال متجانساً، فسيحول التشوه شكلاً كروياً إلى شكل إهليلج منتظم (3 محاور عمودية λ1≥λ2≥λ3). يسمى هذا الشكل إهليلج الانفعال النهائي Finite Strain Ellipsoid (FSE) والذي يمكّن من وصف الانفعال النهائي من حيث الشكل والحجم بسهولة .

أما عندما يكون الانفعال غير متجانس فإنه سيحول شكلاً كروياً إلى شكل غير منتظم يشبه حبة البطاطا "potatoid" يصعب توصيفه للغاية. ولكن ولحسن الحظ، يمكن دائما إيجاد مقياس يكون فيه الانفعال بالمقاربة الأولى متجانساً.

يميز إهليلج منتظم كلياً بمؤشرين K و D يحدد أولهما K نمط الانفعال (شكل الإهليلج) ويحدد ثانيهما D مقدار الانفعال (أي مقدار ابتعاد هذين المؤشرين عن الشكل الكروي الأولي المثالي). وهذان المؤشران تابعان للنسبتين λ1/λ2 و λ2/λ3

والأهم من ذلك، أن K و D لا يتطلبان معرفة نصف قطر الكرة الأولية، إنما يتطلبان فقط معرفة المحاور الرئيسة للانفعال الإهليلجي.

معرب عن Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology, https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-iTunes-pdf, 17.01.2020

Dr. Nasser Kabani

مخطط فلين Flinn Diagram

يسمح مخطط فلين Flinn بتمثيل كافة أنماط الإهليلجيات المنتظمة. وتمثل النسبة λ2/λ3 في الرسم البياني الآتي محور السينات abscissa بينما تمثل λ1/λ2 محور العينات ordinate. ويقيس التابع اللوغاريتمي logarithm function بسهولة نسب محاور الانفعال. أما المتغير D parameter فهو المسافة ما بين أصل الرسم البيانّي (الذي يتمثل بالكرة الأولية) وبين الإهليلج (ملون بالأحمر في الرسم البياني). بينما المتغير K يمثل ميل محور السينات عن الخط الذي يصل الإهليلج بأصل الرسم البياني.

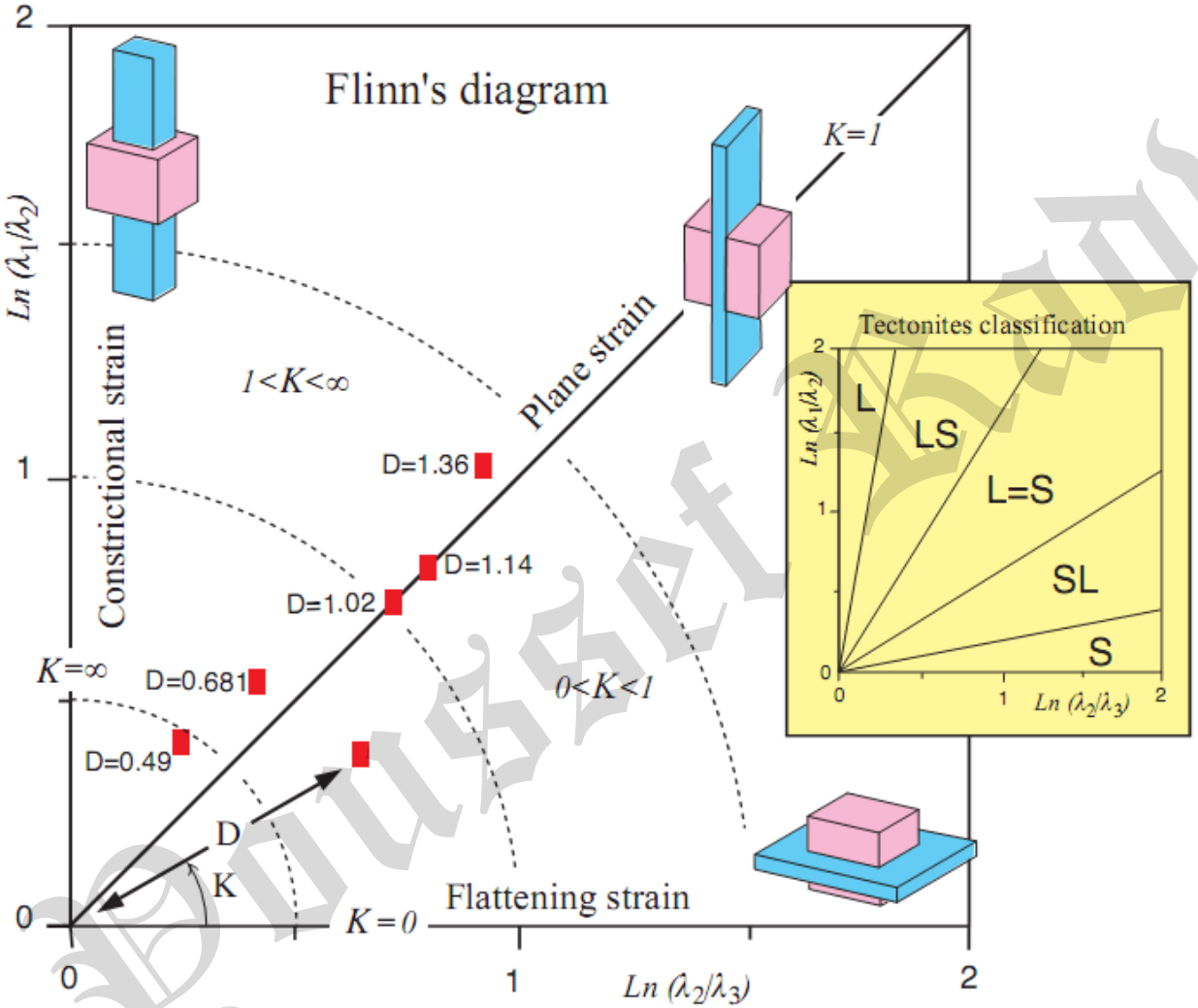
تتشكل إهليلجيات انبوبيّة الشكل على امتداد محور العينات (ما يعني أن K في اللانهاية) بينما يوصف الانفعال بأنه انقباضي.

تتشكل إهليلجيات قرصية الشكل على امتداد محور السينات (K = 0) ويوصف الانفعال هنا بأنهٍ تسطحي. يميز الانفعال المستوي (K = 1)الأشكال الإهليلجية التي يظل محور λ2 فيها ثابتا رغم الانفعال.

يعتمد النسيج المرتبط بالانفعال على شكل إهليلج الانفعال النهائي. تتسبب الإهليلجيات قرصية الشكل بتشكل تكتونايت (التكتونايت *صخور مشوهة إما بالتكتونيك أو بالاستحالة، ويعكس نسيجها تاريخ تشوهها*) من نمط S (شستزة (تورق) قوية، بدون تشكل خطوط)،

بينما تتسبب الإهليلجيات انبوبية الشكل بتشكل تكتونايت L (خطوط قوية، بدون شستزة)، في حين ينتج تكتونايت L=S نتيجة انفعال مستوي.

Flinn Diagram مخطط فلين



Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology. معرب عن
https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-iTunes-pdf, 17.01.2020

Boussif Kaman

تقانات تحليل الانفعال Strain Analysis Techniques

ابتكر الجيولوجيون البنيويون طرائقاً مختلفة لاستنباط Finite Strain Ellipsoid FSE من تحليل النسيج texture والقوام fabric الصخري.

طريقة فراي Fry

طريقة The Rf /Φ (Rfi)

طريقة تحليل النسيج

Dr. Yousef Rahman

طريقة فراي Fry

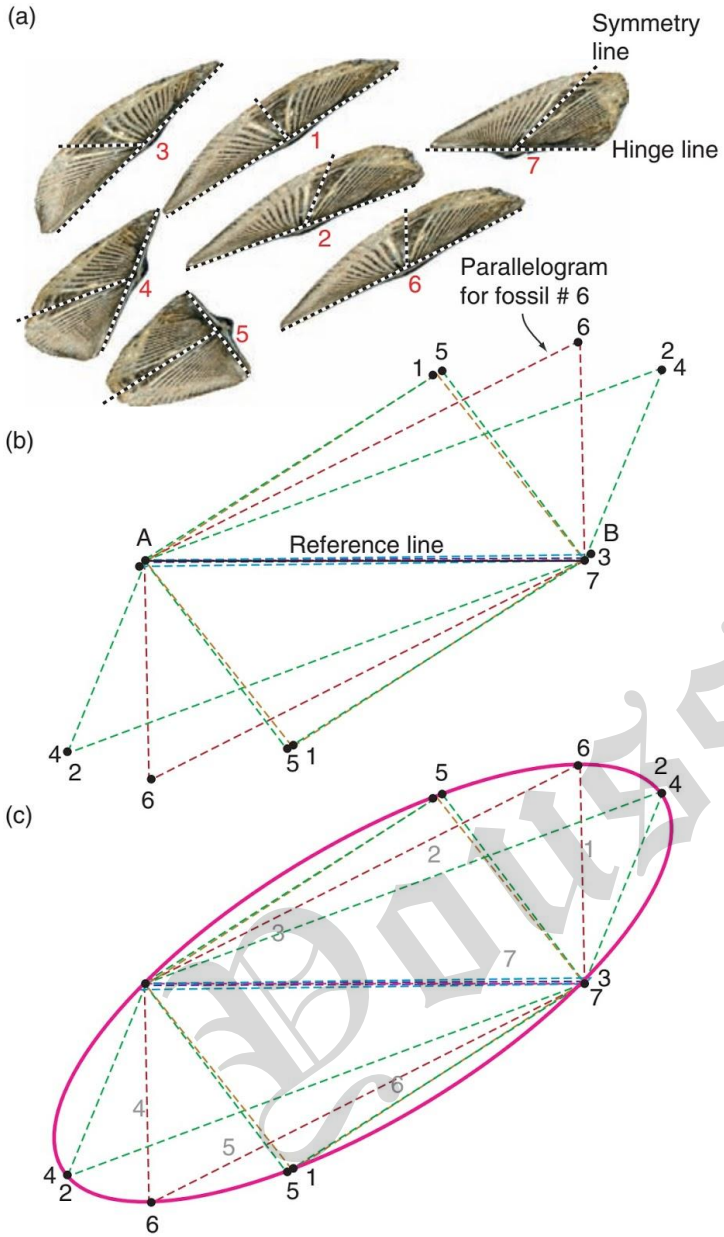
هي أحد أكثر الطرائق سهولة لتحديد الانفعال في الصخور، وذلك اعتماداً على دراسة جزيئات موزعة عشوائيا في أمية صخرٍ ما، ويمكن أن تكون هذه الجزيئات حبيبات كوارتز أو تجمعات كوارتز ضمن صخر الريوليتٍ، أو فلزات أخرى استحالية موجودة قبل حدوث الانفعال كفلز الغارنت (العقيق) ضمن صخور متحولة، أو حصى ضمن حجر رملي متماسك النسيج، إلخ.

والافتراضِ الرئيس هو انه ينبغي أن يكون تباعد هذه الجزيئات قبل التشوه متجانس الخواص إحصائيا، أي أن المسافة بين جزيئين لا تعتمد على الاتجاه الذي تقاس فيه المسافة. ومن طرائق إظهار ذلك استخدام ورق شفاف تسقط عليه مواضع الجزيئات (حمراء اللون في الشكل) المجاورة للجزئ المختار (بقعة بيضاء عند تقاطع الصليب في الشكل الآتي).

تكرر هذه العملية لأكبر عدد ممكن من الجزيئات. فتظهر الجزيئات على الشكل متوزعة حول دائرة يتحدد نصف قطرها بمتوسط المسافة بين الجزيئات، ما يدل على عدم وجود انفعال.

أما بعد التشوه، فيتباعد جزيئان متراصفان مع اتجاه λ1 عنِ بعضهما بينما يقترب جزيئان متراصفان مع اتجاه λ3 من بعضهما. فإن كان الانفعال متجانسا فستتحول الكرة إلى إهليلج.

مثال على طريقة فراي Fry

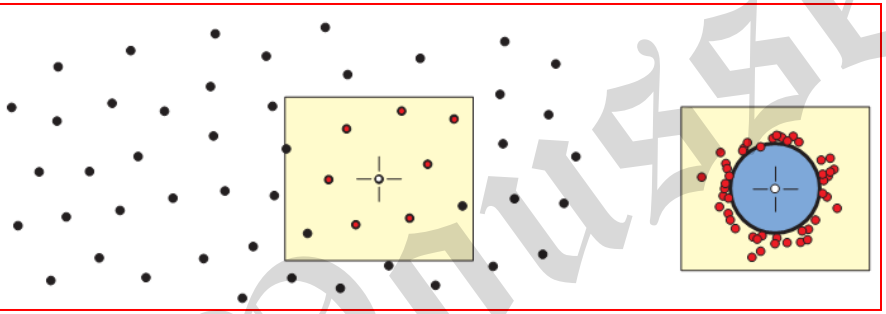


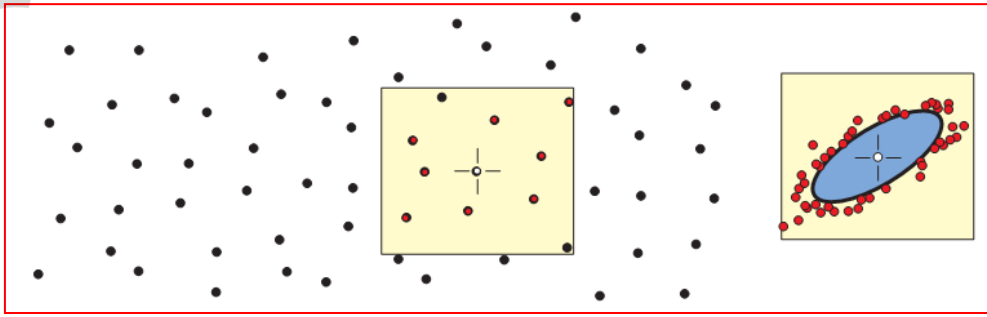
استخدام تحديد الانفعال في الصخور، وذلك اعتماداً على دراسة مستحاثات براكيوبود موزعة عشوائيا في أمية صخر رسوبي، حيث تسقط مواضع أطرافها على ورق شفاف تكرر هذه العملية لأكبر عدد ممكن من مستحاثات البراكيوبود المشوهة. ويحدد اتجاه λ1 من اعتبار من خط يمتد من عقفة المستحاثة إلى نهايتها المقابلة لها بعضهما ويكون اتجاه λ3 هو العمودي عليها راسمة إهليلج الإجهاد.

Boussef Bouaziz

لتحديد المحاور الثلاثة لهذا الإهليلج يعمل الجيولوجيون البنيويون بالتتابع على مقطعين متعامدين (مقاطع شرائح صخرية رقيقة thin sections، أو من مقاطع صخرية من عينات يدوية قصت بمنشار ميكانيكي cut handspecimen، أو لصور فوتوغرافية photos) تحوي محورين من محاور الانفعال الرئيسة الثلاثة. يتم إسقاط المسافة بين جزيء محدد (يوضع في مركز الصليب) وبين الجزيئات المجاورة له على ورق شفاف. يتم تحريك الورقة والصليب بالتتابع على أكبر عدد ممكن من الجزيئات وإسقاط مواقع أقرب جزيئات مجاورة للجزيء المحدد. تظهر المخططات على اليسار مقطعاً ثنائي الأبعاد عبر صخر مشوه. تبدو الجزيئات من النظرة الأولى على المخططات كأنها موزعة عشوائياً.

يكشف تحليل فراي أن العينة في الواقع قد تشوهت بشكل كبير، نظراً لأن الجزيئات المجاورة موزعة حول إهليلج. أما مقياس شدة الانفعال فهو نسبة المحور الطويل إلى المحور القصير. ومن خلال إسقاط النتائج التي تم الحصول عليها من مقطعين متعامدين يحوي كل منهما اثنين من المحاور الرئيسة الثلاثة على مخطط فلين، يمكن تحديد الانفعال ثلاثي الأبعاد تماماً.

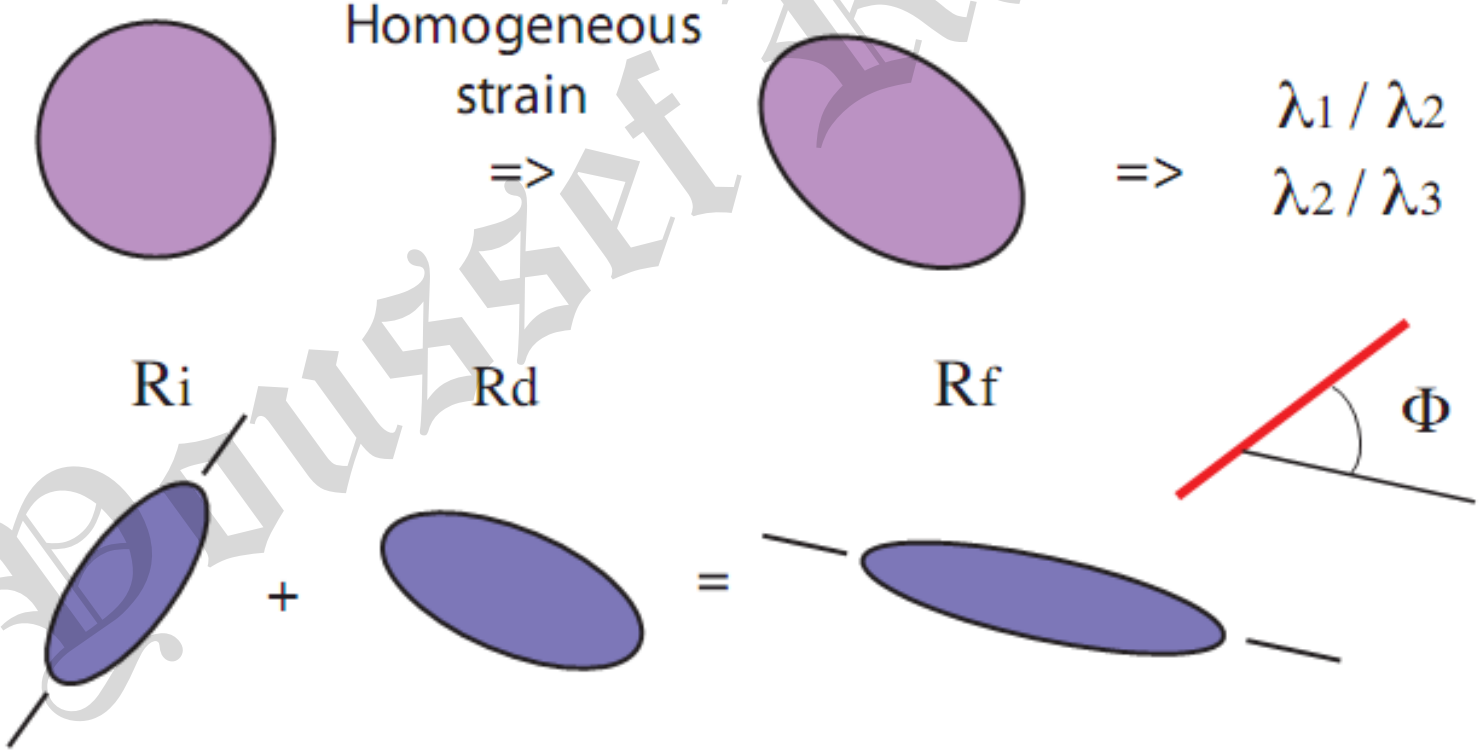




معرب عن *Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology.* *https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-iTunes-pdf, 17.01.2020*

The Rf /Φ (Rfi) طريقة

يمكن تقدير شدة الانفعال من خلال شكل الأجسام شبه الكروية القابلة للتشوه. تتصف تجمعات حصى الكوارتز في الصخور الغرانيتية، والحصى في الكونغلوميرا، والفراغات الغازية في البازلت بشكل شبه كروي. لكنها تتحول بعد انفعال متجانس إلى إهليلجيات. و يمكن تقدير شدة الانفعال من خلال قياس نسب محاور هذه الأشكال الإهليلجية وإسقاطها على مخطط فلين،



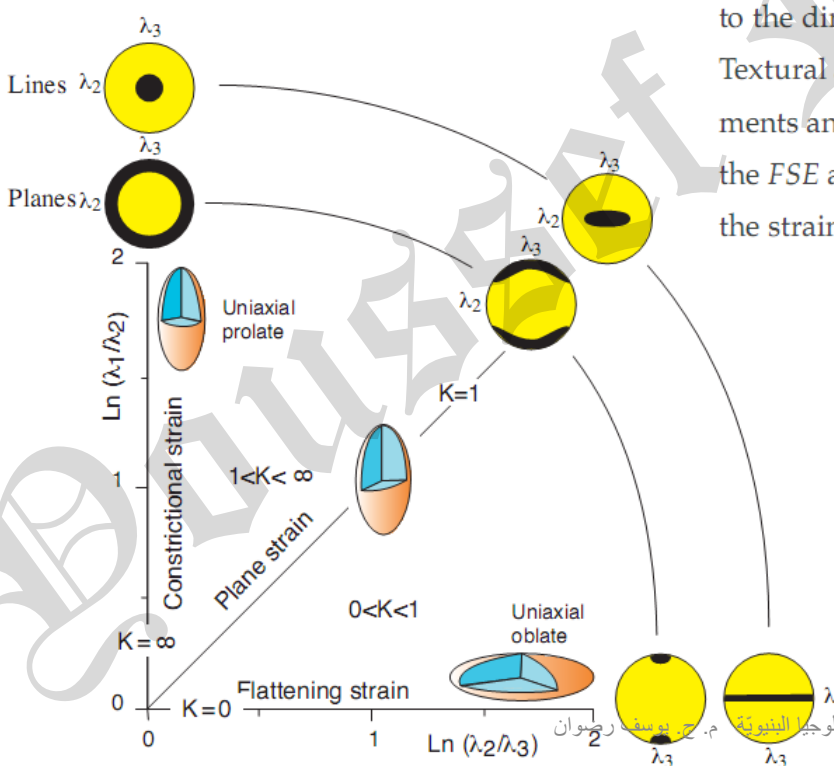
Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology. معرب عن https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-iTunes-pdf, 17.01.2020

Boussef Kaabar

طريقة تحليل النسيج

تكون الجزيئات المستوية كاليكا قبل التشوه موزّعة عشوائياً، ويكون توزع أقطابها على شبكة مجسمة متجانسا. ومع استمرار التشوه، تدور الجزيئات بحيث تميل أقطابها إلى التراصف مع اتجاه التقصير الأعظمي λ3. ويمكن إثبات أن اتجاه الجزيئات المستوية بعد التشوه هو تابع بسيط لاتجاهها الأولي وللنسب المحورية (λ1/λ3 ;λ2/λ3 ;λ1/λ2) لإهليلج الانفعال النهائي.

يؤثر دوران مماثل على العناصر الخطية للتوازي مع اتجاه أقصى استطالة (λ1). يتكون التحليل النسيجي من إسقاط أقطاب عناصر مستوية وعناصر خطية على شبكة مجسمة stereonet. يرتبط توزعها بشكل FSE بينما ترتبط شدة عدم تجانس الخواص بشدة الانفعال.



to the direc
Textural an
ments and
the *FSE* and
the strain.

Dr. Yousef Alrabadi

معرب عن *Patrice F. Rey, 2020, Introduction to Structural Geology.* https://www.scribd.com/document/405424660/Patrice-Textbook-iTunes-pdf, 17.01.2020

الفصل الرابع

الكسور والفوالق

Fractures and Faults

Dr. Yousef Radwan