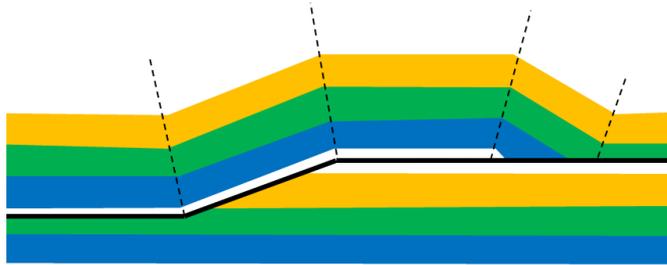


الدكتور عبد الناصر دركل  
أستاذ في قسم الجيولوجيا - كلية العلوم  
جامعة دمشق



1439 هـ

2018 م

البيولوجيا البنيوية - الجزء العملي



# **الجيولوجيا البنيوية**

**الجزء العملي**

**الدكتور عبد الناصر دركل**

**أستاذ في قسم الجيولوجيا - كلية العلوم**

**جامعة دمشق**

**1439 هـ**

---

**2018 م**

إهداء  
إلى طلاب مجلس الأخصائين

## الفهرس

رقم الصفحة

### الباب الأول: الإجهاد والانفعال

1. الإجهاد..... 11
2. التشوه التكرسي..... 29
3. قياس الانفعال..... 53
4. النماذج الانسيابية (الريولوجية)..... 91

### الباب الثاني: الوضعيات الفراغية للعناصر البنيوية

5. العناصر البنيوية..... 103
6. البوصلة الجيولوجية..... 109
7. الوضعيات الفراغية المختلفة للطبقات..... 119
8. الميل الحقيقي والميل الظاهري..... 131

### الباب الثالث: ثخانة الطبقة وعمقها

9. ثخانة الطبقة..... 149
10. العمق..... 163

### الباب الرابع: الطيات

11. التحليل الهندسي للطيات..... 171
12. تصنيف الطيات بحسب طريقة تغير ثخانة الطبقة..... 205
13. تصنيف الطيات بطريقة متساويات الميل..... 213

### الباب الخامس: الصدوع

14. الصدوع وإزاحاتها..... 223

### الباب السادس: الشقوق، دراسة إحصائية

15. الدراسة الإحصائية للشقوق (مخطط الوردية)..... 283

### الباب السابع: تقانات الإسقاط الستيريوغرافي (الإسقاط المجسم)

16. الإسقاط الستيريوغرافي (الإسقاط المجسم)..... 301

17.	الإسقاط الستيريوجرافي للعناصر البنوية المستوية والخطية.....	309
18.	العلاقات بين المستويات والخطوط.....	319
19.	الميل الحقيقي والميل الظاهري.....	329
20.	الإسقاط الستيريوجرافي والإسقاط المحافظ على المساحة.....	333
21.	تحليل بنيات باستخدام الإسقاط الستيريوجرافي.....	339
<b>الباب الثامن: المقاطع العرضية في المناطق المطوية</b>		
22.	المبالغة الشاقولية.....	363
23.	إنشاء المقاطع العرضية.....	371
24.	المقاطع العرضية المتوازنة في مناطق الطي والتصدع التراكمي..	385
<b>الباب التاسع: الخرائط البنوية</b>		
25.	خطوط التسوية البنوية وخطوط تساوي الثخانة.....	409
<b>الباب العاشر: تكتونية الصفائح</b>		
26.	هندسية الصفيحة.....	425
27.	الصفائح في فضاء السرعة.....	467
28.	تكتونية الصفائح على سطح كرة.....	503
517.	المصطلحات.....	
531.	المراجع.....	

## مقدمة

تعد الجيولوجيا البنيوية Structural Geology واحدة من التخصصات الرئيسة لعلم الأرض. وهي تلعب دوراً أساسياً لدى إجراء الدراسات الجيولوجية المختلفة، وبخاصة منها مايتعلق بالنواحي التطبيقية والاقتصادية. كما أن مقرر الجيولوجيا البنيوية يعد واحداً من المقررات الأساسية التي لا بد من إدراجها في المناهج التدريسية لأقسام علوم الأرض في الجامعات العالمية. ومن هنا تأتي أهمية تضمين منهاج هذا المقرر بجزأيه النظري والعملي للمفردات التي تعطي الطالب "الجيولوجي" أساساً كافياً لأن يقوم بعد تخرجه بإجراء دراساته الجيولوجية على النحو المطلوب منه، أو أن يتابع تخصصه ودراسته العالية سواء في مجال الجيولوجيا البنيوية نفسها أو في مجال التخصصات الجيولوجية الأخرى. وفي هذا الإطار يأتي وضع هذا الكتاب الذي روعي في تأليفه أن يتضمن مسائل عملية متعددة ومتنوعة في مجال هذا التخصص المهم، حيث تمت الاستعانة بمراجع علمية عديدة تتعلق بالتطبيقات العملية في مجال الجيولوجيا البنيوية.

يتألف هذا الكتاب من عشرة أبواب تعالج موضوعات أساسية من المواضيع العملية في مجال الجيولوجيا البنيوية. ويتضمن كل من هذه الأبواب فصولاً، بلغ عددها الكلي ثمانية وعشرين فصلاً، وتضمنت أفكاراً ومسائل متنوعة تزود الطالب بالمهارات الكافية للقيام بالتحليل البنيوي للمظاهر الجيولوجية البنيوية. يبدأ هذا التحليل من الوصف الهندسي وتحديد الحركات التي رافقت تطور البنيات وصولاً إلى تحديد الإجهادات أدت إلى تكونها. كما أن هذا التحليل البنيوي يسهم في الفهم الإقليمي والكروي Global لحركات تلك القطع من الغلاف الصخري للأرض المسماة بالصفائح، ومنعكسات تلك الحركات على البنيات الضخمة والمحلية المؤلفة لهذا الغلاف.

يتناول **الباب الأول (الفصول 1 - 4)** موضوعات تتعلق بالإجهاد والانفعال وهي موضوعات لا بد للجيولوجي البنيوي من فهمها لتكون مدخلاً له لفهم آليات التشكل المختلفة للبنيات التي سيقوم بدراستها في الأجزاء الأخرى من هذا الكتاب. فهو يتعلم من خلال فصول هذا الباب كيفية توجه الإجهادات الرئيسة لدى تكون البنيات الجيولوجية، وتأثير قدر هذه الإجهادات في التشوه التكرسي، كما أنه يتعرف على كيفية إجراء قياس الانفعال من خلال الأجسام الجيولوجية المشوهة، وتحديد مواصفات إهليلج الانفعال، ليصل بعد ذلك إلى دراسة العلاقة فيما بين الإجهاد والانفعال، وذلك بهدف فهم كيفية تجاوب الأجسام الصخرية مع الإجهاد.

يتعرض **الباب الثاني (الفصول 5 - 8)** لتعريف العناصر البنيوية وكيفية تحديد وضعياتها الفراغية، خاصة وأن ذلك يعد الأساس الصحيح لإجراء التحليل البنيوي. كما يتعرض أيضاً للبوصلية الجيولوجية التي تعد الوسيلة الأساسية التي يستخدمها الجيولوجي في التحديد الحقلية للبنىات. وكذلك فإن مسألة النقاط الثلاث والتميز فيما بين الميل الحقيقي والميل الظاهري والعلاقة بينهما، تعد من المسائل الأساسية المفيدة التي يجب على الجيولوجي أن يأخذها بالحسبان لدى تحديد الوضعيات الفراغية للبنىات.

تعد ثخانة الطبقات وأعماقها من الأمور المهمة التي يجب على الجيولوجي تحديدها لدى إجراء دراسته الجيولوجية لمنطقة وبخاصة إذا كان هدفها اقتصادياً كتحديد أعماق طبقات أو تشكيلات صخرية حاوية على خامات أو سوائل مفيدة. وقد خصص **الباب الثالث (الفصلان 9 و 10)** لدراسة التحديد الهندسي لثخانة وعمق التشكيلات الصخرية والطبقات، وأرفق بعلاقات رياضية وبعده من المسائل الموضحة لكيفية معالجة هذا الموضوع.

لقد خصصت الأبواب الثلاثة التالية لأهم البنىات التي يقوم الجيولوجي البنيوي بالتحري عنها ودراستها وتحديد مواصفاتها المختلفة خلال أعماله ودراساته الحقلية والإقليمية والمحلية المختلفة، ألا وهي الطيات والصدوع والشقوق. يتناول **الباب الرابع (الفصول 11 - 13)** الدراسة الهندسية للطيات وتحديد الوضعيات الفراغية لعناصرها وتصنيفها بطرائق مختلفة بما يفيد في تحديد أنماطها المختلفة. أما **الباب الخامس (الفصل 14)** فقد خصص لدراسة الصدوع، تلك البنية المهمة التي يجب على الجيولوجي فهم هندستها، ليبني على ذلك تحديد مميزاتا الحركية، وصولاً إلى تحديد الشروط الديناميكية التي تحكمت بتكونها. وكان لابد للوصول إلى هذا الهدف من التمييز فيما بين مصطلحي الانزلاق (أو الرمية) والانفصال وتحديد المعنى الهندسي لكل منهما بالعلاقة مع بنية الصدع. هذا بالإضافة لعدد من المفاهيم الأخرى التي عرضت في هذا الباب. ويدرس **الباب السادس (الفصل 15)** مفاهيم متعلقة بالشقوق، مع التركيز على دراستها من وجهة نظر إحصائية، حيث تعد هذه البنية من أكثر البنىات التكرارية انتشاراً في صخور القشرة الأرضية، وتتوزع أنماطها وتختلف أسباب تكونها من منطقة لأخرى، ولها أهمية كبيرة في الدراسات الجيولوجية التطبيقية المختلفة.

ينتقل محتوى الكتاب في **بابه السابع (الفصول 16 - 21)** إلى دراسة التقانة الرئيسة التي يستخدمها الجيولوجي البنيوي لتمثيل ومعالجة معطيات الوضعيات الفراغية ثلاثية الأبعاد الخاصة

بالبنيات المختلفة وعناصرها الهندسية، ألا وهي تقانة الإسقاط المجسم (الإسقاط الستيريوغرافي). وتتبع أهمية هذه التقانة من أنها تتيح للجيولوجي تمثيل التوجهات ثلاثية الأبعاد على مخططات ثنائية البعد، وتمكنه بالتالي من تحليل البنيات وحل كثير من المسائل الهندسية المتعلقة بها. تعد المقاطع العرضية من أهم المخططات الجيولوجية التي تساعد الجيولوجي في فهم البنيات الصخرية، فهي توضح شكل وترتيب الصخور والطبقات الصخرية في مستويات شاقولية. وهي تُنشأ عادة من خلال الخرائط الجيولوجية، أو من خلال العمل الحقلية. ونظراً لهذه الأهمية فقد أُفرد **الباب الثامن (الفصول 22 - 24)** لدراسة طرائق إنشاء هذه المقاطع ولفهم المقصود بالمقاطع العرضية المتوازنة، لما لذلك من أهمية في تحسين التفسير البنيوي في مناطق الطي والتراكب. ويعد أن يتفهم الطالب أسس إنشاء المقاطع العرضية ومبادئ التعامل معها يتحول في **الباب التاسع (الفصل 25)** إلى دراسة المخطط البنيوي الثاني الذي يتكامل مع المقاطع العرضية في وصفه للبنيات الجيولوجية، وهو المتمثل بالخرائط البنيوية، حيث يتعلم الطالب مفهوم خطوط التسوية البنيوية وكيفية إنشاء وتفسير الخرائط البنيوية المختلفة.

يختلف **الباب العاشر (الفصول 26 - 28)** عن الأبواب السابقة في أنه يعالج مسائل تتعلق بالبنيات الرئيسية الضخمة على المستوي الكروي، التي تنطلق من المفاهيم العامة لنظرية تكتونية الصفائح. سيتم التركيز في هذا الباب بالدرجة الأولى على فهم هندسية الصفائح وكيفية دراسة حركاتها وسرعاتها ومنعكسات كل ذلك على طبيعة البنيات الجيولوجية المتكونة على الحدود الصفيحية.

وعموماً يمثل هذا الكتاب الجوانب التطبيقية العلمية للمفاهيم النظرية التي يتناولها طلاب أقسام علوم الأرض في الجامعات لدى دراستهم لمقرر الجيولوجيا البنيوية. وقد زود بالكثير من الأشكال والمخططات اللازمة لتوضيح الأفكار الواردة فيه. وإني أمل أن أكون قد وفقت بطريقة عرض مواضيعه، وبنوعياتها بما يضمن إيصالها إلى الطالب، جيولوجي المستقبل ليفيد منها في خدمة الوطن والعلم. وأشكر سلفاً كل الأساتذة والزملاء الذين يزودوني بأرائهم حول تطوير الكتاب، أو بنقد بناء لهفوات يمكن أن تكون قد وقعت فيه.



## الباب الأول - الفصل الأول

### الإجهاد Stress

#### 1.1. تَوَجُّه الإهليلج المجسم للإجهاد Orientation of the Stress Ellipsoid

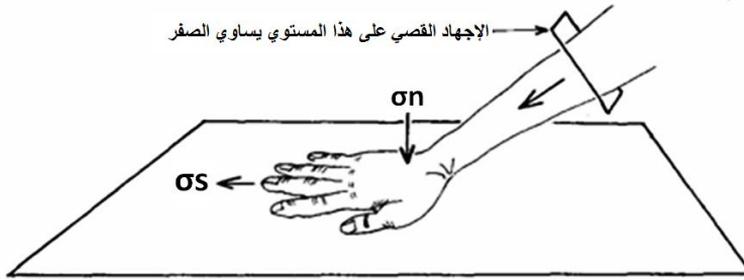
يهدف هذا الفصل إلى دراسة توجه الإجهادات الرئيسية الثلاثة لدى تكوُّن البنيات الجيولوجية. ويقاس الإجهاد بواحدات القوة المؤثرة في مساحة واحدة. يوجد نوعان رئيسان للقوة يؤثران في الكتل الصخرية: القوى الجسمية Body forces وقوى التماس Contact forces أو ماتسمى القوى المنقولة Transmitted forces. تؤثر القوى الجسمية (كالجاذبية) بشكل موحد عبر الكتلة الصخرية، غير أنها لن تكون محط تركيزنا هنا وسيتم إهمالها في الفقرات التالية. ومن ناحية أخرى فإن القوى المنقولة كالضغط الأفقي أو الضغط الشاقولي تنتقل من نقطة إلى أخرى عبر الأرض. وهذه هي القوى التي تؤدي إلى تكوُّن الطيات والصدوع والبنيات الأخرى. سندرس في هذا الفصل العلاقة بين توجه الإجهاد والبنيات من دون الاهتمام بالقدر الحقيقي للإجهادات، الذي سيدرس في فصل "التشوه التكرسي" اللاحق.

#### 2.1. إجهادات رئيسة ثلاثة Three Principal Stresses:

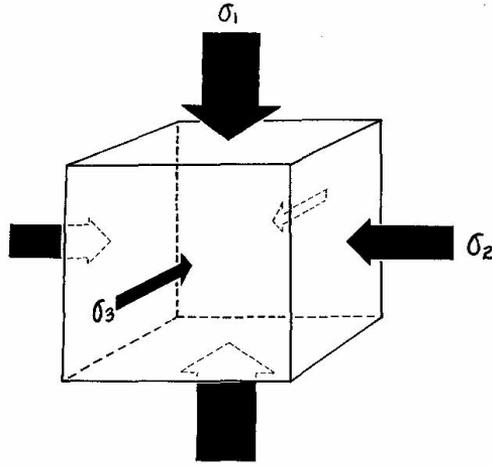
لنتخيل بدأً تضغط بشكل قطري (مائل) على سطح طاولة (شكل 1-1). يمكن تحليل الإجهاد المؤثر في سطح الطاولة إلى مركبتين، هما الإجهاد العمودي "Normal Stress"  $\sigma_n$  الذي يؤثر بشكل متعامد مع السطح، وإجهاد القص  $\sigma_s$  Shear stress الذي يؤثر بشكل مواز للسطح. وعلى الرغم من أن كلاً من الإجهادين العمودي والقصي يؤثر في سطح الطاولة، غير أننا يمكن أن نتخيل مستويًا متعامدًا مع اليد تكون قيمة إجهاد القص عليه مساوية للصفر (شكل 1-1). إن جسمًا يخضع للإجهادات من كل الاتجاهات يتضمن مستويات ثلاثة تكون قيمة إجهاد القص عليها مساوية للصفر، وتدعى هذه "المستويات الرئيسية للإجهاد" Principal planes of stress. أما الإجهادات العمودية الثلاثة المؤثرة في هذه المستويات فتدعى "الإجهادات الرئيسية" وتعطى اصطلاحاً رموز  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  بحيث تكون  $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$  (شكل 1-2). وهي تحدد بمجموعها مايسمى الإهليلج المجسم للإجهاد Stress Ellipsoid.

وإن الإجهاد العمودي المؤثر في أي مستوي ضمن الجسم المُجهَد لا يمكن أن يزيد عن قدر  $\sigma_1$  ولا يقل عن قيمة  $\sigma_3$ . تعد الإجهادات الرئيسية الثلاثة ضغطية وذلك حتى في تلك المناطق التي تتعرض فيها القشرة للشد، كما هو الحال عند الأودية الغورية الضخمة (Rift valleys Rowland, 1986, Davis and Reynolds, 1996, Park, 2001, Duebendorfer ) (et. al, 2007).

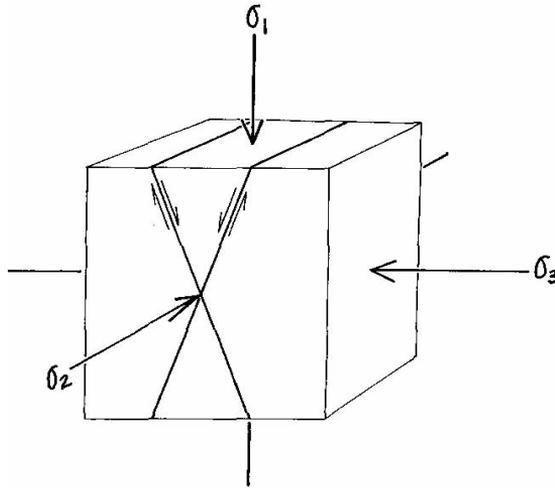
تبين الدراسات المخبرية لتكسر الصخور أنه عندما يتكسر صخر متماثل الخواص تحت تطبيق الإجهاد، يكون لسطوح الكسور توجهات متوقعة بالعلاقة مع الإهليلج المجسم للإجهاد. وكما يتوضح في الشكل (1-3) فإن هناك سطحين كسريين متوقعين أو مايسمى "سطحي قص مزدوجين"، يتعامدان مع مستوي  $\sigma_1 - \sigma_3$ . تصنع كسور القص هذه زاوية حادة مع اتجاه  $\sigma_1$  وزاوية منفرجة مع اتجاه  $\sigma_3$ . وتتغير قيمة الزاوية بين  $\sigma_1$  وكسور القص، حيث يعتمد ذلك على الفرق بين أقدار الإجهادات الرئيسية وعلى خصائص المادة الصخرية، وهي عموماً أقل من  $45^\circ$ .



شكل (1-1): القوة القطرية (المائلة) الناتجة عن يد تضغط على سطح طاولة. تحلل هذه القوة إلى إجهاد عمودي ( $\sigma_n$ ) يؤثر بشكل متعامد مع السطح وإجهاد قصي ( $\sigma_s$ ) يؤثر بشكل مواز للسطح. يتعرض السطح المتميز بإجهاد قصي مساو للصفر إلى إجهاد عمودي فقط.



شكل (1-2): الإجهادات الرئيسية الثلاثة التي تحدد إهليلجاً مجسماً للإجهاد.

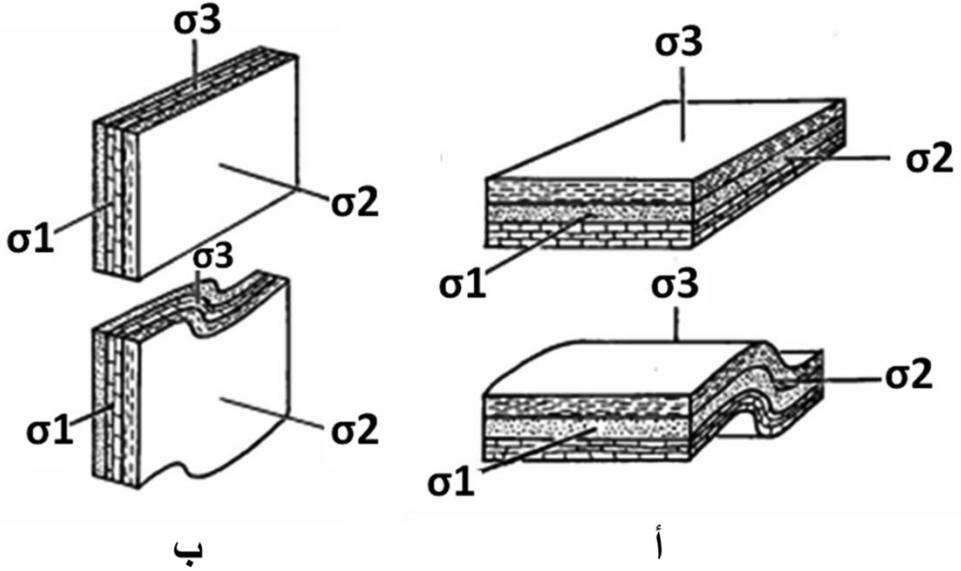


شكل (1-3): العلاقة بين الإجهادات الرئيسية وسطوح الكسور المزدوجة.

### 3.1. هندسية الطية والإهليلج المجسم للإجهاد

يتمثل الهدف الرئيس لهذا الفصل بتحديد توجه الإجهادات الرئيسية الثلاثة المرافقة لتكوّن بنيات جيولوجية مختلفة. وقد يعتقد البعض للوهلة الأولى أن ذلك سيكون أسهل في حالة الطيات منها في حالة الصدوع، غير أن العكس هو الصحيح.

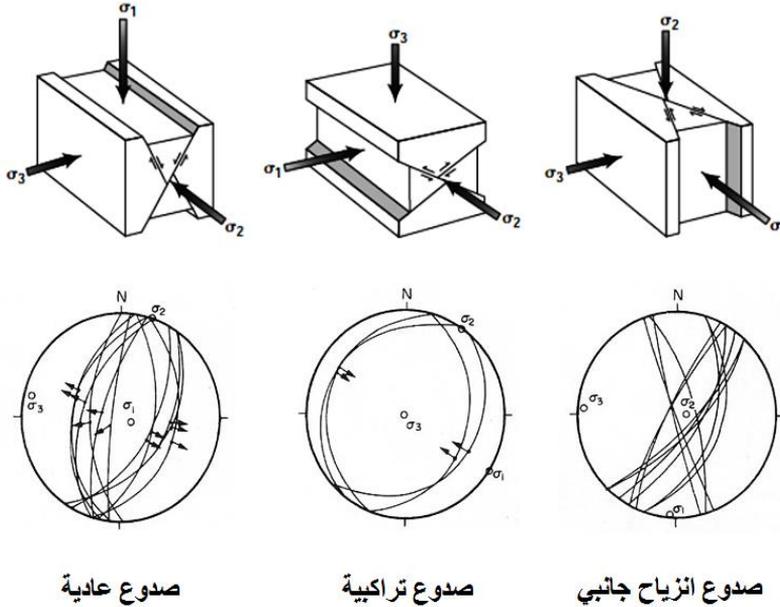
تتمثل الحالة البسيطة في متتالية طباقية مسطحة بشكل أفقي، بحيث يكون  $\sigma_3$  شاقولياً، ويكون محور الطية الناتجة متعامداً مع  $\sigma_1$  ومتوازياً مع  $\sigma_2$  (شكل 1-4 - أ)، غير أن الخصائص الميكانيكية والوضعية الفراغية للطبقات الصخرية تؤثر بشكل كبير في الهندسية النهائية للطية. يبين الشكل (1-4) مثلاً توجيهين مختلفين للطيات ناتجين عن إهليلج الإجهاد المجسم نفسه، حيث يلعب توجه  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  دوراً أقل من أهمية من الدور الذي تلعبه وضعية الطبقات قبل مرحلة الإجهاد. وما يمكن ملاحظته في الشكل (1-4 - ب) أيضاً أن  $\sigma_1$  يمكن أن يدور بقيمة معتبرة ضمن المستوي الأفقي من دون أن يؤدي ذلك إلى تغيير توجه الطية الناتجة. وعموماً يمكن إنشاء الإهليلج المجسم للإجهاد بدراسة الطيات غير أن ذلك يتطلب تحليلاً تفصيلياً للكسور المرتبطة بالطية Fold-related Fractures .



شكل (1-4): استجابة الطبقات الأفقية (أ) والشاقولية (ب) لإجهاد متمائل التوجه. يلاحظ أن هندسية الطيات الناتجة تتأثر بشكل كبير بالوضعية الفراغية للطبقات التي كانت عليها قبل الطي (Rowland, 1986).

## 1.1. وضعية الصدوع وتوجه الإهليج المجسم للإجهاد

بدأت الأفكار الأولى عن العلاقة ما بين الصدوع والإهليج المجسم للإجهاد من خلال الدراسة التي قام بها أندرسون (1942). وقد بين هذا الجيولوجي أن سطح الأرض يتميز بإجهاد قصي مساو للصفر لأنه يمثل السطح الفاصل بين الهواء والصخر ، وهو يمثل بذلك سطح إجهاد رئيس. لذا يُعتَقَد أن واحداً من الإجهادات الرئيسة سيكون شاقولياً في القشرة قليلة العمق (حيث يحدث معظم التصدع)، وبالتالي فإن الإجهادين الآخرين سيكونان أفقيين. وتشرح هذه النظرية تكوّن الأنماط الثلاثة من الصدوع: العادية ( $\sigma_1$  شاقولي) والتراكيبية ( $\sigma_3$  شاقولي) وصدوع الانزلاق الاتجاهي ( $\sigma_2$  شاقولي) (شكل 1-5). كما تسمح هذه النظرية بإنشاء الإهليج المجسم للإجهاد المسؤول عن تكون منظومة معينة من الصدوع.



شكل (1-5): مخططات ثلاثية الأبعاد وإسقاطات متساوية المساحة Equal area plots (شبكة شميت) لثلاثة أنماط من الصدوع كما حددها أندرسون. تبين الإسقاطات متساوية المساحة معطيات نموذجية عن توجهات الصدوع. تشير النقاط الموجودة على الدوائر الكبيرة الممثلة للصدوع إلى وضعية الخدوش على السطح الصدعي، كما تشير الأسهم إلى طبيعة الانزلاق sense of slip (Angelier, 1979, Suppe, 1985, Rowland, 1986).

وكما يلاحظ في الشكل (1 - 5) فإن منظومة الصدوع العادية تتميز بمجموعتين صدعيتين متوازيتين في الاتجاه وزاوية حادة ما بين السطوح الصدعية. أما منظومة الصدوع التراكبية فيكون لمجموعتيها اتجاه متواز وزاوية منفرجة بين السطوح الصدعية، بينما تتألف منظومة صدوع الانزلاق الاتجاهي من مجموعتين من الصدوع لهما اتجاهان مختلفان. تمثل المجموعتان الصدعيتان في كل حالة مجموعتي كسور قص مزدوجتين مشابهتين لتلك الملاحظة بالدراسات التجريبية (شكل 1-3).

إن نشوء مجموعتين واضحتين من الصدوع في صخر متمائل الخواص كما هو موضح في الشكل (1-5) يتطلب أن يكون هناك فرق كمي واضح بين قيم  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$ . فلو فرضنا أن  $\sigma_1$  شاقولي و كان قدرَي  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  متساويين تقريباً فإن منظومة الصدوع الناتجة تتألف من صدوع عادية شديدة الميل دون اتجاه مفضل.

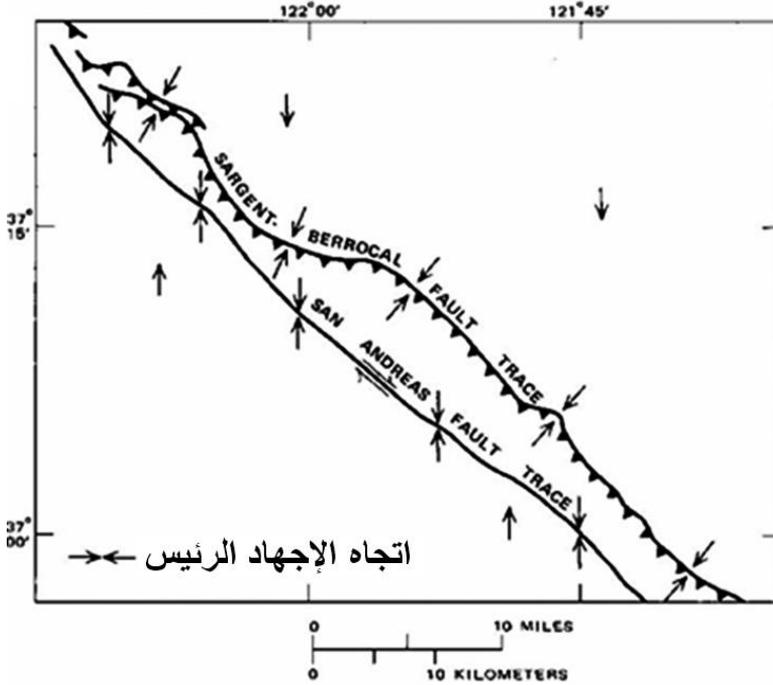
إن إنشاء الإهليج المجسم للإجهاد من خلال منظومة صدوع يتضمن رسم الدائرة الكبيرة للسطح الصدعي على شبكة الإسقاط متساوي المساحة، بالإضافة إلى معطيات الخدوش وطبيعة الحركة كما هو واضح في الشكل (1-5) ويفترض أن واحداً من الإجهادات الرئيسة شاقولي، بينما يكون الاثنان الآخران أفقيين.

### 5.1. التعقيدات الناجمة عن وجود سطوح ضعف سابقة

تفترض المناقشة السابقة أن الصخر المدروس ليس له اي اتجاه أساسي مفضل تجري عملية القص وفقه. وعلى الأغلب فإن هذا الافتراض غير صحيح. تفيد سطوح الضعف Planes of weakness الموجودة سابقاً في أنها تصبح سطوح قص مفضلة وتؤدي بالصدوع لأن تأخذ وضعية مختلفة عنها فيما لو لم تكن هذه السطوح موجودة. وتعد سطوح التطبيق والانفصال Cleavage والشقوق أو حتى الصدوع الموجودة سابقاً أمثلة على سطوح الضعف هذه.

تتعرض الصدوع القديمة التي تكونت استجابة لمنظومة إجهاد معينة إلى إعادة النشاط جراء منظومة إجهاد أخرى. يبين الشكل (1-6) مثلاً من شمال كاليفورنيا، حيث يتوازي صدع سان أندرياس ذو الانزياح الجانبي اليميني مع صدع تراكبي هو صدع سارجنت بيروكال Sargent Berrocal. وبحسب المبادئ التي يلخصها الشكل (1-5)، فإن  $\sigma_1$  من أجل صدع سان أندرياس يجب أن يكون أفقياً وذا اتجاه شمال-جنوب تقريباً، أما  $\sigma_1$  بالنسبة لصدع سارجنت بيروكال فيجب أن يكون أفقياً وباتجاه شمال شرق - جنوب غرب تقريباً. كما أن كلا الصدعين

نشيط زلزالياً. ولا يمكن لمحور  $\sigma_1$  أن يكون ذا اتجاهين في مكان واحد وفي زمن واحد، وبالتالي فإن توجه أحد هذين الصدعين على الأقل يجب أن يكون متأثراً بعوامل أخرى غير منظومة الإجهاد الحالية. يمكن شرح هذه الظاهرة بأن صدع سارجنت بيروكال الحالي لم ينشأ نتيجة منظومة الإجهاد الحالي، بل هو سطح قصي قديم تطور نتيجة إجهاد ذي توجه مختلف. وهو صدع قديم أعيد تنشيطه من خلال الإجهادات الجديدة. تكون الحركات على سطوح الضعف هذه والموجودة سابقاً من نمط الانزلاق المنحرف Oblique slip. ولا يمكن تحديد توجه الإهليلج الجسم للإجهاد في مثل هذه الحالات إلا إذا كان هناك منظومة مؤلفة من صدوع ذوات اتجاهات مختلفة وخدوش.



شكل (1-6): أنثراً صدعي سان أندرياس وسيرجانت باروكال في شمال كاليفورنيا. يعتمد توجه الإجهادات الرئيسة على توجه الأثر السطحي والملاحظات الحقلية (Rowland, 1986).

## 6.1. حقول إجهاد غير موحدة

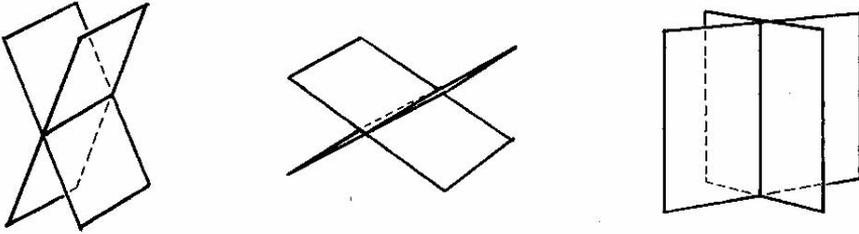
برغم أن افتراضات أندرسون مفيدة جداً لدى دراسة التصدع والإهليلج المجسم للإجهاد، غير أن هذه الافتراضات ليست صحيحة دوماً. فبدلاً من أن تتكون مجموعتان من الصدوع المزدوجة كما هو متوقع بحسب أندرسون، يمكن أحياناً أن تتكون شبكة مؤلفة من أربع مجموعات صدعية في الصخر متماثل الخواص. وكذلك يلاحظ، في بعض الحالات، تطور واحدة فقط من مجموعتي الصدوع المتوقعة.

يفترض أندرسون أيضاً أن توجه الإهليلج المجسم للإجهاد لا يتغير مع العمق، وأن حقل الإجهاد المسبب للتشوه في القشرة قليلة العمق موحد عبر منطقة كبيرة. ومن جملة ماتتضمنه هذه الافتراضات أن نمطاً صدعياً واحداً يميز إقليمياً محددًا، وأن وجود أنماط متعددة من الصدوع يتطلب مراحل تشوه متعددة، وهذا توقع خاطئ. وسنضرب مثالين في التمرينين (السادس والسابع) عن حقول إجهاد غير موحدة تحدث في مرحلة تكتونية منفردة. يدور المثال الأول (التمرين السادس) حول نظام تكتوني شدي، في مقاطعة بيسين أند رينج في غرب الولايات المتحدة، حيث تكون منظومة الإجهاد غير موحدة عبر الزمن. أما المثال الثاني (التمرين السابع) فيدور حول نظام ضغطي في الهيمالايا- تيبب في آسيا، حيث تكون منظومة الإجهاد متغيرة مكانياً بشدة.

## 7.1. التمارين:

### 1.7.1. التمرين الأول:

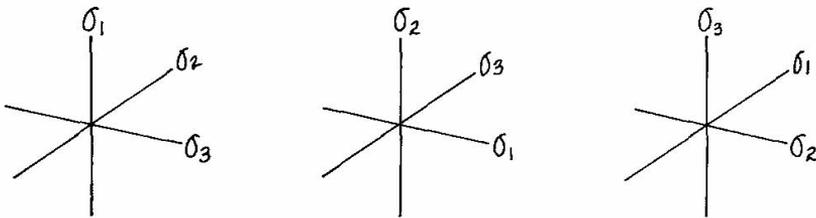
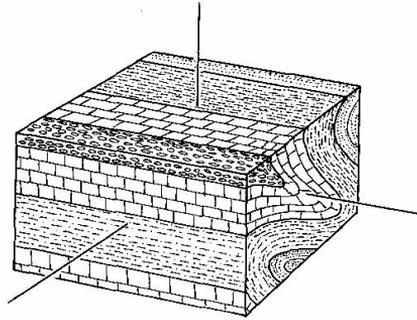
يبين الشكل (1-7) ثلاثة أزواج من سطوح القص المزدوجة. حدد على هذا الشكل اتجاهات الإجهادات الرئيسة المرتبطة بهذه الأزواج.



شكل (1-7): ثلاثة أزواج من سطوح القص من أجل التمرين الأول.

### 2.7.1. التمرين الثاني:

ادرس الشكل (1-8) وحدد أيّاً من توجهات الإجهادات المبينة يمكن أن يكون السبب في تكوّن الطيات الموضحة في هذا الشكل.



شكل (1-8): مخطط ثلاثي البعد لطبقات مطوية مع ثلاثة توجهات افتراضية للإهليلج المجسم للإجهاد، من أجل التمرين الثاني (Rowland, 1986).

### 3.7.1. التمرين الثالث:

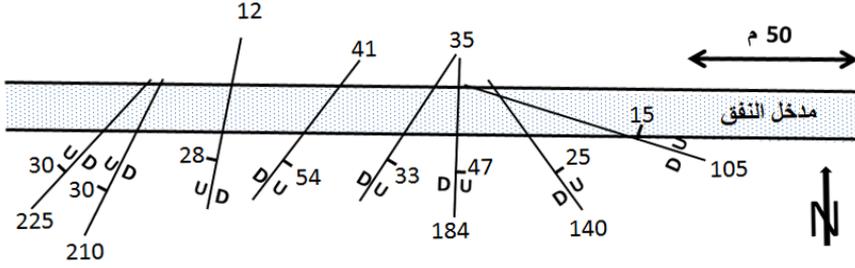
يبين الجدول التالي (لوحة 1-1) قياسات لعشرة صدوع عادية في أحد المواقع على جزيرة كريت. أسقط هذه المعطيات على الشبكة متساوية المساحة Equal area net (شبكة شميت) وحدد توجهات الإجهادات الرئيسية (يتم حل هذا التمرين بعد دراسة الإسقاط الستيريوغرافي، الباب السابع).

لوحة (1-1): معطيات الصدوع لحل التمرين الثالث.

الرقم المتسلسل	سمت الصدع	ميل الصدع	زاوية الخدوش
1	045	61S	80E
2	036	59S	80W
3	090	80N	58W
4	052	68N	78W
5	045	63N	78W
6	110	88N	59W
7	074	78N	65W
8	046	60S	80W
9	077	61N	86E
10	067	56S	88E

#### 4.7.1. التمرين الرابع:

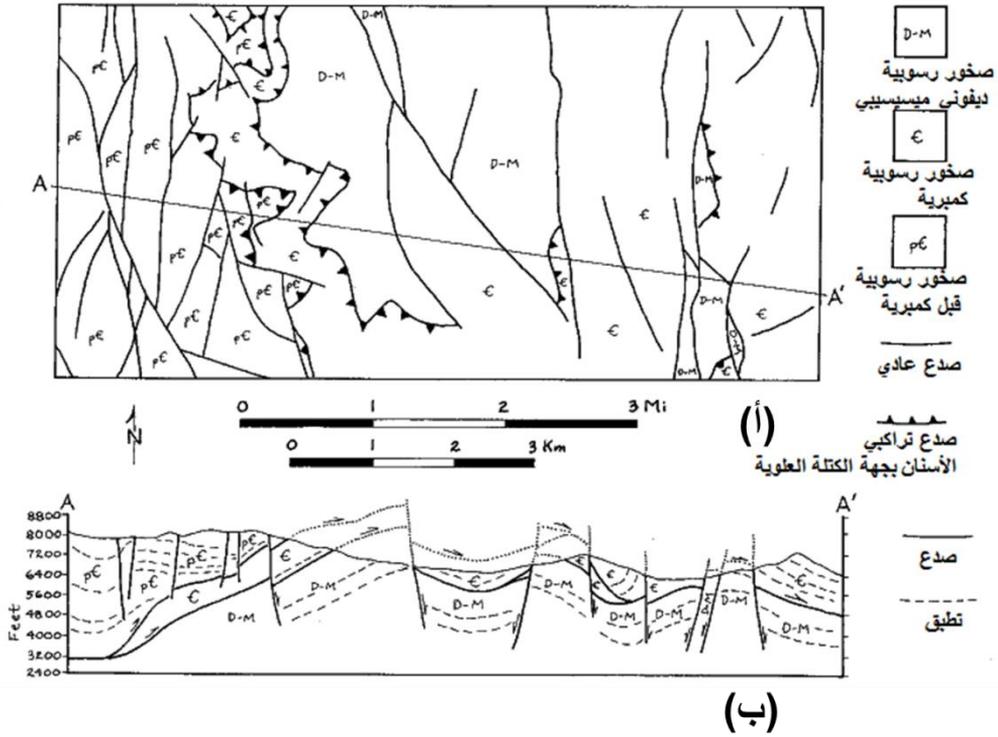
يبين الشكل (1-9) خريطة لمدخل أحد المناجم حيث يتوضح عليها عدد من الصدوع الثانوية التي تكونت في وحدة صخرية متجانسة. أسقط السطوح الصدعية على شبكة شميت وحدد توجه الإهليلج المجسم للإجهاد.



شكل (1-9): خريطة مدخل منجم يتوضح عليها وضعية صدوع ثانوية من أجل التمرين الرابع (Rowland, 1986).

#### 5.7.1. التمرين الخامس:

يبين الشكل (1-10) خريطة جيولوجية ومقطعاً بنيوياً من جبال آينيو Inyo Mountains في شرق كاليفورنيا. صيف تاريخ تطور الإجهادات وتوجهات الإجهادات الرئيسية في هذه المنطقة. ماهي الفترات الزمنية التي أثرت خلالها الإجهادات مختلفة التوجه. وهل هناك من أدلة على أن عوامل أخرى غير توجهات الإجهادات الرئيسية تحكمت بتكوّن سطوح القص. يمكنك تلوين واحدة أو أكثر من الوحدات الصخرية على الخريطة لتوضيح جيولوجية المنطقة.



شكل (1-10): خريطة جيولوجية (أ) ومقطع بنويي (ب) لجزء من جبال أينيوي في شرق كاليفورنيا، من أجل التمرين الخامس (Rowland, 1986).

### 6.7.1. التمرين السادس:

يمثل الشكل (1-11) خريطة جيولوجية عامة لجنوب غرب الولايات المتحدة توضح مقاطعة بيسين أند رينج Basin and Range والمناطق المجاورة. لقد تم اشتقاق اسم مقاطعة بيسين أند رينج (بمعنى حوض وسلسلة جبلية) من وجود أحواض وسلاسل جبلية ذات اتجاه شمال - جنوب في هذه المنطقة. يمكن تمييز حقلين تشوهيين يعودان إلى السينوزوي المتأخر في هذه المنطقة. يشتمل الحقل 1 على مركز وشمال نيفادا وغرب أوتا، ويتميز بصدوع عادية مجرفية. أما الحقل 2 فيشتمل على جنوب وغرب نيفادا وشرق كاليفورنيا، ويتألف من ترابط صدوع عادية وصدوع انزلاق اتجاهي (بمينية ويسارية). وإن توجه الإهليلج المجسم للإجهاد في هذا الحقل أكثر إرباكاً

بسبب وجود هذين النوعين من الصدوع. ولا تسمح مبادئ التصدع الأولى لمثل هذه الصدوع أن توجد مع بعضها خلال الحدث التشوهي نفسه. ويهدف دراسة الحقل II بشكل أدق تمت دراسة نماذج الصدوع في منطقة صغيرة عند سد هوفر على الحدود بين نيفادا وأريزونا. ويلخص الشكل (1- 12) نتائج هذه الدراسة، حيث تم تمييز أربع مراحل للتصدع: مرحلة أولى مبكرة للتصدع العادي يمثلها الشكل (1- 12 - أ)، ومرحلة ثانية مبكرة لتصدع الانزلاق الاتجاهي يمثلها الشكل (1- 12 - ب). تُبعت هذه المرحلة بمرحلة متأخرة من التصدع العادي، وهذه تُبعت بدورها بمرحلة متأخرة من تصدع الانزلاق الاتجاهي. ويبين الشكل (1- 12 - ت) النتيجة النهائية لهذه المراحل. وكما يلاحظ في الشكل (1- 12 - ب) فإن واحداً من صدوع الانزلاق الاتجاهي يساري والآخر يميني. كما يلاحظ أيضاً أن واحداً من صدوع الانزلاق الاتجاهي اليساري أُعيد تنشيطه في الشكل (1- 12 - ث) بحركة انزلاق اتجاهي يمينية. إن كل عمليات التصدع الموضحة في الشكل (1- 12) حدثت خلال الشد الإقليمي الميوسيني الذي أدى إلى تشكل مقاطعة بيسين أند رينج. والمطلوب

أ. حدد توجهات الإجهادات الأفقية ( $\sigma_2$  و  $\sigma_3$ ) على الشكل (1- 11) في الحقل I من مقاطعة بيسين أند رينج.

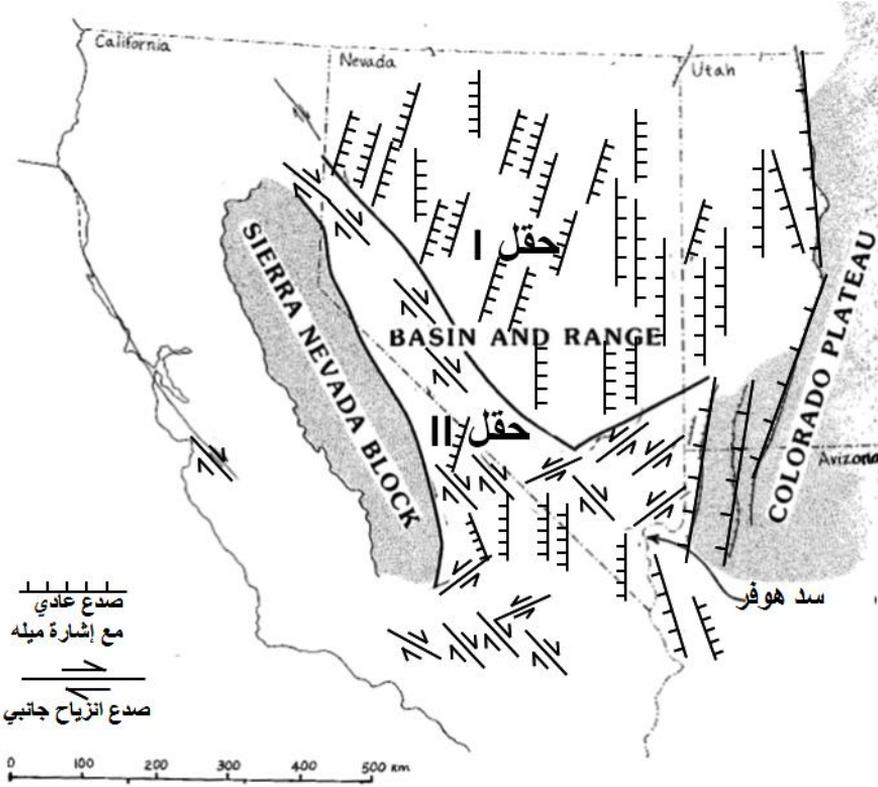
ب. ارسم الإجهادات الرئيسية الثلاثة على الشكل (1- 12 - أ و 1- 12 - ب).

ت. ارسم الإجهادات الرئيسية الثلاثة التي أدت إلى مرحلة الانزلاق الاتجاهي المتأخرة على الشكل (1- 12 - ت).

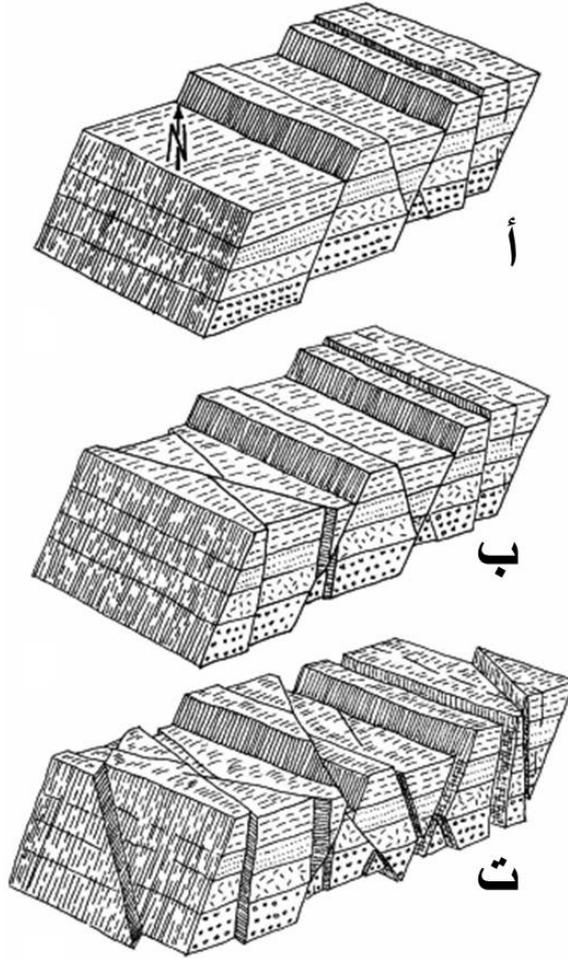
ث. اشرح كيف يمكن لصدع انزلاق اتجاهي أن يتغير من حركة يسارية إلى حركة يمينية خلال حدث تكتوني واحد (يمكن أن تربط ذلك بالتوجه الجغرافي لمحور  $\sigma_3$ ).

ج. لقد عزا الباحثون هذا التغير ما بين التصدع العادي وتصدع الانزلاق الاتجاهي إلى التبادل ما بين  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$ ، وهذا ما يمثل تذبذباً مكانياً وزمانياً للإجهاد. ولو تذكرنا أن ذلك كان زمنياً حدثت فيه بركنة نشيطة وترقق لقشرة ومعدلات عالية للتعرية،

ماهي الظروف التي يمكن أنها أدت بقدر الإجهاد الشاقولي لأن يزداد ويتناقص مقارنة مع الإجهادات الرئيسة الأفقية؟



شكل (1-11): خريطة عامة للمظاهر البنيوية العائدة للسينوزوي المتأخر في جنوب غرب الولايات المتحدة (Rowland, 1986). يتصف الحقل I بصدوع عادية مجرفية. أما الحقل II فيتصف بصدوع عادية وصدوع انزلاق اتجاهي يمينية ويسارية (للاستخدام في حل التمرين السادس).



شكل (1- 12): مخططات بيانية ثلاثية البعد توضح المميزات الرئيسية للتصدع في منطقة سد هوفر (للاستخدام في حل التمرين السادس، Angelier, 1990).

### 7.7.1. التمرين السابع:

تشتمل آسيا على مجموعة معقدة من أنماط الصدوع النشطة. وكما هو موضح في الشكل (1- 13) مثلاً فإن هناك صدعاً تراكيبياً رئيساً في الهيمالايا، وصدع انزلاق اتجاهي يساري رئيس (صدوع Kunlun and Altyn Tagh) في gana (الصين) وصدع انزلاق اتجاهي يميني رئيس في وسط آسيا (صدع Talasso-Fergana) وفي المنطقة الهندية الصينية

(صدع Red River)، ومنظومات صدوع عادية في سيبيريا (منظومة غور البايكال الانهدامي الضخم) وفي الصين (منظومة أغوار Shansi). ومن الواضح أنه لا يمكن لتوجه واحد للإهليلج الجسم للإجهاد أن يفسر كل هذا المحتوى التكتوني. ورغم ذلك فإن كل هذه الصدوع تعزى على الأرجح إلى التصادم والضغط المستمر بين آسيا والهند والذي بدأ في الإيوسين. لقد تم تمثيل التصادم بين الهند وآسيا تجريبياً باستخدام مادة لدنة، ما أدى إلى نتائج جيدة. يبين الشكل (1- 14) شكلاً تخطيطياً أخذ من الصور التي التقطت في أثناء إحدى التجارب. ولقد تم حصر السطحين العلوي والسفلي للمادة اللدنة بين صفيحتين، ما أعاق تكوّن صدوع انزلاق ميلي، ولقد لوحظ أن هناك تشابهاً ملحوظاً بين المظاهر الموضحة بالشكل (1- 14 - ت) وخارطة الصدوع في آسيا (شكل 1- 13).

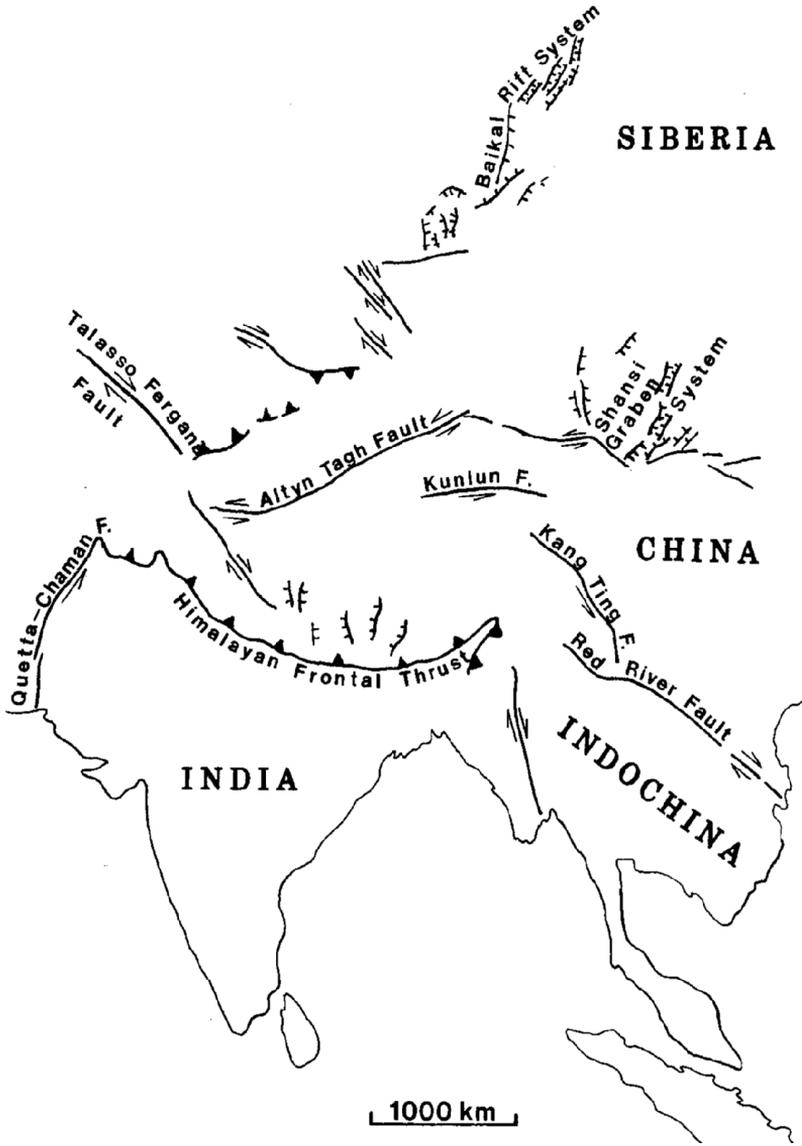
والمطلوب:

أ. ارسم توجهات الإجهادين الرئيسيين الأفقيين المؤثرين في كل من الصدوع التالية، وذلك بحسب نمط الصدع واتجاهه: صدع الهيمالايا التراكمي الجبهي Himalayan frontal fault وصدع Quetta-Chaman وصدع Talasso-Fergana و صدع Altyn Tagh وصدع Shansi وصدع Tagh وصدع Kang Ting.

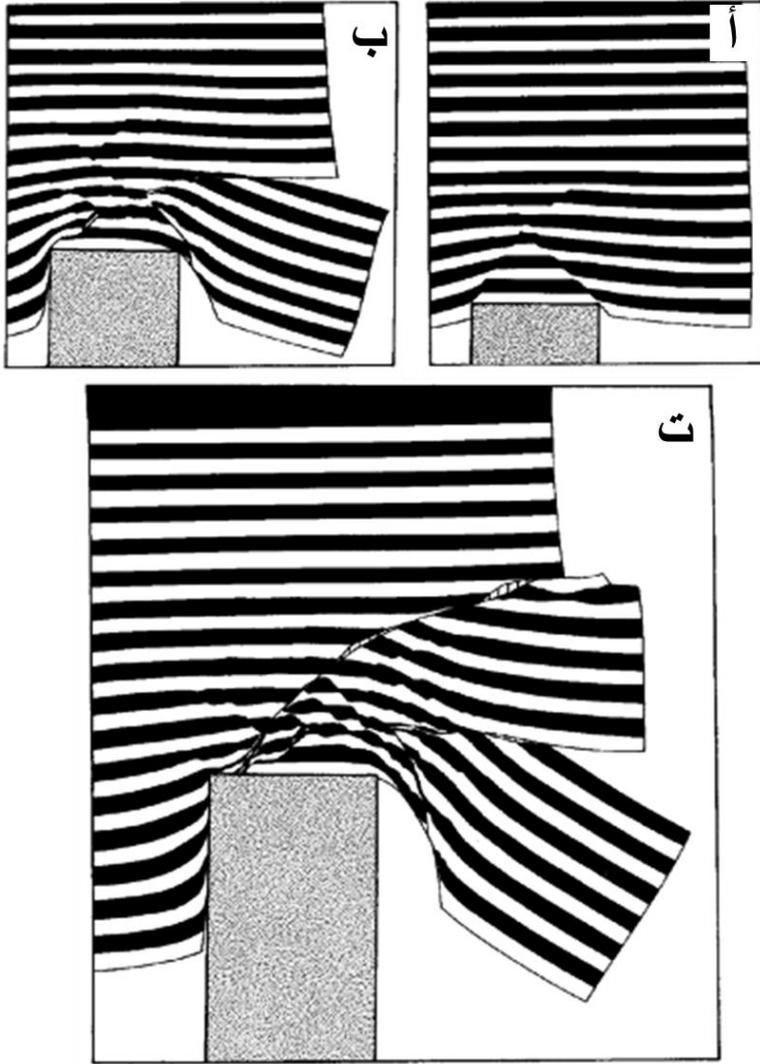
ب. ضع ورقة شفافة فوق الرسومات الثلاث من الشكل (1- 14). حدد على الشكل (1- 14 - ت) مواقع الصدوع السبعة المكافئة للصدوع المذكورة أعلاه. ارسم هذه الصدوع على الورقة الشفافة الموضوعية فوق الشكل (1- 14 - ت)، وانقل توجهات الإجهاد من الشكل (1- 13).

ت. ارسم الصدوع الرئيسة على الورقة الشفافة للشكلين (1- 14 - أ و 1- 14 - ب) وحدد توجه الإجهادات الرئيسة الأفقية في مواقع مختلفة على الخارطة.

ث. صِف تطور الإجهادات الإقليمية الحاصلة خلال التصادم الآسيوي الهندي.



شكل (1- 13): خارطة عامة لجنوب آسيا توضح الصدوع النشطة الرئيسية  
 .(Tapponnier et al., 1982)



شكل (1- 14): ثلاث مراحل من تجربة المادة اللدنة المصممة لمحاكاة التصادم بين الهند وآسيا. ولقد تم حصر الطبقات اللدنة من الأعلى ومن الجانب اليساري، بينما بقي الجانب اليميني حراً (Tapponnier et al., 1982).

## الباب الأول - الفصل الثاني

### التشوه التكسري Brittle Deformation

يهدف هذا الفصل إلى توقع قيم أقدار الإجهاد الرئيس الذي يسبب تكسر مادة معينة، أي إلى التعرف على كيفية تأثير قدر الإجهادات الرئيسة في التشوه التكسري. وذلك بعد أن تمت دراسة توجه الإهليلج المجسم للإجهاد بالعلاقة مع التصدع (الفصل 1). ويتمثل الهدف الرئيس بإمكانية تحديد الإجهاد القديم الذي أدى إلى حدوث تشوه تكسري محدد. كما أن مادة هذا الفصل تعد مادة أساسية من مواد الجيولوجيا الهندسية لأنه يهتم بالشروط التي يتكسر الصخر عندها.

#### 1.2. تحديد قيمة الإجهاد ثنائي البعد 2D Stress:

إذا كنا نعرف اتجاهي وقُدري كل من  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$ ، يمكننا تحديد الإجهاد العمودي والقصي المؤثرين على أي مستوي متعامد مع مستوي  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  (Mattauer, 1980; Rowland, 1986; Ramsay and Huber, 1983; Davis and Reynolds, 1996; Park, 2009; Ragan, 2009; Duebendorfer et. al, 2007; 2001). لنأخذ المستوي المحدد في الشكل (2-1 أ)، ولنحدد الإجهاد العمودي والقصي عليه. ويهدف تبسيط المسألة سنقوم بتحديد هذا المستوي بسطحين مجاورين متعامدين مع  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  (السطحين A و B، شكل 2-1 ب و ت). ونُعرّف الزاوية  $\theta$  على أنها الزاوية بين المستوي واتجاه  $\sigma_3$  (شكل 2-1 ت).

إذا كان المثلث في الشكل (2-1 ت) غير متحرك فإنه بحالة توازن. وهذا يعني أن الإجهاد العمودي  $\sigma_n$  والإجهاد القصي  $\sigma_s$  (أو  $\tau$ ) المؤثرين على المستوي يجب أن يكونا مساويين لقُدري  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  المؤثرين في المستويين A و B. وسنستخدم الآن علاقة التوازن لتعريف  $\sigma_n$  و  $\sigma_s$  بدلالة  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  والزاوية  $\theta$ . يوضح الشكل (2-1 ث)  $\sigma_n$  و  $\sigma_s$  المؤثرين في المستوي، ويوضح كذلك المركبات الأفقية والشاقولية لهما. يتمثل طول الخط المعبر عن المستوي بالقيمة  $A/\cos\theta$  أو  $B/\sin\theta$ . ويبين الشكل (2-1 ث) القوى الأفقية والشاقولية المؤثرة في هذا الخط. وتكون معادلات التوازن من أجل هذا المستوي كما يلي:

$$\sigma_1 A = \frac{A}{\cos\theta} (\sigma_n \cos \theta + \sigma_s \sin \theta) \quad (1)$$

$$\sigma_3 B = \frac{A}{\sin\theta} (\sigma_n \sin \theta - \sigma_s \cos \theta) \quad (2)$$

ويحل هذه المعادلات من أجل  $\sigma_n$  و  $\sigma_s$  بدلالة  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  و  $\theta$  يمكن اشتقاق المعادلتين التاليتين:

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta \quad (3)$$

$$\sigma_s = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \theta \cos \theta \quad (4)$$

ويهدف إعادة كتابة هذه المعادلات بشكل أكثر فائدة يمكن استبدال المعادلات المثلثاتية المتطابقة التالية:

$$\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$$

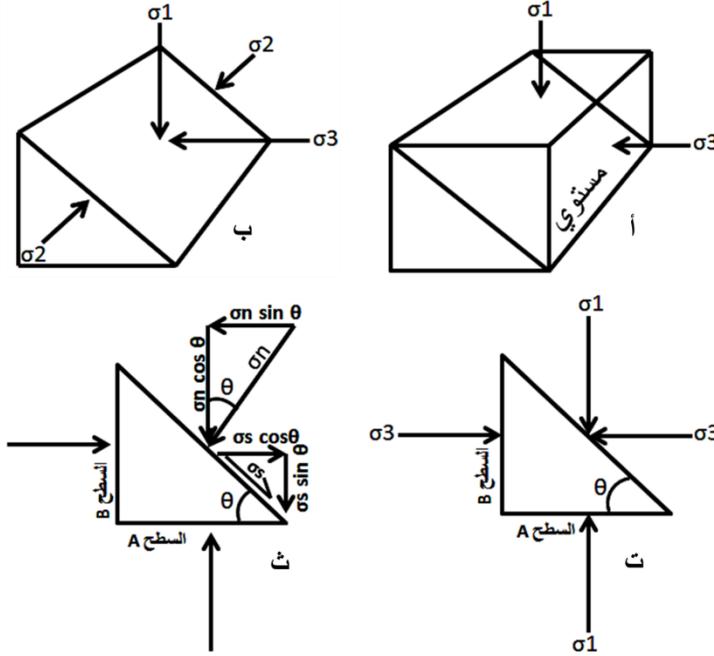
$$\cos^2 \theta = (1 + \cos 2\theta)/2$$

$$\sin^2 \theta = (1 - \cos 2\theta)/2$$

يؤدي ذلك إلى المعادلتين التاليتين:

$$\sigma_n = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cos 2\theta \quad (5)$$

$$\sigma_s = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \sin 2\theta \quad (6)$$



شكل (2-1): العلاقة ثنائية البعد بين مستو وحالة إجهاده (Rowland, 1986).

يقاس الإجهاد بواحدات القوة على المساحة الواحدة، حيث تكون الوحدة الأساسية هي الباسكال (1 باسكال "Pa" = 1 نيوتن بالمتر المربع)،  $10^5$  باسكال تساوي 1 بار الذي يساوي تقريباً للضغط الجوي عند سطح البحر. إن الوحدة الأكثر استخداماً في معظم التطبيقات الجيولوجية هي الميغاباسكال (MPa) التي تساوي  $10^6$  Pa أو 10 بار. ويصل الضغط ضمن القشرة الأرضية إلى  $10^3$  MPa.

يمكن باستخدام المعادلتين (5) و (6) تحديد الإجهاد العمودي والقصي المؤثر عبر مستوي، إذا كنا نعرف توجيهي وقُدري  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$ . ولنفترض مثلاً في الشكل (2-1) أن  $\sigma_1 = 100$  MPa وأن  $\sigma_3 = 20$  MPa وكانت قيمة  $\theta = 40^\circ$ . يمكن أن نحدد الإجهاد العمودي باستخدام المعادلة 5:

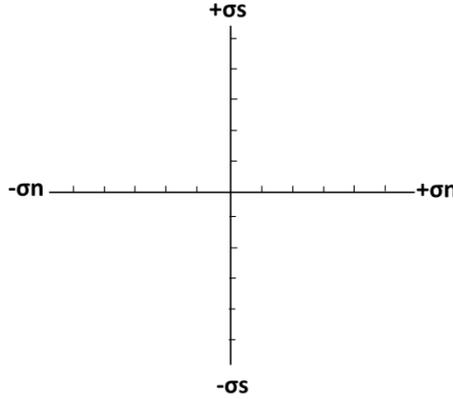
$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cos 2\theta \\ &= (60 \text{ MPa}) + (40 \text{ MPa}) (0.17) = 67 \text{ MPa} \end{aligned}$$

ويشكل مشابه وباستخدام المعادلة 6 يمكن تحديد الإجهاد القصي المؤثر على المستوى:

$$\sigma_s = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \sin 2\theta = (40 \text{ MPa}) (0.98) = 39 \text{ MPa}$$

## 2.2. مخطط مور The Mohr Diagram

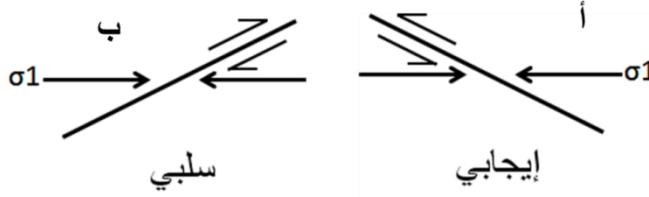
قام المهندس الألماني أوتو مور في العام 1882 بتطوير تقنية مفيدة جداً للرسم البياني لحالة الإجهاد على مستويات ذات اتجاهات مختلفة واقعة في حقل الإجهاد نفسه. تتضمن هذه التقنية توقيع الإجهاد ( $\sigma_s$  و  $\sigma_n$ ) المؤثر في مستوى بشكل نقطة، حيث تقاس  $\sigma_n$  على المحور الأفقي، و  $\sigma_s$  على المحور الشاقولي (شكل 2-2). ويسمى هذا المخطط "مخطط مور".



شكل (2-2): مخطط مور للرسم البياني لحالة الإجهاد على مستوى. تخضع مستويات مختلفة في زوايا ميلها لأقدار مختلفة من  $\sigma_s$  و  $\sigma_n$  وذلك ضمن حقل إجهاد مؤلف من ترابط خاص من  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  ، ولذلك يتم توقيعها في نقاط مختلفة من مخطط مور.

تكون معظم الإجهادات في الأرض ضغطية، ولذلك يَعدُّ الجيولوجيون، اصطلاحاً، أن الضغط إيجابي (بينما يَعدُّ المهندسون أن الشد إيجابي). ومن ناحية عملية في الجيولوجية البنوية يكون  $\sigma_n$  في القشرة الأرضية موجباً دوماً ولذلك فهو يوقَّع على الجانب الموجب (اليميني) بالنسبة للمحور الشاقولي في مخطط مور. ويكون للمحور الشاقولي في مخطط مور كما هو حال المحور الأفقي اتجاهاً موجباً وآخر سالباً. وتُعدُّ إجهادات القص ذات الطبيعة اليسارية

موجبة اصطلاحاً (شكل 2-3 - أ)، وتُوَقَّع فوق مركز الإحداثيات أي في الجهة الموجبة من المخطط، بينما تُوقَّع إجهادات القص اليمينية في الجهة السالبة (تحت مركز الإحداثيات) من المخطط (شكل 2-3 - ب).

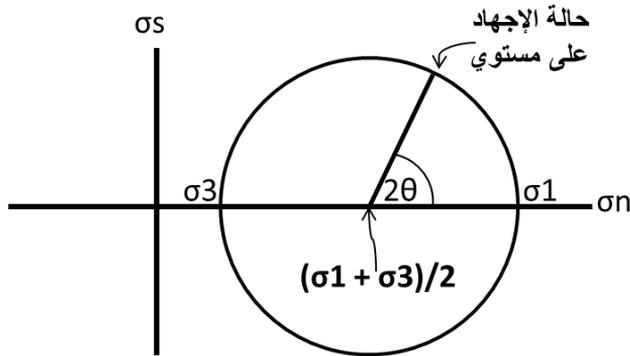


شكل (2-3): الرموز الاصطلاحية المعطاة لإجهادات القص بهدف توقيعها على مخطط مور. يُعدُّ القص اليساري (أ) موجباً، بينما يُعدُّ القص اليميني (ب) سالباً.

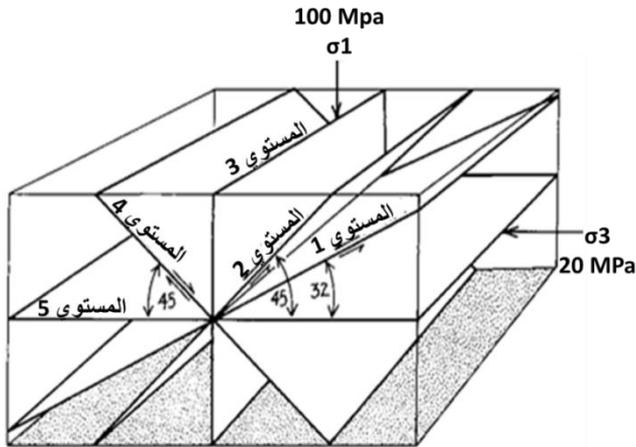
### 1.2.2. دائرة مور للإجهاد The Mohr circle of stress

يتمثل المظهر الأساسي لمخطط مور في أن النقاط الممثلة لحالات الإجهاد على كل المستويات الممكنة والعمودية على مستوي  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  تُرسمُ دائرة، تسمى دائرة مور Mohr Circle. وكما يلاحظ من الشكل (2-4) فإن هذه الدائرة تقطع محور  $\sigma_n$  في قيم تساوي  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$ . أما نصف القطر فيساوي  $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}$ ، في حين أن مركزها يقع عند قيمة  $\frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2}$ . وليس لمحاور مخطط مور توجه جغرافي، وهي تسمح بتوقيع أقدار الإجهادات المؤثرة في مستويات مختلفة التوجه. يكون الإجهاد القصي على المستويات المتعامدة مع  $\sigma_1$  أو  $\sigma_3$  (المستويان 5 و 3 في الشكل 2-5) مساوياً للصفر ولذلك فهي تُوَقَّع على محور  $\sigma_n$  مباشرة. ويكون الإجهاد القصي بقيمته الأعظمية على المستويات التي تصنع  $45^\circ$  مع الإجهادات الرئيسية ( $\theta = 45^\circ$ )، وتُوَقَّع النقاط الممثلة لهذه المستويات على قمة وأسفل دائرة مور.

يمكن قياس قيم  $2\theta$  مباشرة من دائرة مور كما هو موضح في الشكل (2-4). وتقع زوايا  $2\theta$  الممثلة لمستويات ذات قص يساري (موجب) على النصف الأعلى لدائرة مور، بينما تقع الزوايا الممثلة لمستويات قص يميني (سالِب) في النصف الأسفل. وفي كلتا الحالتين تقاس  $2\theta$  بدءاً من النهاية اليمينية لمحور  $\sigma_n$ .

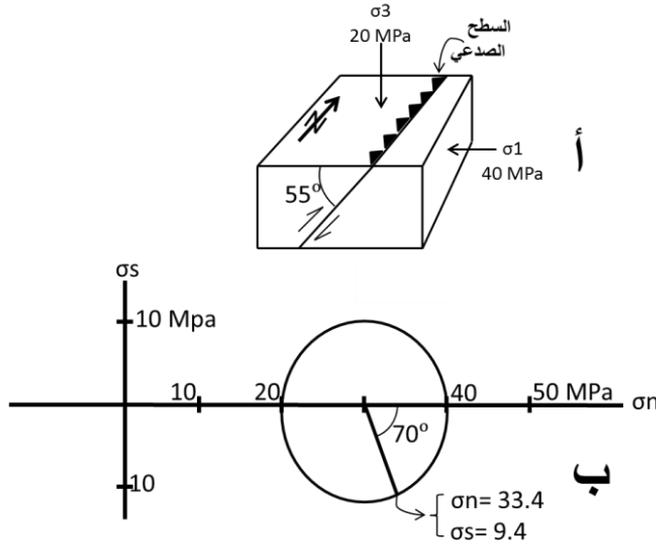


شكل (2-4): المظاهر الرئيسية لدائرة مور للإجهاد. تعرف دائرة مور بأنها مجموعة حالات لإجهاد على كل المستويات الممكنة في حقل إجهاد ثنائي البعد. يمكن تحديد موقع مستوي معطى على دائرة من خلال إيجاد الزاوية  $\theta$  (الزاوية بين المستوي و  $\sigma_3$ ) وتوقيع  $2\theta$  على دائرة مور. توضع المستويات ذات القص اليساري على النصف الأعلى من الدائرة، أما المستويات ذات القص اليميني فتوضع على النصف الأسفل. وتقاس  $2\theta$  (نحو الأعلى أو الأسفل) بدءاً من تقاطع  $\sigma_1$ .



شكل (2-5): خمسة مستويات واقعة ضمن حقل الإجهاد نفسه (Rowland, 1986). للاستخدام في التمرين الثاني (انظر التمارين). إن قيم الإجهادين  $\sigma_n$  و  $\sigma_s$  المؤثرين على المستوي 1 كانت قد حُسبت في التمرين الأول (انظر التمارين).

تتمثل الأهمية الرئيسية لدائرة مور في أنها تسمح بتحديد بياني سريع للإجهادات على مستوى ذي اتجاه معين. لنفترض مثلاً أن  $\sigma_1$  أفقي وموجه شرقاً غرباً وذو قدر يساوي 40 MPa ، بينما كان  $\sigma_3$  شاقولياً وقدره 20 MPa. ونريد إيجاد قيمة الإجهاد العمودي والقصي على سطح صدعي ذي اتجاه شمال - جنوب ويميل بزاوية مقدارها  $55^\circ$  نحو الغرب. يتم حل هذه المسألة كما يلي: يوضح الشكل (2-6 - أ) الوضع الجيولوجي لهذا الصدع. ويتم إنشاء دائرة مور للإجهاد من أجل القيم المعطاة لمحوري  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  (شكل 2-6 - ب). يتم بعد ذلك تحديد قيمة  $2\theta$  وإشارتها من أجل السطح لصدعي. الزاوية  $\theta$  هي الزاوية بين السطح الصدعي و  $\sigma_3$  ، وهي تساوي في هذه الحالة  $35^\circ$  ، وبالتالي فإن  $2\theta$  تساوي  $70^\circ$ . يكون للإجهادات القصية طبيعة يمينية (سالبة) ولذلك فإن  $2\theta$  ترسم في النصف الأسفل من دائرة مور (شكل 2-6 - ب). يمكن قراءة إحداثيات الإجهاد العمودي والقصي المتطابق مع النقاط الموجودة على دائرة مور على المحورين الأفقي والشاقولي من الرسم البياني. وفي هذه الحالة فإن قيمة  $\sigma_n$  تبلغ 33.4 MPa ، أما  $\sigma_s$  فتساوي 9.4 MPa.



شكل (2-6): حل دائرة مور للمسألة المطروحة في المثال، وذلك بهدف تحديد قيمة  $\sigma_s$  و  $\sigma_n$  بالنسبة لمستوى محدد. (أ) شكل ثلاثي البعد، (ب) حل دائرة مور (Rowland, 1986).

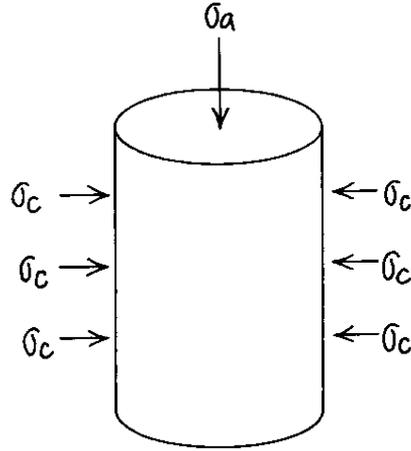
## 2.2.2. مغلف مور للتكسر The Mohr envelop of failure

يتمثل ما درسناه إلى الآن بتحديد الإجهادات المؤثرة على مستويات ذات اتجاهات مختلفة. غير أن هدفنا الأساسي يتمثل بفهم توجه وقدر الإجهاد الذي سيؤدي بالصخر لأن يتكسر. لنتصور أسطوانة من الصخر ضغطت محورياً (شكل 2-7). ولنفترض أن الضغط الحابس المطبق،  $\sigma_c$  ، ثابت ويساوي 40 MPa، أما التحميل المحوري Axial Load،  $\sigma_a$ ، فيبدأ عند قيمة 40 MPa ويزداد تدريجياً حتى تكسر الصخر تحت تحميل محوري يساوي 540 MPa. تسجل قيم أقدار  $\sigma_a$  في مراحل متعددة (لوحة 2-1)، ثم ترسم دائرة مور المتوافقة مع كل منها كما في الشكل (2-8). وفي مثل هذا النمط من التجارب تعد  $\sigma_a$  مشابهة لمحور  $\sigma_1$ ، بينما تعد  $\sigma_c$  مشابهة لمحور  $\sigma_3$ .

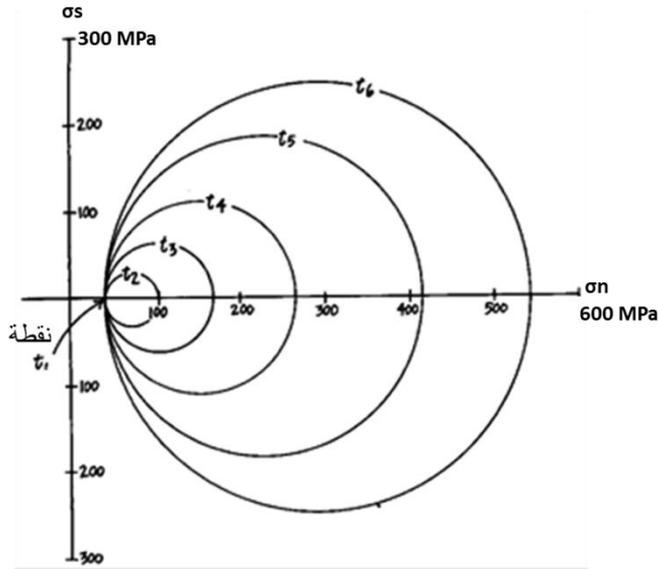
وكما يلاحظ في الشكل (2-8) تؤدي تجربة التكسر التي يكون الضغط الحابس فيها ثابتاً إلى تشكل سلسلة من دوائر مور التي تصبح أكبر فأكثر بشكل مستمر، وتتقاطع كل هذه الدوائر مع محور  $\sigma_n$  في نقطة  $\sigma_c$ . يمثل قطر دائرة مور ( $\sigma_c - \sigma_a$ ) متانة التكسر Fracture Strength وذلك عند تكسر الصخر. وفي التجربة المبينة في الشكل (2-8) يلاحظ أن متانة التكسر حددت بـ 500 MPa عند الضغط الحابس المساوي لـ 40 MPa.

لوحة (2-1): معطيات تجربة تكسر الصخر. إن دوائر مور المتطابقة مع كل مرحلة مرسومة في الشكل (2-8).

الزمن	(MPa) $\sigma_a$	(MPa) $\sigma_c$	(MPa) $\sigma_a - \sigma_c$
t 1	40	40	0
t 2	100	40	60
t 3	165	40	125
t 4	265	40	225
t 5	413	40	373
t 6	540	40	500



شكل (2-7): شكل تخطيطي لتجربة تكسر الصخر حيث تتعرض أسطوانة من الصخر للضغط المحوري. ويتم زيادة التحميل المحوري ( $\sigma_a$ ) بشكل مستمر، بينما يبقى الضغط الحابس ثابتاً.



شكل (2-8): دوائر مور الممثلة للمراحل المتتالية لتجربة تكسر الصخر المسجلة في اللوحة (2-1).

لنفترض الآن أننا أنجزنا سلسلة مؤلفة من ثلاث تجارب على عينات متطابقة، إنما بقيم مختلفة للضغط الحابس. سنلاحظ أن متانة التكسر للصخر ستزداد مع ازدياد الضغط الحابس. تبين اللوحة (2-2) قائمة بالنتائج لسلسلة التجارب هذه، حيث أن التجربة 1 هي نفسها التي نوقشت ورسمت في الشكل (2-8). أما في التجربة 2 فقد رفعت قيمة الضغط الحابس إلى 150 MPa، وفي التجربة 3 رفعت إلى 400 MPa. وقد تم رسم دوائر مور الثلاث الناتجة في الشكل (2-9). وبما أن الضغط الحابس يزداد في كل تجربة عن التجربة التي سبقتها، فإن دوائر مور عند التكسر تصبح أكبر بشكل مستمر.

إن دوائر مور عند التكسر تحت تأثير ضغوطات حابسة مختلفة تُعرّف بمجملها مايسمى "مغلف مور" Mohr Envelope أو "مغلف التكسر" Failure Envelope من أجل صخر محدد (شكل 2-9). إن مغلف التكسر يمثل مواصفة مشتقة تجريبياً للتعبير عن ترابط أقدار  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  الذي يسبب تكسر مادة صخرية معينة. وإذا كانت دائرة مور الممثلة لترابط معين من  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  تتقاطع مع مغلف تكسر المادة فإن هذه المادة ستتكسر، أما إذا كانت دائرة مور لا تتقاطع مع مغلف التكسر للمادة فإن هذه المادة لن تتكسر.

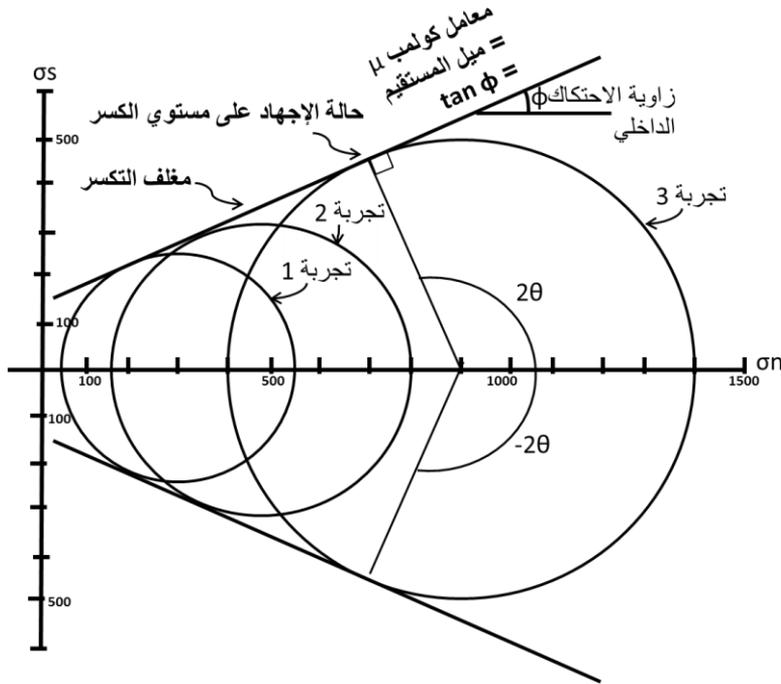
اللوحة (2-2): معطيات التجارب الثلاث على عينات صخرية متطابقة. تم رسم دوائر مور عند التكسر في الشكل (2-9).

رقم التجربة	$(MPa)\sigma_c$	$(MPa)\sigma_a$ عند التكسر	$(MPa)\sigma_a - \sigma_c$
1	40	540	500
2	150	800	700
3	400	1400	1000

يسمح مغلف التكسر أيضاً بتوقع توجه مستوي الكسر. وتكون حالة الإجهاد لهذا المستوي في صخر متمائل الخواص ممثلة بنقطة من دائرة مور واقعة على مغلف التكسر (أي نقطة تقاطع المغلف مع دائرة مور). أما الزاوية بين هذا المستوي واتجاه  $\sigma_3$  (الزاوية  $\theta$ ) فيمكن قياسها مباشرة من مخطط مور (شكل 2-9)، حيث تبلغ قيمة  $2\theta$  في هذا المثال  $114^\circ$ ، ولذلك فإن المستوي يصنع زاوية  $57^\circ$  مع  $\sigma_3$ .

إن متانة التكسر تزداد بشكل خطي مع ازدياد الضغط الحابس وذلك في مجال القيم المتوسطة للضغط الحابس، ما يؤدي إلى مغلف تكسر بشكل خط مستقيم، كما هو الحال بالنسبة للشكل (2-9). وتسمى الزاوية بين هذا الخط والمحور الأفقي زاوية الاحتكاك الداخلي  $\Phi$ ، كما أن ميل خط المغلف يسمى معامل كولمب  $\mu$  Coulomb Coefficient:

$$\mu = \tan \Phi$$



شكل (2-9): المواصفات الرئيسية لمغلف التكسر. يُعرّف مغلف التكسر من خلال دوائر مور عند التكسر لعينات صخرية متطابقة واقعة تحت تأثير ضغوط حابسة مختلفة. المعطيات المسجلة من أجل هذه التجارب موجودة في اللوحة (2-2).

إن معامل كولمب صفة قابلة للقياس للصخر، وتشير إلى سلوكية التكسر عند ضغوطات حابسة متوسطة ضمن القشرة الأرضية. ويشابه معامل كولمب معامل الاحتكاك الذي يقاوم الانزلاق لكتلة فوق أخرى. لندرس حالة صندوق ليس له سطح سفلي يتوضع فوق صندوق آخر (شكل 2-10). فلو تمت تعبئة الصندوقين بالرمل الجاف، فإنه من الممكن لسطح قصي أن يتشكل ما

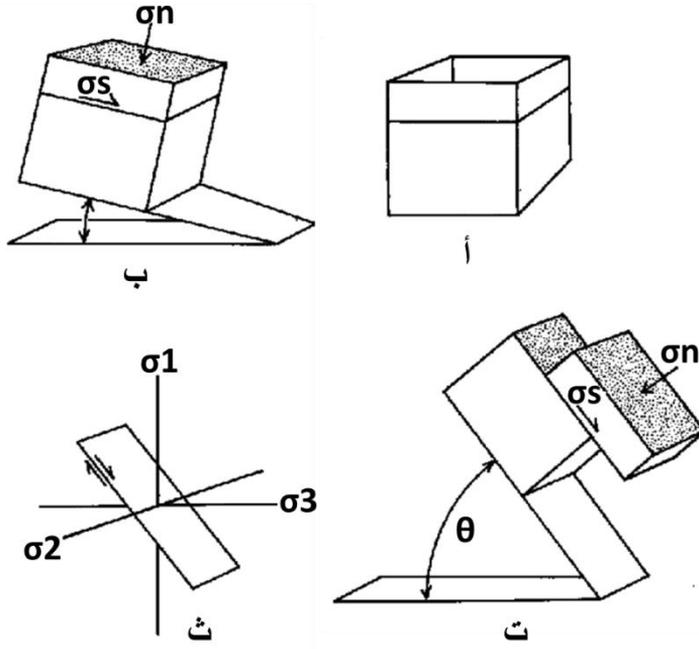
بين الرمل الموجود في الصندوق العلوي والرمل الموجود في الصندوق السفلي، وذلك من خلال دفع الصندوق العلوي جانبياً. وبأخذ هذا السطح القصي الكامن بالحسبان، يمكن أن نتخيل أن  $\sigma_n$  يتمثل بالقوة التي تبقى على الرمل مع بعضه، وأن  $\sigma_s$  يتمثل بالقوة التي تحاول أن تزلق الرمل الموجود في الصندوق العلوي (شكل 2-10 - ب). ولو تمت إمالة الصندوقين نصل إلى زاوية  $\theta$  يحدث عندها حركة على سطح القص (شكل 2-10 - ت). تشابه هذه الزاوية تلك الزاوية  $\theta$  التي استخدمناها كزاوية بين مستوي القص واتجاه  $\sigma_3$  (شكل 2-10 - ث). وفي الواقع فإن معامل كولمب يسمى أحياناً معامل الاحتكاك الداخلي Coefficient of internal friction. وكلما كان معامل كولمب أكبر، كبرت المقاومة للتكسر. إذا افترضنا أن مغلف التكسر يتمثل بخط مستقيم فإنه يمكن تحديد معامل كولمب من خلال تجربة تكسر واحدة، فمثلاً، يمكن استخدام أي من التجارب الموضحة في الشكل (2-9). وعلى العكس لو كان معامل كولمب معروفاً، فإن توجه سطوح القص بالنسبة لـ  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  يمكن توقعه. وفي الشكل (2-9) يمكن ملاحظة أن:

$$2\theta = 90 + \phi$$

أو

$$\theta = 45 + \phi/2$$

ويلخص الشكل (2-11) العلاقة بين  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  و  $\theta$  و  $\phi$  و  $\sigma_n$  و  $\sigma_s$ .

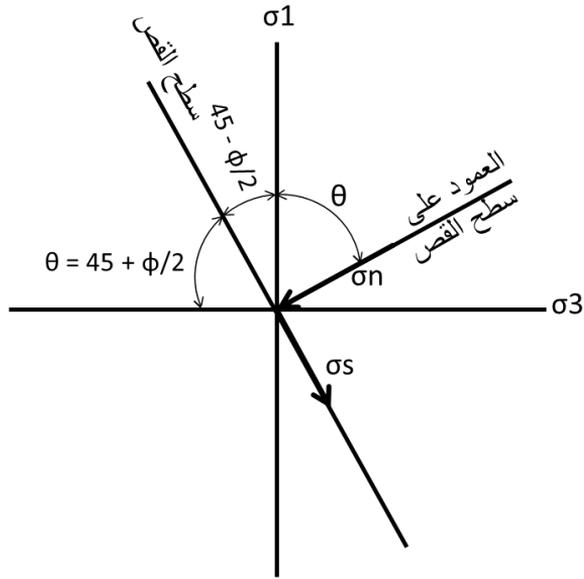


شكل (2-10): تجربة صندوق الرمل من أجل تحديد خصائص تماسك التربة. (أ) وضع صندوق بلا سطح سفلي فوق صندوق آخر. (ب) مُلئ الصندوقان بالتربة وتمت إماتتهما. (ت) تم الوصول إلى زاوية  $\theta$ ، حيث حصل الانزلاق. أُجريت هذه التجربة باستخدام رمل غير متماسك وجاف، حيث يعد معامل كولمب مساوياً للصفر و  $\theta = 45^\circ$ . (ث) توجه مستوي القص بالعلاقة مع الإجهادات الرئيسية (Rowland, 1986).

إن مادة ذات معامل كولمب  $\mu$  بقيمة الصفر (كما هو حال الرمل الجاف اللامتماسك في تجربة صندوق الرمل) سيكون لها زاوية احتكاك داخلي  $\phi$  مساوية للصفر، و  $\theta$  بقيمة  $45^\circ$ . وكلما ازدادت قيمة  $\mu$  ازدادت قيمة الزاوية  $\theta$ . وتبين اللوحة (2-3) القيم المقاسة لـ  $\mu$  من أجل بعض الصخور.

اللوحة (2-3): قيم معامل كولمب من أجل بعض الصخور.

معامل كولمب	الصخر
1.0 - 0.9	كوارتزيت
1.4	غرانيت
0.8	دياباز
0.5	حجر رملي
0.7	رخام
0.9 - 0.5	دولوميت
1.0	تراخيت



شكل (2-11): العلاقات العامة بين الإجهادات الرئيسية والزواويتين  $\theta$  و  $\phi$ .

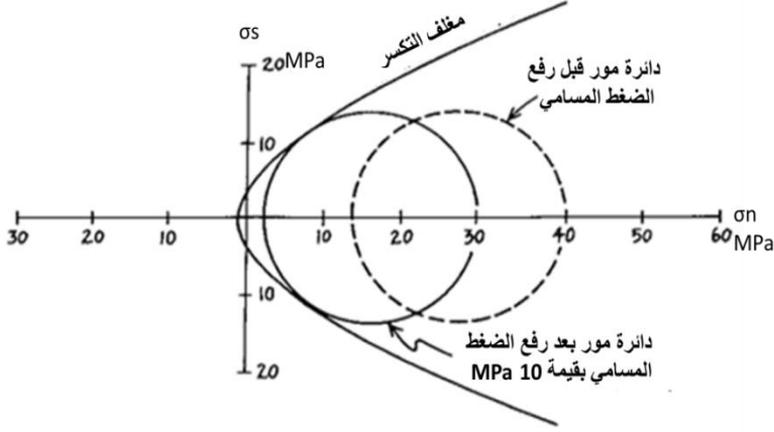
### 3.2.2. أهمية الضغط المسامي Pore Pressure:

يحتوي العديد من الصخور كميات معتبرة من الفراغ المسامي المملوء بسوائل تتسبب ببعض التحميل. لنأخذ كمثال الحجر الرملي المسامي الذي يمثلته مغلف التكسر الموضح بالشكل (2-12). يتعرض الحجر الرملي هذا للإجهادات الرئيسية التالية:  $\sigma_1 = 40 \text{ MPa}$  و  $\sigma_3 = 13 \text{ MPa}$ . تمثل دائرة مور المرسومة بخط متقطع في الشكل (2-12) هذه الحالة من الإجهاد. لنفترض الآن أننا أضفنا  $10 \text{ MPa}$  من الضغط المسامي إلى الصخر. سيؤدي ذلك إلى خفض قيمة الإجهادات الرئيسية بقيمة  $10 \text{ MPa}$ . إن ضغط السائل يمثل ضغطاً هيدروستاتياً (أي يتساوى في كل الاتجاهات)، ولذلك فإن الإجهادات الرئيسية ستتأثر بشكل متساو. وستبقى دائرة مور بالمقاس نفسه، إلا أنها ستتحرك نحو اليسار على المحور الأفقي بمسافة تعادل الزيادة في الضغط المسامي (شكل 2-12).

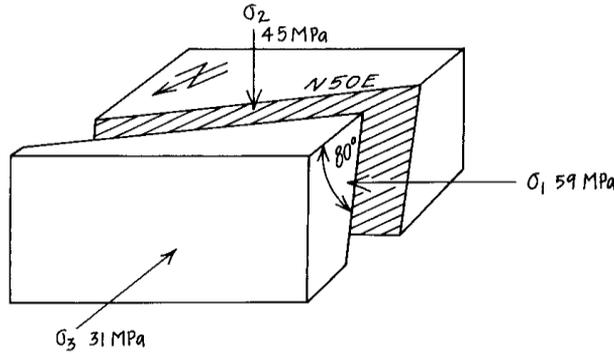
يعبر عن تناقص الإجهادات الرئيسية الناتجة من الضغط المسامي بما يسمى الإجهاد الفعال Effective Stress. والإجهاد الفعال المؤثر على الصخر يساوي الإجهاد الكلي (الإقليمي) ناقصاً الضغط المسامي.

نلاحظ في الشكل (2-12) أن دائرة مور المرسومة بخط متصل (الممثلة للإجهاد الفعال) تتقاطع مع مغلف التكسر. إن ازدياد الضغط المسامي يسبب تكسر هذا الصخر. تسمى هذه الظاهرة التكسر الهيدروليكي Hydraulic fracturing وهي تستخدم عادة في الصناعة النفطية لتوليد كسور في الصخور ذات النفاذية المنخفضة.

إن الضغط المسامي، بالإضافة لكونه يتحكم في بدء تكون كسور جديدة، فإنه يتحكم أيضاً بالحركة وبالزلازل على الصدوع الموجودة مسبقاً. وقد تمت الإشارة إلى ذلك للمرة الأولى في ستينيات القرن العشرين عندما تسبب الجيش الأمريكي بإثارة بعض الزلازل بالقرب من دنفر بعد قيامه بحقن مياه في الأرض. وبعد ذلك أجريت تجربة من قبل المسح الجيولوجي الأمريكي في كولورادو، حيث يبين الشكل (2-13) الموقع الجيولوجي والإجهادات الرئيسية في هذه التجربة. ولقد وجد أن صدع انزلاق منحرف موجود مسبقاً في تشكيلة حجر رمل فيبر Weber Sandstone قد تم تنشيطه بنجاح عندما تم حقن الماء في الأرض.



شكل (2-12): تأثير الضغط المسامي على التشوه التكرسي. تعتمد دائرة مور المرسومة بخط منقطع على الإجهادات الرئيسية المقاسة. وينقل الضغط المسامي دائرة مور إلى اليسار، كما هو موضح بدائرة مور للإجهاد الفعال والمرسومة بخط متصل.



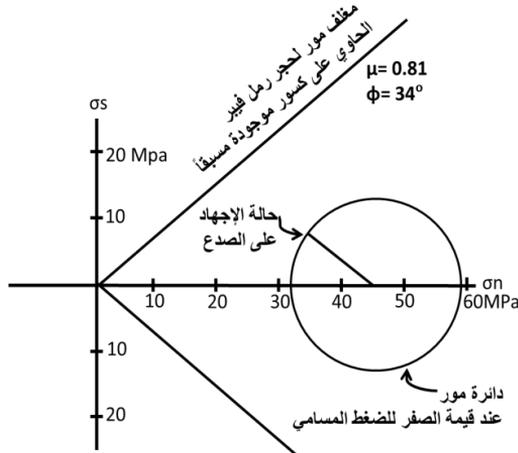
شكل (2-13): مخطط ثلاثي البعد يبين صدع الانزلاق المنحرف الذي تم تنشيطه تجريبياً في كولورادو، وذلك من خلال زيادة الضغط المسامي في الصخور. ولقد تم تحديد أقدار الإجهادات الرئيسية من قياسات أجريت خلال التكسر الهيدروليكي. ويخضع مستوي الصدع لإجهاد عمودي بقيمة 35 MPa وإجهاد قصي بقيمة 8 MPa (Rowland, 1986).

يبين الشكل (2-14) دوائر مور من أجل تجربة الصدع آنف الذكر. وبما أن الحركة كانت قد حدثت على صدع موجود مسبقاً، فإن مغلف التكسر يختلف عن المغلف العادي العائد لصخر سليم. إن مغلف التكسر الموضح في الشكل (2-12) مرسوم من أجل تجارب على حجر رمل

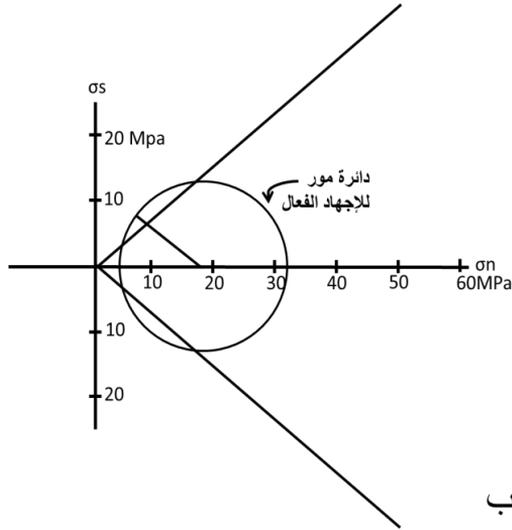
فبير غير المكسر. أما المغلف الموضح في الشكل (2- 14) فهو من أجل تجارب على عينات مقطوعة مسبقاً.

ويهدف تحديد حالة الإجهاد على الصدع الموضح بالشكل (2- 13) فإن أقدار الإجهادات الرئيسية ( $\sigma_1 = 59 \text{ MPa}$  و  $\sigma_3 = \text{MPa}$ ) تم تحليلها على مستوي الصدع باتجاه الانزلاق، ماعطى إجهاداً عمودياً بقيمة 35 MPa، وإجهاداً قصياً بقيمة 8 MPa. وتوضح دائرة مور في الشكل (2- 14 - أ) حالة الإجهاد هذه. ولقد أدى حقن الماء في الصخر إلى توليد ضغط مسامي بقيمة 27 MPa، مآدى إلى تخفيض قيمة  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  إلى الإجهادات الفعالة 32 MPa و 4 MPa على التوالي. إن دائرة مور للإجهاد الفعال الموضحة في الشكل (2- 14 - ب) مزاحة بقيمة 27 MPa إلى يسار دائرة مور الممثلة لحالة ما قبل الحقن.

ومن الملاحظ في الشكل (2- 14- ب) أن نقاط دائرة مور الممثلة لحالة الإجهاد على مستوي الصدع تقاطعت مع مغلف التكسر. وبالحقيقة فإن الحركة على الصدع حدثت عند هذا المستوى من الضغط المسامي. وعندما تم تخفيض الضغط بقيمة 3.5 MPa توقفت الزلازل عن الحدوث. وهذا يتوافق بشكل جيد مع الشكل (2 - 14 - ب) الذي يشير إلى أنه لو تم نقل دائرة مور بقيمة 3.5 MPa إلى اليمين فإن حالة إجهاد الصدع تقع مباشرة على مغلف التكسر.



أ



ب

شكل (2-14): دوائر مور ومغلف التكسر المحدد من أجل تشكيلة Weber Sandstone في كولورادو. (أ) بفرض ضغط مسامي بقيمة الصفر. (ب) دائرة مور للإجهاد الفعال بعد حقن سائل بضغط 27 MPa ، ما أدى إلى حدوث سلسلة من الزلازل. وقد تناقصت الزلازل عندما تم تحريك دائرة مور للإجهاد الفعال بقيمة 3.5 MPa نحو اليمين (Rowland, 1986).

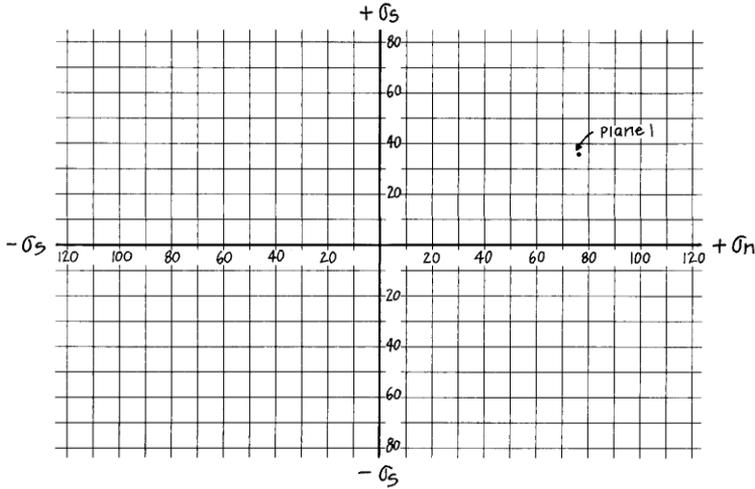
### 3.2. التمارين:

#### 1.3.2. التمرين الأول:

حدد الإجهاد العمودي والإجهاد القصي على مستوي صدعي ذي اتجاه مواز لمحور  $\sigma_2$  ويميل بزاوية مقدارها  $32^\circ$  (المستوي 1 في الشكل 2 - 5)، وذلك إذا علمت أن قيمة الإجهادات الرئيسية  $\sigma_1 = 100$  MPa (شاقولي) و  $\sigma_3 = 20$  MPa (أفقي).

#### 2.3.2. التمرين الثاني:

تم توقيع المستوي 1 العائد للشكل (2 - 5) على مخطط مور في الشكل (2 - 15). حدد الإجهادات الرئيسية على المستويات 2 حتى 5 ووقعها على الشكل (2 - 15) (تذكر أن العلاقات المثلثائية للزوايا في الربعين الثاني والرابع سالبة، بمعنى أن  $180^\circ = -1$ ).



شكل (2 - 15): مخطط مور للاستخدام في حل التمرين الثاني.

### 3.3.2. التمرين الثالث:

إذا كان  $\sigma_1$  شاقولياً ومساوياً لـ 50 MPa وكان  $\sigma_3$  أفقياً باتجاه شرق - غرب ومساوياً لـ 22 MPa، حدد الإجهاد العمودي والقصي على صدع ذي اتجاه شمال - جنوب وبميل بزاوية  $60^\circ$  نحو الشرق، وذلك باستخدام مخطط مور.

### 4.3.2. التمرين الرابع:

تحتوي اللوحة التالية (لوحة 2-4) على نتائج أربع تجارب تكسر لصخر معين.

لوحة (2-4): نتائج تجارب التكسر للصخر المدروس في التمرين الرابع (Rowland, 1986).

رقم التجربة	MPa $\sigma_c$	MPa عند التكسر $\sigma_a$
1	14	87
2	42	164
3	70	242
4	99	321

والمطلوب:

أ. ارسم دائرة مور لكل تجربة وارسم مغلف التكسر

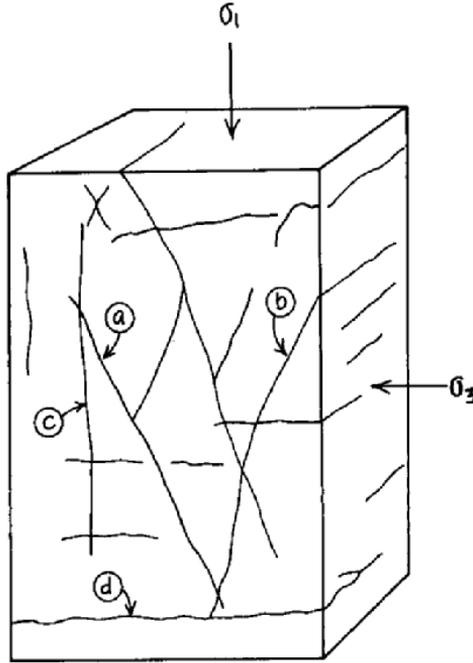
ب. حدد معامل كولمب للصخر المدروس

ت. حدد الزاوية  $\theta$  التي يتوقع أن يصنعها مستوي الكسر مع  $\sigma_3$  عندما تتكسر العينة الصخرية.

### 5.3.2. التمرين الخامس:

يبين الشكل (2-16) كتلة من الحجر الكلسي ناعم الحبيبية. تعرضت هذه الكتلة لتجربة تقصير بحدود 1% في حرارة الغرفة. وأدى ذلك لتكوّن أربع مجموعات من الكسور، حيث تمثل المجموعتان a و b سطوح قص مزدوجة. أما المجموعة c فتمثل كسور تمدد تكوّنت خلال التحميل. أما مجموعة الكسور d فهي كسور تمدد تكوّنت خلال إزالة التحميل عندما أصبح توجه

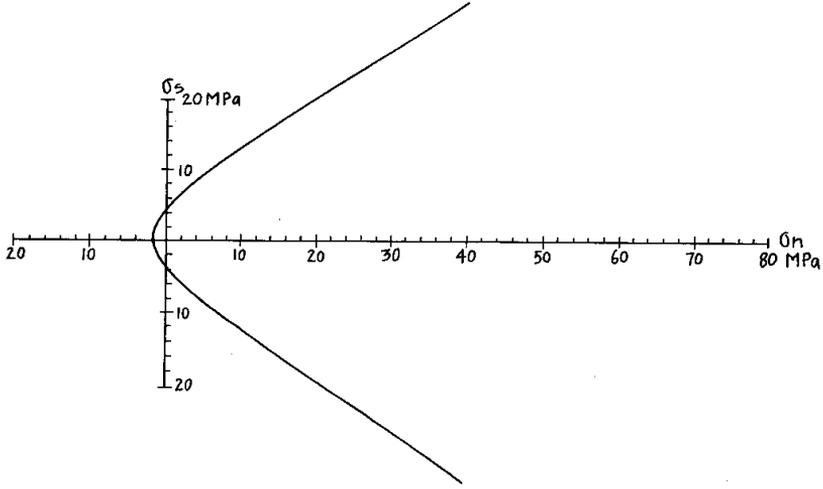
$\sigma_3$  شاقولياً في جهاز ضغط الصخر. حدد معامل كولمب  $\mu$  لهذا الصخر (تحت الضغط الجوي)؟



الشكل (2-16): مخطط كتلة الحجر الكلسي المستخدم في التمرين الخامس (Hobbs et al., 1976).

### 6.3.2. التمرين السادس:

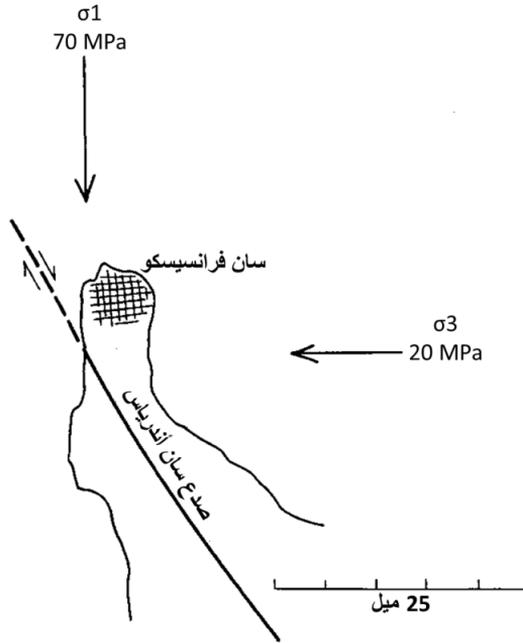
يبين الشكل (2-17) مغلف التكسر لحجر رملي قليل النفاذية وهو في الوقت نفسه خازن للنفط. لو كانت  $\sigma_1 = 72 \text{ MPa}$  و  $\sigma_3 = 42 \text{ MPa}$ ، حدّد قيمة الضغط المسامي اللازم لتكسير هذا الخزان هيدروليكيًا.



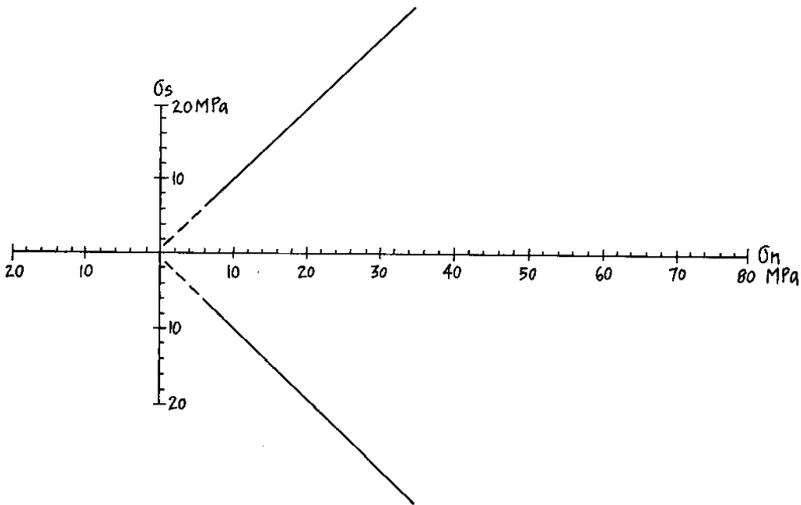
شكل (2-17): مغلف التكسر لحجر رملي يستخدم لحل التمرين السادس.

### 7.3.2. التمرين السابع:

يمثل الشكل (2-18) خريطة لمنطقة سان فرانسيسكو، ويتوضح عليها أيضاً صدع سان أندرياس الذي يعد صدع انزياح جانبي شاقولي. وتشير الخريطة إلى أقدار  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  وتوجهاتها الافتراضية. أما الشكل (2-19) فيوضح مغلف التكسر الافتراضي (بافتراض وجود كسور مسبقة) من أجل الصخور الموجودة بجوار الصدع. وبدلاً من انتظار "الزلازل الكبير" The big one لنفترض أننا نريد تحرير الانفعال المتراكم على صدع سان أندرياس من خلال زلازل نتحكم بها ونحرضها من خلال آبار حقن. حدد الضغط المسامي اللازم لحدوث الانزلاق على سطح الصدع.



شكل (2-18): خريطة لمنطقة سان فرانسيسكو وأثر صدع سان أندرياس. إن أقدار وتوجهات الإجهادات الرئيسية افتراضية (Rowland, 1986).



شكل (2-19): مغلف تكسري افتراضي لصخور قبل التكسر المجاورة لصدع سان أندرياس. للاستخدام في التمرين السابع.

### 8.3.2. التمرين الثامن:

تم تطبيق قوة بقيمة  $10^7$  نيوتن على مستوي بمساحة  $10\text{ م}^2$ . أما اتجاه تطبيق القوة فيصنع  $30^\circ$  مع العمودي على المستوي. ما هي قيمة الإجهاد العمودي على المستوي؟ وماهي قيمة إجهاد القص الأعظمي على هذا المستوي؟

### 9.3.2. التمرين التاسع:

قيست حالة الإجهاد عبر مستوي معين، فكانت  $\sigma = 1.2 \text{ kbar}$  و  $\tau = -0.6 \text{ kbar}$ . كما قيست على مستوي ثان عمودي على الأول فكانت  $\sigma = 0.6 \text{ kbar}$  و  $\tau = 0.6 \text{ kbar}$ . وبفرض أن إجهاداً رئيساً يوازي خط التقاطع بين المستويين:

- ماهي قيم  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$ ؟
- ماهي قيمة الزاوية بين  $\sigma_1$  والعمودي على المستوي الأول؟

### 10.3.2. التمرين العاشر:

قيس الإجهاد الرئيس الأعظمي والأصغري في جسم صخري متجانس فكان  $1.5 \text{ kbar}$  و  $0.8 \text{ kbar}$  على التوالي. ماهي قيمة الإجهاد العمودي وإجهاد القص على المستويات التالية الموازية لمحور الإجهاد المتوسط والتي تصنع الأعمدة عليها الزوايا التالية مع  $\sigma_1$ :  $25^\circ$  و  $45^\circ$  و  $60^\circ$  و  $65^\circ$  و  $80^\circ$ .

### 11.3.2. التمرين الحادي عشر:

ارسم أمثلة على دوائر مور (مع وضع  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  على المخطط) وذلك من أجل حالات الإجهاد التالية:

- أ- ضغط عام General compression
- ب- شد عام General tension
- ت- إجهاد ليثوستاتيكي Lithostatic stress
- ث- قص صرف Pure shear
- ج- شد وحيد المحور Uniaxial tension
- ح- ضغط وحيد المحور Uniaxial compression

## الباب الأول - الفصل الثالث

### قياس الانفعال Strain Measurement

يهدف هذا الفصل إلى:

- قياس الانفعال الطولاني Longitudinal Strain وانفعال القص Shear Strain من خلال الأجسام المشوهة.
- تحديد الأبعاد النسبية لإهليلج الانفعال وتوجهه بدراسة الأجسام المشوهة.
- تحديد أي من حقول انفعالٍ ثلاثةٍ يعبر عن بنية معينة.
- تحديد توجه الإهليلج المجسم للانفعال المعبر عن تطور بنية معينة.
- تحديد أبعاد الإهليلج المجسم للانفعال.

يعبر الانفعال عن تغير في الشكل أو الحجم أو كليهما. وتشكل دراسة كيفية تشوه الصخور في شروط مختلفة واحداً من أهم المفاهيم في علم الجيولوجيا البنيوية. إن ما نقيسه عادة هو التشوه نفسه، أما الإجهاد الذي سبب هذا الانفعال فلا يمكن قياسه. غير أن القياس الدقيق للانفعال يمكن أن يؤدي أحياناً إلى بعض الاستدلالات حول الإجهاد.

إن استنتاج تاريخ الإجهاد الذي أثر في الصخر، من خلال الانفعال المقيس، يمثل هدفاً رئيساً لعلم الجيولوجيا البنيوية، ومن هنا تأتي أهمية إجراء القياس الدقيق للانفعال (دركل، 1994؛ بايرلي ودركل، 2000؛ Rowland, 1986; Ramsay and Huber, 1983; Davis and Reynolds, 1996; Ragan, 2009). سنقوم في هذا الفصل بإجراء قياس الانفعال بطرائق متعددة، حيث ندرس تغيرات الطول (الانفعال الطولاني) وتغيرات الزوايا بين الخطوط المتقاطعة (انفعال القص).

### 1.3. الانفعال الطولاني

إذا كان الطول الأصلي لخط معروفاً، فإنه يمكن إجراء مقارنة بين الطول الأصلي ( $l_0$ ) مع الطول النهائي المشوه ( $l_1$ ). حيث يتم حساب ما يسمى التمدد Extension (e).

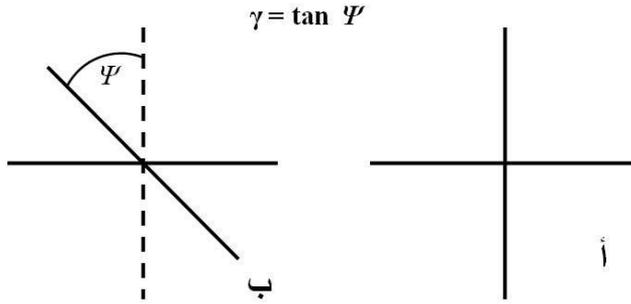
$$e = l_1 - l_0 / l_0$$

ومن الواضح أنه إذا كان  $l_1$  أكبر من  $l_0$  فإن  $e$  موجبة، أما إذا كانت  $l_1$  أصغر من  $l_0$  فإن  $e$  سالبة. فمثلاً لو أن خطأً تطاول مرتين مقارنةً مع طوله الأصلي لوجدنا أن  $e = 1.0$  (أي أن 100% تمت إضافتها للطول الأصلي). ومن أجل خط تقلص لنصف طوله الأصلي، نجد أن  $e = -0.5$  (أي أن 50% تم طرحها من الطول الأصلي). وسنعتبر خلال هذا الفصل أن الطول الأصلي غير المشوه للخطوط يساوي وحدة واحدة. ويمكن تعريف الطول بعد التمدد بشكل  $1 + e$ .

### 2.3. انفعال القص

إذا كان الشكل الأصلي لجسم مشوه معروفاً، فإنه يمكن قياس التغيرات في العلاقات الزاوية الموجودة في هندسية هذا الجسم. ويعرّف القص الزاوي Angular Shear ( $\psi$ ) بأنه التغير الزاوي الحاصل نتيجة التشوه لخطين كانا متعامدين قبل التشوه (شكل 3-1). أما انفعال القص Shear Strain ( $\gamma$ ) فيساوي قيمة ظل القص الزاوي

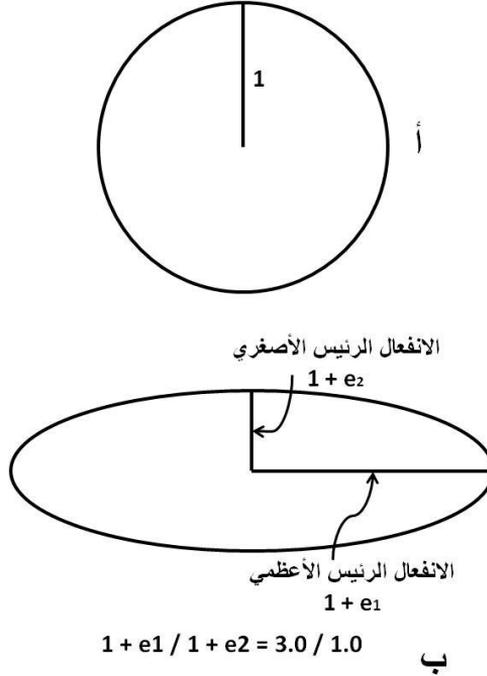
$$\gamma = \tan \psi$$



شكل (3-1): انفعال القص مقيساً على شكل قص زاوي ( $\psi$ ).  
(أ) قبل التشوه. (ب) بعد التشوه

### 3.3. إهليلج الانفعال

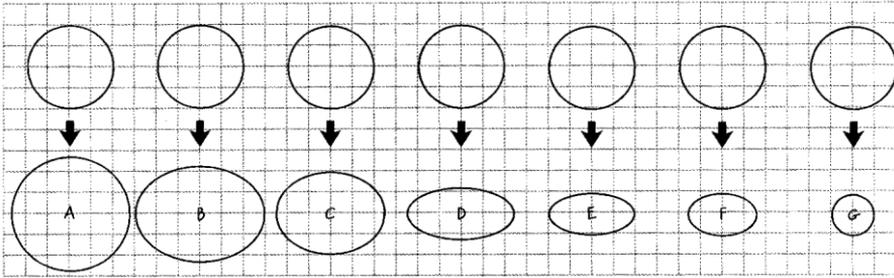
يوصف التشوه في الصخور من خلال تغير شكل أو مقاس كرة مفترضة. تصبح الكرة المفترضة ضمن الصخر إهليلجاً مجسماً نتيجة حدوث انفعال متجانس Homogeneous Strain. ومن المفيد قبل دراسة التشوه ثلاثي البعد أن نختبر التشوه ثنائي البعد. لننتصر مستوياً حاوياً على دائرة. تتحول هذه الدائرة إلى إهليلج نتيجة التشوه (شكل 3-2). ويدعى الإهليلج المتشكل بهذه الطريقة إهليلج الانفعال Strain Ellipse، حيث يصف توجهه وأبعاده تشوه المستوي الذي يقع فيه هذا الإهليلج. يمثل الشكل (3-2 - أ) دائرة يساوي نصف قطرها واحدة طولية، أما الشكل (3-2 - ب) فيمثل إهليلج انفعال نتج من تشوه الدائرة. ويوصف إهليلج الانفعال من خلال انفعالين رئيسيين يتطابقان مع نصفي المحورين الطويل والقصير لإهليلج الانفعال. ويكون طول هذين المحورين مساوياً لـ  $1 + e_1$  و  $1 + e_2$  على التوالي. ويوصف شكل الإهليلج من خلال نسبة الانفعالين الرئيسيين (وهو يساوي في مثالنا 3:1).



شكل (3-2): إهليلج الانفعال. تتحول الدائرة ذات نصف القطر المساوي لواحدة طولية (أ) إلى إهليلج انفعال ذي محوري انفعال رئيسيين أعظمي وأصغري (ب).

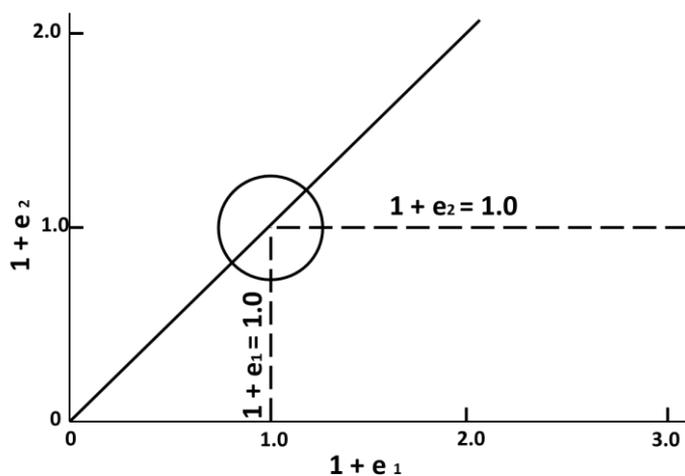
### 4.3. حقول الانفعال الثلاثة

يمكن لإهليلجات الانفعال أن تأخذ أشكالاً عديدة. يبين الشكل (3-3) سبع دوائر ذات نصف قطر 1، كما يبين إهليلج الانفعال المتشكل من كل من هذه الدوائر. أما الشكل (3-4) فيبين مخططاً يربط ما بين  $I + e_1$  و  $I + e_2$ . وتكون الدائرة غير المشوهة عند  $I = 1 + e_2$  و  $I = 1 + e_1$ . ويتوقع الحرف الدال على كل من الإهليلجات الموضحة في الشكل (3-3) في مكانه المناسب في الشكل (3-4) نجد أن مواقع هذه الإهليلجات السبعة تمثل سبعة أصناف عامة. ونلاحظ هنا أن أياً من هذه الإهليلجات لن يقع فوق المستقيم القطري في هذا المخطط، بسبب أن  $I + e_1$  دوماً أكبر من  $I + e_2$  أو يساويه. ويمثل المستقيم القطري مواقع إهليلجات الانفعال المتمثلة بدوائر. يمثل الإهليلج A تطاؤلاً متساوياً في كل الاتجاهات، كما أن الإهليلج G يمثل تقلصاً متساوياً في كل الاتجاهات، حيث أن كلا من A و B يقعان على هذا المستقيم.

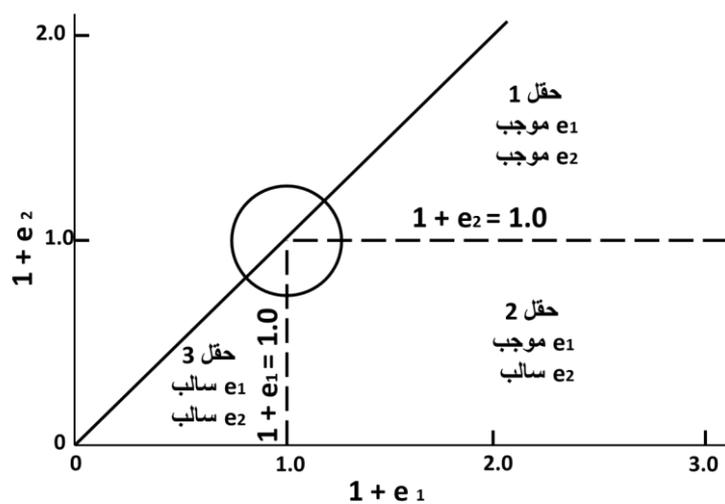


شكل (3-3): سبع دوائر وإهليلجات الانفعال المتوافقة معها. يمكن لإهليلجات الانفعال أن تستخدم في الشكل (3-4).

يمكن تقسيم المخطط (شكل 3-4) إلى حقول ثلاثة، حيث يلعب الخطان  $0 = e_2$  و  $0 = e_1$  دور الحدود بين هذه الحقول (شكل 3-5). يتضمن الحقل 1 كل الإهليلجات التي يكون فيها لكلا الانفعالين الرئيسيين تمديداً موجباً، كما هو حال الإهليلج B في الشكل (3-3). أما الحقل 2 فيحتوي الإهليلجات التي يكون فيها  $e_1$  موجباً و  $e_2$  سالباً، كما هو حال الإهليلج D في الشكل (3-3). ونجد أن الحقل 3 يشتمل على الإهليلجات التي يكون فيها كل من  $e_1$  و  $e_2$  سالباً، كما هو حال الإهليلج F في الشكل (3-3).



شكل (3-4): مخطط يبين علاقة  $1+e_2$  مع  $1+e_1$ ، من أجل إهليلج انفعال محدد (Rowland, 1986).



شكل (3-5): مخطط العلاقة بين قيمتي  $1+e_1$  و  $1+e_2$  يوضح وجود ثلاثة حقول (Rowland, 1986).

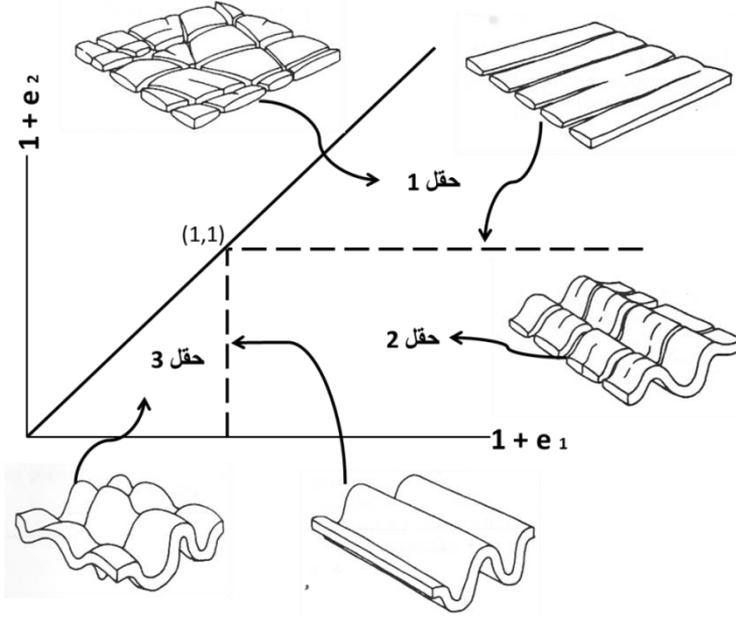
### 5.3. تطبيقات على بعض البنيات الجيولوجية

يمكن لبنيات محددة أن تتطور في الصخور المتطبقة، وتفيد هذه البنيات في تحديد خصائص إهليلج الانفعال والحقل الذي ينتمي إليه هذا الإهليلج. تتميز بعض الطبقات بلزوجة أعلى من طبقات أخرى، ولذلك تكون أقل قابلية لأن تسيل. وعندما تتعرض مثل هذه الطبقات للتطاوّل ستتعرض للتكسر أو لأن تنقسم إلى كتل، أما الطبقات الأقل لزوجة فإنها ستسيل حول هذه الكتل، ما يؤدي إلى تشكل بنيات خاصة تسمى "البنيات السجقية" Boudins، ويبيّن الشكل (3-6) هذه البنية في مقطعها العرضي.



شكل (3-6): مقطع عرضي في البنية السجقية.

إذا كانت لزوجة الصخر لا تسمح له بالتشوه اللين، فإن الكسور ستتشكل عموماً عندما يتعرض الصخر للتطاوّل. وتكون الكسور متعامدة مع الانفعال الرئيس الأعظمي. وهكذا يمكن استخدام البنية السجقية والكسور وهندسية الطيات وأشكال التشوهات الأخرى لتحديد حقل الانفعال الذي خضع الصخر له. يبيّن الشكل (3-7) أنماط البنيات التي تتطور في كل من حقول الانفعال الثلاثة. ادرس هذا المخطط بدقة وتأكد من أنك فهمت سبب وجود كل بنية في كل حقل من حقوله.



شكل (3-7): الحقول الثلاثة الموضحة في الشكل (3-5) مع أنماط البنيات المتوقع تكونها في كل حقل (Rowland, 1986).

### 6.3. مسار التشوه متحد المحور The Coaxial Deformation Path

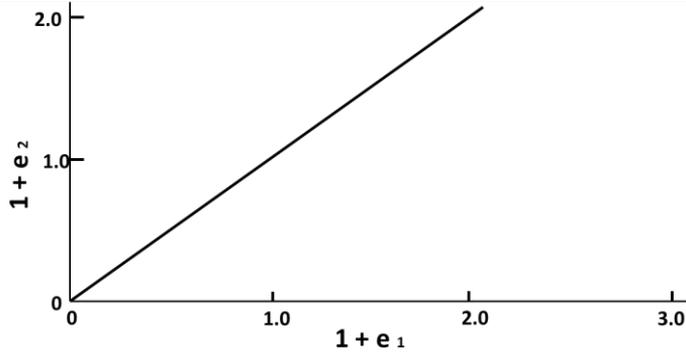
إن مدرسناه إلى الآن يوضح إهليلجات الانفعال كنتاج نهائي للتشوه، غير أنه من المهم أيضاً ملاحظة الكيفية التي يتطور بها إهليلج الانفعال مع تقدم التشوه. وسنقتصر في دراستنا هنا على إهليلجات الانفعال الموجودة في الحقل 2، لأن هذه هي الحالة العامة. ورغم ذلك فإنه يمكن لإهليلجات الانفعال أن تتطور بعدد لانهائي من الطرائق، غير أننا سنناقش بشيء من التفصيل الطريقتين الأكثر بساطة.

#### 1.6.3. تجربة (1): الانفعال متحد المحور في معجون اللعب

يتشكل إهليلج الانفعال الأكثر بساطة من خلال انضغاط دائرة. وهذا مايمكن تنفيذه بوساطة معجون اللعب. وتسجل نتائج هذه التجربة في الجدول التالي (لوحة 3-1) كما توقع هذه النتائج على المخطط الموضح بالشكل (3-8).

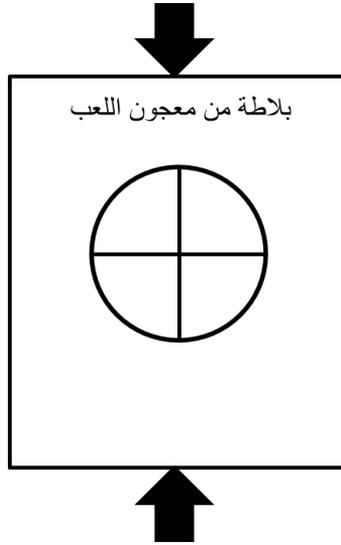
لوحة (3-1): معطيات التجربة (1).

$\frac{1+e_1}{1+e_2}$	$1+e_2$	$e_2$	طول نصف المحور القصير	$1+e_1$	$e_1$	طول نصف المحور الطويل	الزمن
1.0:1.0	1.0	0	$l_0 =$	1.0	0	$l_0 =$	$t_0$
							$t_1$
							$t_2$
							$t_3$
							$t_4$
							$t_5$
							$t_6$



شكل (3-8): مخطط لتوقع مسار التشوه في التجربة (1).

اصنع بلاطة مسطحة من معجون اللعب، ثم اطبع عليها دائرة ذات قطر يبلغ عدة سنتيمترات وذلك بوساطة غطاء علبة، ثم اطبع خطين متعامدين عبر مركز هذه الدائرة كما في الشكل (3-9). سيلعب هذان الخطان دور خطي الانفعال الرئيس عند تطور الإهليج. قس نصف قطر الدائرة وسجله، ويمثل هذا القياس قيمة " $l_0$ " لكلا محوري إهليج الانفعال، حيث يجب معرفة هذه القيمة من أجل حساب  $e$ ، ويعطى نصف قطر الدائرة قيمة الطول 1.0.



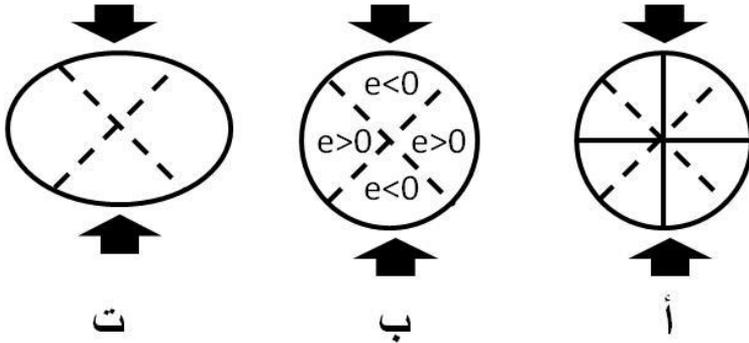
شكل (3-9): دائرة ومستقيمان متعامدان على بلاطة المعجون للقيام بالتجربة.

اضغط بلاطة معجون اللعب بقيمة صغيرة بشكل مواز لأحد الخطين المرسومين. قس طول نصف القطر الكبير ونصف القطر الصغير للإهليلج الناتج، وحدد قيم  $\theta_1$  و  $\theta_2$ . تابع إملاء الجدول السابق مع كل زيادة صغيرة في تشوه معجون اللعب. بعد قياس أبعاد الإهليلجات الستة ارسم مسار التشوه في الشكل (3-8).

يفيد، في مثل هذه التجارب، التمييز بين مايسمى الخطوط المادية Material lines من مثل الخطوط التي ضغطت في المعجون، والخطوط الهندسية Geometric lines كالحدود بين نطاق الانضغاط ونطاق التطاؤل. ويسمى هذا النمط من الانفعال "متحد المحور". ويسمى نمط مسار التشوه الملاحظ في هذه التجربة "القص الصرف" Pure Shear، الذي يُعرَّفُ بأنه انفعال متحد المحور دون حدوث تغير حجمي. كما يمكن اختبار ما إذا كان سطح الإهليلج حافظ على مساحته وذلك من خلال مقارنة مساحة الدائرة غير المشوهة مع مساحة الإهليلج. لنأت الآن إلى خصائص أخرى للانفعال متحد المحور.

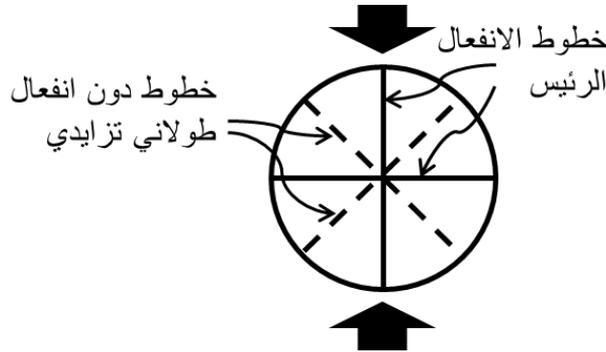
### 2.6.3. تجربة (2): خطوط دون تزايدات في الانفعال الطولاني

أعد تشكيل بلاطة معجون اللعب، ثم اطبع دائرة عليها مرة أخرى وأضف الخطوط المتعامدة. وبالإضافة لذلك اطبع خطين متعامدين آخرين على الدائرة، بحيث يصنعان زوايا  $45^0$  مع الخطين المتعامدين السابقين كما هو موضح في الشكل (3-10 - أ). قم بتشويه بلاطة المعجون كما صنعت في التجربة السابقة، وانتبه لما سيحصل للزوج الثاني من الخطوط. يقسم الزوج الثاني من الخطوط المتعامدة الدائرة إلى نطاقين للانضغاط والتطاول وذلك عند بدء التشوه (شكل 3-10 - ب). يدور هذان الخطان الماديان نحو داخل نطاق التطاول خلال التشوه، إلا أن حدود النطاق نفسها لا تتحرك خلال تطور إهليلج الانفعال. وكما يلاحظ في الشكل (3-10 - ت) فإن النسبة المئوية لمساحة الإهليلج في نطاق التطاول تتزايد على حساب النسبة المئوية في نطاق التقصير، إلا أن حدود هذين النطاقين تبقى متعامدة مع بعضها وتصنع  $45^0$  مع محاور الانفعال الرئيسية.



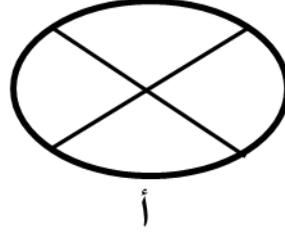
شكل (3-10): الانفعال متحد المحور، الذي يتميز بأن محاور الانفعال الرئيسية لا تدور فيه. (أ) تمثل الخطوط المتصلة محاور الانفعال. (ب) تمثل الخطوط المتقطعة كلا من الخطوط المادية المطبوعة على معجون اللعب والخطوط الهندسية التي تمثل الحدود بين نطاق التمدد ونطاق الانضغاط. (ت) لا تتحرك حدود النطاق الهندسية خلال التشوه، أما الخطوط المادية (غير مرسومة على الشكل) فتدور إلى داخل نطاق التمدد.

إن تطور إهليج الانفعال عملية مستمرة، غير أن تحليلها يتم من خلال تزايدات صغيرة تسمى "إهليجات الانفعال التزايدية" Incremental Strain Ellipses. وتدعى الخطوط الهندسية التي تفصل نطاق التناول عن نطاق التقصير "خطوطاً عديمة الانفعال الطولاني التزايدية" Lines of no Incremental Longitudinal Strain (شكل 3- 11)، لكون هذه الخطوط تتميز بقيمة  $e = 0$  من أجل إهليجات الانفعال التزايدية. ومع التطور المستمر للإهليج، فإن الخطوط المادية التي تأخذ مكان "الخطوط عديمة الانفعال الطولاني التزايدية" في أحد إهليجات الانفعال التزايدية تُعبر إلى نطاق التناول في التزايد التالي.



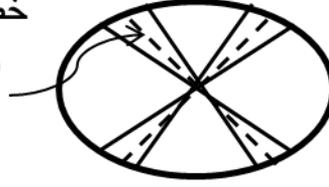
شكل (3- 11): إهليج الانفعال التزايدية.

يبدو إهليج معجون اللعب الآن مشابهاً لذلك الموضح في الشكل (3- 12 - أ). اطبع خطين جديدين على إهليج الانفعال عند موقعي الخطين عديمي الانفعال الطولاني التزايدية، ثم اطبع قريباً منهما خطين آخرين في نطاق التقصير يمران عبر مركز الإهليج، كما هو موضح في الشكل (3- 12 - ب). لقد تعرض هذان الخطان للتقصير حتى الآن. ولكن ومع حصول تشوه جديد لمعجون اللعب، لاحظ كيف أن هذين الخطين المتقاصرين يصبحان خطين عديمي الانفعال الطولاني التزايدية لبرهة، ثم يبدآن بالتناول. وهكذا خلال التشوه، تتعرض بعض الخطوط للتناول المستمر ويتعرض بعضها للتقصير ثم التناول، بينما يتعرض بعضها الآخر للتقصير بشكل مستمر. وتشرح هذه السلوكية عديداً من المظاهر في الصخور المشوهة.



أ

خطوط دون انفعال  
طولاني تزايدي

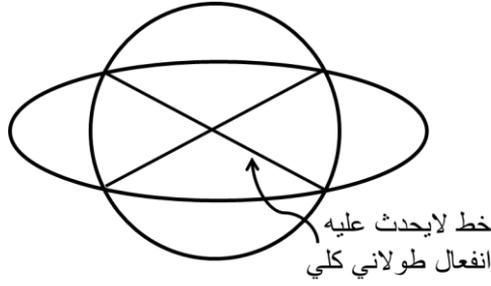


ب

شكل (3- 12): الخطوط المادية للتقصير والتطاؤل. (أ) إهليلج معجون اللعب المشوه مع خطوط مادية كانت متعامدة في الأصل. (ب) الإهليلج السابق نفسه مع مجموعتين إضافيتين من الخطوط المادية.

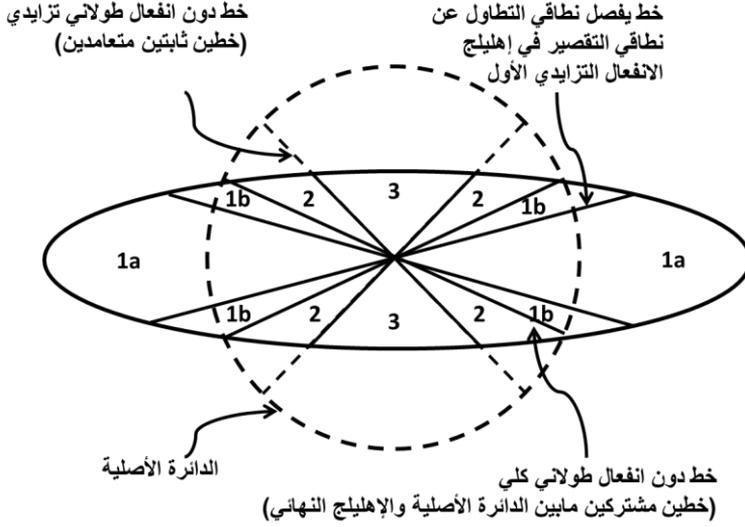
### 3.6.3 إهليلج الانفعال الكلي متحد المحور The Coaxial Total Strain Ellipse

عندما يتوقف التشوه يمكن أن نسمي إهليلج الانفعال "إهليلج الانفعال الكلي" Total Strain Ellipse. لنتصور أننا طبعنا دائرة ذات نصف قطر واحد على معجون اللعب، وأننا قمنا بتشويهها إلى إهليلج. لنتصور أيضاً أننا طبعنا دائرة أخرى فوق الإهليلج آنف الذكر كما هو موضح في الشكل (3- 13). يمكننا ملاحظة أن محورين للإهليلج هما في الوقت نفسه قطران للدائرة. وبغض النظر عن كيفية التقصير والتطاؤل التي تعرضت لها هذه الخطوط خلال تطور إهليلج الانفعال، فإن النتيجة الصرفة هو أن هذه الخطوط لها الطول نفسه في بدايتها، وهي تسمى "الخطوط عديمة الانفعال الطولاني الكلي" Lines of no total Longitudinal Strain. إن كل محاور الإهليلج التي تقع داخل الدائرة الواحدة كانت قد تعرضت للتقصير الصرف، بينما تعرضت كل المحاور التي تمتد خارج الدائرة إلى تطاول صرف.

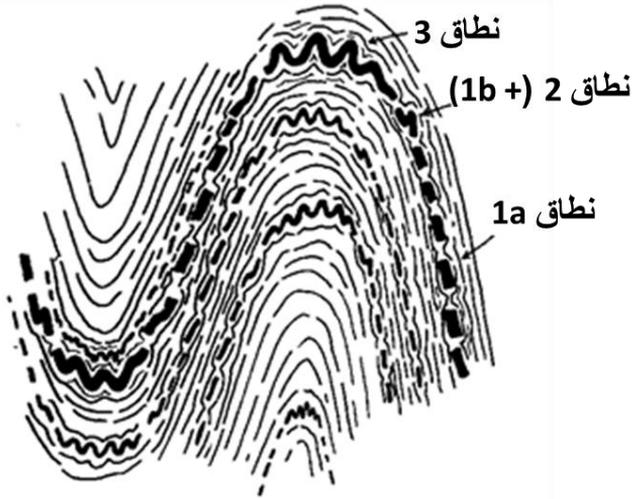


شكل (3-13): إهليلج الانفعال الكلي متضمناً خطوطاً عديمة الانفعال الطولاني الكلي.

يمكن تقسيم الإهليلج الكلي متحد المحور إلى أربعة نطاقات تصف تاريخ تشوه الخطوط. ويبين الشكل (3-14) هذه النطاقات كما أنه يبين البنيات المتوقعة تشكلها في كل منها. يؤدي النطاق 1a، الذي يتضمن خطوطاً تعرضت للتطاول فقط، إلى تشكل البنية البودينية في الطبقات العصية. أما النطاقان 1b و 2 فيحتويان خطوطاً تعرضت للتقصير في مرحلة مبكرة ثم تُبع ذلك بتطاولها، حيث تنتهي الخطوط في 1b طويلاً، بينما تنتهي الخطوط في 2 قصيرة. وفي هذين النطاقين تصبح الطيات التي تشكلت خلال مرحلة التقصير مشوشة أو منبسطة خلال مرحلة التطاؤل. يتضمن النطاق 3 خطوطاً تتعرض للتقصير فقط، وهذا ما يؤدي إلى تكوين طيات ذات ساعات (ارتفاعات) كبيرة وعرض صغير. ويبين الشكل (3-15) طية تحتوي بنيات من كل النطاقات.



شكل (3-14): إهليلج انفعال كلي متحد المحور، مع نطاقات أربعة تختلف فيما بينها بتاريخ التشوه (Rowland, 1986).



شكل (3-15): طية تطورت من خلال انفعال متحد المحور وتبدي بنيات في كل نطاق. إن محور الانفعال الرئيس الأعظمي شاقولي (Ramsay and Huber, 1983).

### 4.6.3. تجربة (3): إهليلجات الانفعال الكلي المتراكبة Superimposed Total Strain

#### Ellipses

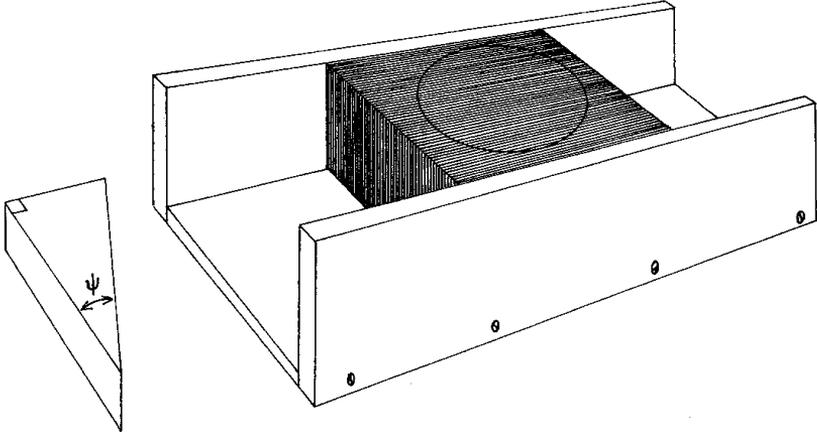
لنقم بطباعة دائرة على سطح معجون اللعب ثم نقوم بتشويهاها إلى إهليلج واضح. ولو قمنا بضغط البلاطة من جهة أخرى، لوجدنا أن إهليلج الانفعال الكلي الناتج من المرحلة السابقة سيتشوه إلى إهليلج مختلف الشكل بتأثير حقل انفعال مختلف التوجه. وهكذا فإن أي إهليلج انفعال يمكن ان يكون ناتجاً من عدد من مراحل الانفعال مختلفة التوجه. أي أن الأمور يمكن أن تكون أعقد مما تبدو.

### 7.3. الانفعال لامتد المحور Noncoaxial Strain

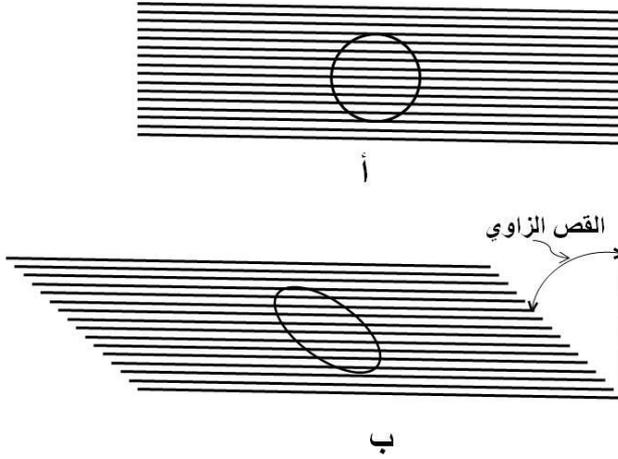
#### 1.7.3. تجربة (4): إهليلج انفعال ورق اللعب

يتميز الانفعال لامتد المحور بأن محاور الانفعال الرئيسية تغير اتجاهها بالنسبة لخطوط مادية، ويمكن تمثيله بسهولة من خلال مجموعة من أوراق اللعب (أو بطاقات حاسوب) ثخانتها 5 سم أو أكثر. وفي الحالة النموذجية توضع هذه البطاقات ضمن صندوق خشبي خلال التجربة كما هو موضح في الشكل (3-16).

ارسم أولاً دائرة على جانب مجموعة البطاقات. استخدم مسطرة لإحداث قص موحد باتجاه واحد، ما يؤدي إلى تشويه الدائرة إلى إهليلج (شكل 3-17). يسمى التشوه من نمط "ورق اللعب" قصاً بسيطاً Simple Shear. يتصف القص البسيط بأنه تشوه لامتد لمحور وثابت الحجم وثنائي البعد أي أنه دون تسطح في الاتجاه المتعامد مع مستوي الانزلاق، كما أن مساحات الإهليلجات الناتجة من القص متساوية فيما بينها.



شكل (3-16): صندوق خشبي يستخدم لوضع بطاقات الحاسوب لإجراء تجربة الانفعال لامتد المحور.



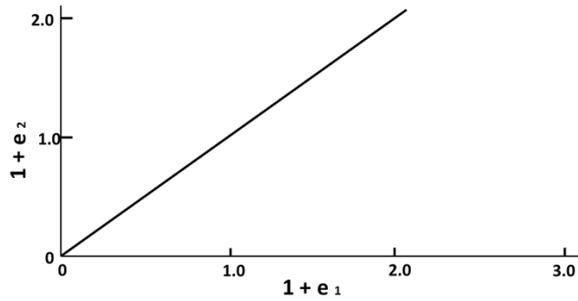
شكل (3-17): انفعال لامتد المحور يتوضح باستخدام بطاقات الحاسوب. (أ) قبل التشوه. (ب) قص زاوي بعد التشوه (Ramsay and Huber, 1983).

إن من المفاهيم المهمة للقص البسيط، وللانفعال لامتد المحور عموماً، هو مقدار الدوران، الذي يمكن قياس زاويته  $\psi$  (القص الزاوي) كما هو موضح في الشكل (3-17 - ب).

قم بإجراء تشوه قصي على مجموعة البطاقات بتزايدات صغيرة لانتجاوز  $10^0$  من القص الزاوي، وسجل المعطيات الناتجة في الجدول التالي (اللوحة 3-2)، ثم ارسم مسار التشوه للإهليلج على الشكل (3-18)، كما فعلت بالنسبة لتجربة الانفعال متحد المحور في الشكل (3-8).

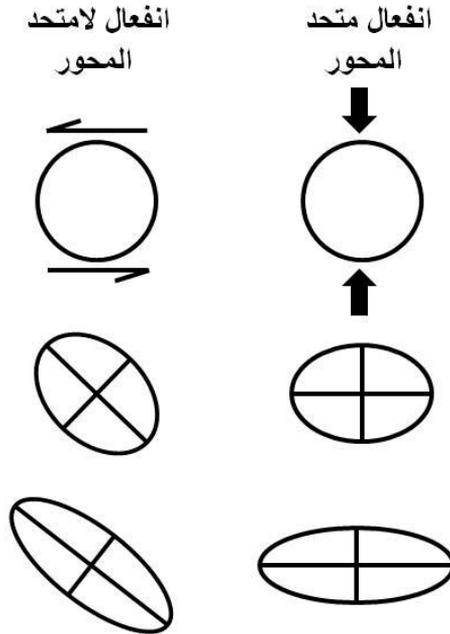
اللوحة (3-2): معطيات التجربة (4).

زاوية الدوران	$\frac{1+e_1}{1+e_2}$	$1+e_2$	$e_2$	طول نصف المحور القصير	$1+e_1$	$e_1$	طول نصف المحور الطويل	الزمن
$0^0$	1.0/1.0	1.0	0	$l_0 =$	1.0	0	$l_0 =$	$t_0$
								$t_1$
								$t_2$
								$t_3$
								$t_4$
								$t_5$
								$t_6$



شكل (3-18): مخطط لتوقيع مسار التشوه في التجربة (4).

قارن بين مسار تشوه القص البسيط لإهليلج مجموعة بطاقات الحاسوب مع مسار تشوه إهليلج معجون اللعب. وبالحقيقة فإن هناك فروقات ضئيلة جداً بين مساري التشوه. ورغم ذلك فإن العمليتين مختلفتان تماماً. وكما يلاحظ في الشكل (3-19) فإن محاور الانفعال الرئيسة تدور خلال تجربة الانفعال لامتد المحور، بينما نجدتها لاتدور في تجربة الانفعال متحد المحور. ولا يعد ذلك فرقاً عادياً، كما أن بنيات الصخور تعكس هذه العملية.



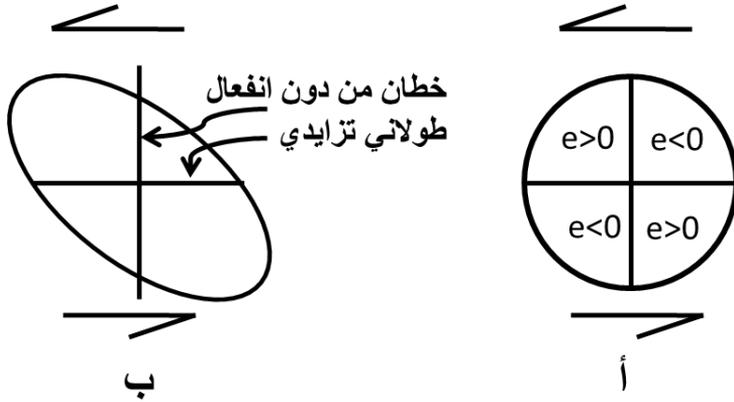
شكل (3-19): مقارنة بين الانفعال متحد المحور والانفعال لامتد المحور.

### 2.7.3. إهليلج الانفعال الكلي لامتد المحور The Noncoaxial Total Strain

#### Ellipse

سنتناول الآن بعض التفاصيل المتعلقة بالانفعال لامتد المحور. يتضمن هذا الإهليلج حدين ثابتين متعامدين بين نطاقي التقصير والتطاول، كما هو الحال في إهليلج الانفعال متحد المحور. وهذه تتمثل بالخطوط عديمة الانفعال الطولاني التزايدية، وهي موازية لحواف البطاقات ومتعامدة معها. وهنا يجب أن نتذكر أن هذه الخطوط هندسية وليست مادية. وكما هو الحال بالنسبة

للتشوه متحد المحور، عندما يتشوه الإهليلج، فإن مساحة نطاق التطاول تتزايد، بينما تتناقص مساحة نطاق التقصير شكل (3-20).



شكل (3-20): إهليلج الانفعال لامتد المحور مبدئياً نطاقي التقصير والتطاول والخطوط عديمة الانفعال الطولاني التزايد. (أ) قبل التشوه. (ب) بعد التشوه.

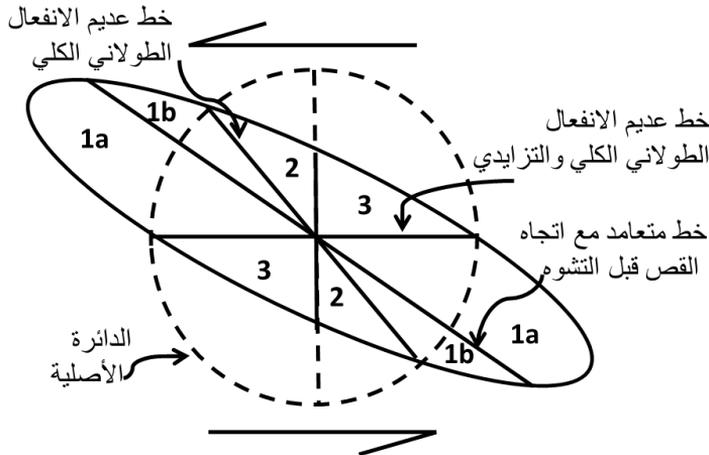
### 3.7.3. تجربة (5): إهليلج الانفعال لامتد المحور ذو التمنطق اللامتناظر

#### The Asymmetrically Zoned Noncoaxial Strain Ellipse

ضع مجموعة بطاقات الحاسوب بوضعها غير المشوه وارسم الخطوط عديمة التشوه الطولاني التزايد على الدائرة غير المشوهة (شكل 3-20). قم بتشويه الدائرة إلى إهليلج واضح، وارسم دائرة مساوية في نصف قطرها لقطر الدائرة الأصلية وذلك بشكل متناظر على الإهليلج. وأخيراً ارسم الخطوط عديمة الانفعال الطولاني التزايد مرة ثانية وكذلك الخطوط عديمة الانفعال الطولاني الكلي كما هو في الشكل (3-14).

وكما يتوضح في الشكل (3-21) يمكن تقسيم الإهليلج لامتد المحور إلى أربعة نطاقات بحسب سلوكية الخطوط. تتطابق هذه النطاقات مع تلك الموضحة في الشكل (3-14) العائد للإهليلج متحد المحور. ورغم ذلك يمكن ملاحظة الترتيب اللامتناظر للنطاقات في الإهليلج اللامتد المحور. وبما أن الخطوط الموازية لاتجاه القص هي الخطوط عديمة الانفعال الطولاني التزايد والكلي، فإن النطاقين 1b و 2 يوجدان على جانب واحد فقط من النطاق 1a في

الإهليلج لامتحده المحور. تقيد هذه الظاهرة عند محاولة معرفة حدوث دوران من عدمه جراء تطور بنية معينة.

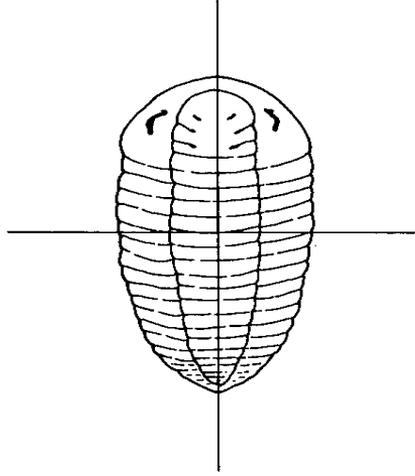


شكل (3- 21): إهليلج الانفعال الكلي لامتحده المحور يتوضح عليه أربعة نطاقات (Rowland, 1986). لاحظ الترتيب اللامتناظر للنطاقات بالمقارنة مع تلك النطاقات التي ظهرت في إهليلج الانفعال متحد المحور (شكل 3- 14).

### 8.3. المستحاثات المشوهة كمؤشرات على الانفعال Deformed fossils as strain indicators

يكون العديد من الصخور متجانساً ليثولوجياً، ولايحتوي بنيات كالطيات والبنىات السجقية التي يمكن أن تشير إلى طبيعة الانفعال الحاصل. غير أنه يمكن استخدام المستحاثات في بعض هذه الصخور كمؤشرات على الانفعال للانفعال (دركل، 1994؛ بايرلي ودركل، 2000؛ Rowland, 1986; Ramsay and Huber, 1983; Davis and Reynolds, 1996; Ragan, 2009). وعندما يكون مقياس المستحاثات وشكلها معروفين بدقة، فإنه يمكن حل هذه المسألة من خلال قياس التمدد والقص الزاوي باتجاهات مختلفة. ورغم ذلك فإنه يصعب في بعض الحالات معرفة أطوال الخطوط قبل التشوه بل إن ذلك مستحيل في أحيان أخرى. ويمكن التغلب على هذه المشكلة جزئياً بوجود مستحاثات موجهة باتجاهات مختلفة. وتعد المستحاثات ذات التناظر ثنائي الجانب Bilaterally symmetrical fossils مناسبة لقياس الانفعال

كثلاثيات الفصوص أو عضديات الأرجل Brachiopods. فمثلا يكون لمستحاثات ثلاثية الفصوص محور مركزي يقسمها إلى جانبيين متناظرين يميني ويساري (شكل 3-22).



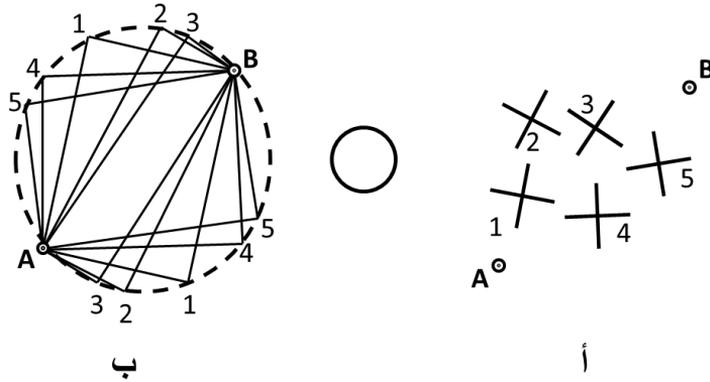
شكل (3-22): ثلاثية فصوص غير مشوهة.

يمكن استخدام هذا النوع من المستحاثات في تحليل الانفعال. لنتصور خمس مستحاثات ثلاثيات فصوص موجهة بشكل عشوائي على بلاطة من الصخر. يمكن تمثيل هذه المستحاثات الخمسة بخمس مجموعات من الخطوط المتعامدة (شكل 3-23 - أ). توضع النقطتان A و B على نحو اعتباطي على البلاطة. ثم نقوم برسم موازيات لكل مجموعة من الخطوط المتعامدة من كل من النقطتين A و B وتُمدد حتى تتقاطع مع بعضها لتشكل مستطيلات. إن رؤوس المستطيلات الناتجة تقع على دائرة عامة واحدة (شكل 3-23 - ب). وتمثل هذه الدائرة إهليلج الانفعال قبل التشوه.

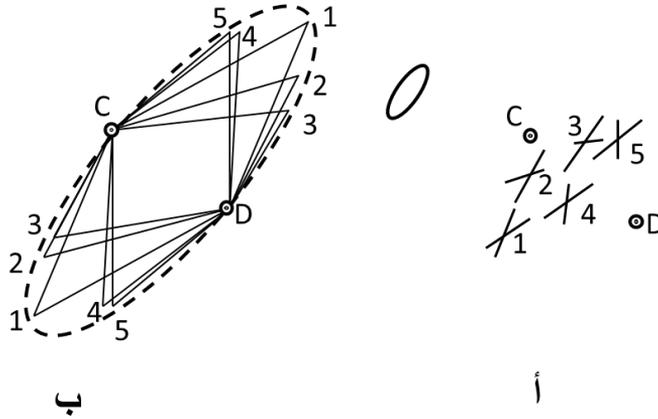
لنتصور الآن وجود خمس مستحاثات مشوهة على البلاطة، وهذه يمكن تمثيلها بخمسة أزواج من الخطوط غير المتعامدة (شكل 3-24 - أ). يتم بعد ذلك تحديد النقاط C و D بشكل اعتباطي على البلاطة، ثم ترسم موازيات لكل زوج من الخطوط بدءاً من هاتين النقطتين، وتُمدد حتى تتقاطع، مما يؤدي إلى تشكيل خمسة متوازيات أضلاع. إن رؤوس متوازيات الأضلاع الناتجة تحدد إهليلج الانفعال (شكل 3-24 - ب).

إن تحديد النسبة المحورية Axial Ratio لإهليلج الانفعال وتوجهه من خلال مجموعة من المستحاثات المشوهة يتم باتباع الطريقة التالية:

- أ- ارسم مستقيمين على كل مستحاثة يمثلان المستقيمين اللذين كانا متعامدين قبل التشوه.
- ب- حدد نقطتين على نفس الشكل الحاوي على المستقيمتين أفئة الذكر، بحيث يكون المستقيم الواصل بين هاتين النقطتين غير موازٍ لأي من تلك المستقيمتين.
- ت- ضع ورقة شفافة فوق الشكل وانقل النقطتين إلى هذه الورقة وكذلك انقل أزواج المستقيمتين إلى هاتين النقطتين شريطة عدم تدوير الورقة الشفافة بالنسبة للشكل الأصلي، لنجد أن كل مستحاثة تحدد متوازي أضلاع.
- ث- ارسم إهليلجاً يمر قدر الإمكان من رؤوس متوازيات الأضلاع.



شكل (3- 23): طريقة ويلمان لتحديد إهليلج الانفعال. يكون الصخر في هذا المثال غير مشوه، ما يؤدي إلى أن المستحاثات ستمثل بمستقيمتين متعامدة كما في الشكل (3- 22). (أ) مستقيمتين متعامدة تمثل خمس مستحاثات. يتم توقيع النقطتين A و B اعتبارياً على البلاطة الصخرية. (ب) إهليلج انفعال (مرسوم بخط متقطع) يمر من رؤوس المستطيلات المتشكلة من تمديد مجموعات الخطوط المتعامدة بدءاً من النقطتين A و B (Rowland, 1986).



شكل (3-24): استخدام طريقة ويلمان في حال مستحاثات مشوهة. (أ) خمس مجموعات من خطوط، كانت متعامدة في الأصل، وتمثل المستحاثات المشوهة. (ب) إهليلج الانفعال (مرسوم بخط منقطع) مرسوم عبر رؤوس متوازيات الأضلاع (Rowland, 1986).

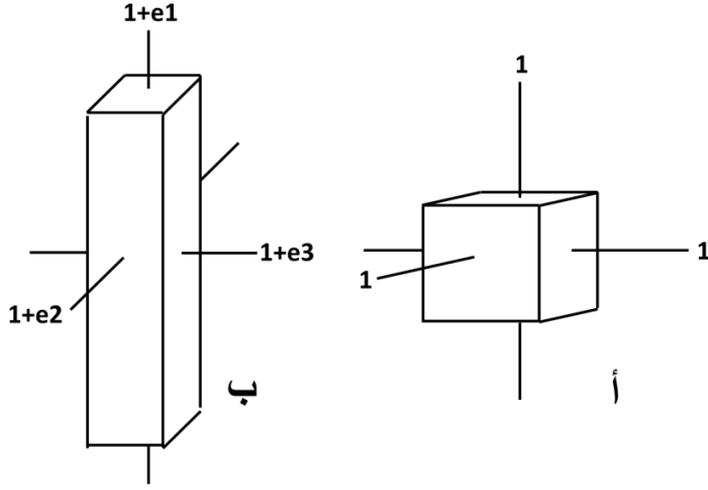
### 9.3. الانفعال في الأبعاد الثلاثة

الصخور أجسام ثلاثية الأبعاد، وهذا يستدعي أخذ البعد الثالث بالحسبان لدى وصف الانفعال وقياسه. ويمكن أن نتصور أن الصخور غير المشوهة تحتوي كرة تتحول إلى إهليلج مجسم للانفعال Strain Ellipsoid جراء التشوه المتجانس. وتصف أبعاد هذا الإهليلج وتوجهه الانفعال الصخري.

وإن للإهليلج المجسم للانفعال ثلاثة محاور رئيسة تسمى محاور الانفعال الأعظمي والمتوسط والأصغري. وأطوال هذه المحاور هي:

$$1 + e_1 \geq 1 + e_2 \geq 1 + e_3$$

حيث يعد طول نصف قطر الكرة الأصلية مساوياً لقيمة 1. ويمثل الشكل (3-25 - أ) كتلة متساوية الأبعاد وغير مشوهة، أما الشكل (3-25 - ب) فيمثل الكتلة نفسها بعد التشوه، وتتوضح فيه محاور الانفعال الرئيسية.

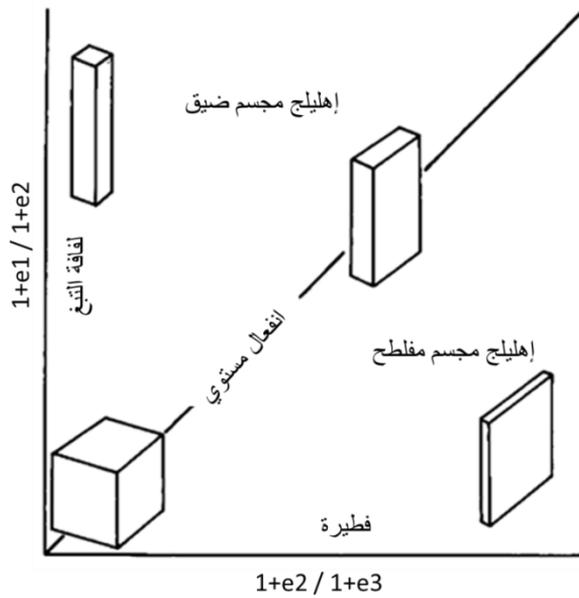


شكل (3-25): ثلاثة محاور انفعال رئيسية. (أ) غير مشوهة. (ب) بعد التشوه.

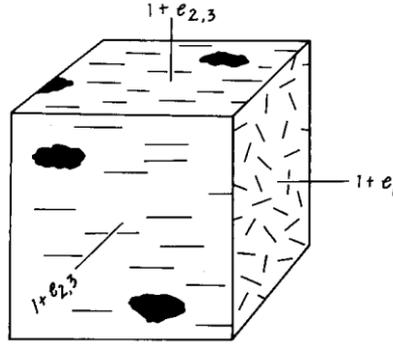
يوضح الشكل (3-26) سلسلة الإهليلجات المجسمة للانفعال من خلال علاقة  $1 + e_1 / 1 + e_2$  مع  $1 + e_2 / 1 + e_3$ ، وهو يدعى "مخطط فلين Flinn Diagram"، وينقسم إلى حقلين يفصل بينهما خط الانفعال المستوي Plane Strain. والانفعال المستوي هو تشوه يحافظ على الحجم، ويكون التمدد الموازي لمحور الانفعال المتوسط مساوياً للصفر. تكون الإهليلجات المجسمة فوق خط الانفعال المستوي منقلصة، وتتمثل في حالتها القصوى بشكل لفافة التبع، حيث يكون  $1 + e_1 > 1 + e_2 = 1 + e_3$ . وتكون الإهليلجات المجسمة تحت خط الانفعال المستوي مفلطحة، وتتمثل في حالتها القصوى بشكل الفطيرة، حيث يكون  $1 + e_1 = 1 + e_2 > 1 + e_3$ . وتستخدم بنية (نسيج) الصخر عادة لتحديد توجه إهليلج الانفعال وشكله. يبين الشكل (3-26) صخوراً يحتوي على فلزات صفائحية ذات توجهات مختلفة وذات محور عام، حيث يكون الإهليلج المجسم للانفعال ذا شكل لفافة التبع ( $1 + e_1 > 1 + e_2 = 1 + e_3$ ).

### 10.3. تحديد القيم في الإهليج الجسم للانفعال

هناك عديد من التقانات وضعت لتحديد قيم الانفعال. وتتضمن إحدى هذه التقانات البسيطة قياس أجسام مشوهة متضمنة في الصخر. وتعد الحصى المشوهة في الصخور الحطامية التجمعية (الكونغلوميرالية) والبنية البيوضية Oolite في الصخور الكلسية أمثلة على تلك الأجسام المشوهة التي يمكن استخدامها في قياس الانفعال.



شكل (3-26): مخطط فلين، يلاحظ وجود حقلين للانفعال يفصل بينهما خط الانفعال المستوي يتميز بقيمة  $e_2 = 0$ ، وبالمحافظة على الحجم. يقع كل من القص الصرف والقص البسيط على خط الانفعال المستوي هذا (Rowland, 1986).



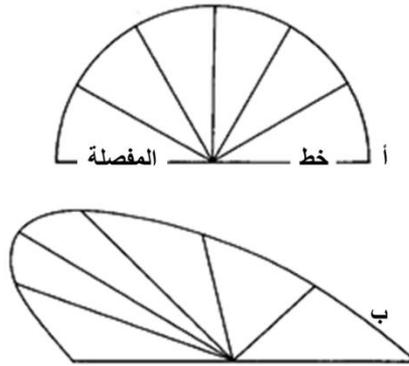
$$1 + e_1 > 1 + e_2 = 1 + e_3$$

شكل (3-27): صخر مشوه يحتوي على فلز صفائحي. تشير الخطوط المتوافقة إلى توجه محور الانفعال الرئيس الأعظمي. يشير التوجه العشوائي لسطوح الفلزات إلى أن  $1 + e_2 = 1 + e_3$ .

### 11.3. التمارين:

#### 1.11.3. التمرين الأول:

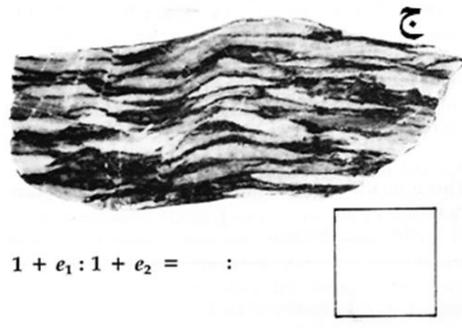
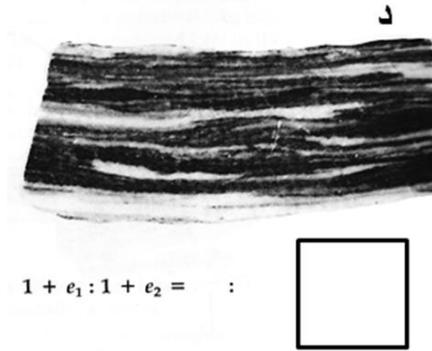
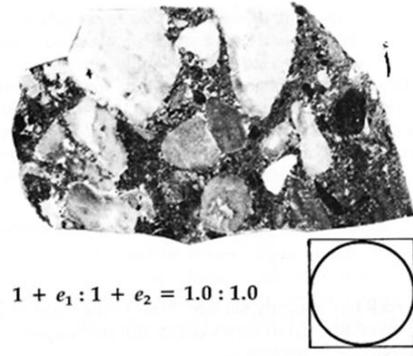
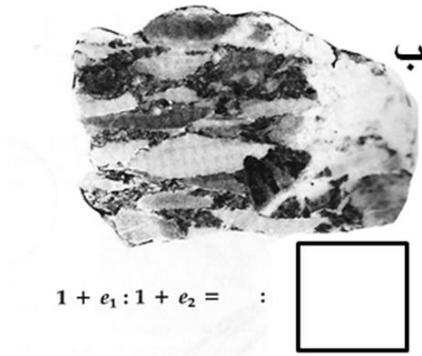
يبين الشكل (3-28) مخططاً لقوقعة عضدية أرجل قبل التشوه (شكل 3-28 - أ) وبعد التشوه (شكل 3-28 - ب). والمطلوب تحديد التمدد  $e$  لخط المفصلة، وتحديد القوس الزاوي  $\psi$  والانفعال القوسي  $\gamma$  لهذه القوقعة.



شكل (3-28) قوقعة عضدية أرجل قبل التشوه (أ) وبعده (ب) من أجل التمرين الأول.

### 2.11.3. التمرين الثاني:

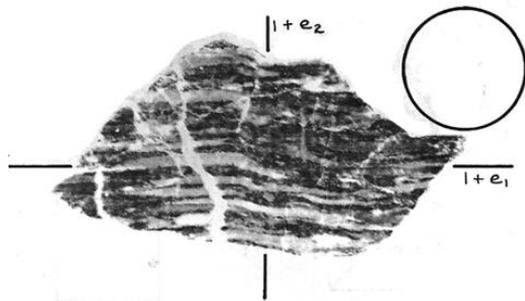
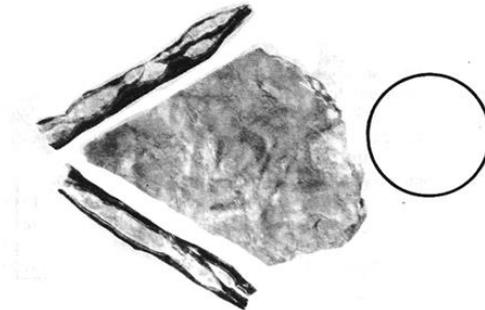
يمثل الشكل (3- 29 - أ) صورة لبلاطة تحتوي صخر تجمعي بريشي غير مشوه من جبال الألب. أما الأشكال (3- 29 - ب و 3- 29 - ج و 3- 29 - د) فتمثل صور لبلاطات من الصخر التجمعي نفسه مأخوذة من مواقع مجاورة تعرضت للتشوه (المقياس متساوي في كل هذه الصور). ارسم مخططاً لإهليلج الانفعال التقريبي لكل من هذه الصخور عند الزاوية السفلى اليمينية لكل شكل، وحدد النسبة  $1 + e_1 / 1 + e_2$  لإهليلج الانفعال الذي قمت برسمه.



شكل (3- 29): صخر تجمعي بريشي من جبال الألب (Rowland, 1986). (أ) غير مشوه. (ب، ج، د) مراحل مختلفة من التشوه.

### 3.11.3. التمرين الثالث:

ادرس الصور الموضحة في الشكل (3-30)، وحدد حقل الانفعال الذي يمثل كل حالة معطياً تبريراً لذلك. ارسم بعد ذلك إهليلجاً تقريبياً للانفعال فوق الدائرة المرسومة بجانب كل صورة والتي تمثل إهليلج الانفعال قبل التشوه.



شكل (3-30): ثلاث صور لبنيات مشوهة من أجل التمرين الثالث (Rowland, 1986).

### 4.11.3. التمرين الرابع:

يبين الشكل (3- 31) معقداً مؤلفاً من جدار Dyke واندساس أفقي Sill، حيث اندسَّ صخرٌ عَصِيٌّ ملونٌ بالأسود في الشيبست. تمثل الخطوط الأفقية الانفصال Cleavage. لو اعتبرنا أن مستويات الانفصال متعامدة مع محور الانفعال الرئيس الأصغري، أجب عن الأسئلة التالية:

- ماهي قيمة التمدد  $e$  التقريبية في الاتجاه المتعامد مع مستويات الانفصال؟
- ماهي قيمة التمدد  $e$  التقريبية في الاتجاه الموازي لمستويات الانفصال؟
- استخدم قيمتي التمدد المحسوبتين آنفاً والبنيات الملاحظة على الجدار والاندساس الأفقي، لترسم إهليلجاً موجهاً بشكل صحيح وذا نسبة محاور صحيحة من أجل هذا الصخر. قم بعد ذلك بوصف النطاقات الموجودة داخل هذا الإهليلج، ثم احسب نسبة  $1 + e_1 / 1 + e_2$ .



شكل (3- 31): المخطط المستخدم لحل التمرين الرابع (Rowland, 1986).

### 5.11.3. التمرين الخامس:

يبين الشكل (3- 15): بعضاً من طيات وبنيات مترافقة معها ناتجة من انفعال متحد المحور. ارسم شكلاً مشابهاً لبنيات ناتجة من انفعال لامتحد المحور.

### 6.11.3. التمرين السادس:

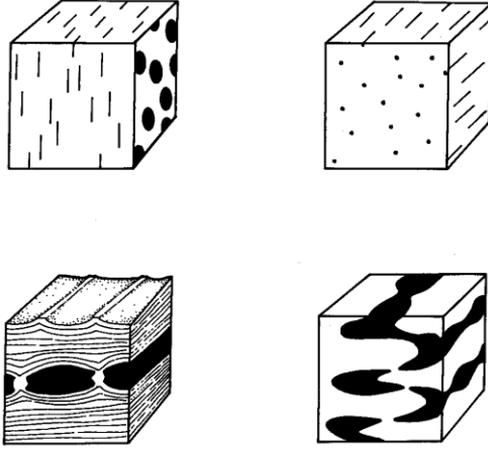
يمثل الشكل (3- 32) صورة لأجزاء خلفية (pygidium) لعدد من مستحاثات ثلاثيات الفصوص. والمطلوب: حدد إهليلج الانفعال لهذا الصخر، وارسمه عند الزاوية اليمينية العليا من الصفحة. ثم حدد نسبة  $1 + e1 / 1 + e2$ ، وكذلك حدد توجه الانفعال الرئيس الأعظمي بالعلاقة مع جهة الشمال.



شكل (3- 32): الأجزاء الخلفية لمستحاثات ثلاثيات الفصوص، من أجل التمرين السادس (Rowland, 1986).

### 7.11.3. التمرين السابع:

حدد توجهات محاور الانفعال الرئيسة على الرسومات الموضحة بالشكل (3- 33) والتي تمثل صخوراً مشوهة. حدد الأطوال النسبية للمحاور تحت كل مخطط (كما تم آنفاً في الشكل 3- 27).



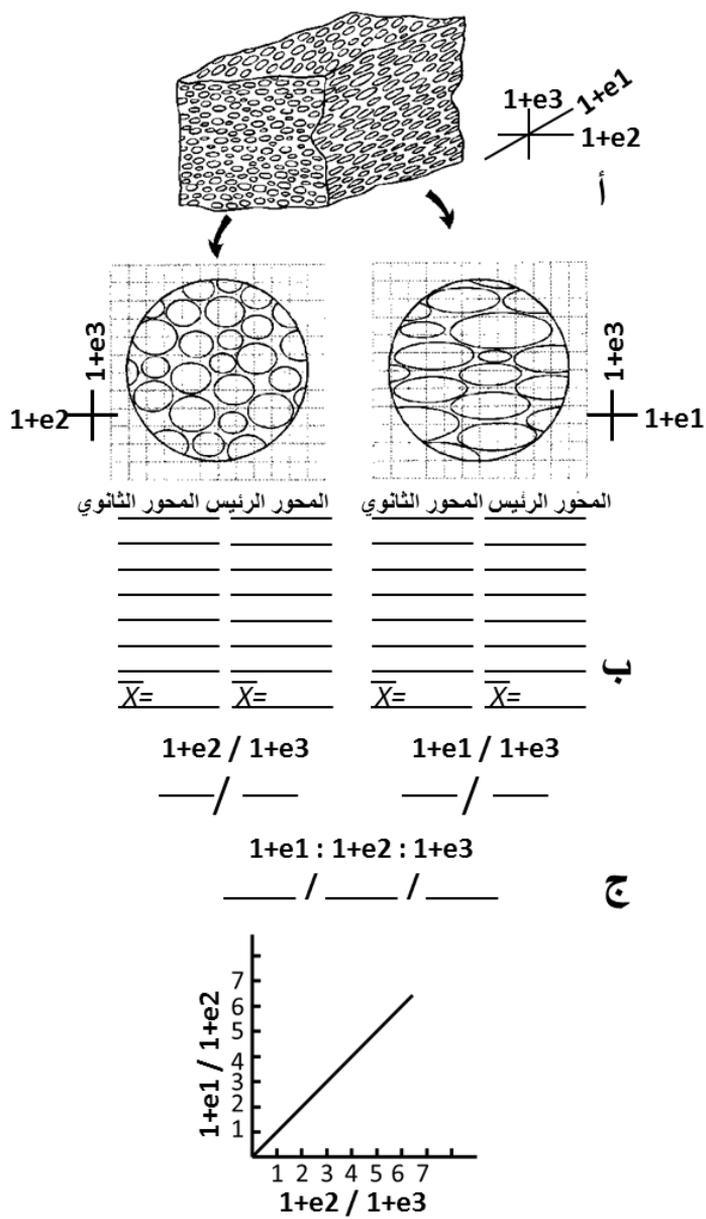
شكل (3- 33): أربعة مخططات ثلاثية الأبعاد لصخور مشوهة للاستخدام في التمرين السابع.

### 8.11.3. التمرين الثامن:

يبين الشكل (3- 34 - أ) رسماً تخطيطياً لعينة يدوية من صخر كلسي بيوضي Oolite. وقد تم تحديد توجهات محاور الانفعال الرئيسة في الحقل من خلال البنيات الخطوطية وسطوح الانفعال Cleavages ومن خلال الأشكال البيوضية. ولقد تم صنع شريحتين مجهريتين مأخوذتين بشكل متعامد مع اثنتين من محاور الانفعال الرئيسة، حيث يبين الشكل (3- 34 - ب) حقلين مجهريين من لكل من الشريحتين المجهريتين. والمطلوب:

أ- قم بقياس أبعاد عدد من البيوض، ثم احسب المتوسط الحسابي (x) للمحورين الرئيس والثانوي في كل حقل. واحسب نسبة المحور الرئيس إلى المحور الثانوي في كل حقل، ثم اربط بين هذه النسب لإيجاد النسبة  $1 + e_1 / 1 + e_2 / 1 + e_3$  من أجل الإهليلج المجسم للانفعال.

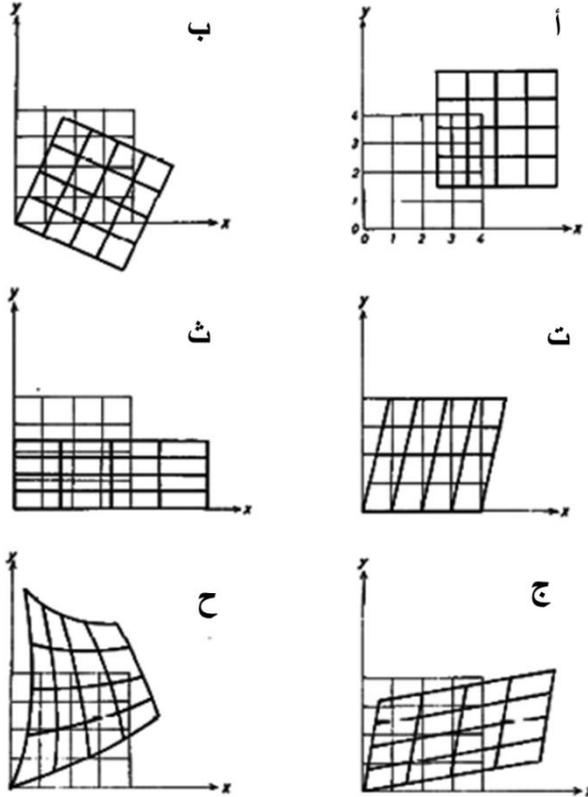
ب- وقّع الإهليلج المجسم للانفعال على مخطط فلين في الشكل (3- 34 - ج).



شكل (3- 34): بيوض كلسية مشوهة من أجل التمرين الثامن (Rowland, 1986).  
 (أ) شكل تخطيطي للعينة. (ب) مقاطع مجهرية رقيقة للبيوض الكلسية المشوهة مع جدول  
 لتسجيل القياسات. (ج) مخطط فلين.

### 9.11.3. التمرين التاسع (محلول):

يبين الشكل التالي (3-35) تشوه شبكة منتظمة جراء انفعالات محددة (أ حتى ح). ارسم حقل متجهات الانزياح Displacement vector field من أجل كل زوج من الشبكات. سمّ الانفعال، وصنّفه فيما إذا كان متجانساً أم لامتجانس، صلباً Rigid أم ذا تشوه شكلي Distortional، دوراني أم لادوراني.



شكل (3-35): تشوه شبكة منتظمة جراء انفعالات مختلفة. للاستخدام في التمرين التاسع.

الحل:

أ: انتقال جسم Body translation: الانفعال صلب ولادوراني ومتجانس.

ب: دوران جسم Body rotation: صلب ودوراني ومتجانس

ت: قص بسيط Simple shear: غير صلب Non-rigid ومتجانس ودوراني (الخطوط التي كانت موازية أصلاً لمحور  $y$  انحرقت بزواوية  $\psi$ ).

ث: قص صرف Pure shear: غير صلب ومتجانس ولادوراني (المحور الطويل لإهليلج الانفعال مواز لـ  $x$ ، المحور القصير مواز لـ  $y$ . ولهذه المحاور اتجاه الخطوط الأصلية نفسه).

ج: انفعال دوراني متجانس عام General homogeneous rotational strain: برغم أن حقل الانتقال يبدو معقداً، فإن كل عنصر ذي أصل مربع الشكل تحول إلى متوازي أضلاع من الشكل والتوجه نفسيهما. الخطوط التي كانت في الأصل مستقيمة ومتوازية غيرت طولها وتوجهها، غير أنها بقيت مستقيمة ومتوازية.

ح: انفعال لامتجانس عام General heterogenous strain: لكل عنصر شكل مختلف بعد التشوه. وتصبح الخطوط التي كانت مستقيمة منحنية.

### 10.11.3. التمرين العاشر (محلول):

يبين الشكل التالي (3- 36) صورة لعرق مملوء بالكالسيت في رخام شديد التشوه من جبال يولونغ Yulong mountains في جنوب غرب الصين. وقد أخذت الصورة بشكل موازٍ لخطوطية التطاول Stretching lineation وبشكل عمودي على تورق الميلونيت. افترض أن التشوه من نمط الانفعال المستوي Plane strain والقص البسيط. وارسم إهليلج الانفعال اللانهائي infinitesimal strain ellipse لهذه الصخور، وميز ما بين أرباع التقصير والتطاول Shortening and extension quadrants. ارسم مخططاً منطقياً لإهليلج الانفعال النهائي Finite strain ellipse. ارسم آثار المظاهر الواضحة في الصورة. ميز ما بين أرباع التقصير النهائي والتمدد النهائي، وذلك على هذا المخطط وعلى مخطط إهليلج الانفعال النهائي، ثم بين مستوي القص وطبيعة هذا القص. قم بعد ذلك بتفسير البنية الظاهرة في هذا التكتشف من خلال تحديد طبيعة القص في هذه الصخور. أي العروق تكون أولاً؟

ماذا حدث له؟

ماذا حدث بعد ذلك؟

كيف يؤدي بك هذا التفسير لاستنتاج طبيعة القص؟

وفي النهاية ارسـم مخططاً بسيطاً لما يمكن أن يحصل فيما لو استمر قص هذا الصخر، ودوران العروق وانفتاح عرق جديد.



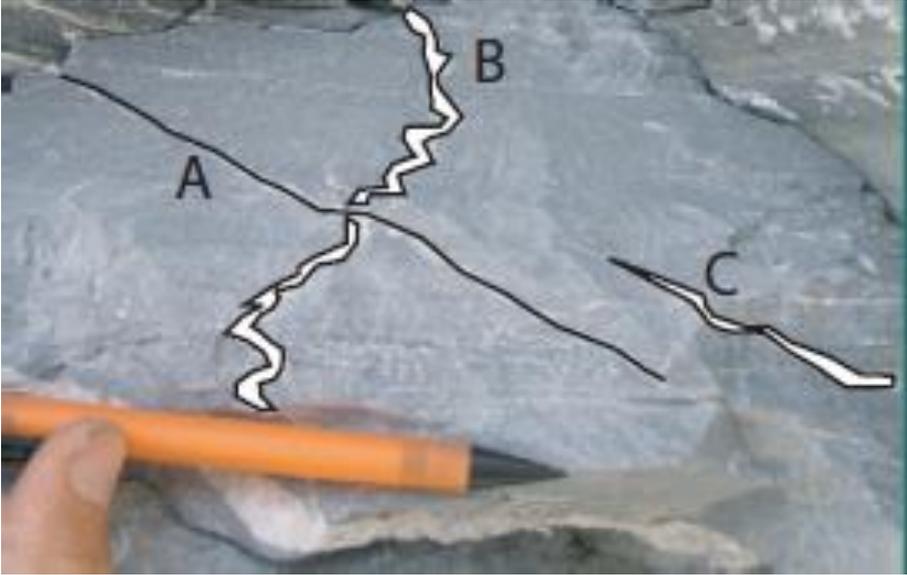
شكل (3- 36): صورة لعرق مملوء بالكالسيت في رخام شديد التشوه من جبال يولونغ Yulong mountains في جنوب غرب الصين.

الحل:

يعتمد تفسير هذا التـكشـف (شكل 3 - 37) على الافتراضات الآتية:

- أ- انفعال مستو ثنائي البعد،
- ب- قص بسيط،
- ت- مستوي القص مواز للتورق الميلوني،
- ث- يتمثل الانفعال بتراكم تزايدات متطابقة من الانفعال، بحيث يمكن ربط إهليلج الانفعال اللانهائي بإهليلجات انفعال نهائية من أجل أجزاء من الجسم الصخري الخاضع للتشوه،
- ج- يمكن ربط الانفتاح والدوران وطي العروق بتراكم انفعال لانهائي.

عند تراكم الانفعال بشكل يميني، يفتح عرق تممدي باتجاه متعامد مع اتجاه التمدد الرئيس لإهليلج الانفعال اللحظي instantaneous strain ellipse الذي يصنع زاوية 45° مع مستوي القص. أي أن عروق التمدد الجديدة ستتكون بزواوية -45° مع مستوي القص.



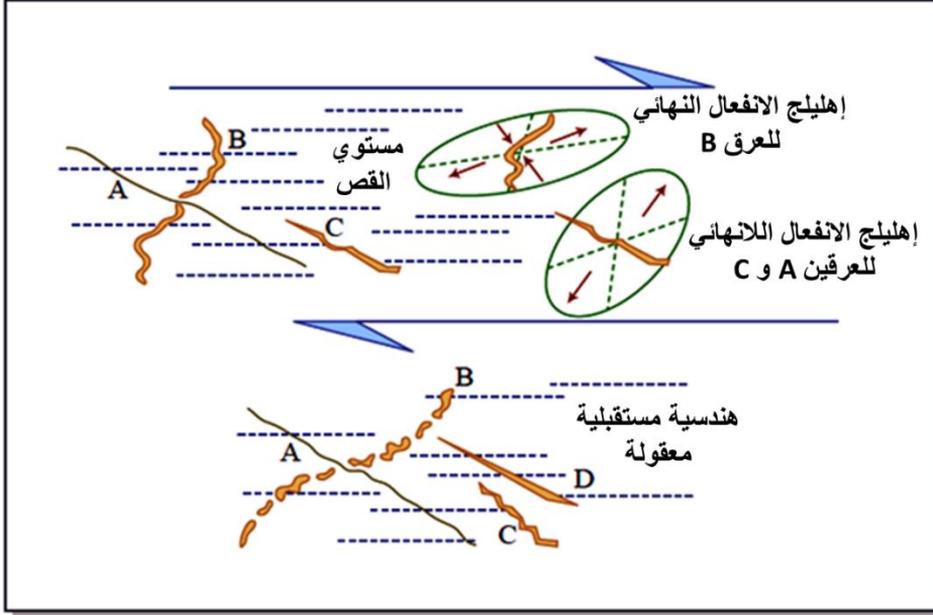
شكل (3-37): تخطيط البنيات الظاهرة في صورة الشكل (3-36).

وبذلك يمكن تفسير العرقين A و C كعرقين جديدي التكون. وبالحقيقة فإنهما يصنعان زاوية أقل من 45°، وهذا يعني إما أنهما تعرضا لشيء من الدوران بدءاً من التكون أو أنهما انفتحا باتجاه غير متعامد مع محور الانفعال اللانهائي الرئيس المفترض (اتجاه التطاول الأعظمي). عندما تتكون مثل هذه العروق تكون موجهة مباشرة في ربع التقصير العائد لإهليلج الانفعال اللحظي. وبما أن كل الخطوط المادية تدور بالتوافق مع طبيعة القص في القص البسيط، فإن العروق لن تتعرض للتقصير فقط بل للدوران أيضاً. وفي النهاية ستدور مثل هذه العروق إلى خارج ربع التقصير وإلى داخل ربع التمدد اللحظي. ويبدو أن العرق B مثال على مثل هذه العروق. وعلى الأغلب فإن هذا العرق تكون باتجاه العرقين A و C نفسه، غير أنه تعرض للتقصير عندما دار نحو اتجاهه الحالي. وهو يقع حالياً في ربع تمدد لحظي، إنما بحالة تقصير

نهائي. أي أنه لم يقض وقتاً كافياً في ربع التطاول، بحيث أن التطاول الذي تعرض له تجاوز التقصير المتراكم خلال دورانه عبر ربع التقصير.

يبين الشكل (3 - 38) إهليلجات الانفعال من أجل الانفعال اللانهائي والانفعال النهائي. وهنا يمكن ملاحظة كيف أن العروق ذات الأعمار المختلفة راكمت قيماً مختلفة من الانفعال النهائي. وعلاوة على ذلك، فإن الصخر الذي تكونت فيه هذه العروق تعرض لانفعال نهائي أكبر مما تعرض له أي من هذه العروق. يمثل إهليلج الانفعال النهائي الموضح في هذا الشكل الانفعال النهائي الذي تعرض له العرق B. وبما أنه تم تفسير العرقين A و C على أنهما تكوناً بشكل متأخر "تكون جديد" فإن إهليلجات الانفعال اللانهائية تعد تمثيلات قريبة بشكل معقول لانفعالات هذه العروق.

وبفرض استمرار الانفعال، فإن كل الخطوط المادية الموجودة (العروق A و B و C) ستستمر بالدوران بجهة دوران عقارب الساعة. أي أن العرق B، المتوجه حالياً للتطاول، سيتعرض للتكون البوديني Boudinage حتى يراكم تطاولاً صرفاً. أما العرقان A و B سيتعرضان للطي. كما أن أي عرق جديد التكون (ذاك الذي يحمل الرمز D في أسفل الشكل) سينفتح آخذاً اتجاهاً يصنع حوالي 45° مع التورق.



شكل (3-38): الجزء الأعلى: مخطط العروق، حيث يفترض هنا أن مستوي القص يوازي التورق الميلونيتي (خطوط متقطعة). بما أن العروق تنفتح في أثناء استمرار التشوه، فإن العرق B راكم انفعالات أكثر من العرقين A و C. يوضح الشكل أيضاً إهليلج الانفعال النهائي للعرق B، حيث تمثل الخطوط المتقطعة فيه الحدود ما بين أرباع التقصير النهائي والتطاول النهائي. وإن انفعالات العروق A و C أقرب على الأرجح لإهليلج الانفعال اللانهائي، حيث تمثل الخطوط المتقطعة الحدود ما بين أرباع التقصير والتطاول اللحظيين. يوضح الشكل أيضاً طبيعة القص المستتجة. الجزء الأسفل: مخطط يبين تطوراً معقولاً للانفعال فيما لو استمر بالتراكم: يبدأ العرق B بالتكون البوديني، أما العرقان A و C فيبدأن بالطي، كما يبدأ عرق جديد D بالانفتاح.

## الباب الأول – الفصل الرابع

### النماذج الانسيابية (الريولوجية) Rheological Models

يهدف هذا الفصل إلى اكتساب فهم كافي للنماذج الانسيابية كمشابهات للتشوهات الصخرية، حيث تتجاوب الصخور بطريقة معقدة مع الإجهاد، فنلاحظ أن الطبقة الصخرية نفسها تطوى في شروط معينة وتتكرر في شروط أخرى. كما أن طبقات متجاورة يمكن أن تسلك سلوكاً مختلفاً وهي تتعرض للشروط نفسها. سندرس في هذا الفصل علاقات نموذجية بين الإجهاد Stress والانفعال Strain ومعدل الانفعال Strain Rate.

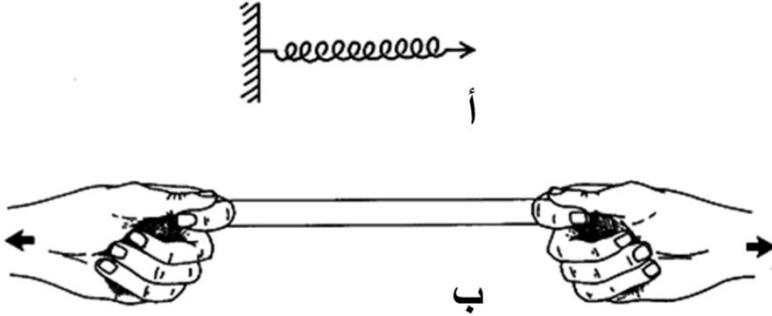
يقاس الإجهاد  $\sigma$  بوحدة القوة المؤثرة في وحدة المساحة. أما الانفعال  $\epsilon$  فهو التغير الشكلي أو الحجمي الذي يقاس بطرائق متعددة. وبالإضافة إلى الإجهاد والانفعال فإن عامل الزمن يعد مهماً في دراسة التشوه. وهكذا فإن دراسة العلاقات بين الإجهاد والانفعال والزمن تدرس من خلال "علم الانسياب" أو "الريولوجيا" Rheology (من الإغريقية ريو Rheos تعني انسياب). ويمثل "النموذج الانسيابي" Rheological model العلاقة المميزة بين الإجهاد والانفعال والزمن والتي يبيدها جسم تعرض للتشوه ( Ramsay and Huber, 1983; Rowland, 1986; ) (Davis and Reynolds, 1996; Ragan, 2009).

ويهدف الوصول إلى فهم كافي للإجهاد والانفعال فإنه من المفيد اختبار ثلاثة نماذج انسيابية: التشوه المرن والتشوه اللزج والتشوه اللدن. وسوف نختبر هذه التشوهات بشكل منفرد أولاً، ثم بشكل مترابط في محاولة لفهم تشوه الصخور.

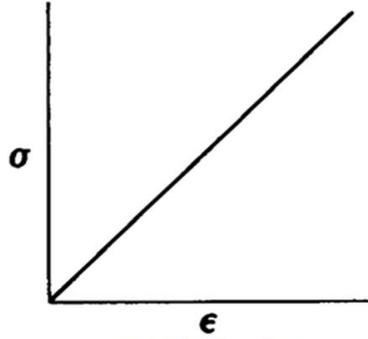
#### 1.4. التشوه المرن Elastic Deformation – الانفعال اللحظي القابل للاسترداد

يمكن أن تمثل التشوه المرن من خلال حزام مطاطي أو من خلال نابض (شكل 4-1). يكون الانفعال مرتبطاً تماماً بالإجهاد وذلك من أجل جسم مرن كامل، ويتمثل المخطط البياني لعلاقة الإجهاد بالانفعال بخط مستقيم (شكل 4-2). يوصف التشوه المرن من خلال قانون هوك:  $\sigma = E\epsilon$  ، حيث أن  $E$  هي مرونة المادة (معامل يونغ). وتدعى الأجسام التي تتصرف بشكل مرن أجسام هوك Hookean bodies. وتجدر الإشارة هنا إلى أن الصخور تتصرف كأجسام هوك أثناء حدوث الزلازل، وذلك عندما تنقل الأمواج الزلزالية.

يحدث التشوه المرن في الأرض بشكل سريع جداً، وعموماً يمكن تلخيص المظاهر الأساسية للتشوه المرن بأن الانفعال يرتبط بشكل متناسب ومباشر مع الإجهاد، كما أن الانفعال لحظي، ويمكن استرداده مع زوال الإجهاد (إلا إذا تم تجاوز حد المرونة).



شكل (4 - 1): التشوه المرن. (أ) نابض. (ب) حزام مطاطي.



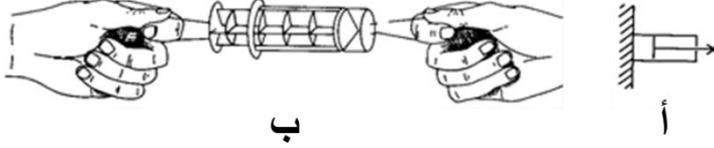
النسبة المئوية للتطاول أو التقصير

شكل (4 - 2): مخطط بياني لعلاقة الإجهاد ( $\sigma$ ) بالانفعال ( $\epsilon$ ) خلال تشوه مرن. يتغير ميل المستقيم بحسب مرونة المادة (معامل يونغ).

#### 2.4. التشوه اللزج - Viscous deformation - الانفعال المستمر بتأثير أي إجهاد

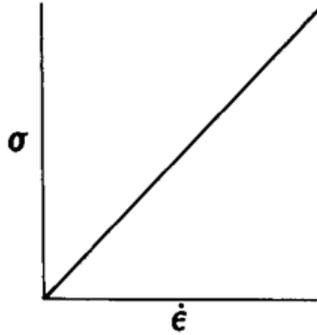
تنساب بعض المواد استجابةً لتأثير الإجهاد ولو كان صغيراً جداً كما هو حال الماء مثلاً. ويدعى هذا السلوك بالتشوه اللزج، كما أن المواد التي تتصرف بهذه الطريقة تسمى سوائل (أو موائع) نيوتن Newtonian fluids. يمكن مشابهة التشوه اللزج بكباس مسامي في أسطوانة مملوءة

بمسائل، وهذا مايسمى "جهاز توهين" أو "جهاز منع الاهتزاز" Dashpot (شكل 4-3 - أ).  
 وإن جهاز التوهين المناسب لتجربتنا هي إبرة طبية بلاستيكية (شكل 4-3 - ب).



شكل (4-3): التشوه اللزج. (أ) كباس راشح في أسطوانة مملوءة بالسائل (جهاز توهين Dashpot)، (ب) المشابهة مع الإبرة الطبية.

بما أن التشوه اللزج مستمر مع أي إجهاد، فليس هناك من معنى لرسم مخطط بياني لعلاقة الإجهاد بالانفعال كما فعلنا في الشكل (4-2)، حيث أن المهم هنا هو معدل الانفعال وليس الانفعال المطلق. يعطى معدل الانفعال الرمز  $\dot{\epsilon}$ . ويعد معدل الانفعال لمادة لزجة تابعاً للإجهاد وللزوجة:  $\sigma = \eta \dot{\epsilon}$ ، حيث أن  $\eta$  (إيتا) تمثل معامل اللزوجة للمادة. وكلما كان الإجهاد كبيراً، كان التشوه أسرع. يبين الشكل (4-4) علاقة الإجهاد  $\sigma$  بمعدل الانفعال  $\dot{\epsilon}$  من أجل مادة معطاة. ويعد التشوه اللزج مستديماً، وهذا هو وجه اختلاف مع التشوه المرن.



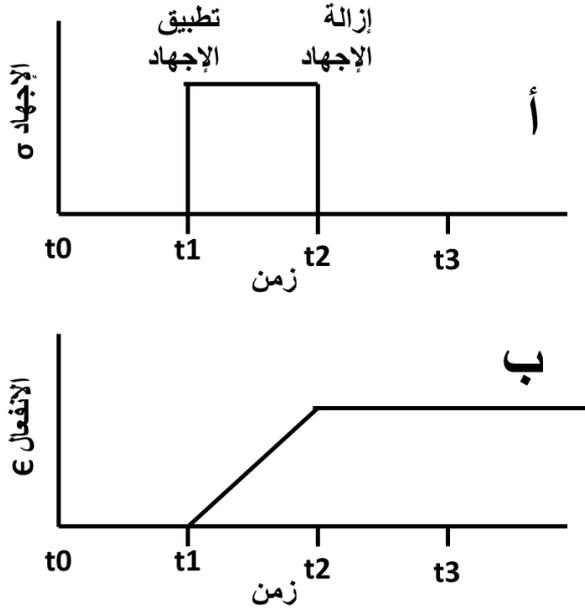
شكل (4-4): مخطط بياني لعلاقة الإجهاد بمعدل الانفعال من أجل التشوه اللزج. يتغير ميل الخط بحسب لزوجة المادة.

وبما أن الانفعال الكلي يرتبط جزئياً بالزمن، فإنه من المفيد رسم مخطط بياني لكل من الإجهاد والانفعال بشكل مستقل مع الزمن، كما هو الحال في الشكل (4-5). لندرس المخططين المبينين في هذا الشكل ولنحاول أن نفهم كيف يرتبطان ببعضهما. ففي الشكل (4-5 أ) يتوضح أن الإجهاد يطبق أولاً عند الزمن  $t_1$  ويزال عند الزمن  $t_2$ . أما في الشكل (4-5 ب) فإن الانفعال مستمر من  $t_1$  إلى  $t_2$  الذي لا يحصل بعده مزيد من انفعال.

يقاس معدل الانفعال عموماً بالنسبة المئوية للتناول أو التقصير في الثانية. فمثلاً لو أن جسماً تم تقصيره بالإجهاد من 10 إلى 9 سم في 100 ثانية فإن معدل الانفعال يساوي

$$10\%/100s = 0.1/100s = 0.001/s = 1 \times 10^{-3}/s$$

تكون معدلات الانفعال في القشرة الأرضية أبطأ بعدد كبير من المرات. فمثلاً أعطى قياس تغير المسافة بين نقاط على جانبي صدع سان أندرياس معدل انفعال مساو لـ  $1.5 \times 10^{-13}/s$ .

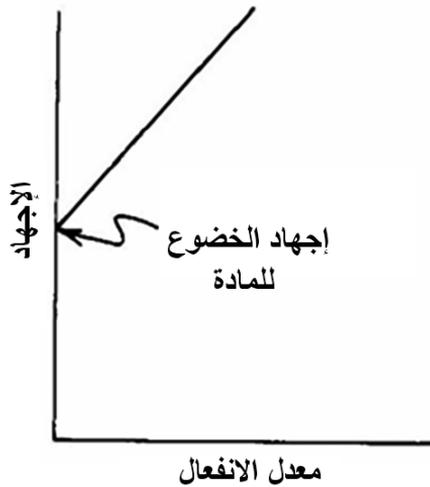


شكل (4-5): تجربة التشوه اللزج، حيث رسمت علاقة الزمن بالإجهاد (أ) وبالانفعال (ب).

### 3.4. التشوه اللدن Plastic deformation - الانفعال المستمر فوق إجهاد الخضوع

#### Yield Stress

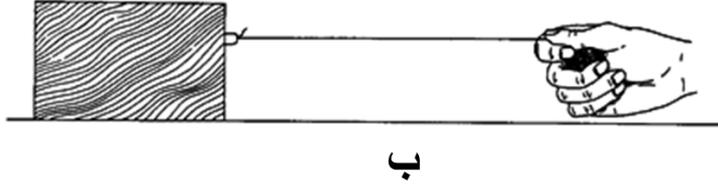
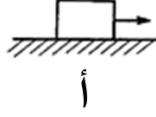
يشبه التشوه اللدن التشوه اللزج، باستثناء أن الانسياب لا يبدأ حتى نصل إلى عتبة إجهاد هي إجهاد الخضوع ( $\sigma_y$ ). فاللبن الرائب مثلاً لن يسيل على الطاولة لو أفرغناه من علبته. حيث أن له إجهاد خضوع مساو لـ 800 دين في السنتمتر المربع Dynes per square centimeter، وهو أكبر من قوة الجاذبية التي تؤثر عليه. ولو وضعنا صحناً فوق اللبن فإنه سيبدأ بالانسياب لأنه تم تجاوز مقاومة الخضوع Yield Strength للبن. ففي المجال الأعلى من إجهاد الخضوع يشابه مخطط "الإجهاد - معدل انفعال" مخطط التشوه اللزج (شكل 4-6). وتسمى المواد التي تسلك هذا السلوك "لدائن بينغهام" Bingham Plastics.



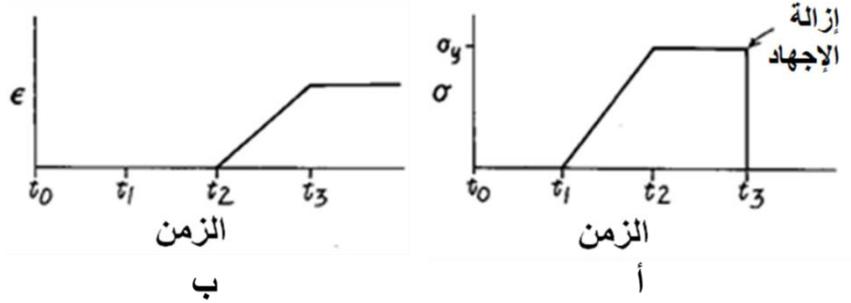
شكل (4-6): مخطط "الإجهاد - معدل الانفعال" للتشوه اللدن. حالما يتم تجاوز مقاومة الخضوع للمادة يكون السلوك لزجاً.

ومن أجل مشابهة التشوه اللدن سنستخدم كتلة موضوعة فوق سطح أفقي (شكل 4-7). فلو تم تطبيق إجهاد صغير فلن تحدث حركة لهذه الكتلة. ورغم ذلك هناك إجهاد خضوع  $\sigma_y$ ، يتجاوز قوة الاحتكاك للكتلة الساكنة. وعندما يتم تطبيق إجهاد الخضوع وتجاوز قوة الاحتكاك تبدأ الكتلة

بالحركة وتستمر متحركة. إن كتلة موجودة فوق طاولة ليست مثلاً حقيقياً على التشوه اللدن، حيث أن الفرق الأساسي هو أن الكتلة لن تتشوه بينما يتشوه الجسم اللدن. ورغم ذلك فإن تشابه العلاقات بين الإجهاد والانفعال والزمن تسمح لنا باستخدام الكتلة كمثابه للتشوه اللدن. ومن الجدير ملاحظته أنه بعد تطبيق إجهاد الخضوع، تكون قيمة الانفعال مرتبطة بالزمن. وفي الشكل (4-8) تم رسم علاقة كل من الإجهاد والانفعال مع الزمن بشكل منفصل. ويطبق الإجهاد بداية من الزمن  $t_1$  ثم يزداد بالتدريج إلى أن يصل إلى إجهاد الخضوع عند الزمن  $t_2$ .



شكل (4-7): تشوه لدن. (أ) ممثل من خلال كتلة على سطح أفقي، (ب) ممثل من خلال شد كتلة خشبية بحبل.

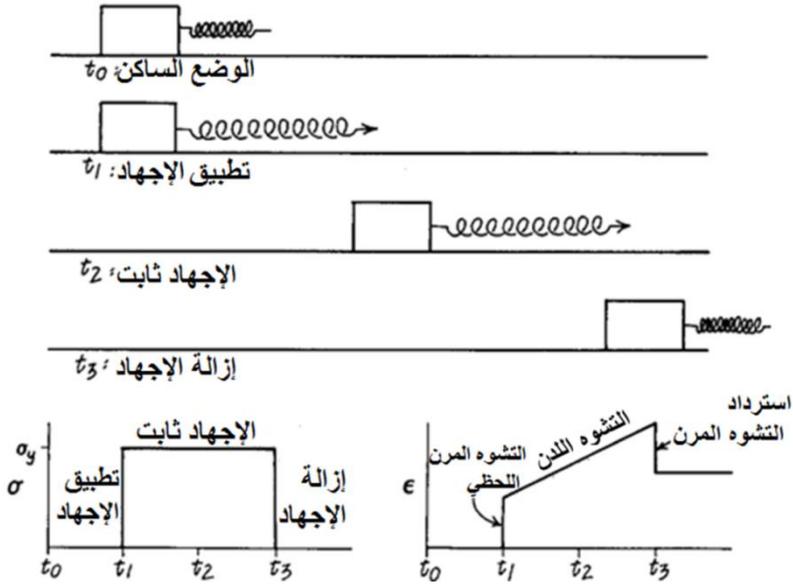


شكل (4-8): تجربة تشوه لدن حيث تم رسم علاقة الزمن مع كل من الإجهاد (أ) والانفعال (ب).

#### 4.4. التشوه المرن اللدن Elastico-Plastic Deformation

تبدى معظم المواد مميزات ريولوجية معقدة يمكن مشابهتها ببعض الترابط بين التشوه المرن واللدن واللزج.

اربط الربطة المطاطية بقطعة من الخشب وأجر التجربة الموضحة في الشكل (4-9). لنفترض أن الربطة المطاطية والكتلة الخشبية تتصرف كوحدة واحدة، ولنختبر كيف تنعكس هذه السلوكية في مخطط الإجهاد - زمن ومخطط الانفعال - زمن (شكل 4-9). لاحظ كيف أن الربطة المطاطية تعطي المركبة المرنة وتسبب بدء الانفعال عند الزمن  $t_1$  حتى قبل أن يتم الوصول إلى إجهاد الخضوع. ورغم ذلك فقد تم استرداد التشوه المرن جراء إزالة الإجهاد عند الزمن  $t_3$  وكان التشوه المتبقي ناتجاً من المركبة اللدنة.



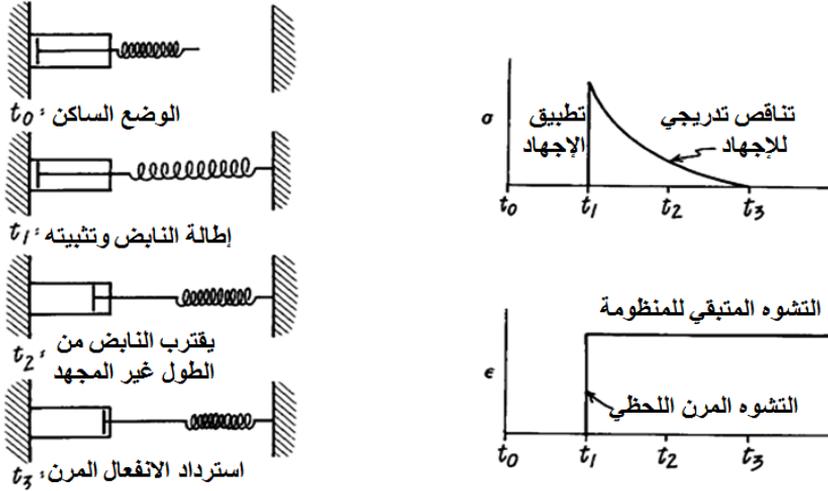
شكل (4-9): السلوك المرن - اللدن.

#### 5.4. التشوه المرن اللزج Elastico-Viscous Deformation

اربط الربطة المطاطية إلى إبرة طبية (شكل 4-3 - ب)، وأجر تجربة على سلوكية هذه الوحدة. تتصرف هذه الآلة كجسم مرن لدن، غير أن الفرق يتجلى في أنه ليس هناك من إجهاد خضوع

يجب تجاوزه قبل أن يبدأ الانفعال المتبقي. يسمى الجسم الذي يتصرف بهذا الشكل "جسم ماكسويل" Maxwell body.

تبين التجربة الموضحة في الشكل (4-10) أن الربطة المطاطية تطاولت وثبتت، ما أعطى الجسم انفعالاً متبقياً لحظياً. وفي كلا المخططين، لاحظ أنه وبرغم أن الانفعال لحظي ومتبق فإن الإجهاد أعظمي عند  $t_1$  ويتناقص حتى يتم الاسترداد الكلي للانفعال المرن.



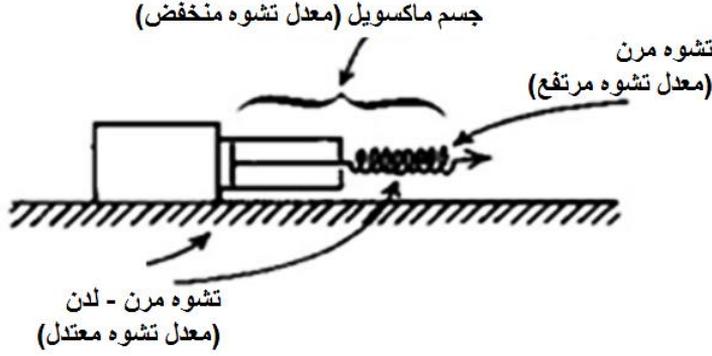
شكل (4-10): السلوك المرن للزج

#### 6.4. التمارين:

##### 1.6.4. التمرين الأول:

يتصرف النموذج الانسيابي المبيّن في الشكل (4-11) بشكل مختلف عند معدلات انفعال مختلفة. فعند معدلات الانفعال المرتفعة يتصرف بشكل مرن. أما في حال معدلات الانفعال المتوسطة فهو يتصرف بشكل مرن لدن. وفي حال معدلات الانفعال المنخفضة فإنه يتصرف بشكل مرن لزج. أجر تجربة بالمعجون ولاحظ أن لها بعض المميزات المذكورة في هذا النموذج، غير أنها ليست تماماً كهذا النموذج المرسوم. فالمعجون يبدي السلوك التالي: الارتداد عند معدلات الانفعال العالية والتطاول مع الارتداد البطيء الجزئي عند معدلات الانفعال المتوسطة، والسيلان بتأثير قوة الجاذبية (معدلات الانفعال المنخفضة).

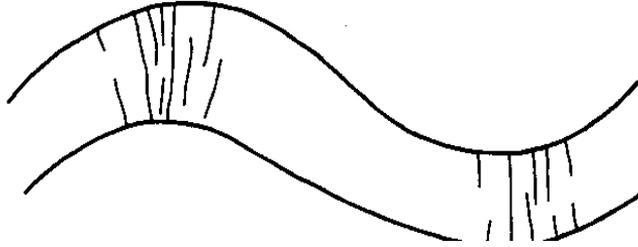
ارسم نموذجاً انسيابياً للمعجون يتوافق مع كل هذه المتطلبات، وحدد على الرسم الأجزاء التي تتصرف بالسلوكيات المختلفة.



شكل (4-11): نموذج انسيابي للاستخدام في التمرين الأول.

#### 2.6.4. التمرين الثاني:

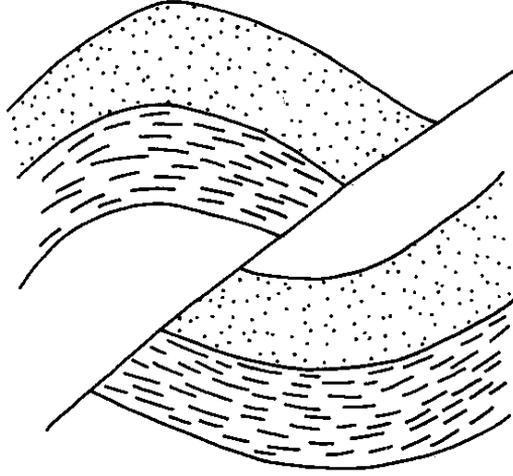
يتوضح في الشكل (4-12) طبقة صخرية مشوهة، حيث أن أجنحة الطيات تشوهت من دون حصول تكسر بينما حصل التكسر في مجال المفاصل. اشرح بحسب النماذج الانسيابية، لماذا كان هناك اختلاف في سلوك الأجزاء المختلفة على الرغم من أنها تتألف من المادة نفسها وتتأثر بالشروط نفسها من الضغط والحرارة.



شكل (4-12): مخطط لطبقة صخرية تعرضت للطي والتكسر، من أجل التمرين الثاني.

#### 3.6.4. التمرين الثالث:

تعرضت الطبقات الصخرية الموضحة في الشكل (4-13) للطي ثم للتصدع. أعط سببين محتملين على الأقل من أجل النمطين المختلفين من التشوه.

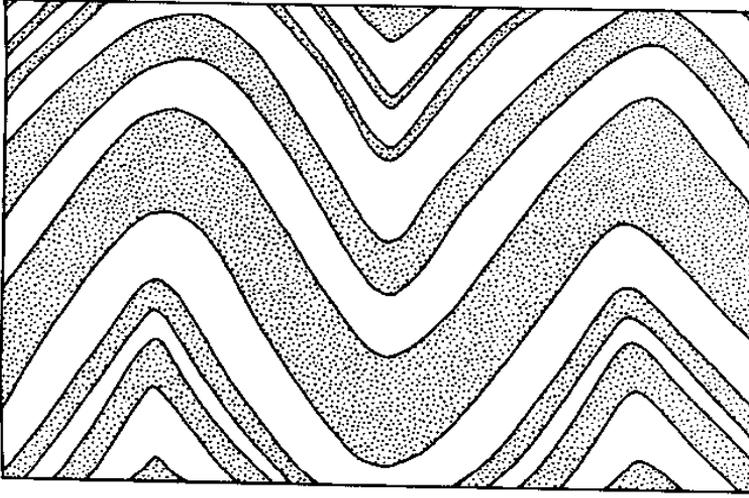


شكل (4-13): مخطط للطبقات المطوية والمتصدعة، المستخدم في التمرين الثالث.

#### 4.6.4. التمرين الرابع:

يوضح الشكل (4-14) طبقات رسوبية مطوية. والمطلوب:

- قس المسافة الحالية بين مفاصل المكدبات، وقدر ماهي المسافة التي كانت موجودة بين هاتين المفصلتين قبل حدوث الطي. حدد أيضاً النسبة المئوية للتقصير الذي تعرضت له هذه الطبقات.
- إذا كان عمر الصخور 10 م.ع فما هو المعدل المتوسط للانفعال محسوباً بقيمة التقصير في الثانية.



شكل (4-14): مخطط الطبقات المطوية، للاستخدام في التمرين الرابع.



## الباب الثاني - الفصل الخامس

### العناصر البنيوية Structural Elements

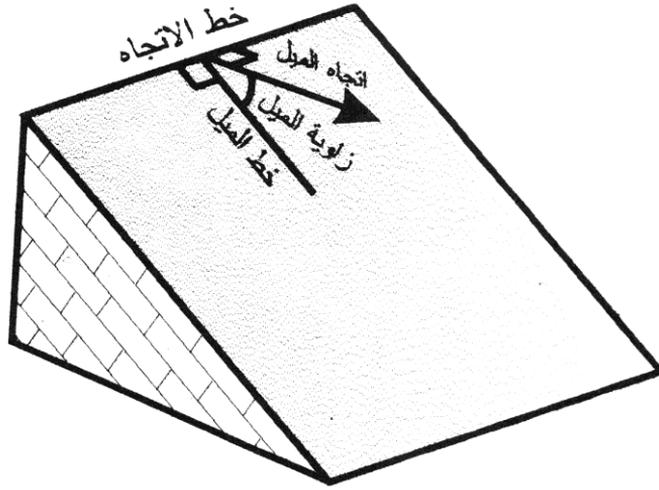
إن الدراسة الجيولوجية لمنطقة ما تبدأ بتحديد الوضعيات الفراغية لعناصر بنيوية متنوعة ولمواقع هذه العناصر. وتعد المستويات والخطوط من أهم العناصر البنيوية، ومنها مستويات التطبق والصدوع والشقوق والتورق وغيرها (بايرلي و دركل 2000؛ Ramsay and Huber, 1983; Rowland, 1986; Davis and Reynolds, 1996; Park, 2001; Lutgens and Tarbuck, 2003; Duebendorfer et. al, 2007; Ragan, 2009; Coe, 2010). ومن الخطوط يمكن أن نضرب أمثلة عديدة فمنها محاور الطيات وخدوش الصدوع وخطوط التقاطع بين مستويات بنيوية وغيرها. ونعني بمصطلح الوضعية الفراغية Attitude توجه مستوي أو خط في الفراغ ثلاثي الأبعاد، ويحدد ذلك عادة بالعلاقة مع الإحداثيات الجغرافية Geographical coordinates والأفق (شكل 5-1 وشكل 5-2).

#### 1.5. وضعية العناصر المستوية في الفراغ ثلاثي الأبعاد

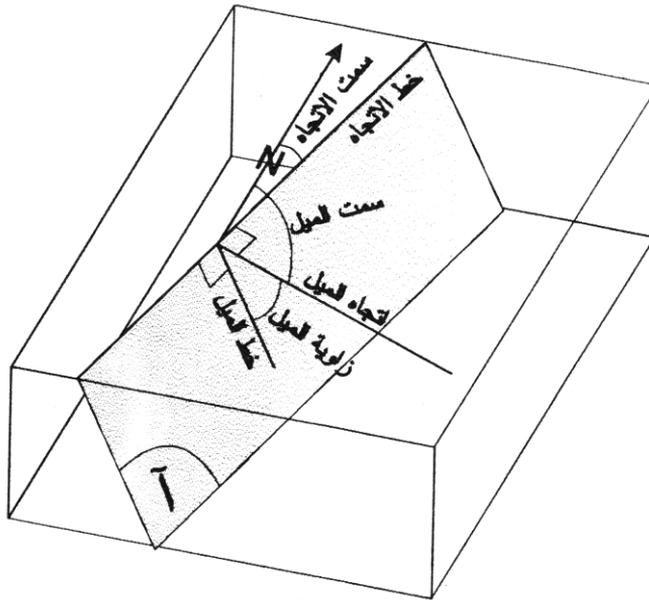
تحدد الوضعية الفراغية للعناصر المستوية المائلة في الفراغ بصورة رئيسة من خلال مستقيمين متعامدين موجودين على سطح كل عنصر، هما خط الاتجاه وخط الميل.

#### 1.1.5. خط الاتجاه Strike line:

ينتج خط الاتجاه من تقاطع سطح العنصر المستوي المائل مع مستو أفقي، وهو بالتالي مستقيم وهمي يصل بين نقطتين (أو نقاط) واقعتين على هذا السطح ومتساويتي الارتفاع (أو العمق) عن سطح البحر، أو عن أي سطح مرجعي آخر (شكل 5-1 وشكل 5-2).



شكل (5-1): خط الاتجاه وخط الميل واتجاه الميل وزاوية الميل لمستوى يمثل سطحاً طبقياً في هذه الحالة (بايرلي ودركل 2000).



شكل (5-2): تحديد الوضعية الفراغية لعنصر مستو مائل (بايرلي ودركل 2000).

### 2.1.5. خط الميل Dip line واتجاه الميل Dip direction:

يتعامد هذا الخط مع خط الاتجاه ويقع على سطح العنصر المستوي المائل (شكل 5-1)، ويعبر في هذه الحالة عن الميل الحقيقي (الأعظمي)، أما إذا لم يكن متعامداً مع خط الاتجاه فيعبر عن خط ميل ظاهري. وإن مسقط هذا الخط على المستوي الأفقي يعبر عن اتجاه الميل.

### 3.1.5. العلاقة مع الشمال والأفق

تعتبر علاقة خط الاتجاه وخط الميل واتجاه الميل مع جهة الشمال ومع الأفق عن الوضعية الفراغية للعناصر المستوية. ويُستخدَم مصطلح "منحى" Trend لوصف علاقة خط أفقي (عادةً خط الاتجاه أو اتجاه الميل) مع الشمال، حيث تُحدَد هذه العلاقة إما من خلال "الصوب" أو من خلال "السمت":

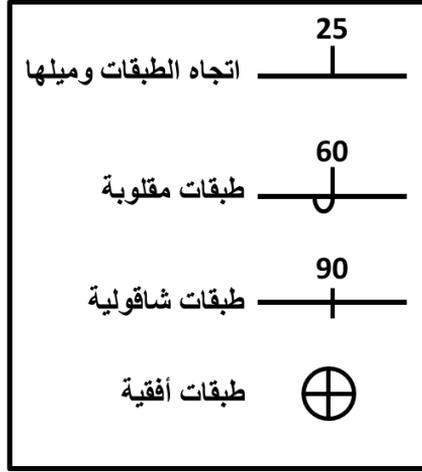
- الصوب Bearing: زاوية أفقية مقيسة بدءاً من الشمال أو الجنوب نحو الشرق أو الغرب (مثال N40E أو N35W)

- السمت Azimuth: زاوية أفقية مقيسة بحسب حركة عقارب الساعة بدءاً من الشمال (مثال 135 أو 075).

ومن هنا يمكن تحديد ما يسمى سمت الاتجاه وسمت الميل (شكل 5-2). ويضاف لذلك تحديد زاوية الميل وهي الزاوية المحصورة ما بين المستوي المائل والمستوي الأفقي.

### 4.1.5. تدوين الاتجاه والميل Strike and dip

يُعبَّر مصطلحا "الاتجاه" و"الميل" عن حالة الوضعية الفراغية لمستوي بنيوي. ويُحدَدان في الخرائط من خلال رموز خاصة (شكل 5-3). وتعد المستويات الأفقية حالة خاصة لا يعبر عنها من خلال مصطلحي الاتجاه والميل، ولها رموز خاصة في الخرائط.



شكل (5-3): أمثلة عن الرموز المستخدمة للتعبير عن الوضعيات الفراغية للطبقات في الخرائط.

ويُعبّر عموماً عن الوضعية الفراغية للمستويات من خلال مقاربتين، تتضمن أولاهما منحى الاتجاه وتتضمن ثانيهما منحى الميل (اتجاه الميل) للمستوي المدروس (Ragan, 2009)، وانطلاقاً من ذلك نجد أن الأشكال الأربعة التالية للتدوين تعبّر عن الوضعية الفراغية للمستوي نفسها (شكل 5-4):

- تدوين الاتجاه Strike notation، يتم بإحدى الطريقتين التاليتين:

- N65W, 25S: تعني أن خط الاتجاه يصنع 65° بدءاً من الشمال نحو

الغرب، وأن الميل بقيمة 25° نحو الجنوب.

- 295, 25S أو 295/25S: تعني أن سمت الاتجاه يساوي 295° مقيساً

باتجاه عقارب الساعة بدءاً من الشمال، وأن الميل بقيمة 25° نحو الجنوب.

- تدوين الميل Dip notation ويتم أيضاً بإحدى الطريقتين التاليتين:

أ- 25, S25W: تعني أن زاوية الميل 25° وأن صوب الميل بقيمة 25° إلى

الغرب بدءاً من الجنوب.

ب- 25/205: تعني أن زاوية الميل 25° وأن سمت الميل يساوي 205° مقيساً مع عقارب الساعة بدءاً من الشمال. ويمكن بحسب بعض الجيولوجيين أن يكتب القياس السابق بطريقة معكوسة، أي 205/25، ما يمكن أن يؤدي إلى حصول التباس. ولتجنب مثل هذا الالتباس يُعبّر عن قيمة زاوية الميل برقمين وعن قيمة السمت بثلاثة أرقام، حيث يؤدي ذلك لاستخدام رقم الصفر في بداية قيمة السمت عندما تكون قيمته أقل من 100°.

إن طريقة تدوين الاتجاه (بطريقتيها) هي الأكثر شيوعاً في التدوين، ويتمثل الفرق بين طريقتيها بأن تكون البوصلة المستخدمة مقسمة إلى أربعة أرباع أو إلى 360°. أما طريقة تدوين الميل فتستخدم في حالة قياس الوضعية الفراغية للخطوط أكثر من استخدامها للمستويات، ورغم ذلك يمكن تطبيق هذه الطريقة في حال قياس المستويات والخطوط بأن معاً.

الرمز الطريقة	35 15	40 36
الاتجاه (أ)	N35W, 15NE	N40E, 36SE
الاتجاه (ب)	325, 15NE أو 325/ 15NE	040, 36SE أو 040/ 36SE
الميل (أ)	15, N55E	36, S50E
الميل (ب)	15/ 055 أو 055/ 15	36/ 130 أو 130/ 36

شكل (5-4): أمثلة عن طرائق تدوين الاتجاه والميل.

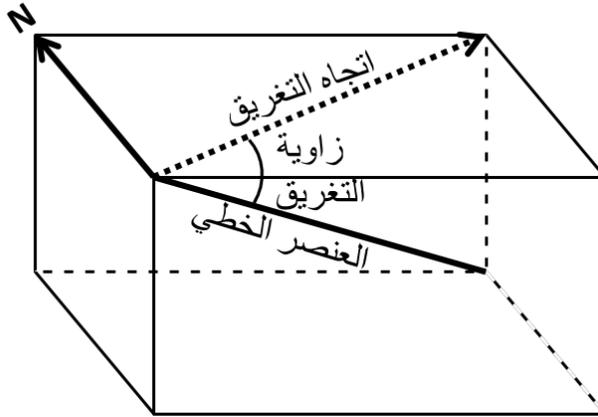
## 2.5. وضعية العناصر الخطية في الفراغ ثلاثي الأبعاد

يشابه تحديد العناصر الخطية في الفراغ تحديد العناصر المستوية (شكل 5-5):

- زاوية التغرق Angle of plunge: تقاس بين العنصر الخطي المائل وبين الأفق (أي أنها مقيسة في مستوي شاقولي).
- منحى التغرق Trend of plunge: الزاوية الأفقية الكائنة بين الشمال وبين الجهة التي يتغرق نحوها العنصر الخطي المائل (المتغرق) على الأفق (معطاة بقيمة الصوب أو السميت) .

أمثلة:

- طريقة الصوب: S45W, 30، أي أن الخط يتغرق بزاوية مقدارها  $30^\circ$  نحو  $S45^\circ W$ .
- طريقة السميت:  $30/225$  أو  $30-225$  (وتكتب أحياناً  $225/30$ )، أي أن الخط يتغرق بزاوية مقدارها  $30^\circ$  نحو  $225$ . ويتم تمييز السميت بأنه مؤلف من أرقام ثلاثة، وفي حال كانت قيمته أقل من مئة درجة (75 مثلاً) يضاف إليه رقم الصفر لتمييزه (075).



شكل (5-5): تحديد الوضعية الفراغية لعنصر خطي.

## الباب الثاني - الفصل السادس

### البوصلة الجيولوجية Geological compass

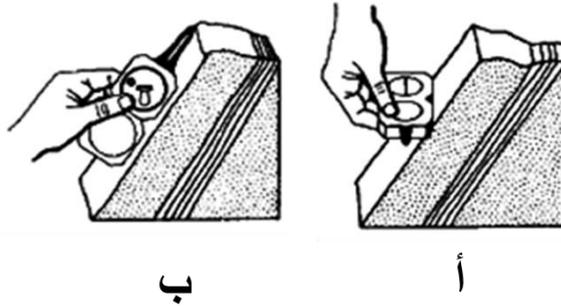
تستخدم البوصلة الجيولوجية لإجراء القياس الحقلي للوضعيات الفراغية للعناصر البنيوية المستوية والخطية. ويوجد عدد لانهائي من أشكال البنيات في الصخور، حيث أن قياس اتجاهاتها في الفراغ ثلاثي الأبعاد يمثل الأساس الذي يستند إليه التحليل البنيوي. وهناك أنواع مختلفة من البوصلات المستخدمة لهذا الخصوص. فهناك بوصلة برنتون Brunton compass وبوصلات سيلفا رينجر Silva Ranger وكلاهما Clar وتشيكس Chaix. وتتضمن البوصلة عموماً إبرة مغناطيسية لقياس الاتجاهات، كما تتضمن مقياساً للميول لقياس زوايا الميل. تتضمن الطريقة المباشرة للقياس حمل البوصلة بشكل مباشر قبالة السطح أو الخط المراد قياسه في التكتشف الصخري. ورغم أن الأنواع المختلفة من البوصلات تهدف إلى قياس الوضعية الفراغية للعناصر البنيوية، غير أن طريقة التطبيق تختلف بحسب النوع. لذا سنتعرض بشكل مختصر إلى طريقة عمل بعضها الأكثر انتشاراً.

#### 1.6. البوصلة الجيولوجية من نموذج برنتون (شكل 6-1) :

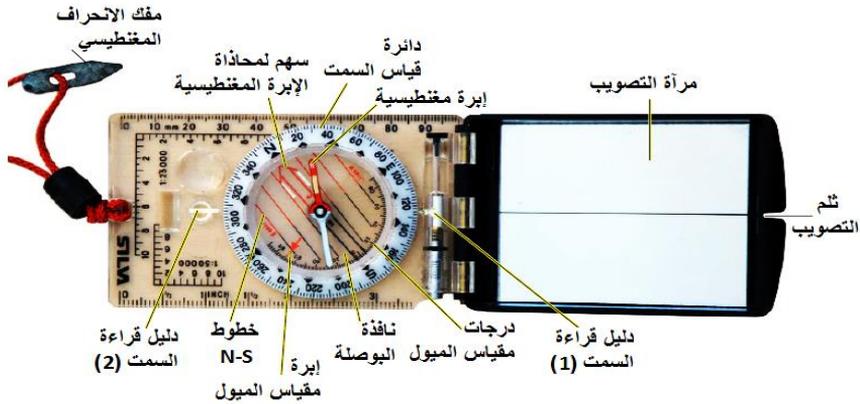


شكل (6-1): البوصلة الجيولوجية من نموذج برنتون.

تجري عملية قياس الوضعية الفراغية للعناصر البنيوية المستوية على مرحلتين (شكل 6-2)، ففي المرحلة الأولى توضع حافة البوصلة المفتوحة قبالة المستوي بحيث تكون البوصلة أفقية تماماً (شكل 6-2 - أ)، ويساعد في ذلك الفقاعة الموجودة على سطح البوصلة. تقرأ قيمة سمت الاتجاه التي تشير إليها الإبرة المغناطيسية. وتقاس قيمة زاوية الميل في المرحلة الثانية بوضع حافة البوصلة على السطح وإنما بشكل متعامد مع الاتجاه الذي قيس في المرحلة السابقة، بحيث يكون جسم البوصلة شاقولياً (شكل 6-2 - ب). وتقرأ قيمة زاوية الميل من خلال مقياس الميل Clinometer.



شكل (6-2): قياس الوضعية الفراغية لمستوي بواسطة البوصلة الجيولوجية من نوع برنتون. (أ) قياس سمت الاتجاه، (ب) قياس زاوية الميل (Ragan, 2009).  
2.6. البوصلة الجيولوجية من نموذج سيلفا (شكل 6-3):



شكل (6-3): البوصلة الجيولوجية من نموذج سيلفا، وأجزائها (Coe, 2010).

### 1.2.6. قياس اتجاه وميل العناصر البنيوية المستوية:

لإتمام هذه العملية تُتَّبَع الخطوات التالية:

أ- يُحدَّد خط أفقي على السطح المدروس (خط الاتجاه) باستخدام مقياس الميول بعد وضعه على قيمة الميل  $0^0$ .

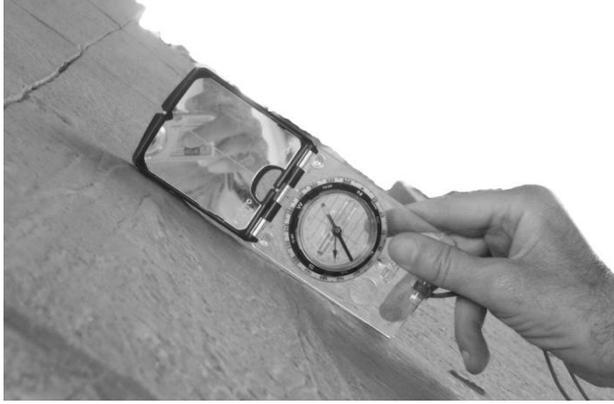
ب- يقاس سمت اتجاه هذا الخط بواسطة البوصلة وتسجل هذه القيمة على الدفتر الحقلي (شكل 6-4).

ت- قبل القيام بالخطوة التالية يُدَوَّر قرص البوصلة المرقم من  $0^0$  حتى  $360^0$  بحيث تصبح علامتا E و W بجوار العلامتين اللماعتين الموجودتين على طرفي البوصلة (دليلي قراءة سمت، شكل 6-3). ثم تقاس زاوية الميل بوضع البوصلة على السطح بشكل شاقولي بحيث تتعامد مع الخط الأفقي المحدد سابقاً (شكل 6-5). تُسجَل القيمة التي يعطيها مؤشر مقياس الميول، كما يُحدَّد اتجاه الميل العام.

ث- مثال:  $123^0 / 56^0$  SW



شكل (6-4): وضع بوصلة سيلفا لقياس سمت الاتجاه.



شكل (6-5): وضع بوصلة سيلفا لقياس زاوية الميل.

إن من جملة الأخطاء الشائعة لدى إجراء القياسات الحقلية للمستويات (بخاصة عند المبتدئين) أن يتم تسجيل الاتجاه أو اتجاه الميل بشكل معاكس للواقع، كتسجيل جهة الشرق بدلاً من الغرب أو العكس. لذا يصار إلى اعتماد قاعدة اليد اليمنى Right hand rule لتلافي هذا الخطأ، حيث توضع اليد اليمنى على السطح المراد قياسه كما هو موضح في الشكل (6-6) ويسجل الاتجاه الذي تشير إليه السبابة في حين يشير الإبهام إلى الميل.

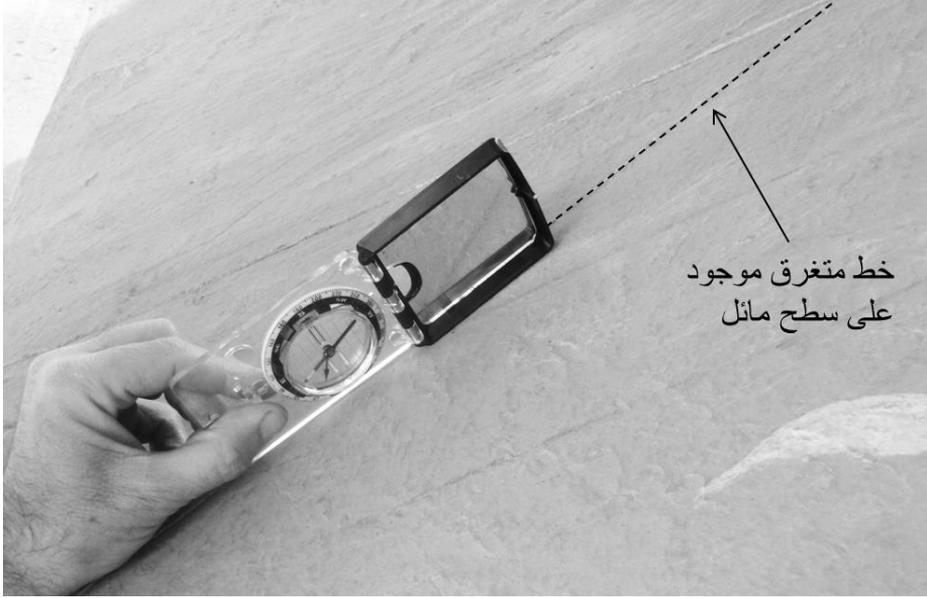


شكل (6-6): قاعدة اليد اليمنى. توضع اليد اليمنى على السطح المراد قياس وضعيته الفراغية، بحيث يشير الإبهام إلى الميل، ويسجل الاتجاه الذي تشير إليه السبابة.

### 2.2.6. قياس اتجاه تغريق وزاوية تغريق العناصر الخطية

يمكن استخدام لوح خشبي أو الدفتر الحقلي للمساعدة في إجراء هذا القياس، حيث توضع حافة اللوح بتماس مع الخط المراد قياسه، بحيث يكون اللوح شاقولياً. ثم يقاس سمت التغريق بعد وضع

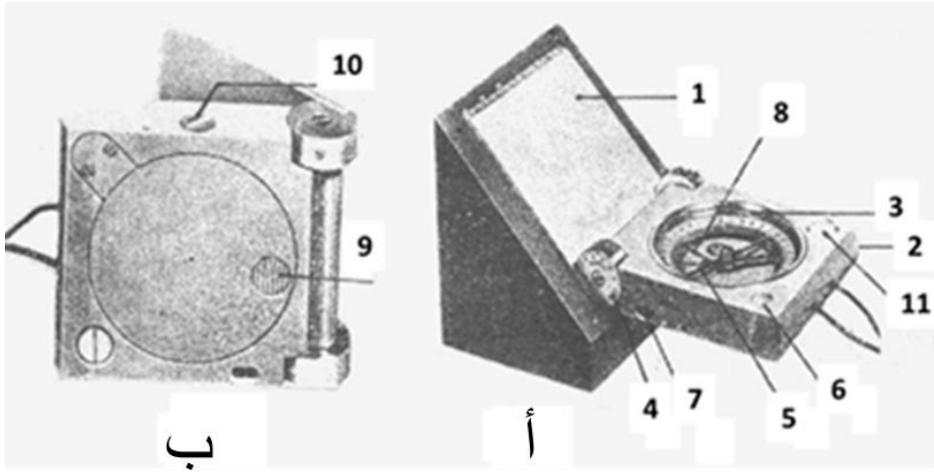
حافة البوصلة على جانب اللوح. يصار بعد ذلك إلى قياس زاوية التغيريق، باستخدام البوصلة كمقياس ميول Clinometer (بوضعها بشكل شاقولي)، حيث توضع حافة البوصلة على الخط مباشرة وتقاس قيمة زاوية التغيريق من خلال مقياس الميول مباشرة (شكل 6-7).



شكل (6-7): قياس سمت تغيريق العناصر الخطية باستخدام بوصلة سيلفا.

### 3.6. البوصلة الجيولوجية من نموذج كلار

تتميز هذه البوصلة بأن تحديد الوضعيات الفراغية للمستويات (الاتجاه والميل) وللخطوط (زاوية التغيريق واتجاهه) يتم بعملية واحدة للقياس. ويبين الشكل (6-8) الأجزاء المختلفة لهذه البوصلة. تعطى قيم الزوايا بالدرجات (0-360° على الدائرة المدرجة الأفقية و 0-90° على الدائرة المدرجة الشاقولية) أو بالغرادات (0 حتى 400 غراد على الدائرة المدرجة الأفقية و 0 حتى 100 على الدائرة المدرجة الشاقولية) ويتم تحويل قيم الزوايا المحسوبة بالدرجات إلى قيمها بالغرادات أو بالعكس كما يلي: القيمة المحسوبة بالدرجات  $\times 1.11 =$  القيمة بالغرادات  
القيمة المحسوبة بالغرادات  $\times 0.90 =$  القيمة بالدرجات



شكل (6-8): أجزاء البوصلة الجيولوجية من نموذج كلار. (أ) منظر عام، (ب) منظر سفلي.  
 1- صفيحة القياس (غطاء البوصلة)، 2- علبة البوصلة، 3- الدائرة المدرجة الأفقية (دائرة قياس السمات)، 4- الدائرة المدرجة الشاقولية (دائرة قياس زوايا الميل)، 5- الإبرة المغنطيسية، 6- ميزان مائي، 7- ميزان مائي أنبوبي، 8- مقياس الميل، 9- زر إيقاف مقياس الميل، 10- زر تحريك الدائرة المدرجة الأفقية، 11- زر تحرير الإبرة المغنطيسية.

### 1.3.6. قياس الوضعية الفراغية للمستويات البنوية

يتم قياس الاتجاه والميل للمستويات البنوية بإحدى طريقتين:

- طريقة الاتجاه: ويقاس فيها سمت الاتجاه وزاوية الميل.
- طريقة اتجاه الميل: ويقاس فيها سمت الميل وزاوية الميل.

تكون طريقة الاتجاه مناسبة خلال العمل الحقلّي للحصول على معلومات سريعة عن الوضعيات الفراغية للمستويات. أما طريقة اتجاه الميل فتعطي الأفضلية خاصة عندما يتم قياس الوضعيات الفراغية للمستويات والخطوط بأن معاً في الحقل. ولذلك يجب ذكر الطريقة المستخدمة عند إجراء القياسات الحقلية. كما يجب الانتباه عند القياس بطريقة الاتجاه إلى أن إشارة الشرق E (90°) العائدة للدائرة المدرجة الأفقية يجب أن تكون موجودة عند إشارة الدليل الموجودة في جهة مفصلة صفيحة القياس. وبذلك فإن اتجاه الشمال - جنوب العائد للدائرة المدرجة يوازي مفصلة صفيحة

القياس. أما عند إجراء القياس بطريقة اتجاه الميل فإن اتجاه الشمال - جنوب العائد للدائرة المدرجة يجب أن يتعامد مع مفصلة صفيحة القياس، بحيث تكون إشارة الجنوب S (180°) في جانب المفصلة ومنتطابقة مع الإشارة الموجودة عندها (Möbus, 1989).

إن ما يلفت النظر على الدائرة المدرجة للبوصلية الجيولوجية أن تزايد زوايا الاتجاه يحدث بعكس دوران عقارب الساعة. وبذلك فإن إشارة الشرق E توجد (إذا تم النظر نحو الشمال) على الجهة اليسارية لدائرة البوصلية، أي أن الشرق E والغرب W يظهران متبادلين مقارنة مع موقعهما الجغرافي. يعود سبب ذلك إلى أن المستويات والخطوط الجيولوجية المراد قياسها ثابتة الوضعية الفراغية، وأن الذي يدور هي دائرة البوصلية الجيولوجية لدى وضع صفيحة القياس على هذه المستويات أو الخطوط.

**طريقة إجراء القياس:** تقاس الوضعية الفراغية لمستو ما بالطريقة التالية (شكل 6-9):

✓ **قياس السميت:**

أ- توضع صفيحة القياس (غطاء البوصلية) على السطح المراد قياسه (شكل

6-9 - أ)،

ب- تعطى علبة البوصلية الوضع الأفقي بوساطة الفقاعة الموجودة على سطحها (شكل

6-9 - ب)،

ت- تحرر الإبرة المغنطيسية بضغط زر إيقافها شكل (6-9 - ت)،

ث- تقرأ قيمة سميت الاتجاه أو سميت الميل على الدائرة المدرجة الأفقية بعد استقرار الإبرة

المغنطيسية كما يلي (شكل 6-9 - ث):

- تقرأ القيمة المقابلة للنهاية الشمالية للإبرة (النهاية ذات اللون الأسود) في حالة

السطوح السفلية (أي التي تقع تحت صفيحة القياس)

- تقرأ القيمة المقابلة للنهاية الجنوبية للإبرة (النهاية ذات اللون الأحمر) في حالة

السطوح المعلقة (أي السطوح التي تقع فوق صفيحة القياس) (شكل 6-10).

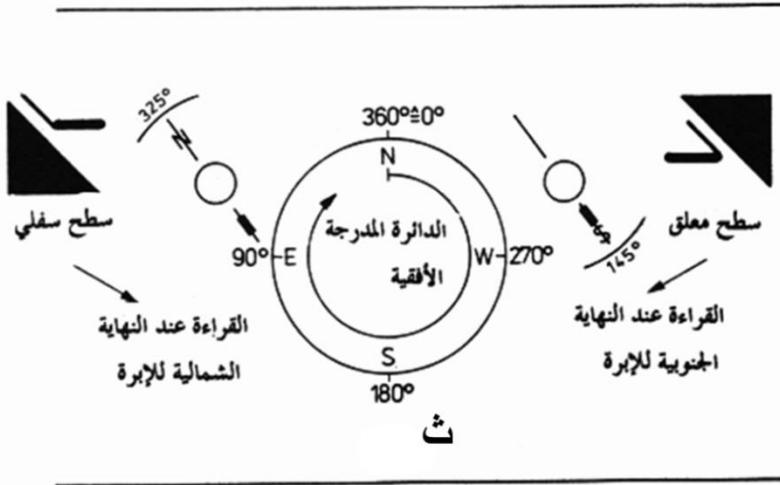
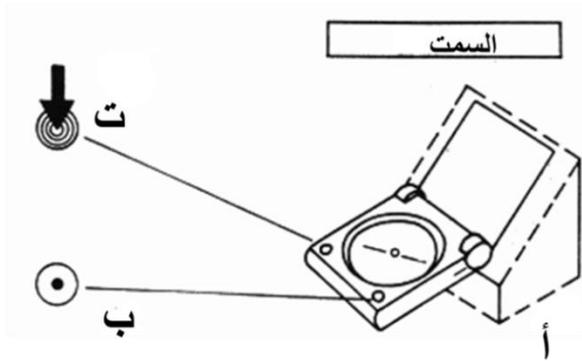
✓ **قياس زاوية الميل:**

تقرأ زاوية الميل على الدائرة المدرجة الشاقولية الموجودة على جانب صفيحة القياس.

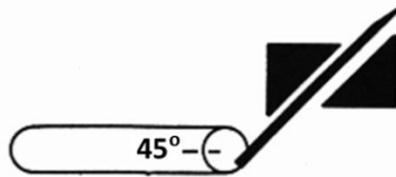
✓ النتيجة: قيمة سمت الاتجاه وزاوية الميل أو قيمة سمت الميل وزاوية الميل.

ويمكن هنا ملاحظة أن سمت الميل متعامد دوماً مع سمت الاتجاه بحيث تتحقق العلاقة:

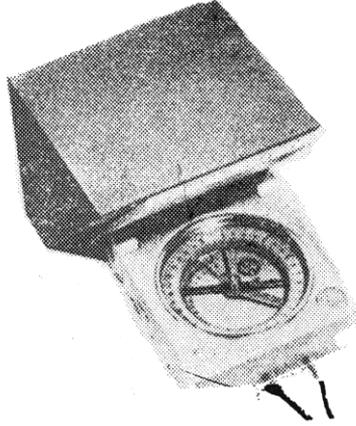
$$\text{سمت الميل} = 90^\circ + \text{سمت الاتجاه}$$



زاوية الميل



شكل (6-9): قياس الوضعية الفراغية للعناصر البنيوية المستوية (السطوح) باستخدام بوصلة كلار (Möbus, 1989).



شكل (6-10): قياس السطوح المعلقة.

### 2.3.6. قياس الوضعية الفراغية للخطوط

تقاس الوضعية الفراغية للخطوط (العناصر الخطية) الموجودة على سطح ما والتي تتحرف عن خط ميل السطح، كالخدوش الموجودة على سطوح الصدوع مثلاً، بطريقة اتجاه الميل، حيث يقاس سمت التغيريق وزاوية التغيريق كما يلي (شكل 6-11):

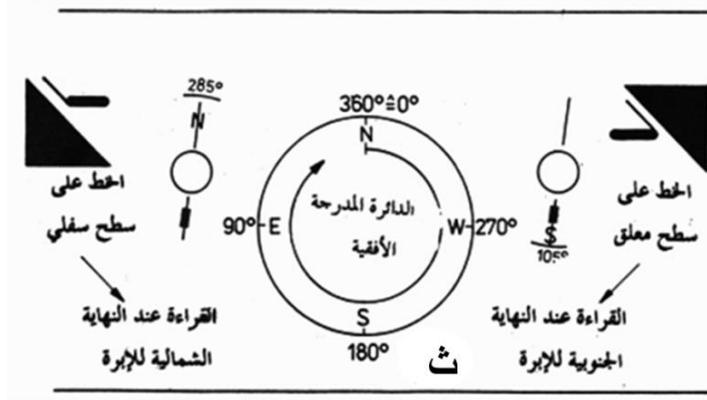
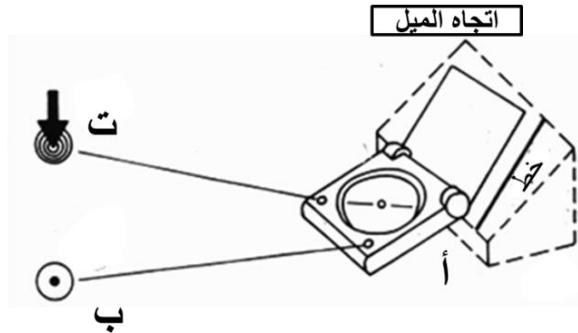
✓ قياس سمت التغيريق:

- أ- توضع الحافة الجانبية لصفحة القياس بشكل مواز للخط المراد قياسه (شكل 6-11-أ)
  - ب- تعطى علبة البوصلة الوضع الأفقي من خلال الفقاعة الموجودة على سطحها (شكل 6-11-ب).
  - ت- تحرر الإبرة (شكل 6-11-ت).
  - ث- تقرأ قيمة سمت التغيريق على الدائرة المدرجة الأفقية بعد استقرار الإبرة المغنطيسية كما يلي (شكل 6-11-ث):
- يقرأ القياس عند النهاية الشمالية للإبرة عندما يكون السطح الذي يجري عليه قياس الخط سفلياً،

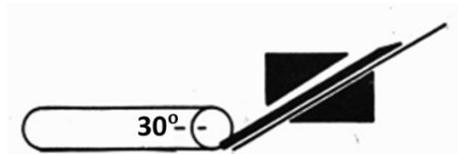
- يقرأ القياس عند النهاية الجنوبية للإبرة عندما يكون السطح الذي يجري عليه قياس الخط معلقاً (شكل 6-10).

✓ قياس زاوية التغير: تقرأ زاوية التغير على الدائرة المدرجة الشاقولية الموجودة على جانب صفيحة القياس.

✓ النتيجة: سمت التغير وزاويته



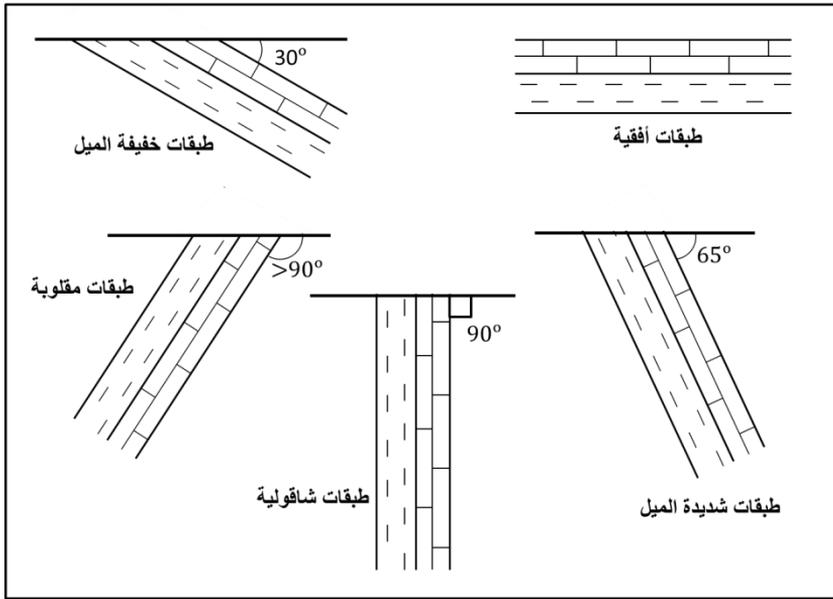
زاوية الميل



شكل (6 - 11): قياس الوضعية الفراغية للعناصر الخطية باستخدام بوصلة كلار (Möbus, 1989).

## الباب الثاني - الفصل السابع الوضعيات الفراغية المختلفة للطبقات

الطبقة جسم رسوبي محدود بسطحين متوازيين أو شبه متوازيين يدعيان "سطحي الطبقة". وتأخذ الطبقة بُعد ترسيبها الوضع الأفقي أو شبه الأفقي، إلا أنها وبسبب الإجهادات اللاحقة قد تأخذ وضعيات مائلة أو شاقولية أو حتى مقلوبة (شكل 7-1).



شكل (7-1): الوضعيات المختلفة للطبقات.

### 1.7. مسألة النقاط الثلاث (استخدام معطيات الآبار)

يستحيل أحياناً قياس اتجاه وميل الطبقات مباشرة في الحقل، كما هو الحال مثلاً بالنسبة للطبقات العميقة غير المتكشفة على سطح الأرض. وتحدد وضعية مثل هذه الطبقات بمساعدة الآبار التي تتيح لنا تحديد مواقع وارتفاعات ثلاث نقاط واقعة على سطح الطبقة المدروسة. وإن الشرط الأساسي هنا أن تكون هذه الطبقات مستوية تقريباً وغير مشوهة في المناطق الفاصلة بين الآبار.

تعتمد هذه الطريقة بالدرجة الأولى على إيجاد نقطتين متساويتين الارتفاع واقعتين على سطح الطبقة، وبالتالي فإن الخط الواصل بينهما يمثل خط اتجاه لهذه الطبقة، ويعادل ارتفاعه ارتفاع هاتين النقطتين.

يمكن دراسة هذه الطريقة من خلال المثالين التاليين:

### 1.1.7. المثال الأول-الحالة البسيطة:

يمثل الشكل (7-2) مواقع وارتفاعات ثلاث نقاط A، B، C على سطح طبقة صخرية، اثنتان منهن A و B متساويتان في الارتفاع. والمطلوب تحديد اتجاه وميل هذه الطبقة على افتراض أنها طبقة مستوية.

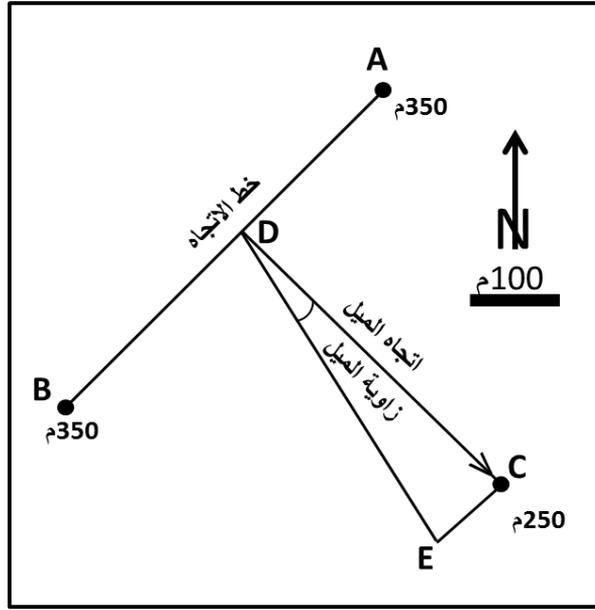
• مراحل الحل:

- أ- نصل بين النقطتين A و B متساويتين الارتفاع، فنحصل على خط اتجاه الطبقة والمعادل في الارتفاع لارتفاع هاتين النقطتين، أي خط اتجاه 350م.
- ب- نحدد سمت هذا الخط، أي قيمة الزاوية بينه وبين اتجاه الشمال (في هذه الحالة 045°).
- ت- ننشئ الخط CD المتعامد مع خط الاتجاه AB، فنحصل على اتجاه الميل الذي يكون في هذه الحالة نحو الجنوب الشرقي، ونحدد سمتة أيضاً (135°).
- ث- لتحديد زاوية الميل يُنشأ المثلث القائم CDE، بحيث يكون طول CE معادلاً لفرق الارتفاع بين خط الاتجاه AB والنقطة C، بحسب مقياس الرسم. إن الزاوية CDE تمثل زاوية ميل الطبقة التي يمكن قياسها بالمنقلة.
- ج- النتيجة: نكتب قيم الوضعية الفراغية للطبقة المدروسة (الاتجاه والميل) على النحو التالي:

اتجاه الميل	زاوية الميل/ سمت الاتجاه
SE	14° / 045°

أو على النحو التالي:

زاوية الميل / سمت الميل  
14° / 135°



شكل (7-2): تحديد الاتجاه والميل (مسألة النقاط الثلاث، الحالة البسيطة).

### 2.1.7. المثال الثاني- الحالة العامة:

يختلف هذا المثال عن المثال السابق بأن النقاط الثلاث المحددة على سطح الطبقة مختلفة في ارتفاعاتها. وتعتمد طريقة معالجة هذه المسألة على الحل التخطيطي للمثلثات المتشابهة، وذلك بهدف إيجاد نقطتين على ارتفاع واحد وإرجاع هذه المسألة إلى الحالة البسيطة المدروسة في المثال السابق.

يمثل الشكل (7-3) مواقع ثلاث آبار حفرت في النقاط A و B و C للوصول إلى الطبقة الصخرية المطلوبة. وترتفع نقاط الحفر (قمة البئر) عن سطح البحر كما يلي: بئر A: 72 م، وبئر B: 50 م، وبئر C: 62 م. أما أعماق الحفر في كل بئر للوصول إلى السطح العلوي

للطبقة فبلغت في بئر A: 222 م، وفي بئر B: 300 م، وفي بئر C: 562 م. والمطلوب:  
تحديد اتجاه وميل سطح هذه الطبقة.

الحل:

لحل هذه المسألة يجب أولاً حساب المسافة الشاقولية (الارتفاع أو الانخفاض) للنقاط A' و B' و C' الواقعة على سطح الطبقة اعتباراً من سطح البحر. أي القيام بحذف التأثير التضاريسي، ويتم ذلك بطرح مقدار عمق الحفر في كل بئر من قيمة الارتفاع التضاريسي لقمة كل بئر:

• المسافة الشاقولية للنقطة A' عن سطح البحر =  $222 - 72 = 150$  (-)

• المسافة الشاقولية للنقطة B' عن سطح البحر =  $300 - 50 = 250$  (-)

• المسافة الشاقولية للنقطة C' عن سطح البحر =  $562 - 62 = 500$  (-)

ويهدف إجراء الحل التخطيطي لهذه المسألة نتبع المراحل التالية:

أ- نصل بين أخفض نقطة C' وأعلى نقطة A' فنحصل على المستقيم A'C'

الذي يجب أن يمر من نقطة معادلة في الارتفاع للنقطة B'.

ب- ننشئ من النقطة A' مستقيماً A'D يصنع مع المستقيم A'C' زاوية ما (يمكن

أن تكون قائمة) بطول يعادل الفرق بين ارتفاعي النقطة العليا A' والنقطة

الدنيا C'.

ت- نقسم المستقيم A'D بحسب مقياس الرسم، ونحدد عليه النقطة E ذات

الارتفاع 250- م والنقطة D ذات الارتفاع 500- م.

ث- ننشئ مستقيماً بين D و C' وآخر موازياً له ماراً من E وقاطعاً للمستقيم

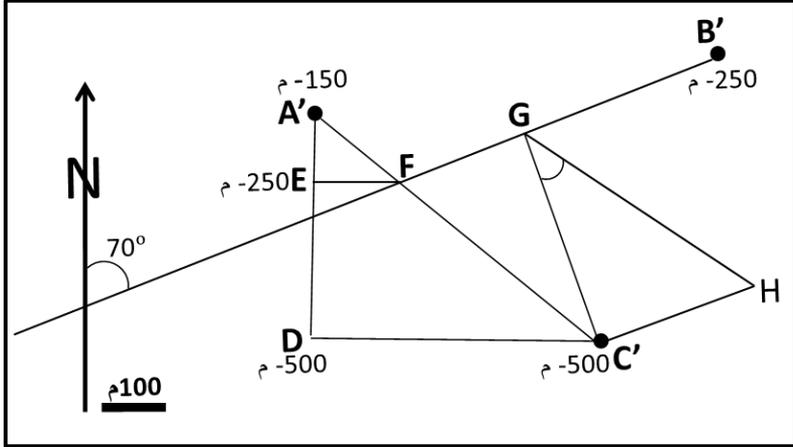
A'C' في النقطة F. إن النقطة F هي المعادلة في الارتفاع للنقطة الوسطى

B'.

ج- النتيجة: ثلاث نقاط C' و F و B' موجودة على سطح الطبقة، اثنتان منهن

F و B' لهما الارتفاع نفسه 250- م.

نتابع الحل بالطريقة نفسها التي اتبعناها في المثال السابق (الحالة البسيطة) للحصول على اتجاه وميل هذه الطبقة.

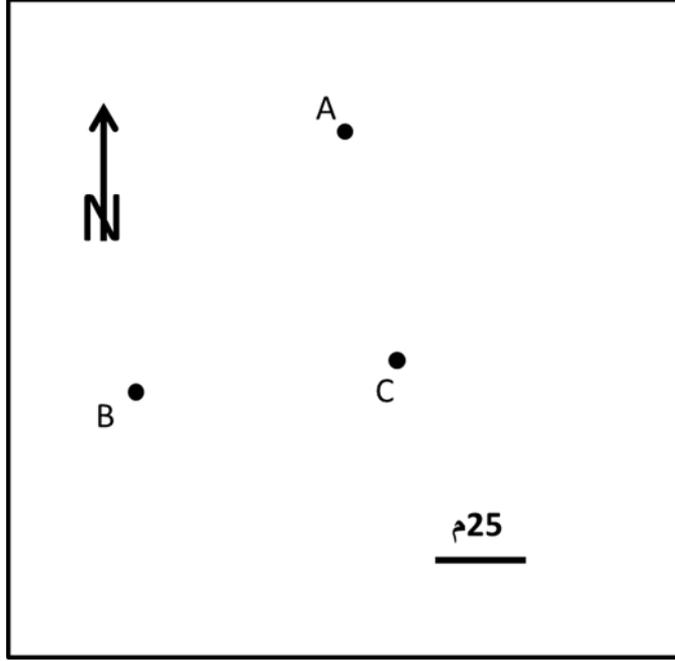


شكل (7-3): تحديد الاتجاه والميل من خلال معطيات الآبار (مسألة النقاط الثلاث).

### 3.1.7. التمارين:

#### 1.3.1.7. التمرين الأول

حفرت ثلاث آبار في المواقع A و B و C الموضحة في الشكل (7-4) للوصول إلى السطح العلوي لطبقة حجر رملي. وتبلغ الارتفاعات التضاريسية لمواقع الآبار عن سطح البحر كما يلي: ارتفاع الموقع A: 500 م، وارتفاع الموقع B: 600 م، وارتفاع الموقع C: 400 م. أما أعماق الحفر للوصول إلى السطح العلوي لطبقة الحجر الرملي فكانت: في البئر A: 250 م، وفي البئر B: 350 م، وفي البئر C: 200 م. والمطلوب تحديد قيم الوضعية الفراغية (الاتجاه والميل) لهذه الطبقة.



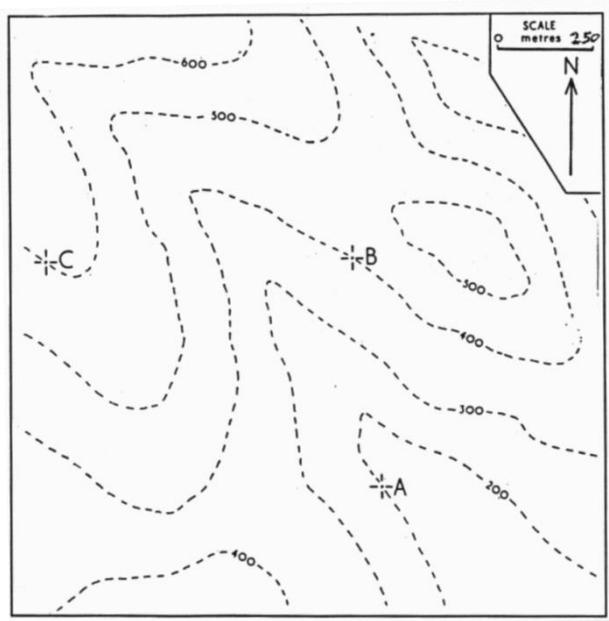
شكل (7-4): خريطة لمواقع النقاط المستخدمة في التمرين الأول.

### 2.3.1.7 التمرين الثاني

يتكشف السطح العلوي لطبقة من الحجر الكلسي الحواري في نقطة (A)، ارتفاعها 400م عن سطح البحر. كما يتكشف في نقطة ثانية (B) تقع إلى الشمال من النقطة A وتبعد عنها مسافة 1000م (مسافة أفقية)، و يبلغ ارتفاعها عن سطح البحر 1200م. ويتكشف هذا السطح أيضاً في نقطة ثالثة (C) واقعة إلى الغرب من النقطة A وعلى بعد 600م منها (مسافة أفقية) أما ارتفاعها فيبلغ 700م. المطلوب تحديد قيم الوضعية الفراغية لهذه الطبقة. مقياس الرسم: 1:20000.

### 3.3.1.7 التمرين الثالث

حفرت ثلاث آبار في النقاط A و B و C المبينة مواقعها في الخريطة التضاريسية التالية (شكل 7-5). وقد بلغ الحفر إلى السطح العلوي لطبقة من الفحم الأعماق التالية: في البئر A: 200 م، وفي البئر B: 350 م، وفي البئر C: 400 م. المطلوب: تحديد قيم الوضعية الفراغية لهذه الطبقة.

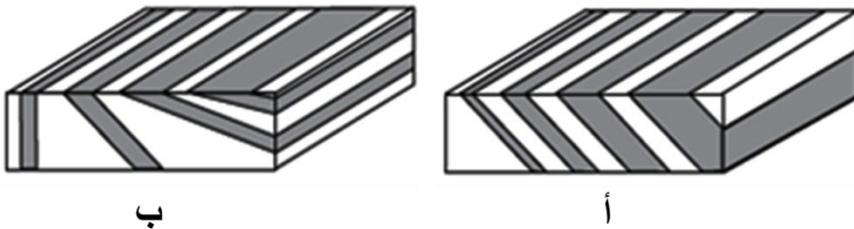


شكل (7-5): خريطة مواقع الآبار المستخدمة في التمرين الثالث.

## 2.7. المستويات والتضاريس Planes and topography

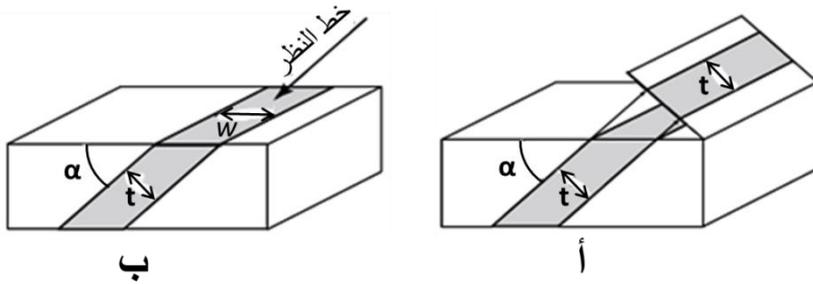
### 1.2.7. الكشف على سطوح أفقية

إن شكل تقاطع طبقات مائلة مع سطح تضاريسي يعطي مايسمى "تمط الكشف" Outcrop pattern (Ragan, 2009). وعندما يكون السطح التضاريسي أفقياً فإن عرض الكشف لهذه الطبقات يعتمد على عاملين أولهما الثخانة الحقيقية للطبقات وثانيهما زاوية ميل كل طبقة (شكل 7-6).



شكل (7-6): عرض الكشف: (أ) يتغير بتغير الثخانة، (ب) يتغير بتغير زاوية الميل.

ويكون عرض التكشف الظاهر في الخريطة مساوياً للثخانة الحقيقية في حالة خاصة فقط عندما تكون الطبقات شاقولية (سطح الأرض أفقي). وفي الحالة العامة المتمثلة بالطبقات المائلة، فإن خط الميل يعد واحداً من خطوط النظر line of sight التي يمكن استخدامها في الخريطة الجيولوجية. وفي هذه الحالة يمكن إنشاء مستوي رؤية مساعد بشكل متعامد مع هذا الخط، وهو ما يؤدي إلى رؤية الطبقات عبر حوافها، ويمكن بالتالي من رؤية الثخانة الحقيقية (شكل 7-7 - أ). وعموماً فإنه من غير الضروري إجراء مثل هذا الإنشاء لأنه يمكن الحصول على المعلومة نفسها من خلال الخريطة نفسها. ولهذا الهدف يتم تدوير الخريطة الجيولوجية حتى يصبح اتجاه الميل مبتعداً عن القارئ، ثم يتم النظر إلى الخريطة بشكل مائل على سطحها بقدر زاوية ميل الطبقة (أي بشكل مواز لخط ميل الطبقة). ومن خلال هذه النظرة فإن عرض التكشف، الذي هو دوماً أكبر من قيمة الثخانة الحقيقية، يتم تقصيره بقيمة مناسبة ليبدو كثخانة حقيقية (شكل 7-7 - ب).



شكل (7-7): الثخانة الحقيقية: (أ) مستوي عمودي على خط الميل، (ب) نظرة أسفل الميل (Ragan, 2009) Down-dip view.

يستخدم هذا المبدأ، في حياتنا اليومية، من أجل الإشارات المرورية المرسومة على أرضية الطرقات، حيث يتم تشويبه مقصود للأحرف، إذا تم النظر إليها بشكل شاقولي (نظرة خريطة map view)، أما في حال نظر إليها سائق السيارة (حيث يراها بشكل مائل) فإن التقصير المترافق مع هذه النظرة يعوض التشوه وتبدو الكتابة بنسب عادية، لتصبح قابلة للقراءة بشكل مناسب (شكل 7-8).



شكل (7-8): لو نظرنا إلى كلمة STOP بشكل متعامد مع الورقة، فسنجد أنها متطاوله، أما لو نظرنا إليها بشكل مائل من جهة اليسار فنجد أن تشوهها (تطاولها) أقل مما تبدو عليه في الحالة الأولى.

ويتطبيق هذا المبدأ على الخرائط الجيولوجية، نجد أن تدوير الخرائط الجيولوجية، بشكل يتم من خلاله النظر باتجاه أسفل الميل Down-dip direction، يؤدي بنا إلى رؤية الطبقات وكأنها بوضعيتها الأفقية الأصلية.

### 2.2.7. تأثير التضاريس

إن عوامل أخرى ستضاف عند تحديد أنماط التكشف في المناطق التي يكون فيها سطح الأرض مائلاً. وتشتمل هذه العوامل على زاوية انحدار سطح الأرض واتجاه هذا الانحدار بالنسبة لوضعية الطبقات، وكذلك تغيرات زاوية الانحدار واتجاهها. أي أن نمط التكشف (الظاهر على الخريطة) يتأثر بتفاصيل التضاريس، إضافة إلى تأثيره بالثخانة والميل للطبقات المتكشفة. تسمى القاعدة التي تدرس العلاقة بين الميل الطبقي والتضاريس "قاعدة V" The rule of Vs، التي يتم من خلالها تقدير اتجاه ميل الطبقات مباشرة من خلال نمط التكشف. وحيثما يتقاطع أثر سطح ما (السطح الطبقي مثلاً) مع وادي (أو مسيل مائي)، فإن النمط الناتج يميز وضعية هذا المستوي. وهنا نجد عدة أنماط مميزة:

#### أ. المستويات الأفقية Horizontal planes

تتبع آثار التكشف للمستويات (الطبقة مثلاً) الأفقية في هذه الحالة منحنيات التسوية التضاريسية. ولذلك فإن نمط التكشف (أي رأس حرف الـ V) يشير إلى أعلى المسيل المائي، بشكل مشابه لمنحني التسوية التضاريسية (شكل 7-9 - أ).

### ب. تميل المستويات نحو جهة أعلى المسيل المائي **Planes inclined upstream**

يتمثل نمط التكشف بحرف V غير حاد ويشير برأسه نحو أعلى المسيل المائي (شكل 7-9 - ب). وكلما ازداد ميل المستوي أصبح شكل حرف الـ V أقل حدة.

### ت. المستويات الشاقولية **Vertical planes**

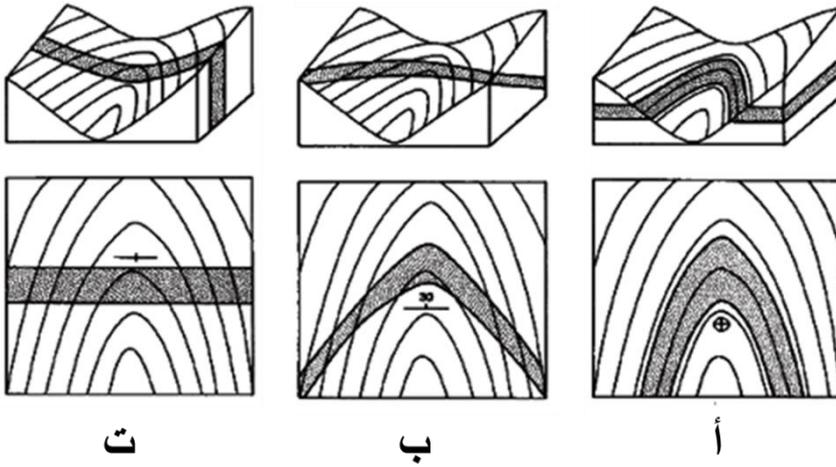
يأخذ التكشف في هذه الحالة الخاصة، التي يكون فيها الميل مساوياً  $90^\circ$ ، شكلاً مستقيماً وموازياً لخط اتجاه هذه المستويات، بغض النظر عن تفاصيل السطح التضاريسي. ولا يتشكل حرف V (شكل 7-9 - ت).

### ث. تميل المستويات نحو أسفل المسيل المائي **Planes inclined downstream**

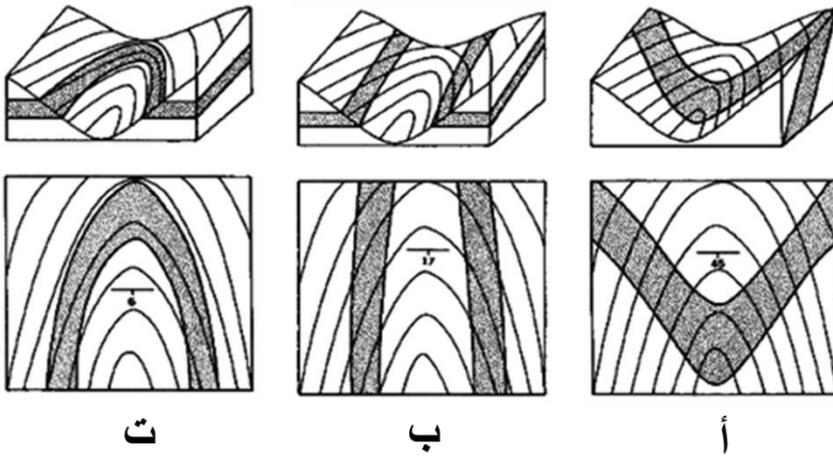
هناك حالتان عامتان وحالة خاصة حدية:

- إذا كان ميل المستوي أكبر من انحدار المسيل المائي فإن نمط التكشف يأخذ شكل حرف V يشير برأسه باتجاه أسفل المسيل المائي (شكل 7-10 - أ).
- إذا كانت زاوية ميل المستوي تساوي انحدار المسيل المائي فإن أثر التكشف لن يقطع محور المسيل المائي، ولن يتشكل حرف V (شكل 7-10 - ب).
- إذا كان ميل المستوي أقل من انحدار المسيل المائي فإن التكشف يأخذ شكل حرف V مشيراً برأسه إلى أعلى المسيل المائي (شكل 7-10 - ت).

تفترض هذه القاعدة أن اتجاه المستوي يتعامد مع محور المسيل المائي. وبالنتيجة كان شكل V متناظراً تقريباً. أما إذا كان المستوي يأخذ اتجاهات أخرى، فستنشأ أشكال غير متناظرة لـ V، غير أن القاعدة ماتزال في هذه الحالة قابلة للتطبيق. أما في حالة توازي اتجاه المستوي ومحور المسيل فلن يكون هناك نمط V على الإطلاق.



شكل (7 - 9): قاعدة V: (أ): طبقة أفقية، (ب): طبقة مائلة باتجاه أعلى المسيل المائي، (ت): طبقة شاقولية.



شكل (7 - 10): قاعدة V: (أ): طبقة تميل باتجاه أسفل المسيل المائي، (ب): الطبقة تميل بقيمة انحدار محور المسيل المائي نفسها، (ت): الطبقة تميل باتجاه أسفل المسيل المائي إنما بزاوية أقل من انحدار المسيل المائي.

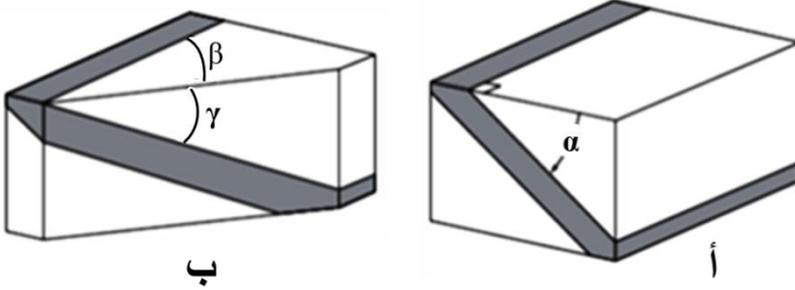


## الباب الثاني - الفصل الثامن

### الميل الحقيقي والميل الظاهري True dip & Apparent dip

#### 1.8. ماهو الميل الحقيقي وماهو الميل الظاهري؟

مر معنا أن زاوية ميل مستوي تتمثل بالزاوية المحصورة ما بين هذا المستوي والمستوي الأفقي. غير أن المستوي المائل يبدي في مقاطع شاقولية ذات اتجاهات مختلفة زوايا ميل متباينة أكبرها قيمة هي تلك المقيسة في المقطع الشاقولي المتعامد مع اتجاه المستوي المدروس، وتدعى زاوية الميل الحقيقي True dip angle (شكل 8-1 - أ). أما زوايا الميل التي تظهر في المقاطع الشاقولية الأخرى (غير المتعامدة مع اتجاه المستوي المدروس) فهي دوماً أصغر من زاوية الميل الحقيقي، وتدعى زاوية الميل الظاهري Apparent dip angle (شكل 8-1 - ب). وهي تساوي الصفر عندما يكون المقطع الشاقولي موازياً لاتجاه ذلك المستوي المائل.



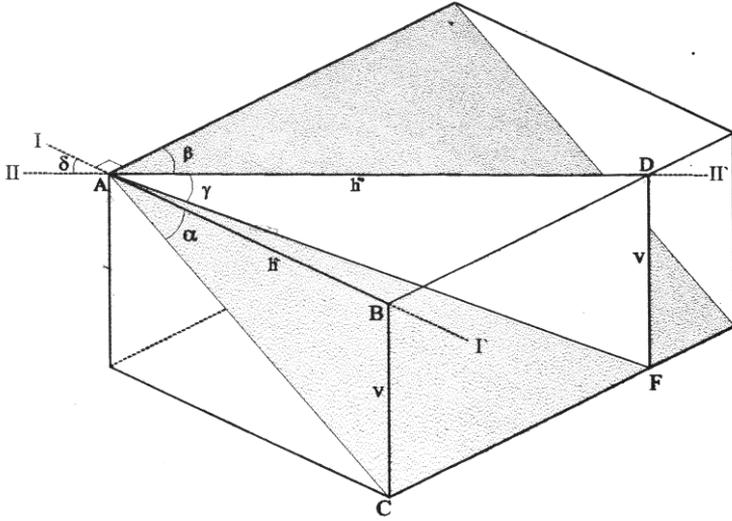
شكل (8-1): (أ) زاوية الميل الحقيقي "α" مقيسة في مقطع متعامد مع خط الاتجاه، (ب) زاوية الميل الظاهري "β" مقيسة في مقطع لايتعامد مع خط الاتجاه بل يصنع معه زاوية "β".

إن لهذه الفكرة فوائد تطبيقية مهمة، فليست كل الميول الطبقيّة التي نشاهدها في التكتشفات الحقلية مثلاً أو في المقاطع الشاقولية هي زوايا ميل حقيقية، إلا إذا كانت تلك التكتشفات أو المقاطع متعامدة مع اتجاه الطبقات. فقد نصادف في الحقل مثلاً تكتشفاً نظن من خلاله للوهلة الأولى أن الطبقات ذات وضعيّة أفقيّة أو أنها ذات ميل خفيف، رغم أنها قد تكون في الحقيقة شديدة الميل. وكذلك يجب الانتباه، عند رسم مقاطع شاقولية من خلال الخرائط الجيولوجية، إلى تصحيح قيمة

زاوية الميل الظاهرية للطبقات (أو لأية مستويات مائلة أخرى كالصدوع مثلاً) إلى قيمتها الحقيقية إذا كانت تلك المقاطع لاتتعامد مع اتجاه تلك الطبقات (أو المستويات). وبتعبير آخر فإن المعطيات الحقيقية للوضعيات الفراغية تظهر في المقاطع المتعامدة مع اتجاه الطبقات (أو البنيات). وفيما عدا ذلك، أي في المقاطع المنحرفة عن اتجاه الطبقات (أو البنيات) فإن زوايا الميل تكون ظاهرية، وهي دوماً أصغر من الحقيقية.

## 2.8. العلاقة الرياضية بين زاوية الميل الحقيقي وزاوية الميل الظاهري:

يمكن حساب قيمة زاوية الميل الحقيقي ( $\alpha$ ) المقيسة ضمن المقطع ( $I' I$ ) المتعامد مع اتجاه المستوي المائل المدروس (سطح طبقة مثلاً) كما يلي (شكل 8-2):



شكل (8-2): حساب قيم  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\gamma$ .

نجد من المثلث القائم ABC أن

$$\tan \alpha = v/h \quad (1)$$

حيث،  $\alpha$ : زاوية الميل الحقيقي، و  $v$ : المسافة الشاقولية بين خطي اتجاه، و  $h$  المسافة الأفقية بين خطي الاتجاه نفسيهما بحسب المقطع ( $I' I$ ).

أما قيمة زاوية الميل الظاهري ( $\gamma$ ) المقيسة ضمن المقطع (II III) المنحرف عن اتجاه المستوي المائل المدروس بالزاوية  $\beta$  (الواقعة في المستوي الأفقي) فتحسب كما يلي (شكل 8 - 2):

$$\tan \gamma = v/h' \quad (2)$$

حيث،  $\gamma$ : زاوية الميل الظاهري، و  $v$ : المسافة الشاقولية بين خطي الاتجاه، و  $h'$ : المسافة الأفقية بين خطي الاتجاه نفسيهما بحسب المقطع (II III).

ولإيجاد العلاقة بين  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\gamma$ ، نجد من المثلث ABD أن:

$$\sin \beta = h/h' \quad (3)$$

ومن العلاقتين (1) و (2) نجد أن:

$$\tan \gamma / \tan \alpha = h/h' \quad (4)$$

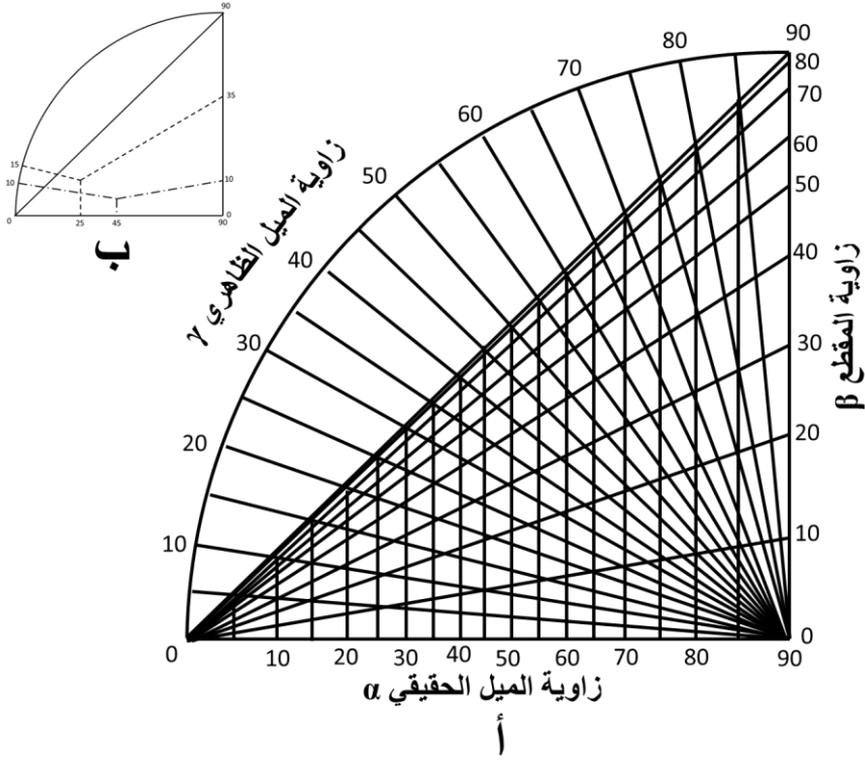
وبمقارنة العلاقتين (3) و (4) نحصل على العلاقة التالية التي يمكننا من خلالها حساب أي من الزوايا  $\alpha$  أو  $\beta$  أو  $\gamma$  بمعرفة اثنتين منهن:

$$\tan \gamma = \tan \alpha \cdot \sin \beta$$

ملاحظة: يمكن أيضاً حساب  $\alpha$  أو  $\gamma$  بمعرفة إحداهما بالإضافة إلى الزاوية  $\delta$  الكائنة بين اتجاهي المقطعين (I') و (II III) (شكل 8 - 2) من العلاقة:

$$\tan \gamma = \tan \alpha \cdot \cos \delta$$

ولقد طور الباحثون مخططات بيانية يمكن من خلالها ومن دون اللجوء للعمليات الحسابية تحديد قيم الزوايا  $\alpha$  أو  $\beta$  أو  $\gamma$  بمعرفة اثنتين منها (شكل 8 - 3).



شكل (8-3): أ: مخطط بياني لتحديد قيم  $\alpha$  أو  $\beta$  أو  $\gamma$  بمعرفة اثنتين منهن. ب: مثال، (Flick et al., 1972).

### 3.8. تحديد الاتجاه والميل الحقيقي بمعرفة ميلين ظاهريين (طريقة التظل)

تقاس زوايا الميل الظاهري، كما تبين آنفاً، ضمن مقاطع شاقولية غير متعامدة مع اتجاه المستوي المائل المدروس (سطح طبقة أو صدع أو غيره...). فلو أن لدينا زاويتي ميل ظاهريتين لمستو ما، قيستا باتجاهي ميل ظاهريين، فإنه يمكن بطريقة إنشائية تحديد اتجاه هذا المستوي المائل وميله الحقيقي (Ragan, 2009).

### 1.3.8. مثال محلول أول:

لدى دراسة طبقة صخرية تبين ان زاوية ميلها باتجاه الميل الظاهري الأول N15E تساوي 30°  
(30°, N15°E)، وباتجاه الميل الظاهري الثاني N80W تساوي 10° (10°, N80°W).  
المطلوب تحديد اتجاه هذه الطبقة وميلها الحقيقي.  
الحل:

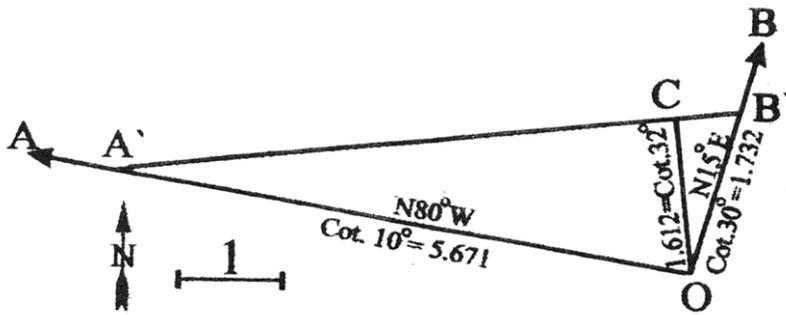
1- ننشئ شعاعين اعتباراً من النقطة O. الأول OA باتجاه N80W والثاني OB باتجاه N15E (شكل 8-4).

2- نأخذ على كل شعاع طولاً يساوي قيمة تظل زاوية الميل الظاهري الموافقة لاتجاه هذا الشعاع. أي الطول OA' على الشعاع OA والطول OB' على الشعاع OB، وذلك بحسب مقياس مناسب.

3- نصل بين A' و B' فيكون اتجاه المستقيم A'B' ممثلاً لاتجاه الطبقة المدروسة.

4- ننشئ من النقطة O العمود OC على المستقيم A'B'. إن اتجاه المستقيم OC يعبر عن اتجاه الميل الحقيقي. أما طوله فيساوي (بحسب المقياس) قيمة تظل زاوية الميل الحقيقي.

5- النتيجة: الوضعية الفراغية للطبقة 32N S84W، أو 264/32N.



شكل (8-4): حل المسألة الواردة في المثال الأول.

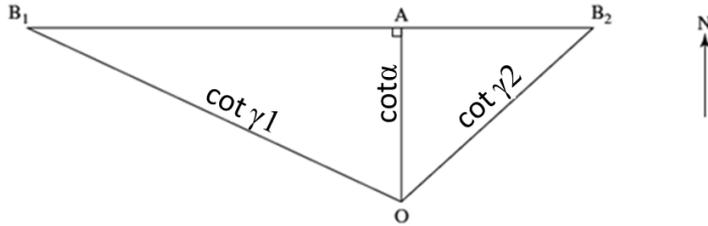
### 2.3.8. مثال محلول ثان:

حدد الميل الحقيقي والاتجاه لمستوي مائل من خلال معرفة الميلين الظاهريين  $20^\circ/296^\circ$  (أي  $20^\circ$  نحو  $296^\circ$ ) و  $30^\circ/046^\circ$  باستخدام طريقة التظل.

الحل:

نستخدم نفس الطريقة التي اتبعناها في المثال السابق شكل (8-5) فنجد أن المستوي يتجه E-W وأن الميل يساوي  $40^\circ$  نحو الشمال، أي:

$$\delta = \arctan (1/1.19) = 40^\circ$$



شكل (8-5): تحديد الميل الحقيقي والاتجاه بمعرفة ميلين ظاهريين بطريقة التظل (المثال الثاني).

### 4.8. طرائق تخطيطية (Ragan, 2009):

#### مثال محلول أول

يتكشف أثر سطح طبقي مستوي مائل على سطح أرض مستوي أفقي. وكان اتجاه السطح الطبقي E-W وميله  $36^\circ$  نحو الشمال. ارسم مقطعاً شاقولياً بيدي زاوية الميل الحقيقي. ماهو عمق هذا السطح الطبقي عند نقطة تبعد مسافة أفقية  $w = 100 \text{ m}$  عن التكشف، مأخوذة بشكل متعامد مع خط الاتجاه؟

الحل:

أ- يرسم خط اتجاه E-W (S) على الخريطة، ويتم تحديد نقطة O على هذا الخط. يرسم

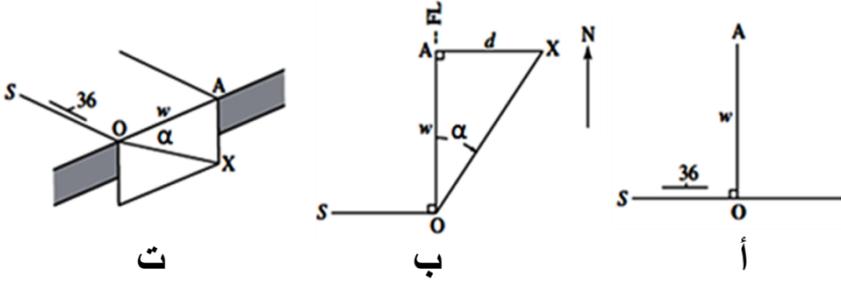
بدءاً من النقطة O خط باتجاه الميل، وذلك لتحديد النقطة A على بعد  $w = 100 \text{ m}$ ،

وذلك بمقياس مناسب شكل (8-6 - أ).

ب- نعتبر الخط OA خط مفصلة (أو خط طي (Folding line ، FL)، ونرسم خطأ (OX) يصنع زاوية  $\alpha = 36^\circ$  مع الأفق، وبذلك يظهر المقطع الشاقولي في مستوي الخريطة نفسه ، بتدويره  $90^\circ$  حول خط المفصلة. أي أن الخط OX يمثل أثر المستوي البنيوي المائل (شكل 8-6 - ب).

ت- يرسم خط شاقولي بدءاً من النقطة السطحية A لهذا المقطع حتى يتقاطع مع أثر المستوي البنيوي المائل عند النقطة X. إن المسافة AX تمثل عمق المستوي  $d = 73m$  عند هذه النقطة.

وما يساعد في تصور العلاقة بين الخريطة والمقطع الشاقولي، يتمثل بطي الشكل حول خط المفصلة على حافة سطح طاولة (شكل 8-6 - ت).

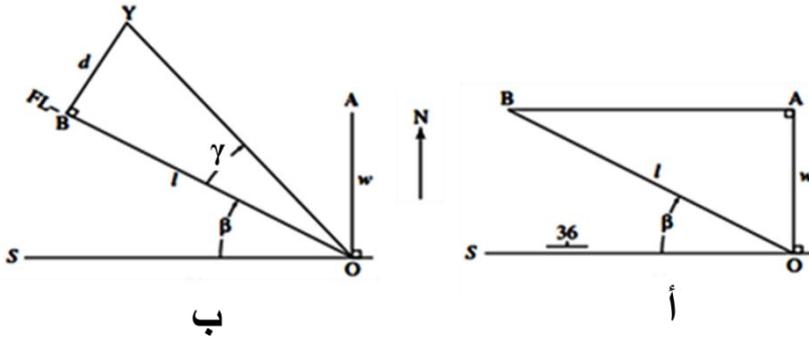


شكل (8-6): الميل الحقيقي: (أ) خريطة، (ب) مقطع يمثل الخط OA فيه خط المفصلة (انظر النص)، (ت) تصور العلاقة بين المقطع والخريطة بعد طي ورقة التمرين بزاوية  $90^\circ$ .

### مثال محلول ثان

ارسم المستوي البنيوي السابق نفسه، الذي يميل نحو الشمال، في مقطع شاقولي ذي منحنى N60W. إن قيمة زاوية الميل الظاهري في ذلك الاتجاه تساوي  $20^\circ$ . ماهو عمق هذا المستوي على بعد  $l = 200 m$  من خط الاتجاه مقيسة بهذا الاتجاه المنحرف؟  
نرسم خطأ باتجاه N60W بدءاً من نقطة O السطحية والواقعة على خط الاتجاه S ذي المنحنى E-W ، ثم نوقع النقطة B على مسافة  $l = 200m$  بحسب مقياس مناسب (شكل 8-7 - أ).

أ- نعتبر OB خط مفصلة FL ونرسم خطأ ينحرف عنه بزاوية  $20^\circ$  (شكل 8-7 - ب).  
ثم نرسم خطأ شاقولياً (متعامداً مع OB في هذه الحالة) بدءاً من B نحو الأسفل حتى  
يتقاطع مع الخط المائل عند نقطة Y. إن المسافة BY تمثل عمق المستوي المطلوب  
 $d = 73m$



شكل (8-7): الميل الظاهري: (أ) خريطة، (ب) المقطع، حيث يعتبر الخط OB خط  
المفصلة FL.

#### 1.4.8 إيجاد الميل الظاهري Apparent dip

لاحظنا في المسألتين السابقتين أن الميل الظاهري كان معطى في نص المسألة. ورغم أنه لا  
يمكن قياس هذه الزاوية دوماً في الحقل، وإذا كان مطلوب منا رسم مستويات مائلة ضمن مثل  
هذه المقاطع المنحرفة، فيجب إيجاد طريقة لذلك.

مثال محلول

إذا كانت  $\alpha = 36^\circ$  و  $\beta = 30^\circ$  فما هي قيمة  $\gamma$ ؟

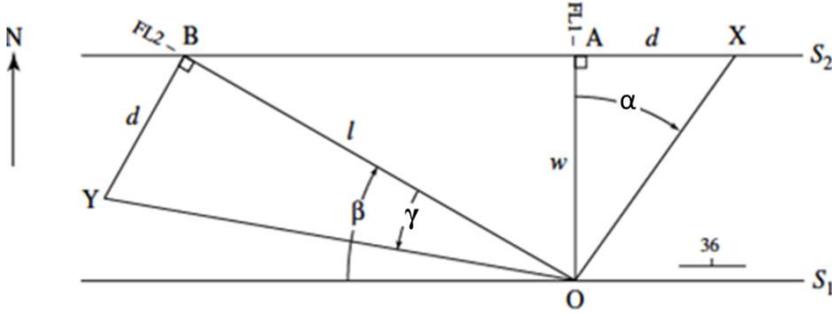
الحل:

1. نرسم، بدءاً من النقطة O الواقعة على خط الاتجاه S1، خطأ باتجاه الميل الحقيقي

(شكل 8-8). ثم نوقع النقطة السطحية A على هذا الخط على مسافة اعتباطية w

غير أن قياسها متناسب مع الشكل.

2. ننشئ مقطعاً شاقولياً معتبرين OA كخط للمفصلة FL1، ونرسم معه أثر المستوي المائل بزواوية  $\alpha = 36^\circ$ ، محددين بالتالي العمق d للنقطة X تحت A.
3. نرسم بدءاً من النقطة A خط اتجاه ثان S2.
4. نرسم بدءاً من النقطة O خطاً يصنع زاوية  $\beta = 30^\circ$  مع S1 ويتقاطع مع S2 عند النقطة السطحية B.
5. ننشئ مقطعاً شاقولياً ثانياً معتبرين OB كخط مفصلة FL2، وذلك لتحديد النقطة Y الواقعة بنفس العمق d تحت B. إن OY تمثل أثر المستوي وإن ميله يمثل زاوية الميل الظاهري BOY بقيمة  $20^\circ$ .



شكل (8-8): استنتاج الميل الظاهري بمعرفة الميل الحقيقي والاتجاه.

#### 2.4.8. طريقة التظل Cotangent method

هذه طريقة مختصرة لتحديد العلاقة بين  $\alpha$  و  $\beta$  و  $\gamma$ ، وهي تجمع ما بين الإنشاء الهندسي البسيط والمعطيات المثلثانية.

مثال محلول أول:

إذا كانت قيمة  $\alpha = 36^\circ$  و  $\beta = 30^\circ$ ، فما هي قيمة  $\gamma$ ؟

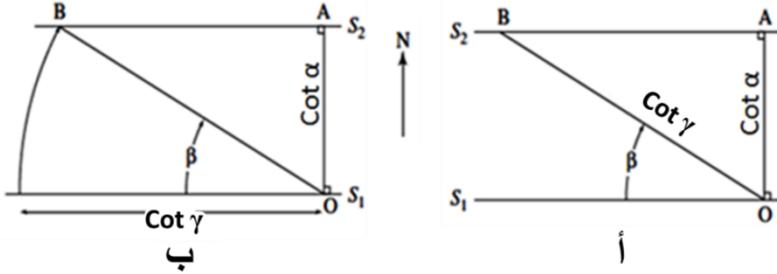
الحل:

1. نحدد المسافة  $\cot \alpha = 1 \div \tan \alpha = 1.37$  ، بدءاً من النقطة O الواقعة على خط الاتجاه S1، وذلك باتجاه الميل الحقيقي باستخدام مقياس مناسب، ثم نوقع النقطة A (شكل 8-9 أ).

2. نرسم خط الاتجاه S2 عبر النقطة A وبشكل مواز لخط الاتجاه S1.

3. نرسم خطاً عبر O بحيث يصنع زاوية  $\beta$  مع S1 ويتقاطع مع S2 في النقطة B.

4. نستخدم المقياس نفسه، لنجد أن المسافة  $OB = \cot \gamma = 2.75$ . ولذلك فإن  $\gamma = \arctan (1/2.75) = 20^\circ$



شكل (8-9): طريقة التظل (أ) الميل الظاهري، (ب) الصوب البينيوي Structural bearing.

مثال محلول ثان:

إذا كانت  $\alpha = 36^\circ$  و  $\gamma = 20^\circ$ ، فما هي قيمة  $\beta$ ؟

الحل:

أ- نرسم خط الاتجاه S1 على الخريطة، كما نرسم الخط OA الممثل لاتجاه الميل الحقيقي (شكل 8-9 ب).

ب- نقيس المسافة  $OA = \cot \alpha$  على الخط الممثل لاتجاه الميل بمقياس مناسب. ثم نرسم خط اتجاه ثان  $S2$  عبر النقطة  $A$ .

ت- نحتاج الآن خطأً ذا طول يساوي  $\cot \gamma$  بحسب المقياس نفسه. وليس من المهم أين نرسم هذا الخط، غير أن المناسب أن نقيسه على طول الخط  $S1$ .

ث- نعتبر النقطة  $O$  مركزاً والطول  $\cot \gamma$  نصف قطر، نرسم قوساً لإيجاد النقطة  $B$  على الخط  $S2$ . إن الخط  $OB$  يمثل منحنى الميل الظاهري، كما أن الزاوية التي يصنعها مع  $S2$  هي  $\beta$ . أي أن الصوب البنوي  $\beta = 30^\circ$ . لاحظ أن هذه الزاوية تتناسب مع منحنين هما:  $N60E$  و  $N60W$ .

### 3.4.8. طريقة تخطيطية لتحديد الميل الحقيقي والاتجاه True dip and Strike بمعرفة

#### ميلين ظاهريين

تشابه هذه الحالة السابقة المذكورة في الفقرة (3.8)، غير أن الحل هنا تخطيطي صرف. ولنأخذ عليها المثال التالي:

#### مثال محلول:

حدد الميل الحقيقي والاتجاه لمستوي مائل، إذا عرفت أن الميلين الظاهريين التاليين قيسا على المستوي نفسه:  $20^\circ/296^\circ$  و  $30^\circ/046^\circ$ .

الحل:

أ- نرسم منحنى الميلين الظاهريين بدءاً من نقطة  $O$  على الخريطة (شكل 8-10).

ب- ننشئ مقطعاً شاقولياً على كل منحنى من هذين المنحنيين:

- نعتبر الخط الأول خط مفصلة  $FL1$  ونحدد النقطة  $B1$  عليه بمسافة اعتبارية  $l_1$ . ثم ننشئ المثلث الشاقولي  $B1OY1$  باستخدام  $\gamma_1 = 20^\circ$ ، وبناء عليه نحدد العمق  $d$  إلى  $Y1$  على المستوي تحت النقطة السطحية  $B1$ .

• نعتبر الخط الثاني خط مفصلة FL2، وننشئ المثلث الشاقولي B2OY2

باستخدام الزاوية  $\gamma_2 = 30^\circ$ . وفي هذه المرة يتم تحديد الخط  $l_2$  بتحديدنا

للعمق  $d$ ، ومن خلاله يتم تحديد موقع النقطة السطحية B2.

ت- بما أن النقطتين Y1 و Y2 لهما العمق نفسه تحت النقطة العامة O، فإن لهما

الارتفاع نفسه أيضاً. وبالتالي لو وصلنا بين النقطتين B1 و B2 المتوافقتين معهما

بخط، لكان هو خط اتجاه.

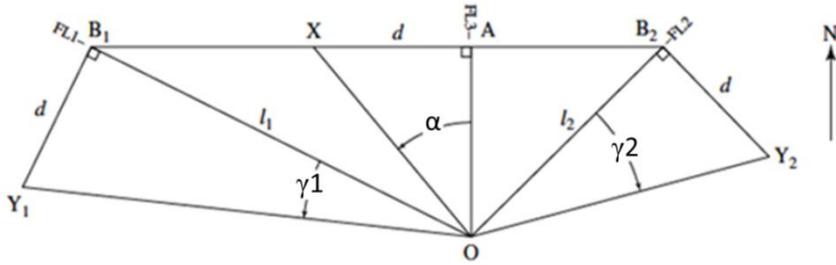
ث- نرسم خطاً عمودياً على الاتجاه بدءاً من النقطة O، ويتقاطع معه في النقطة A، فيكون

OA ممثلاً لاتجاه الميل. تقع النقطة X على الخط الأفقي Y1 Y2 على العمق  $d$

نفسه تحت النقطة A. نعتبر منحى الميل الحقيقي خطاً للمفصلة FL3، ونوقع النقطة

X على العمق  $d$  نفسه تحت A. إن الزاوية AOX تمثل زاوية الميل الحقيقي. ونجد

بالتالي أن المستوي ذو اتجاه E-W وميل  $40N$ .



شكل (8-10): تحديد الميل الحقيقي والاتجاه من خلال ميلين ظاهريين باستخدام خط المفصلة (الطريقة التخطيطية).

4.4.8. الميل الحقيقي والظاهري باستخدام شبكة وولف (يُحلُّ هذا التمرين بعد دراسة الباب

السابع، الإسقاط الستيريوغرافي)

كيف نحسب قيمة الميل الظاهري بمعرفة الميل الحقيقي وذلك باستخدام شبكة وولف؟

### مثال 1:

تبلغ قيمة الميل الحقيقي لطبقة  $30^0$  نحو (اتجاه الميل)  $210^0$  (أي أن الاتجاه يساوي  $300^0$ ).  
ماهي قيمة الميل الظاهري نحو اتجاه الميل  $225^0$ .

الحل:

- أسقط السطح الطبقي بشكل دائرة كبيرة على شبكة وولف.
  - ارسم مستقيماً يمتد باتجاه  $225^0$  بدءاً من مركز الشبكة.
  - دوّر الورقة الشفافة حتى يصبح المستقيم المرسوم بجهة الغرب.
  - اقرأ قيمة زاوية الميل الظاهري المطلوبة وذلك عند نقطة تقاطع المستقيم (المعبر اتجاه الميل الظاهري) مع الدائرة الكبيرة المرسومة آنفاً.
- كيف نحسب قيمة الميل الحقيقي بمعرفة ميلين ظاهريين وباستخدام شبكة وولف؟

### مثال 2:

تبلغ قيمة الميل الظاهري لطبقة  $13^0$  نحو (اتجاه الميل)  $295^0$ ، كما تبلغ  $20^0$  نحو  $200^0$ .  
ماهو الميل الحقيقي لهذه الطبقة؟

الحل:

- وُقِعَ النقطتين  $a$  و  $b$  اللتين تمثلان وضعية الميلين الظاهريين (كعنصرين خطيين).
- دوّر الورقة الشفافة حتى تصل النقطتان  $a$  و  $b$  إلى دائرة كبيرة مشتركة.
- ارسم هذه الدائرة الكبيرة التي تمر عبر  $a$  و  $b$ .
- تشتمل هذه الدائرة الكبيرة على كل من الميل الحقيقي والميل الظاهري.
- اقرأ قيمة زاوية الميل الحقيقي لهذه الدائرة.
- دوّر الورقة الشفافة لتعود إلى وضع البداية (علامة الشمال في موضعها) وقرأ اتجاه الميل الحقيقي.

### 5.8. التمارين:

#### 1.5.8. التمرين الأول:

أمكن، عند إجراء الدراسة الجيولوجية لمنطقة، قياس اتجاه طبقة من خلال تكشف أفقي. أما زاوية الميل الحقيقي فلم يكن قياسها ممكناً. ولكن أمكن تحديد زاوية الميل الظاهري للطبقة نفسها من خلال تكشف شاقولي مجاور وغير متعامد مع اتجاه التطبق. حدد في كلا الحالتين التاليتين قيمة زاوية الميل الحقيقي (اللوحة 8 - 1):

اللوحة (8 - 1): المعطيات المستخدمة في حل التمرين الأول.

الاتجاه الظاهري	الاتجاه الطبقة	زاوية الميل الظاهري	
N90E	N60E	°45	الحالة الأولى
N15W	N45W	°50	الحالة الثانية

#### 2.5.8. التمرين الثاني:

حدد الاتجاه والميل الحقيقي للسطوح التي قيست فيها أزواج الميول الظاهرية التالية:

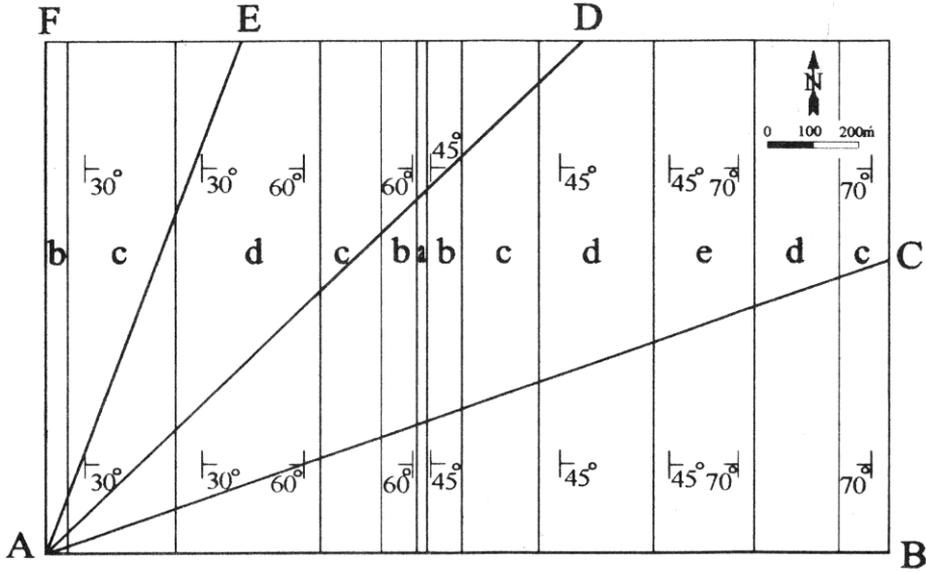
1. 20° نحو N90W، 40° نحو N

2. 30° نحو N60E، 50° نحو N45E

3. 60° نحو N60E، 70° نحو S45E

#### 3.5.8. التمرين الثالث:

ارسم المقاطع البنوية AB و AC و AD و AE و AF اعتماداً على الخريطة المبينة في الشكل (8 - 11). صل آثار سطوح الطبقات فوق سطح الأرض بخطوط متقطعة بهدف إيضاح البنية بشكل أفضل (سطح الأرض أفقي). ماذا تلاحظ.



شكل (8 - 11): الخريطة المستخدمة في التمرين الثالث (أعيد رسمها عن Billings, 1972).

#### 4.5.8. التمرين الرابع

حُدِّدَت الوضعية الفراغية لسطح طبقي فكانت  $N75W, 22N$  ماهي زاوية الميل الظاهري باتجاه  $N50E$ ؟

#### 5.5.8. التمرين الخامس

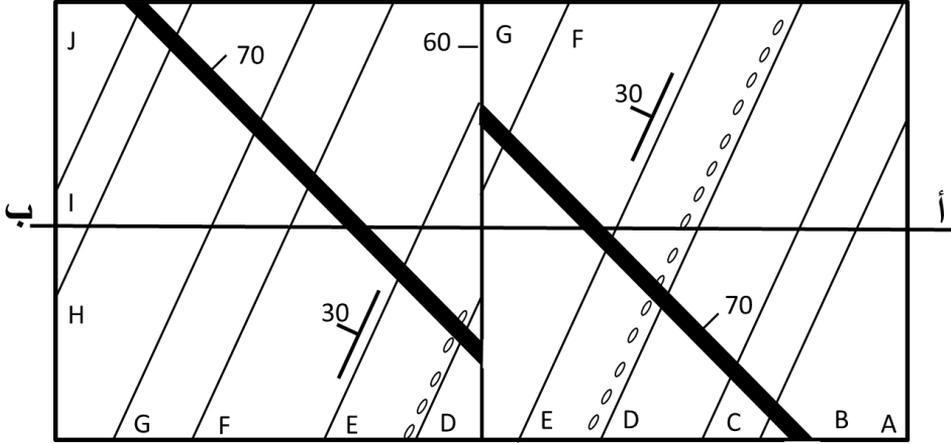
تبلغ قيمة زاوية الميل الحقيقي  $40^\circ$  نحو الشمال ( $40^\circ N$ )، ماهو الاتجاه الذي تكون قيمة الميل الظاهري فيه مساوية  $30^\circ$ ؟

#### 6.5.8. التمرين السادس

أجري قياس للوضعية الفراغية لطبقة فكان ميلها (الحقيقي)  $40/000$ . بأي اتجاه ستكون زاوية الميل الظاهري مساوية لنصف هذه القيمة؟ هل تبقى العلاقة نفسها سارية في حال كانت زاوية ميل الطبقة (الحقيقية)  $10^\circ$  أو  $20^\circ$  أو  $50^\circ$  أو  $80^\circ$ ؟ وإذا كان الجواب "لا"، ماهو السبب؟

### 7.5.8. التمرين السابع

تتجلى الأهمية الكبرى لتحديد الميل الظاهري عند إنشاء المقاطع الجيولوجية والبنوية. يبين الشكل (8-12) خريطة جيولوجية مبسطة لمتتالية مائلة من الطبقات الرسوبية، وقد اخترقها جدار بازلي، وتعرض المجموع بعد ذلك إلى التصدع. ارسم مقطعاً شاقولياً على طول الخط أ- ب موضحاً عليه آثار المستويات البنوية الثلاثة بميولها ومواقعها الصحيحة.



شكل (8-12): الخريطة المستخدمة في التمرين السابع (Ragan, 2009).

### 6.5.8. التمرين الثامن

استخدم المعطيات التالية للوصول إلى الإجابة، وذلك بشكل تخطيطي أولاً ثم اختبر نتائجك بالحساب المثلثاني ثانياً. يجب أن تكون دقة النتيجة بالطريقة التخطيطية بحدود  $1^\circ$  بالمقارنة مع النتيجة الحسابية. وفي حال كانت الدقة أقل من ذلك يجب إعادة الرسم بدقة أكبر، حيث يمكن تغيير المقياس للحصول على نتيجة أدق.

- إذا كانت الوضعية الفراغية لطبقة N85E, 25NW، ماهي قيمة زاوية الميل الظاهري باتجاه N20E؟

- إذا كان سمت الاتجاه لطبقة  $350^\circ$  وميلها الظاهري  $300^\circ / 35^\circ$ ، ماهو ميلها الحقيقي؟

- إذا كانت الوضعية الفراغية لطبقة N45E, 30SE ، فماهي زاوية ميلها الظاهري نحو  
؟S25W

#### 9.5.8. التمرين التاسع

حُدِّدَت الوضعية الفراغية لطبقة بـ  $W 35^0 / 030^0$  (الميل الحقيقي  $35^0$  نحو  $300^0$ ). حدد قيمة الميل الظاهري نحو الشمال ونحو الغرب ونحو  $336^0$  و  $020^0$  و  $30^0$ ، وذلك باستخدام شبكة وولف.

#### 10.5.8. التمرين العاشر

ماهو الميل الحقيقي لطبقة إذا علمت أن قيمة ميلين ظاهريين هي:  $36^0$  نحو  $197^0$  و  $23^0$  نحو  $298^0$ ، استخدم شبكة وولف.

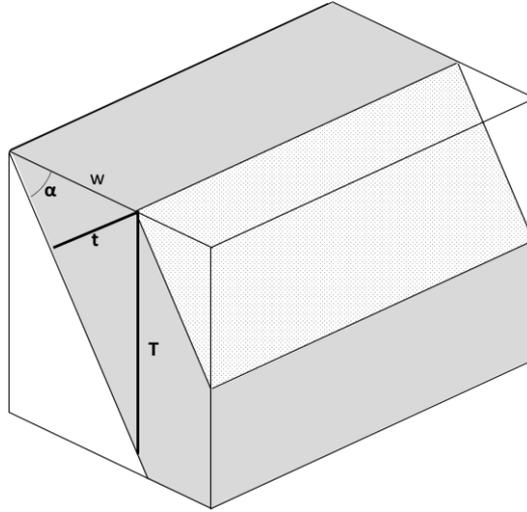


## الباب الثالث - الفصل التاسع ثخانة الطبقة Layer Thickness

### 1.9. تعريف الثخانة

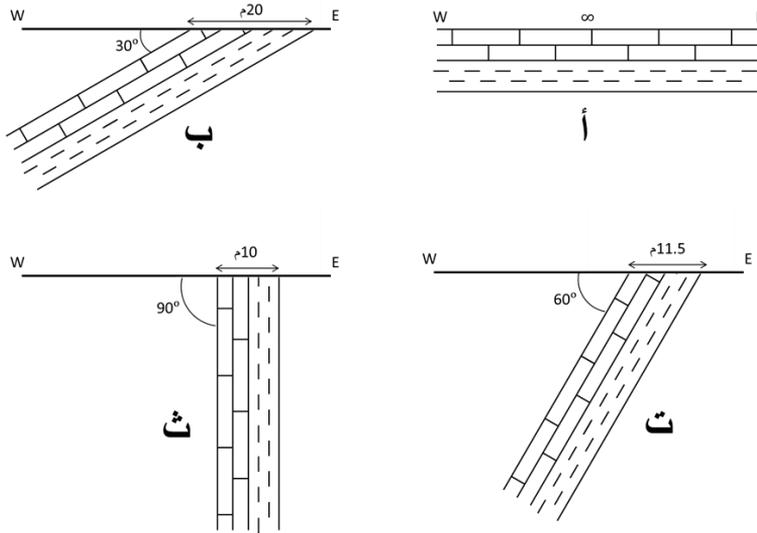
تعرف ثخانة الطبقة بأنها المسافة بين سطحها العلوي وسطحها السفلي، ونميز عادة بين أنواعها التالية (شكل 9-1):

- الثخانة الحقيقية true thickness (t): وهي المقيسة بشكل عمودي على سطحي الطبقة (على اعتبار أن سطحي الطبقة متوازيان).
- الثخانة الشاقولية Vertical thickness (T): وهي المقيسة بحسب الشاقول.
- عرض التكشف Width of outcrop (w): المسافة بين أثري الطبقة مقيسة على سطح الأرض، وذلك بشكل عمودي على اتجاه الطبقة. ويمكن قياسها أفقياً أو على سطح مائل.



شكل (9-1): الثخانة الحقيقية  $t$  والشاقولية  $T$  وعرض التكشف  $w$  لطبقة مائلة بزاوية  $\alpha$ .

يبين الشكل (9-2) العلاقة بين عرض التكشف وزاوية الميل عند ثبات قيمة الثخانة الحقيقية (نفترض هنا أن سطح الأرض أفقي). ويلاحظ أن قيمة  $w$  غير محدودة نظرياً عندما تكون الطبقة ذات وضع أفقي (شكل 9-2 - أ). وتتناقص هذه القيمة مع ازدياد زاوية الميل (شكل 9-2 - ب وشكل 9-2 - ت)، لتتساوى مع قيمة  $t$  عندما تصبح زاوية الميل  $90^\circ$  (شكل 9-2 - ث). نستنتج من ذلك أن عرض التكشف إما أن يكون أكبر من الثخانة الحقيقية أو مساوياً لها.



شكل (9-2): تأثير زاوية الميل في قيمة عرض التكشف مع ثبات قيمة الثخانة الحقيقية للطبقات.

## 2.9. الإنشاء الهندسي لعرض التكشف والثخانة الحقيقية وزاوية الميل (سطح الأرض أفقي)

### 1.2.9. الإنشاء الهندسي للثخانة الحقيقية:

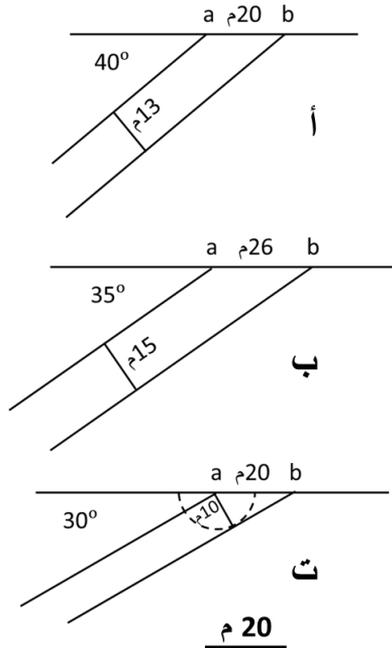
المعطيات: عرض التكشف وزاوية الميل الحقيقية (شكل 9-3 - أ)  
يحدد عرض التكشف  $ab$  على الخط الأفقي للمقطع العرضي، ثم يرسم أثراً السطحين العلوي والسفلي للطبقة اعتباراً من النقطتين  $a$  و  $b$  وبزاوية تعادل قيمة زاوية الميل الحقيقي (مع الخط الأفقي). وبذلك تمثل المسافة العمودية بين هذين الأثرين قيمة الثخانة الحقيقية.

### 2.2.9. الإنشاء الهندسي لعرض التكشف (الثخانة الظاهرية)

المعطيات: الثخانة الحقيقية وزاوية الميل الحقيقية (شكل 9-3 - ب).  
يرسم أثر السطح العلوي للطبقة اعتباراً من النقطة  $a$  على الخط الأفقي للمقطع العرضي، وذلك بحسب قيمة زاوية الميل. ثم يرسم خط موازٍ لهذا الأثر على مسافة تعادل قيمة الثخانة الحقيقية. يمثل هذا الخط أثر السطح السفلي. وهو يقطع الخط الأفقي في نقطة  $b$ . تمثل المسافة  $ab$  عرض التكشف.

### 3.2.9. إنشاء زاوية الميل الحقيقية

المعطيات: الثخانة الحقيقية وعرض التكشف (شكل 9-3 - ت)  
يحدد الطول  $ab$  الممثل لعرض التكشف على الخط الأفقي، وترسم دائرة مركزها النقطة  $a$  ونصف قطرها يعادل قيمة الثخانة الحقيقية. إن مماس هذه الدائرة المار من النقطة  $b$  يمثل الحد السفلي للطبقة. أما الخط الموازي لهذا المماس والمار من النقطة  $a$  فيمثل حدها العلوي. وتمثل الزاوية المحصورة بين الخط الأفقي وأثر السطح العلوي (أو السفلي) قيمة زاوية الميل الحقيقية.



شكل (9-3): الإنشاء الهندسي للثخانة الحقيقية وعرض التكشف وزاوية الميل.

### 3.9. قياس الثخانة

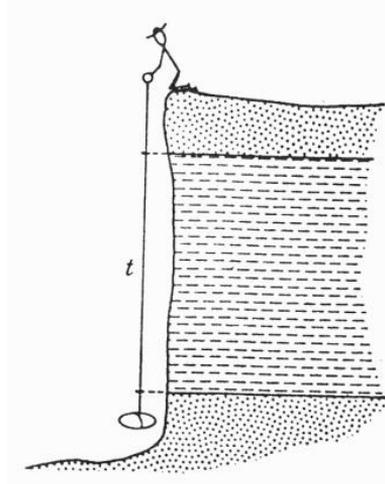
#### 1.3.9. القياس المباشر للثخانة

يمكن شرح طرائق قياس الثخانة في الحقل من خلال الأمثلة التالية:

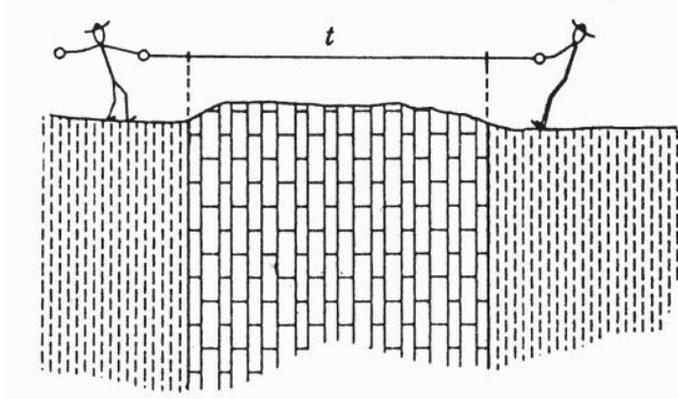
أ- عندما تكون الطبقات ذات وضعية أفقية ومنكشفة من خلال جرف (مقطع) شاقولي، فإنه يمكن قياس ثخانتها بتعليق شريط القياس على الحافة العلوية للمقطع (شكل 9-4). ويمكن قياس الثخانة أيضاً من خلال تحديد ارتفاعي الحدين العلوي والسفلي للطبقة الأفقية (أو الوحدة الصخرية المتطبقة بشكل أفقي)، وهي تعادل الفرق بين قيمتي هذين الارتفاعين. تتم هذه العملية بغض النظر عن زاوية الانحدار التضاريسي الذي تتكشف عبره الطبقة (أو الوحدة الصخرية).

ب- عندما تتكشف طبقة (أو وحدة صخرية متطبقة) ذات وضعية شاقولية من خلال سطح تضاريسي أفقي، فإن الثخانة تقاس مباشرة بوضع شريط القياس بشكل متعامد مع اتجاه الطبقة (شكل 9-5).

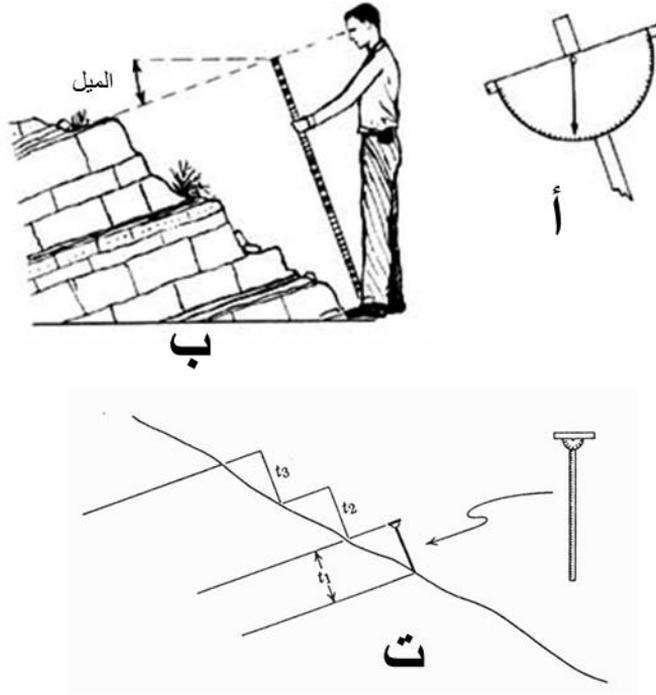
ت- تقاس الثخانة في الحالة العامة، مهما كانت زاوية المنحدر التضاريسي، بمقياس خاص يتألف من عصا مدرجة ترتبط بها بوصلة جيولوجية أو مقياس ميل Clinometer (شكل 9-6 - أ). توضع العصا باتجاه ميل الطبقات حتى يُظهر مقياس الميول قيمة زاوية ميل الطبقات، ثم يتم التصويب نحو نقطة محددة على الأرض (شكل 9-6 - ب). إن ثخانة الطبقة (أو جزء منها) المحصورة بين قاعدة العصا وبين النقطة التي تم التصويب إليها تعادل طول العصا. تستخدم هذه الطريقة سواء في حالة الطبقات الرقيقة (التي تكون ثخانتها أقل من طول العصا) أو الثخينة وذلك بتكرار عملية القياس (شكل 9-6 - ت). والمهم هنا هو وضع العصا باتجاه ميل الطبقات، أي بشكل متعامد مع اتجاهها، وإلا فمن الممكن أن تُرتكب أخطاء في القياس.



شكل (9-4): القياس المباشر لثخانة الطبقات الأفقية (Ragan, 2009).



شكل (9-5): القياس المباشر لثخانة الطبقات الشاقولية (Ragan, 2009).



شكل (9-6): استخدام عصا القياس لتحديد ثخانة الطبقات في الحقل. أ: تتم إمالة العصا حتى يعطي مقياس الميول قيمة زاوية ميل الطبقات (Ragan, 2009). ب: القياس بالتصويب. ت: تكرار القياس بهدف تحديد ثخانة كامل الوحدة الصخرية .

### 2.3.9. القياس غير المباشر للثخانة

عندما يتعذر إجراء القياس المباشر لثخانة الطبقات، فإن هناك طرائق رياضية غير مباشرة لتحديدها، وذلك من خلال معرفة عرض التكشف وزاوية ميل الطبقات وزاوية الانحدار التضاريسي (Ragan, 2009).

#### 1.2.3.9. تحديد الثخانة عندما يكون سطح الأرض أفقياً:

ترتبط الثخانة الحقيقية  $t$  وعرض التكشف  $w$  وزاوية الميل الحقيقية  $\alpha$  للطبقات، ضمن مقطع متعامد مع اتجاه الطبقة، بالعلاقة الرياضية التالية (شكل 9-7):

$$\sin \alpha = t/w$$

$$t = w \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

أما عرض التكشف  $w'$  في مقطع لايتعامد مع اتجاه الطبقة (المقطع II-II' في الشكل 9-7) فإنه يرتبط بزواوية هذا المقطع  $\beta$  التي يصنعها مع اتجاه الطبقة، إضافة لارتباطه مع كل من  $t$  و  $\alpha$ ، حيث نجد في المثلث ABC (شكل 9-7) أن:

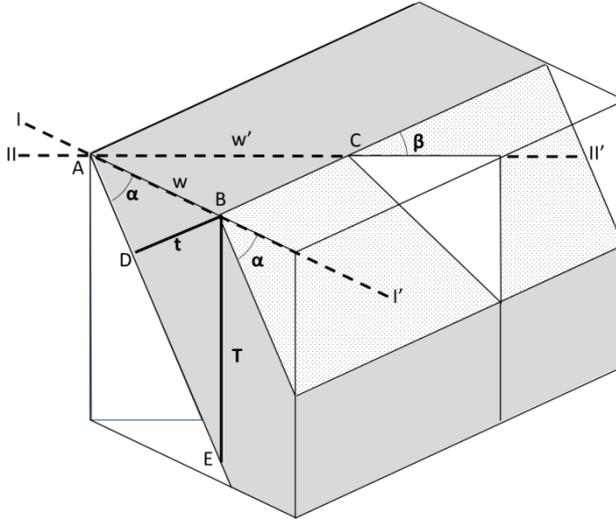
$$\sin \beta = w/w'$$

$$w' = w/\sin \beta \quad (2)$$

وبمقارنة العلاقتين (1) و (2) نجد أن:

$$w' = t/(\sin \alpha \cdot \sin \beta)$$

$$t = w' \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta = w \cdot \sin \alpha$$



شكل (9-7): العلاقة بين عرض التكشف  $w$  والثخانة الحقيقية  $t$  والثخانة الشاقولية  $T$  وزاوية الميل الحقيقي  $\alpha$  وزاوية المقطع  $\beta$ . I-I': مقطع متعامد مع اتجاه الطبقة. II-II': مقطع منحرف عن اتجاه الطبقة بزواوية  $\beta$ .

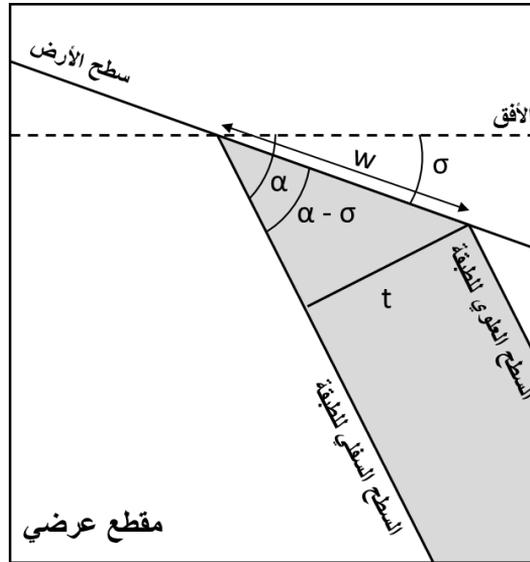
### 2.2.3.9. تحديد الثخانة عندما يكون سطح الأرض منحدرًا

يمكن من حيث المبدأ استخدام الطريقة الرياضية آفة الذكر (العلاقة 1) لتحديد الثخانة  $t$  عندما يكون عرض التكشف  $w$  مقيساً على سطح الأرض المنحدر، إلا أن قيمة الثخانة  $t$  ترتبط بزوايا انحدار سطح الأرض  $\sigma$ ، وهذا يعني أن تحديد  $t$  في هذه الحالة أكثر تعقيداً من الحالة السابقة. هناك حالتان رئيستان لحساب  $t$  تتشأن من علاقة اتجاه الميل الطبقي باتجاه انحدار سطح الأرض، مع الأخذ بالحسبان أن عرض التكشف  $w$  يقاس بشكل متعامد مع اتجاه الطبقات: - الحالة الأولى، اتجاه ميل الطبقات يتوافق مع اتجاه انحدار سطح الأرض، نلاحظ من الشكل (8-9) أن:

$$\sin(\alpha - \sigma) = t/w$$
$$t = w \cdot \sin(\alpha - \sigma) \quad (3)$$

حيث:

$t$ : الثخانة الحقيقية و  $w$ : عرض التكشف و  $\alpha$ : زاوية ميل الطبقة و  $\sigma$ : زاوية انحدار سطح الأرض.

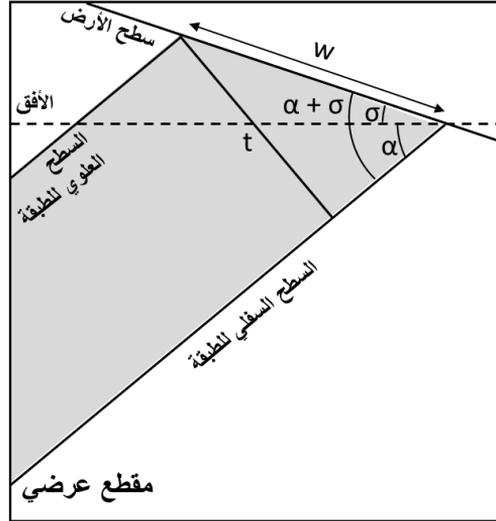


شكل (8-9): تحديد قيمة الثخانة الحقيقية في حالة توافق اتجاه ميل الطبقة واتجاه انحدار سطح الأرض (انظر النص).

- الحالة الثانية، اتجاه ميل الطبقة يتعاكس مع اتجاه انحدار سطح الأرض، نلاحظ من الشكل (9-9) أن:

$$\sin(\alpha + \sigma) = t/w$$

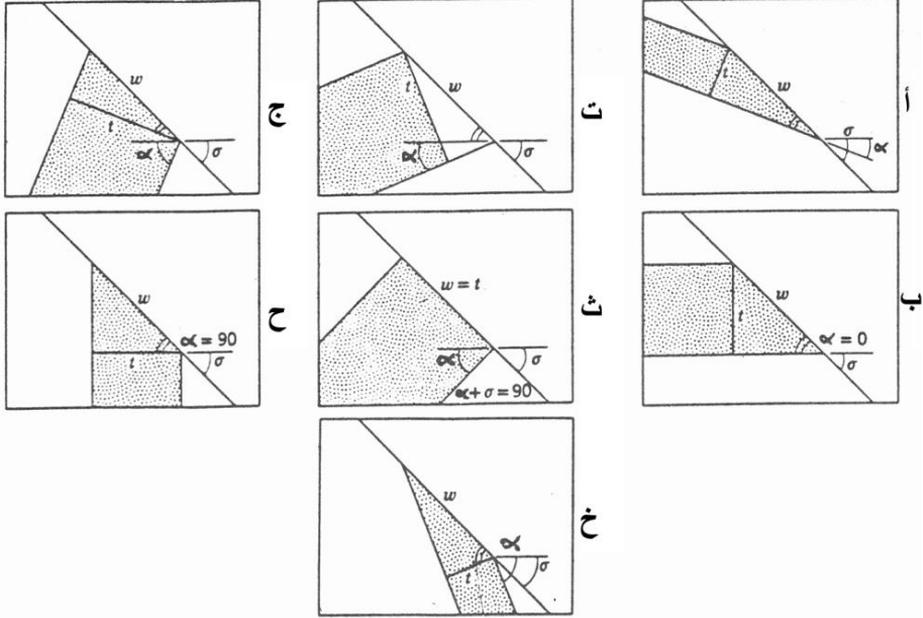
$$t = w \cdot \sin(\alpha + \sigma) \quad (4)$$



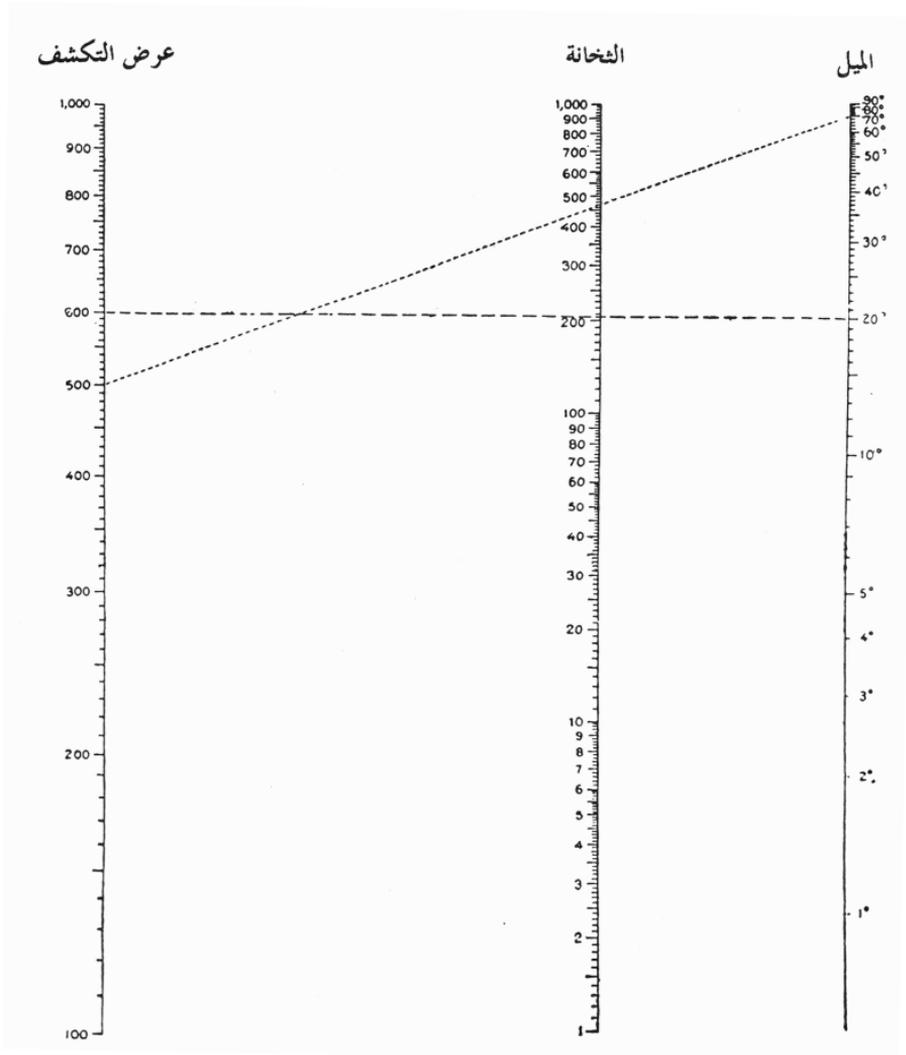
شكل (9-9): تحديد قيمة التخانة الحقيقية في حالة تعاكس اتجاه ميل الطبقة واتجاه انحدار سطح الأرض (انظر النص).

يبين الشكل (9-10) تفصيلاً لسبع حالات في حساب التخانة الحقيقية  $t$  عندما يكون سطح الأرض منحدراً، مع بيان العلاقة الرياضية لكل حالة. بناء على ما سبق ذكره، فقد طور الباحثون مخططات بيانية تسهل عملية حساب التخانة بمعرفة الميل وعرض التكشف. يستخدم المخطط المبين في الشكل (9-11) عندما تكون  $w$  مقيسة بشكل متعامد مع اتجاه الطبقات، حيث يعبر العمود الأيمن من المخطط (عمود الميل) عن قيمة  $\alpha$  عندما يكون سطح الأرض أفقياً. ويستخدم هذا المخطط البياني أيضاً عندما يكون سطح الأرض منحدراً شريطة أن تقاس قيمة  $w$  في الاتجاه المتعامد مع اتجاه الطبقات، وأن يعبر عن عرض التكشف الحقيقي المقيس على سطح الأرض المنحدر. أما زاوية الميل المبينة في العمود

الأيمن من المخطط فتعبر في هذه الحالة عن زاوية ميل الطبقة مضافاً إليها زاوية ميل المنحدر  $\sigma$  في حال تعاكس اتجاهيهما، أو مطروحاً منها قيمة  $\sigma$  عند توافق اتجاهيهما.



شكل (9-10): سبع حالات لحساب النخانة الحقيقية عندما يكون سطح الأرض منحدرًا (مقاطع عرضية). وتحسب  $t$  في كل حالة كما يلي: أ:  $t = w \cdot \sin(\sigma - \alpha)$ . ب:  $t = w \cdot \sin \sigma$ . ت:  $t = w \cdot \sin(\alpha + \sigma)$ . ث:  $t = w$ . ج:  $t = w \cdot \sin(180 - \alpha - \sigma)$ . د:  $t = w \cdot \sin(90 - \sigma)$ . هـ:  $t = w \cdot \sin(\alpha - \sigma)$ .



شكل (9-11): مخطط بياني لحساب الثخانة (Billings, 1972). يستخدم هذا المخطط فقط عندما يقاس عرض التكشف بشكل متعامد مع اتجاه الطبقات (انظر النص). طريقة الاستخدام: ننشئ مستقيماً يصل بين قيمة عرض التكشف على العمود الأيسر وزاوية الميل على العمود الأيمن. يقطع هذا المستقيم عمود الثخانة (الأوسط) في نقطة تعبر عن قيمة الثخانة الموافقة.

#### 4.9. العلاقة الرياضية بين الثخانة الحقيقية والثخانة الشاقولية

ترتبط قيمة الثخانة الشاقولية T والثخانة الحقيقية t وزاوية الميل بعلاقات رياضية بسيطة. وكما هو موضح في المثلث ABD (الشكل 9-7) فإن:

$$\sin \alpha = t/w$$

$$w = t/\sin \alpha \quad (5)$$

وفي المثلث ABE نجد:

$$\tan \alpha = T/w$$

$$T = w \cdot \tan \alpha \quad (6)$$

وبمقارنة العلاقتين (5) و (6) نجد أن:

$$T = t \cdot \tan \alpha / \sin \alpha$$

$$= t \cdot \sin \alpha / \sin \alpha \cdot \cos \alpha = t / \cos \alpha$$

$$t = T \cdot \cos \alpha$$

#### 5.9. التمارين

##### 1.5.9. التمرين الأول

حدد ثخانة طبقة حجر كلسي ذات اتجاه شمال - جنوب وتميل بزاوية مقدارها  $35^\circ$  نحو الشرق (أي أن قيمة وضعيتها الفراغية  $E/35^\circ/000$ ). وقد قيس عرض التكشف بشكل متعامد مع اتجاهها فبلغ 400 م، علماً أن سطح الأرض أفقي. أوجد حل هذه المسألة من خلال رسم مقطع عرضي بمقياس 1:10000، ثم من خلال العلاقة الرياضية المناسبة، ثم من خلال المخطط المبين في الشكل (9-11).

##### 2.5.9. التمرين الثاني

احسب ثخانة طبقة من الحجر الكلسي تتكشف على السفح الشرقي لجبل. وقد حددت الوضعية الفراغية لهذه الطبقة بوساطة البوصلة الجيولوجية فتبين أنها تتجه شمال - جنوب وتميل بزاوية  $33^\circ$  نحو الغرب (أي  $W/33^\circ/180$ ). وقد قيس ارتفاع تكشف السطح العلوي بوساطة مقياس الارتفاعات فبلغ 1500 م عن سطح البحر، بينما يرتفع تكشف السطح السفلي بمقدار 1000 م.

وبلغت المسافة بين هذين التكتشفين 1600م مقيسة على المنحدر ويشكل متعامد مع اتجاه الطبقة. حل هذه المسألة من خلال مقطع عرضي بمقياس 1:100000، ثم من خلال المعادلة الرياضية المناسبة.

### 3.5.9. التمرين الثالث

تتكشف طبقة حجر رملي على سطح تضاريسي منحدر نحو الغرب. وقد وجد أن قيمة الوضعية الفراغية لهذه الطبقة  $000^{\circ}/34^{\circ}E$  (أي أنها تتجه شمال - جنوب وتميل بزاوية  $34^{\circ}$  نحو الشرق). يتكشف السطح العلوي لهذه الطبقة على ارتفاع 1600م، والسطح السفلي على ارتفاع 1250م. أما المسافة الأفقية (المسافة المأخوذة على الخريطة) بين هذين التكتشفين فبلغت 900م باتجاه متعامد مع اتجاه الطبقة. احسب ثخانة هذه الطبقة من خلال مقطع عرضي بمقياس مناسب ثم من خلال المعادلة الرياضية المناسبة.

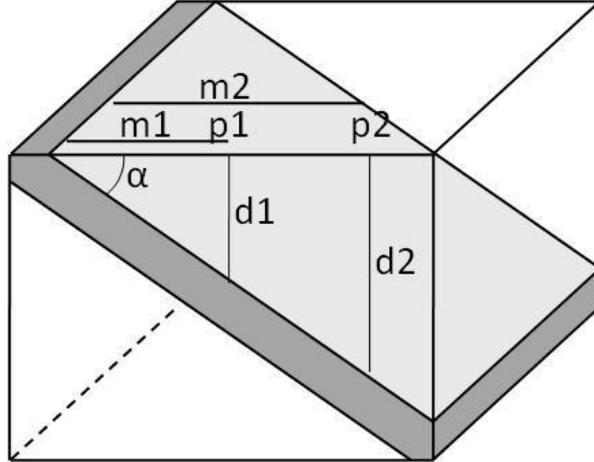


## الباب الثالث - الفصل العاشر

### العمق Depth

#### 1.10. تعريف

يعرف العمق عموماً بأنه المسافة الشاقولية المقيسة اعتباراً من مستوٍ معين (سطح الأرض عادةً) إلى نقطة أو خط أو سطح موجود تحت هذا المستوي. ويقاس في حالة الطبقات بالمسافة بين نقطة محددة على سطح الأرض والسطح العلوي للطبقة المدروسة (شكل 10 - 1). وعادة ما يكون بعد هذه النقطة عن مكان تكشف الطبقة معلوماً. ومن الواضح أن عمق الطبقات المائلة (d) يزداد كلما ابتعدت هذه النقطة عن تكشف الطبقة أي باتجاه الميل.



شكل (10 - 1): يزداد العمق d للطبقة باتجاه ميلها، أي بازدياد قيمة البعد m للنقطة p (نقطة تحديد العمق) عن تكشف الطبقة.

#### 2.10. حساب العمق

يمكن تمييز عدة حالات في حساب العمق تبعاً لعلاقة زاوية ميل الطبقة  $\alpha$  مع زاوية الانحدار التضاريسي  $\sigma$  (Ragan, 2009):

### 1.2.10. الحالة الأولى

تميل الطبقة في هذه الحالة بزواوية مقدارها  $\alpha$  ويكون سطح الأرض أفقياً (شكل 10 - 1). ولحساب العمق  $d$  في نقطة معينة  $p$  تبعد مسافة مقدارها  $m$  عن تكشف الطبقة، بشرط أن تقاس المسافة  $m$  على سطح الأرض باتجاه متعامد مع اتجاه الطبقة، فإن:

$$d = m \cdot \tan \alpha$$

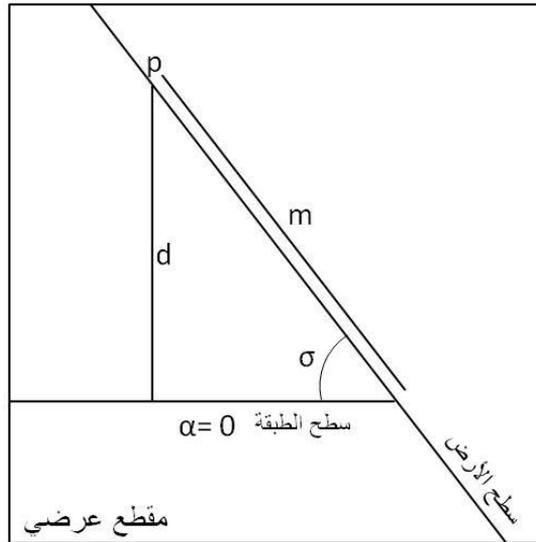
ومن ناحية أخرى، إذا كانت المسافة  $m$  مقيسة باتجاه لايتعامد مع اتجاه الطبقة فيجب استخدام قيمة زاوية الميل الظاهري  $\gamma$  في ذلك الاتجاه بدلاً من زاوية الميل الحقيقي.

### 2.2.10. الحالة الثانية:

ينحدر سطح الأرض بزواوية مقدارها  $\sigma$ ، بينما تتوضع الطبقة بشكل افقي (شكل 10 - 2)، وبحسب العمق  $d$  للطبقة اعتباراً من النقطة  $p$  من العلاقة:

$$d = m \cdot \sin \sigma$$

حيث  $m$  تمثل المسافة على سطح الأرض بين النقطة  $p$  وتكشف الطبقة.



شكل (10 - 2): تحديد العمق  $d$  لطبقة أفقية متكشفة على سطح الأرض المنحدر بزواوية  $\sigma$ .

### 3.2.10. الحالة الثالثة

ينحدر سطح الأرض هنا بزاوية  $\sigma$  بنفس اتجاه ميل الطبقة ذي الزاوية  $\alpha$ . وكما نلاحظ من الشكل (10-3) فإن:

$$\cos \sigma = h/m \Rightarrow h = m \cdot \cos \sigma \quad (1)$$

$$\sin \sigma = v/m \Rightarrow v = m \cdot \sin \sigma \quad (2)$$

$$\tan \alpha = (d + v) / h \quad (3)$$

وبمقارنة العلاقات (1) و (2) و (3) نستنتج أن:

$$\tan \alpha = d + m \cdot \sin \sigma / m \cdot \cos \sigma$$

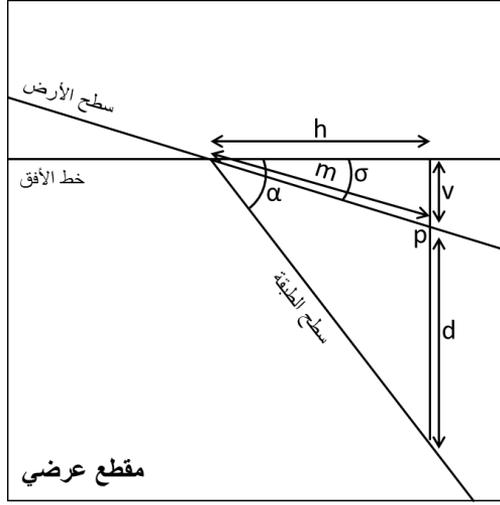
$$d + m \cdot \sin \sigma = m \cdot \cos \sigma \cdot \tan \alpha$$

$$d = m \cdot \cos \sigma \cdot \tan \alpha - m \cdot \sin \sigma$$

$$d = m (\cos \sigma \cdot \tan \alpha - \sin \sigma) \quad (4)$$

حيث:

- d: العمق في النقطة p
- m: المسافة على سطح الأرض بين النقطة p وبين التكشف مقيسة باتجاه متعامد مع اتجاه الطبقة
- v: المسافة الشاقولية بين p وبين تكشف الطبقة.
- h: المسافة الأفقية بين p وبين تكشف الطبقة
- $\sigma$ : زاوية الانحدار التضاريسي
- $\alpha$ : زاوية ميل الطبقة.



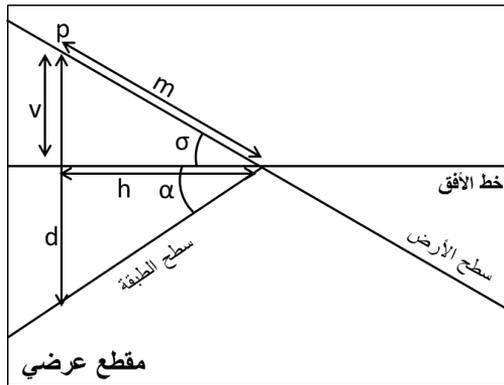
شكل (10 - 3): تحديد العمق d للطبقة المائلة بزاوية α باتجاه الانحدار التضاريسي نفسه.

#### 4.2.10 الحالة الرابعة

ينحدر سطح الأرض في هذه الحالة باتجاه معاكس لاتجاه ميل الطبقة. كما وأن المسافة m قيست باتجاه متعاود مع اتجاه الطبقة (شكل 10 - 4). تعطى قيمة العمق d في هذه الحالة من

$$d = m (\cos \sigma \cdot \tan \alpha + \sin \sigma) \quad (5) \quad \text{العلاقة:}$$

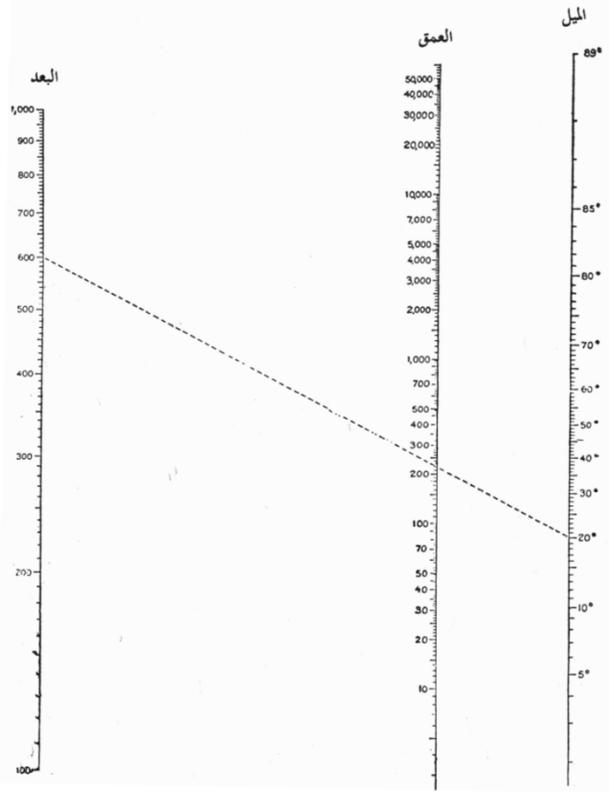
وللرموز المدلول المستخدم في العلاقة (4) نفسه.



شكل (10 - 4): تحديد العمق d للطبقة المائلة بزاوية α بعكس اتجاه الانحدار التضاريسي.

### 5.2.10. مخطط بياني لحساب الأعماق

يبين الشكل (10-5) مخططاً بيانياً يستخدم (دون الرجوع إلى المعادلات الرياضية) لتحديد قيمة العمق  $d$  من خلال معرفة زاوية الميل  $\alpha$  والمسافة  $m$  على فرض أن سطح الأرض أفقي وأن  $m$  قيست باتجاه متعامد مع اتجاه الطبقة.



شكل (10-5): مخطط بياني لحساب عمق الطبقات (Billings, 1972)، وذلك عندما تقاس المسافة  $m$  بشكل متعامد مع اتجاه الطبقات وعندما يكون سطح الأرض أفقياً. طريقة الاستخدام: ننشئ مستقيماً يصل بين قيمة المسافة  $m$  على العمود الأيسر وبين قيمة زاوية ميل الطبقة  $\alpha$  على العمود الأيمن. يقطع هذا المستقيم العمود الأوسط (عمود العمق) في نقطة تساوي العمق المطلوب للسطح المائل.

### 3.10. تمرين

#### 1.3.10. التمرين الأول

تتجه طبقة مكونة من حجر رملي باتجاه  $N25^{\circ}E$  وتميل بمقدار  $25^{\circ}$  نحو  $S65^{\circ}E$  (أي أن قيم الوضعية الفراغية هي  $25^{\circ}/25^{\circ}ESE$ )، فإذا كان سطح الأرض أفقياً، فما هو عمق بئر شاقولية أريد حفرها في نقطة تبعد عن تكشف هذه الطبقة مسافة 800 م، مقيسة باتجاه متعامد مع اتجاهها، وذلك للوصول إلى هذه الطبقة. أوجد حل هذه المسألة بالطرائق التالية:

- من خلال رسم مقطع عرضي بمقياس 1:10000.
- من خلال العلاقة الرياضية المناسبة.
- من خلال المخطط المبين في الشكل (10 - 5).

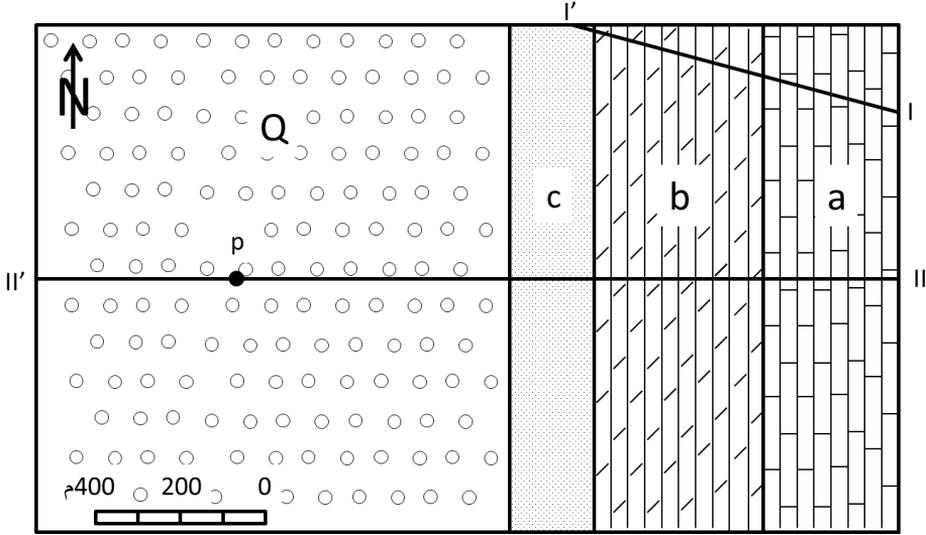
#### 2.3.10. التمرين الثاني

تتكشف طبقة دولوميتية على السفح الجنوبي الشرقي لجبل في نقطة ارتفاعها 2000 م عن سطح البحر. ولدى قياس الوضعية الفراغية لهذه الطبقة بوساطة البوصلة الجيولوجية تبين أنها ذات اتجاه  $N45^{\circ}E$  وزاوية ميل  $40^{\circ}$  نحو  $SE$  (أي  $45^{\circ}/40^{\circ}SE$ ). أريد حفر بئر شاقولية عند النقطة ذات الارتفاع 1700 م على هذا المنحدر والتي تبعد مسافة 800 م عن نقطة التكشف وإلى الجنوب الشرقي منها. والمطلوب تحديد عمق هذه البئر للوصول إلى الطبقة الدولوميتية.

#### 3.3.10. التمرين الثالث

تتكشف الطبقات  $a$  و  $b$  و  $c$  إضافة إلى توضعات الحقب الرابع ( $Q$ ) في المنطقة المحددة على الخريطة الموضحة في الشكل (10 - 6). وقد تبين في المقطع 'I-I' أن زاوية الميل الظاهري تعادل  $30^{\circ}$  نحو  $WNW$ . فلو علمنا أن سطح الأرض أفقي، يطلب مايلي:

- أ- احسب الثخانة الحقيقية لكل من الطبقات a و b و c.
- ب- ماهي ثخانة توضعات الحقب الرابع في بئر شاقولية حفرت في النقطة p؟
- ت- ماهو عمق الطبقة a في هذه البئر؟
- ث- ارسم المقطع II-II' بمقياس مناسب.



شكل (10-6): الخريطة المستخدمة في التمرين الثالث (معدلة عن بايرلي ودركل، 2000).



## الباب الرابع - الفصل الحادي عشر

### التحليل الهندسي للطيات Geometric analysis of folds

#### 1.11. عناصر الطيات:

يعتمد فهم هندسية الطيات على التعريف الدقيق لعناصرها البنوية الأساسية، وتعد العناصر

التالية من أهم هذه العناصر (الأشكال 1-11 و 2-11 و 3-11):

أ- نقطة المفصلة Hinge point: نقطة التقوس الأعظمي على السطح المطوي.

ب- خط المفصلة Hinge line: الواصل ما بين نقاط المفصلة على السطح المطوي.

ت- "المنحى المحوري" Axial trend للطيّة يعبر عنه من خلال اتجاه (أو سمت Azimuth)

خط المفصلة. ويمكن لخط المفصلة هذا أن يكون أفقيّاً أو متغرفاً.

ث- نقطة الانعطاف Inflection point: يكون معدل تغير الميل عندها مساوياً للصفر، أي

أنها موقع تغير شكل الجناح من المحدب إلى المقعر أو العكس.

ج- خط الانعطاف Line of inflection: الخط الواصل ما بين نقاط الانعطاف على السطح

المطوي.

ح- السطح المتوسط Median surface: السطح الحاوي على خطوط الانعطاف المتتالية

العائدة لسطح مطوي.

خ- القمة Crest والمنخفض Trough : النقاط الأعلى والأخفض على سطح طبقي مطوي.

د- السطح القمّي Crestal surface و سطح المنخفض Trough surface: يتمثلان

بالسطحين الحاويين على القمم والمنخفضات لسطح مطوية متتالية.

ذ- الأثر القمّي Crestal trace وأثر المنخفض Trough trace: يتمثلان بخط التقاطع ما بين

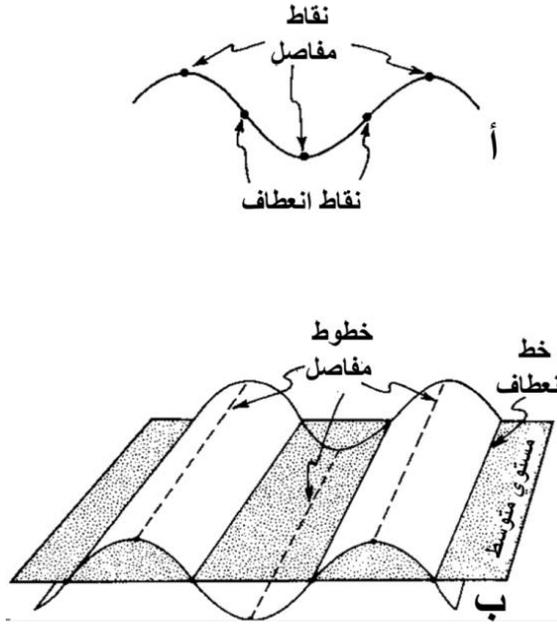
السطح القمّي و سطح المنخفض مع سطح آخر هو سطح الأرض على الأغلب.

ر- السطح المحوري Axial surface: السطح الحاوي على خطوط مفاصل السطوح المطوية

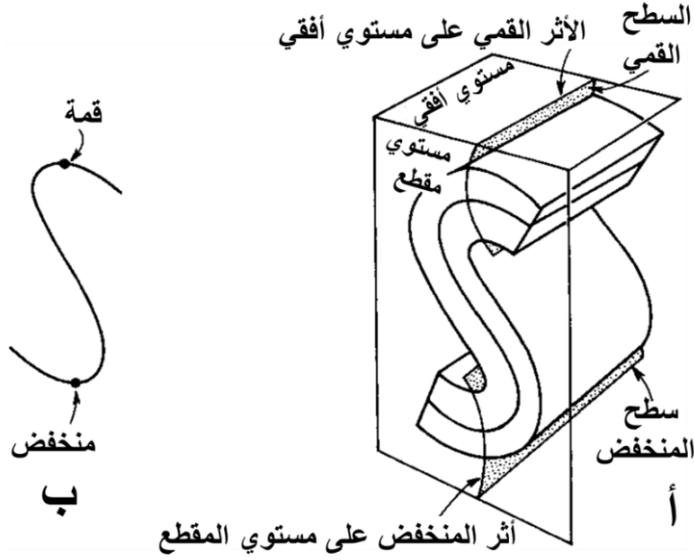
المتتابعة، وإذا كان مستويّاً سمي "المستوي المحوري" Axial plane. ويسمى خط تقاطعه

مع أي مستو آخر (عادة سطح التكشف أو مستوي المقطع العرضي) "الأثر المحوري". وإن قطاعاً مطويًا Fold domain يمكن أن يبدي سطحاً محورياً واحداً أو أكثر، حيث يمكن للسطوح المحورية أن تتلاقى على امتداد خط، يكون للطيبة بعده سطح محوري واحد فقط (شكل 11-4). كما يمكن للسطوح المحورية أن تنتهي أو أن تأخذ أشكالاً قرنية (شكل 11-5). وتوصف الوضعية الفراغية للسطوح المحورية من خلال اتجاهها وميلها.

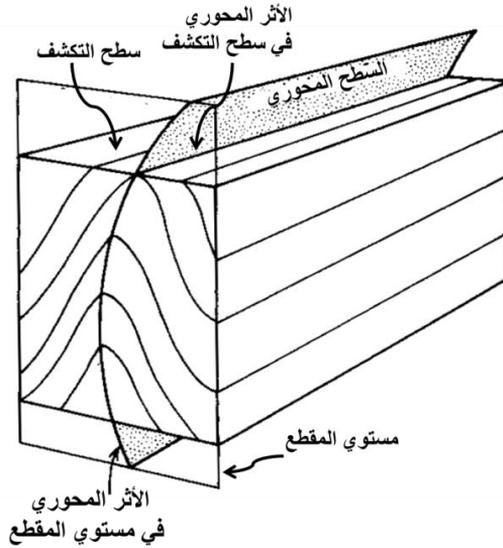
ز- المحاور الهندسية Geometric axes: ثلاثة محاور متعامدة تستخدم كمرجعية تناسب إليها الطية والبنىات المترافقة معها كالشقوق والبنىات الخطوطية والتورق. ويمثل المستوي  $ab$  المستوي المحوري للطيبة، حيث يكون المحور  $c$  متعامداً مع المستوي المحوري (شكل 11-6).



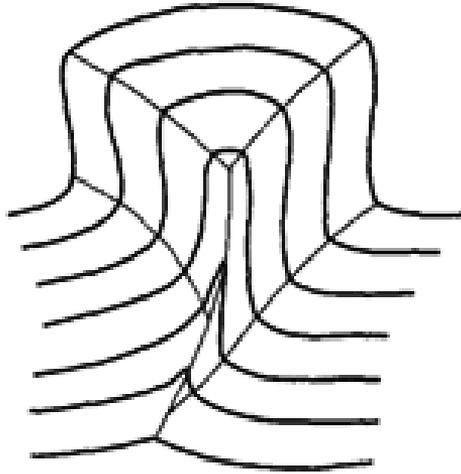
شكل (11-1): بعض من العناصر الأساسية للطيبات. أ: مقطع عرضي، ب: شكل ثلاثي البعد (Rowland, 1986).



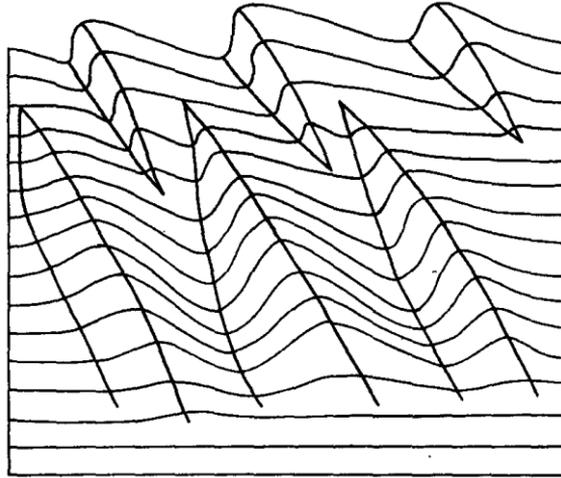
شكل (11-2): مصطلحات أخرى لتعريف هندسية الطيات. أ: شكل ثلاثي البعد، ب: مقطع عرضي (Rowland, 1986).



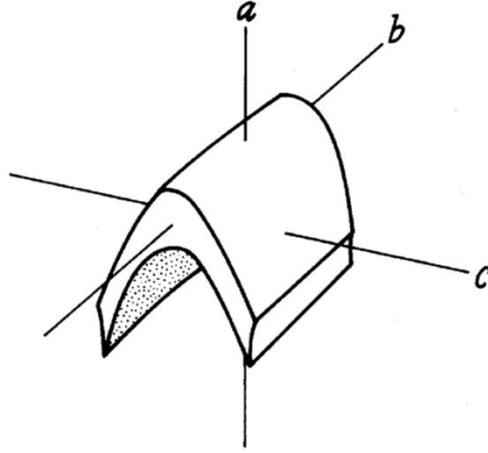
شكل (11-3): السطح المحوري لطية وأثره في مستوي المقطع العرضي وفي (خريطة) سطح التكشف (Rowland, 1986).



شكل (11 - 4): طية صندوقية Box fold (Ramsay and Huber, 1987).



شكل (11 - 5): نماذج لسطوح محورية في طبقات متعددة مطوية (Ramsay and Huber, 1987).



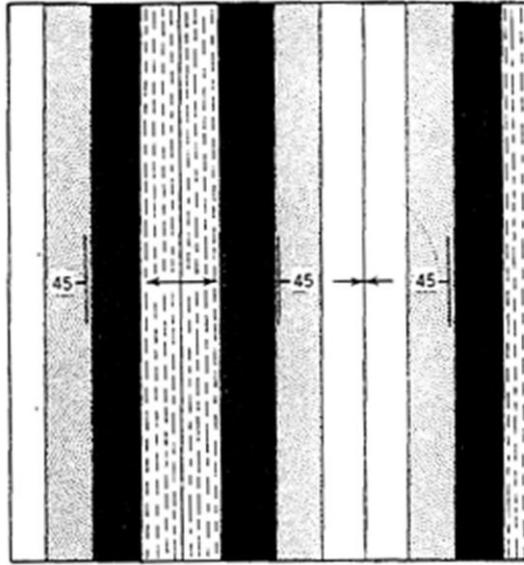
شكل (11 - 6): المحاور الهندسية لطية (Rowland, 1986).

### 2.11. أنماط تكشف الطيات **Outcrop pattern of folds** :

إن نمط تكشف **Outcrop pattern** طيات ذات محور (خط مفصلة) أفقي، أي طيات لامتعرفة **Non-plunging folds**، ضمن مستو أفقي (خريطة) يتمثل بأجنحة مائلة تأخذ شكل مجموعة من "سرايط" **bands** تكشف متوازية (شكل 11 - 7). وإن معرفة الوضعية الفراغية (اتجاه وميل الطبقات) في مواقع مختلفة من الطيات أو معرفة العمر النسبي ومقارنة الوحدات الطباقية تسمح للجيولوجي بتفسير هذا النمط بأنه جزء من بنية مطوية. أما الطيات المتعرفة **Plunging folds** فتتصف بأنماط تكشف متقاربة (شكل 11 - 8). ورغم ذلك فإن تمييز الأشكال المحدبة من الأشكال المقعرة غير ممكن من خلال نموذج الكشف (خريطة مثلاً) وحده. حيث أن تحديد نمط الطية يحتاج إلى معرفة الميل في عدد من النقاط أو معرفة العمر النسبي للطبقات أو اتجاه التغريق.

يبين كل من الشكلين (11 - 9 و 11 - 10) طيات ذات أنماط تكشف متطابقة في الخرائط، غير أن الطيات في إحدى هذين الشكلين يتعاكس تغريقها مع تغريق الطيات في الشكل الآخر. وبهذا يتبين أن نمط الكشف ليس كافياً لوحده لتحديد توجه الطية، حيث يجب تحديد اتجاه وقيمة الميل أيضاً. أما الشكل (11 - 11) فيوضح نمط كشف متطابق مع نمطي الكشف في الشكلين السابقين، غير أن الطيات هنا مقلوبة وتتغرق بزواوية 45° نحو الجنوب. ويهدف فهم هذه البنية

بشكل أفضل يمكن لنا أن نطوي ورقة ونمليها بشكل مشابه لواحدة من الطبقات المطوية المشمولة في هذا الشكل (شكل 11-11). وهنا يمكن ملاحظة أن هذه الطيات، وكذلك كل الطيات المقلوية تحتوي على أجزاء شاقولية من الطبقات المطوية، حيث أن اتجاه هذه الأجزاء الشاقولية يوازي منحنى محور الطية. وفي معظم الحالات التي تكون الطيات فيها متغرقة وذات سطوح محورية مائلة، لا يتطابق الأثر القمي أو أثر المنخفض مع الأثر المحوري، حتى أن الأثر القمي وأثر المنخفض لا يتوازيان مع الأثر المحوري.

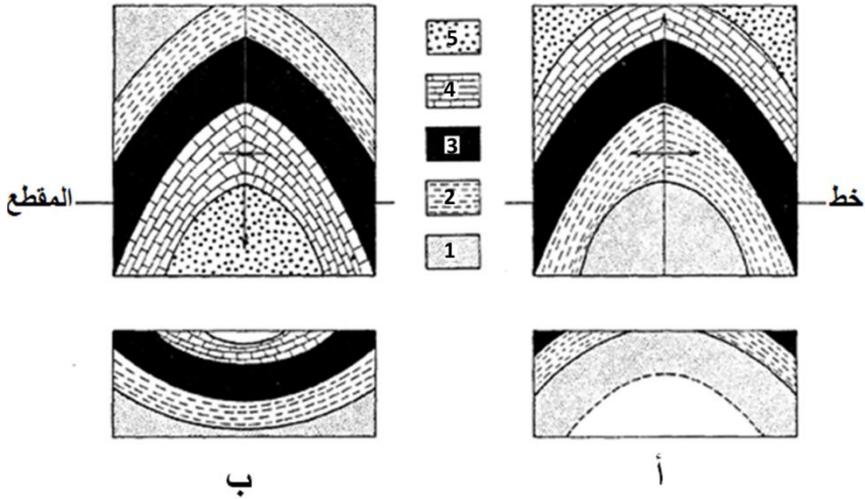


أ

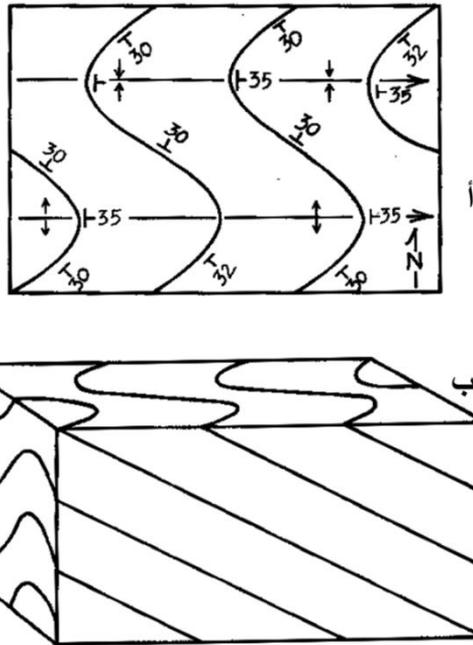


ب

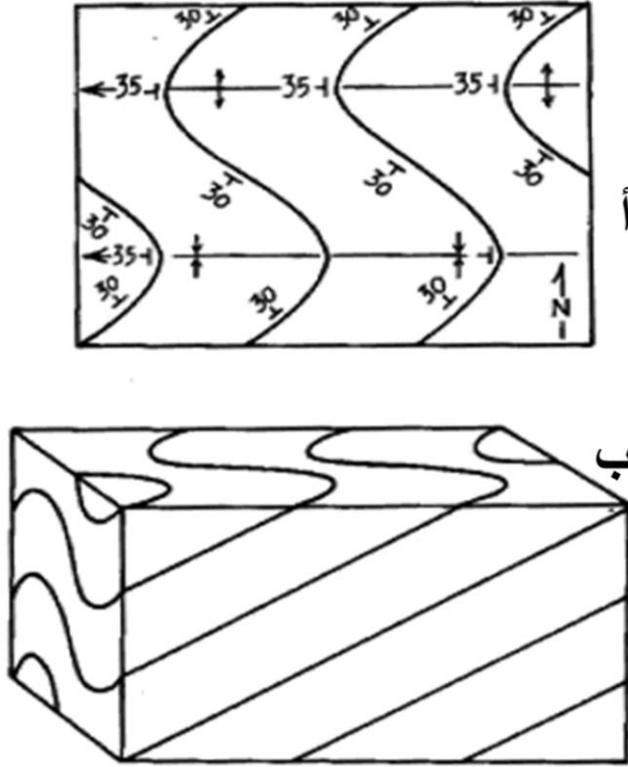
شكل (11-7): نمط تكشف لطيات لامتغرقة. أ: خريطة، ب: مقطع عرضي.



شكل (11 - 8): نمط تكشف لطيات متفرقة. أ: محدب متفرق مع مقطعه العرضي، ب: مقعر متفرق مع مقطعه العرضي.



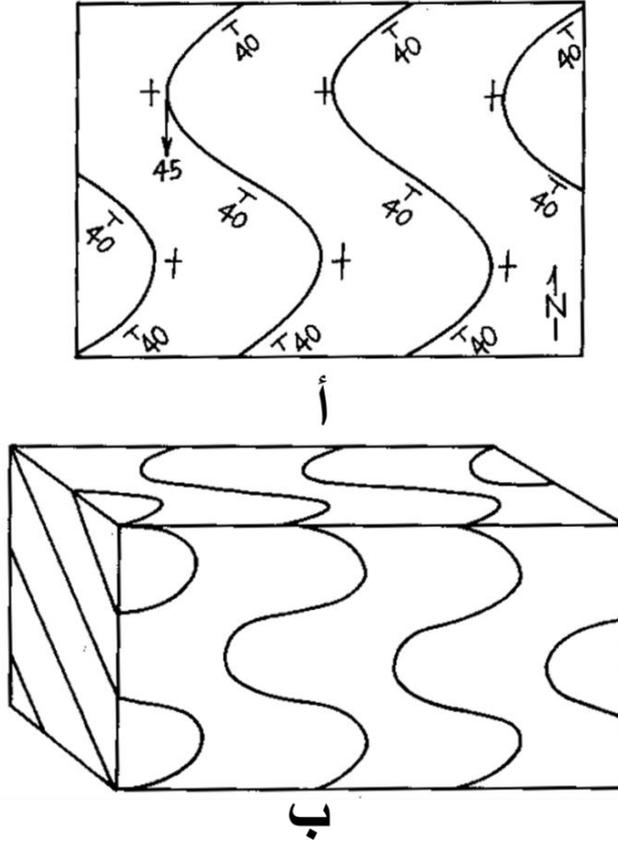
شكل (11 - 9): طيات متفرقة نحو الشرق. أ: نظرة خريطة، ب: مخطط ثلاثي الأبعاد (Rowland, 1986).



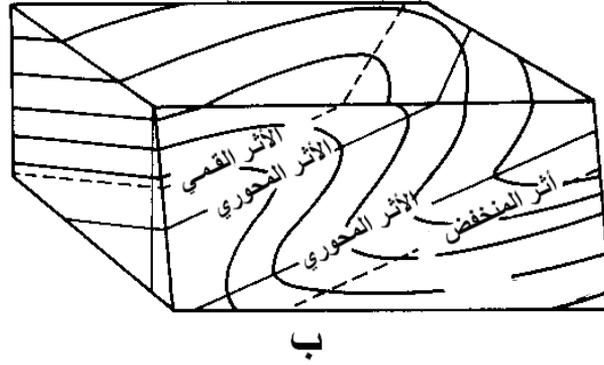
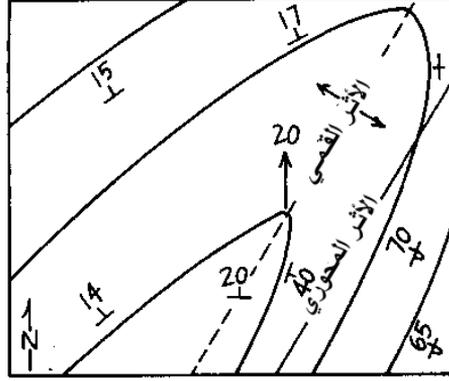
شكل (11-10): طيات متغرقة نحو الغرب. أ: نظرة خريطة، ب: مخطط ثلاثي الأبعاد (Rowland, 1986).

يوضح الشكل (11-12) طية ذات سطح محوري مائل نحو الشمال الغربي، ومحور يتغرق بزاوية 20° نحو الشمال. ويبدو واضحاً أن أثري القمة والمنخفض ليسا منطبقين على الأثر المحوري.

إن ميل الطبقات على امتداد أثري القمة أو المنخفض في الطيات الأسطوانية يتساوى مع منحى وتغرق محور الطية. وبالتالي يعد هذان الأثران أهم الخطوط التي يجب رسمها على أنماط تكشف الطيات في الخرائط.



شكل (11 - 11): طية متغرقة نحو الجنوب. أ: نظرة خريطة، ب: شكل ثلاثي البعد (Rowland, 1986).



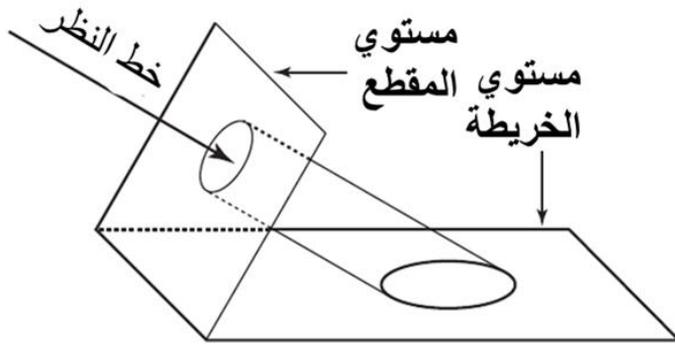
ب

شكل (11-12): مثال عن طيات لا يكون أثر القمة أو أثر المنخفض فيها متطابقاً مع الأثر المحوري. أ: نظرة خريطة، ب: شكل ثلاثي البعد (Rowland, 1986).

### 3.11. نظرة أسفل التفریق Down-plunge viewing

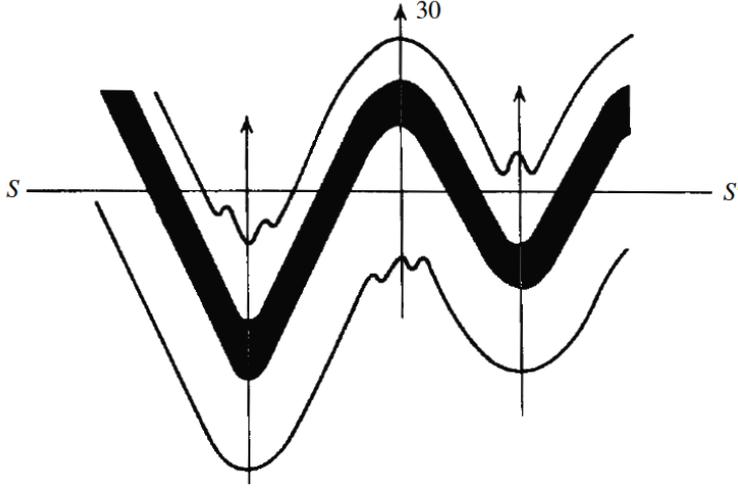
إن إنشاء المقاطع العرضية الشاقولية Vertical cross sections يعد من الوسائل الأساسية المساعدة في دراسة الوضعيات الفراغية للطبقات والبنى المختلفة. ورغم ذلك، فإن مثل هذه المقاطع تعطي معلومات صحيحة عن هندسية الطيات في حالة الطيات اللامتغرقة فقط. أما في الحالات الأخرى فإن هذه المقاطع تؤدي إلى تشوهات في شكل السطوح المطوية وفي تغيرات ثخانة الطبقات المطوية وفي قيم زاوية الطية. وبالتالي، إذا كان المطلوب توضيح الهندسية الأساسية للطية، فإن هذه المقاطع الشاقولية تصبح عديمة الفائدة. وكما مر معنا سابقاً، (الفقرة 2.7) فإنه يمكن الحصول على تبسيط بصري مهم عند النظر إلى أنماط تكشف طبقات مائلة

غير مطوية في الخرائط ، بطريقة نظرة أسفل الميل. ويمكن استخدام المقاربة نفسها لدى النظر إلى أنماط خرائط الطيات المتعرجة. يتم ذلك بتدوير الخريطة والنظر إليها بشكل يكون فيه خط النظر مواز لمحور الطية المتعرج، وبذلك نرى مقطع الطية المتعامد مع محورها Profile of the fold. يتضمن مبدأ "نظرة أسفل التعريق" إزالة التشوهات التي تحصل لشكل التكشف نتيجة تقاطع الطية مع سطح الأرض. وهذا ما يمكن تبسيطه بحالة أنبوب أسطواني مائل ذي مقطع دائري (شكل 11- 13). وهكذا تفضّل دراسة الطيات عادة في مقاطعها المتعامدة مع محاورها Profile view، أي عندما تكون جهة النظر موازية لمحور الطية. ويكون مثل هذا المقطع غير متاح في بعض الحالات.



شكل (11- 13): رؤية مقطع الأنبوب الأسطواني بشكل دائرة في مستوي المقطع المتعامد معه وبشكل إهليلج في مستوي الخريطة (Ragan, 2009).

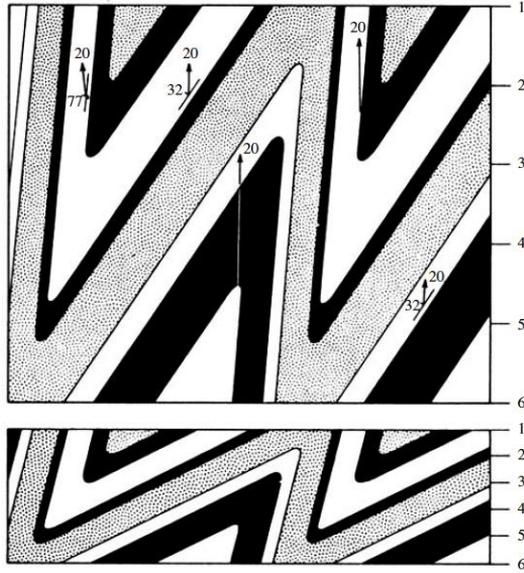
يوضح الشكل (11- 14) خريطة جيولوجية لعدد من الطيات القائمة المتعرجة نحو الشمال. وبذلك فإن الأشكال المحدبة والأشكال المقعرة ترى ببساطة وبشكل مباشر من خلال نظرة أسفل الميل. ويشير نمط التكشف على الخريطة إلى وجود طيات لامتوافقة، وبذلك نجد أن نظرة أسفل الميل ستتضمن هذه الطيات تلقائياً وفي مكانها الصحيح ضمن البنية. أما المقطع الشاقولي الذي يمكن أن ينشأ على طول الخط  $SS'$  لن يُظهر الطيات الصغيرة في نوى الطيات الكبيرة.



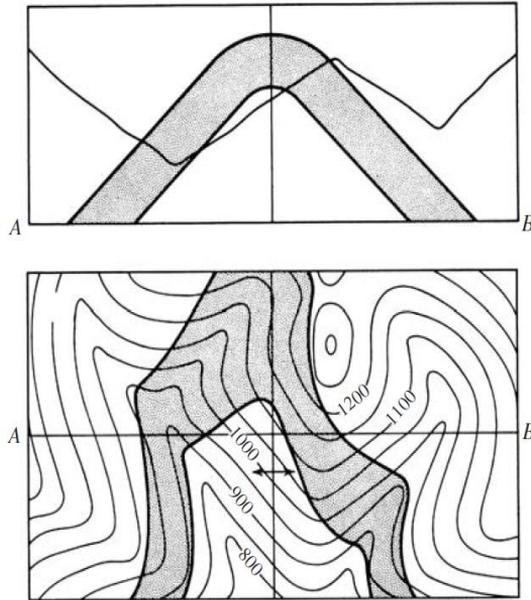
شكل (11- 14): خريطة طية قائمة متغرفة (Ragan, 2009).

إذا كانت الطيات مائلة فإن الشكل الصحيح للطية المتغرفة يرى إذا كان خط النظر موازياً لمحور الطية فقط، وليس إذا كان موازياً لأثر السطح المفصلي. وكما في الخريطة الموضحة بالشكل (11- 15) فإن الطيات تتغرق نحو الشمال بزاوية 20°. أما الأثر السطحي للسطح المفصلي فإنه يتجه N15E ويميل بشدة نحو الغرب. وهكذا نجد أن الشكل الحقيقي للطيات المطوية يظهر واضحاً إذا كان خط النظر موازياً لمحور الطية، وتتوضح نتيجة هذه النظرة في المقطع المنشأ بشكل متعامد مع محور الطية. وهنا يمكن ملاحظة أنه لو تم النظر بشكل مواز لاتجاه السطوح المفصلية، أي باتجاه N15E، فإن الطية ستبدو خطأً وكأنها قائمة وبها ترقق للجناح الشرقي شديد الميل للشكل المحدب.

توضح نظرة أسفل التغريق مظهراً آخر مهماً لأنماط الطيات. إن الطيات في الشكل (11- 14) ذات مستويات مفصلية شاقولية، وبالتالي فإن أثر المستوي المفصلي في هذه الحالة يربط ما بين نقاط التقوس الأعظمي لنمط التكشف، وهذا ما يمكن رؤيته بوضوح من خلال نظرة أسفل التغريق. ويحصل هذا التوافق عندما تكون الطيات متكشفة في منطقة ذات تضاريس لطيفة فقط. أما إذا كانت التضاريس معقدة فإن هناك فرقاً ما بين نقاط المفصلة الحقيقية والظاهرية (شكل 11- 16).



شكل (11-15): خريطة ومقطع متعامد مع المحور لطية مائلة متغزقة (Ragan, 2009).



شكل (11-16): مقطع وخريطة لمحدب قائم غير متغزق يتكشف في منطقة معقدة طبوغرافياً (Ragan, 2009).

#### 4.11. مقطع الطية المتعامد مع محورها Fold profile

يمكن للشكل الحقيقي للطيات الأسطوانية، الذي يرى من خلال نظرة أسفل التغيريق، أن يُنشأ تخطيطياً من الخريطة الجيولوجية. وهناك طريقتان مختلفتان غير أنهما متكافئتان (Ragan, 2009):

##### 1.4.11. الطريقة الأولى

وهي الأكثر بساطة وتُطبَّق بشكل خاص في المناطق ذات التضاريس البسيطة. وهي تتضمن إنشاء نمط خريطة مقصّرة Foreshortened map بمساعدة شبكة الإنشاء:

أ- ترسم شبكة مربعة على الخريطة الجيولوجية، بحيث يكون واحد من الاتجاهات الإحداثية موازياً لمنحى محور الطية، وبفاصل شبكي ذي قيمة  $k$  (شكل 11-17 أ).

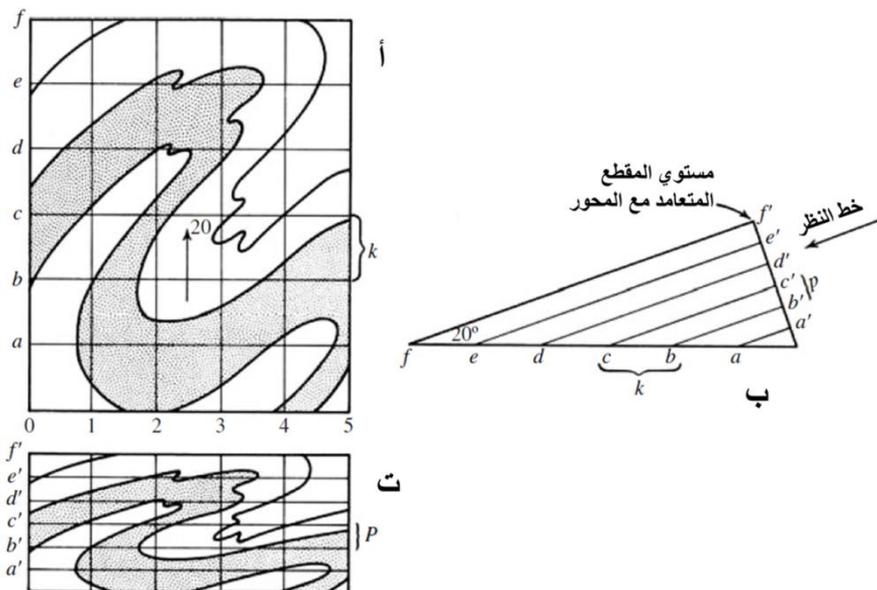
ب- بالنظر نحو أسفل التغيريق، فإن الفاصل الشبكي  $k$  المأخوذ بشكل عرضي على خط النظر يبقى دون تغيير (1، 2، 3،.....)، أما الفاصل الشبكي المأخوذ بشكل مواز للمنحى المحوري  $p$  فيحسب كما يلي (شكل 11-17 ب):

$$p = k \sin \omega$$

حيث  $\omega$ : زاوية تغيريق المحور (في هذه الحالة 20°).

ت- يتم إنشاء شبكة ثانية لتمثل نظرة أسفل التغيريق: الفاصل الشبكي 1، 2، 3.... يساوي الفاصل الأصلي المنشأ على الخريطة، أما  $a'$  و  $b'$  و  $c'$ .... فتتمثل الفاصل الشبكي المقصّر  $p$ .

ث- تتقل نقاط السطوح الطبقيّة المطوية من شبكة الخريطة إلى شبكة المقطع حتى يكتمل المقطع (شكل 11-17 ت).



شكل (11 - 17): إنشاء مقطع متعامد مع محور الطية. أ: خريطة، ب: شبكة المقطع، ت: مقطع (Ragan, 2009).

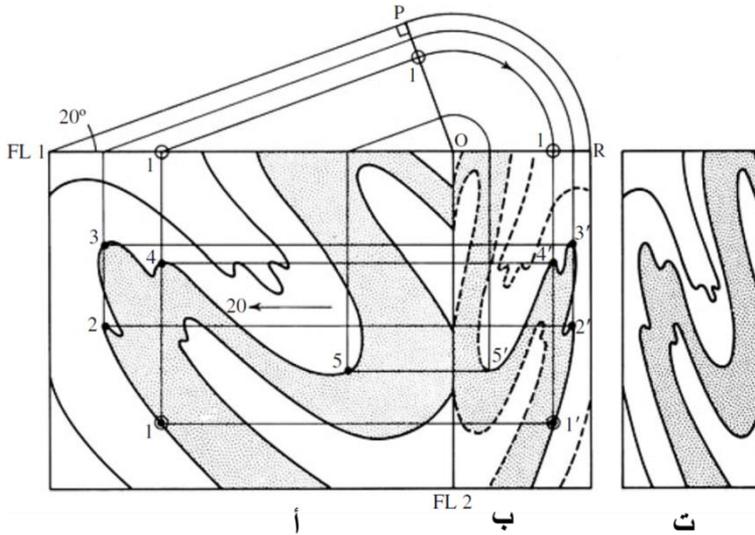
#### 2.4.11. الطريقة الثانية:

تستخدم طريقة الإنشاء التخطيطي المتعامد (الإنشاء الأورثوغرافي Orthographic construction) وتطبق في الحالات الأكثر تعقيداً. الإنشاء:

أ- حدد خطي طي  $FL1$  و  $FL2$ ، بحيث يكون أولهما مواز لمنحى محور الطية، ويكون الثاني متعامداً معه. ويفضل أن يحدد هذان الخطان خارج إطار الخريطة (شكل 11 - 18 - أ). (خط الطي: خط مشترك ما بين مستوي الخريطة ومستوي المقطع، ويستخدم لتدوير المستوي المقطع بزاوية 90° حوله، بحيث يتمكن القارئ من رؤية كلاً من الخريطة والمقطع ضمن مستو واحد).

ب- حدد مقطعاً شاقولياً موازياً لمحور الطية من خلال تدويره حول  $FL1$ . ثم ارسم فيه الخط  $OP$  الذي يمثل مستوي المقطع المتعامد مع محور الطية في النظرة الجانبية

- Edge view. تُختار بعد ذلك مجموعة من النقاط من الخريطة، ليتم إسقاطها بشكل عمودي على  $FL1$ ، ومن ثم على  $OP$ ، وذلك بحسب قيمة زاوية التغيريق (هنا  $20^\circ$ ).
- ت- بالتدوير حول  $FL2$ ، تُسقط النقاط السابقة نفسها من  $OP$ ، وذلك باستخدام أقواس دائرية، بحيث تمثل النقطة  $O$  مركزها.
- ث- يتم كذلك إسقاط نفس النقاط من الخريطة إلى  $FL2$ ، بهدف تثبيت مواقعها على مستوي المقطع المتعامد مع محور الطية (انظر مثلاً تفاصيل إسقاط النقطة 1 من الخريطة إلى 1' على المقطع في الشكل 11-18 - ب).
- ج- وهكذا وبعد نقل عدد كاف من النقاط بهذه الطريقة، يصار إلى إكمال شكل الطيات في مستوي المقطع من خلال ربط النقاط بشكل مناسب.
- ح- إن المقطع المرسوم بهذه الطريقة يمثل نظرة "أعلى التغيريق" Up-plunge view، غير أنه يمكن أن يرسم بشكل معكوس للحصول على نظرة أسفل التغيريق (شكل 11-18 - ت).



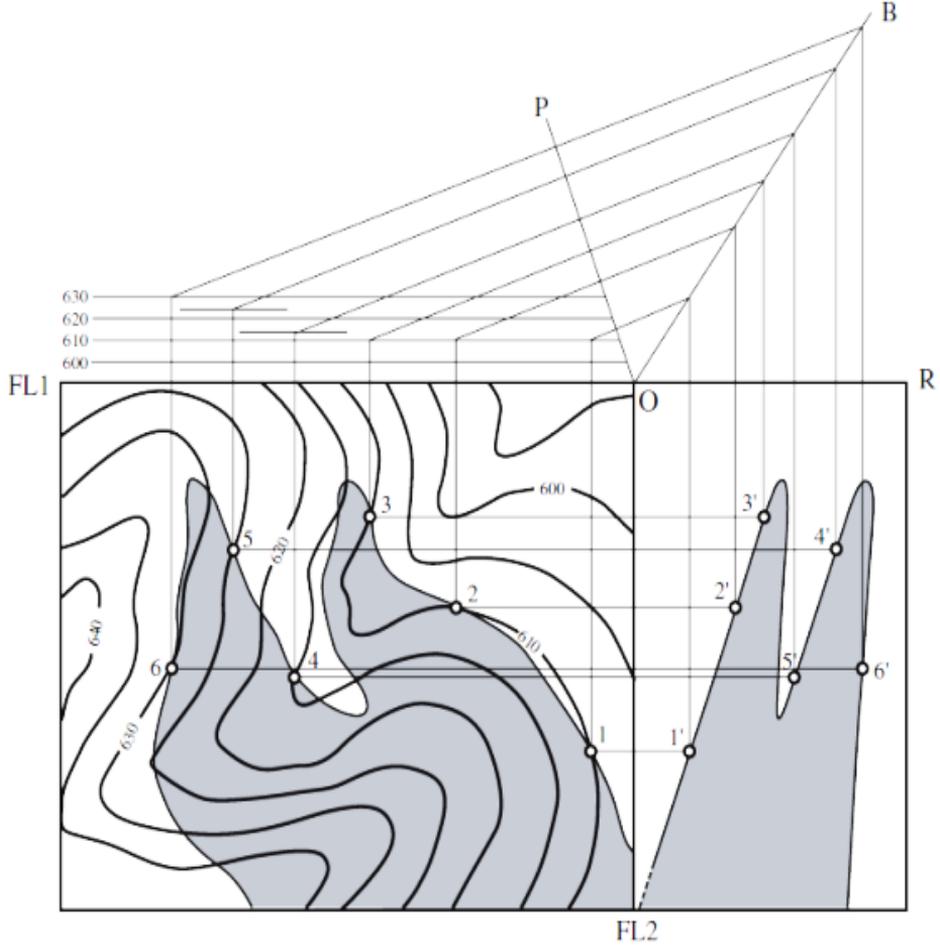
شكل (11-18): إنشاء مقطع متعامد مع محور الطي باستخدام طريقة الإنشاء التخطيطي المتعامد (Ragan, 2009).

تتميز هذه الطريقة عن طريقة الشبكة آنفة الذكر (الطريقة الأولى) بأنه يمكن إنشاء مقطع متعامد مع محور الطية عندما يكون التكشف متأثراً بشكل تضاريسي غير منتظم. وهو ما يوضحه المثال التالي:

أ- حدّد خطي الطي FL1 و FL2 كما في المثال السابق (بشكل مواز ومتعامد مع محور الطية المتعرجة).

ب- بدلاً من الإسقاط المباشر إلى مستوي المقطع عبر FL1، يجب أولاً أخذ التضاريس بالحسبان. وهذا ما يمكن فعله من خلال إضافة مجموعة من خطوط ارتفاع (بحسب مقياس محدد) إلى النظرة الجانبية وذلك بقيمة الفاصل نفسها بين منحنيات التسوية المرسومة على الخريطة (شكل 11-19). ثم يتم إسقاط نقاط تكشف السطوح المطوية عبر FL1 إلى خطوط الارتفاع المتوافقة معها.

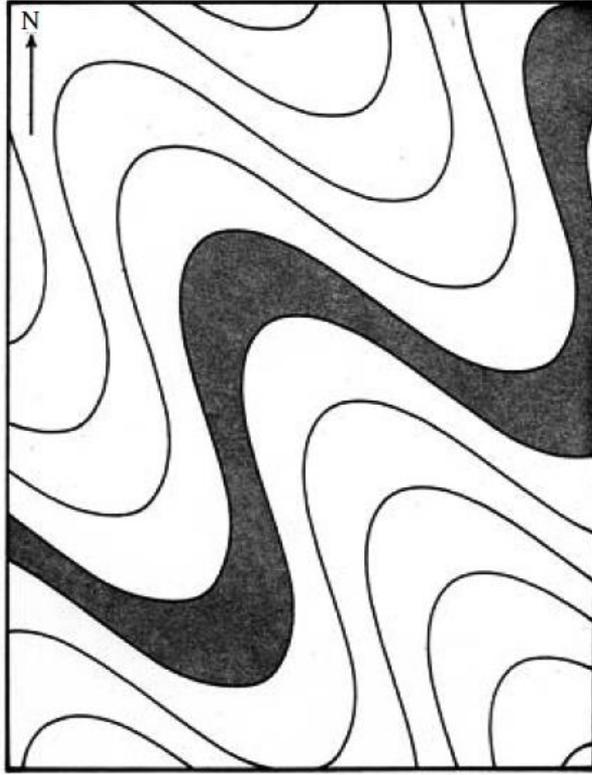
ت- يصار بعد ذلك إلى إسقاط هذه النقاط على مستوي المقطع OP، باستخدام زاوية التعرّيق. ويمكن القيام بهذا الإسقاط بشكل أسهل دون استخدام أقواس دائرية، حيث يتم إنشاء خط OB المنصف للزاوية POR، ويتم إسقاط النقاط على طول خط التعرّيق إلى هذا المنصف مباشرة، ومن ثم إلى المقطع. ثم يُنشأ مقطع الطية كما في السابق، أي من نقاط مسقطه من النظرة الجانبية ومن الخريطة.



شكل (11 - 19): مقطع متعامد مع محور طية تم إنشاؤه من التكشف مع أخذ التضاريس بالحسبان (Ragan, 2009).

#### 1.4.11. تمرين:

حددت الوضعية الفراغية لخطوط المفاصل في الطيات الموضحة في الشكل (11 - 20) بقيمة 30/090. أنشئ المقطع المتعامد مع المحور للطبقة المظلمة.



شكل (11-20): الخريطة المستخدمة للتمرين (Ragan, 2009).

### 5.11. توجه الطية Fold orientation:

تعد زاوية ميل المستوي المحوري وزاوية تغريق خط المفصلة الأساس لتحديد توجه الطية. وبالتعريف فإن خط المفصلة يوجد ضمن السطح المحوري للطية. وبشكل عام فإن اتجاه (منحى) خط المفصلة يمكن أن يكون موازياً لاتجاه السطح المحوري أو منحرفاً عنه أو حتى متعامداً معه ولكنه يبقى ضمن السطح المحوري (شكل 11-21 وشكل 11-22).

• إذا كان خط المفصلة أفقياً، فإن اتجاه الأثر المحوري يوازي اتجاه خط المفصلة (شكل

11-21 - أ، ب).

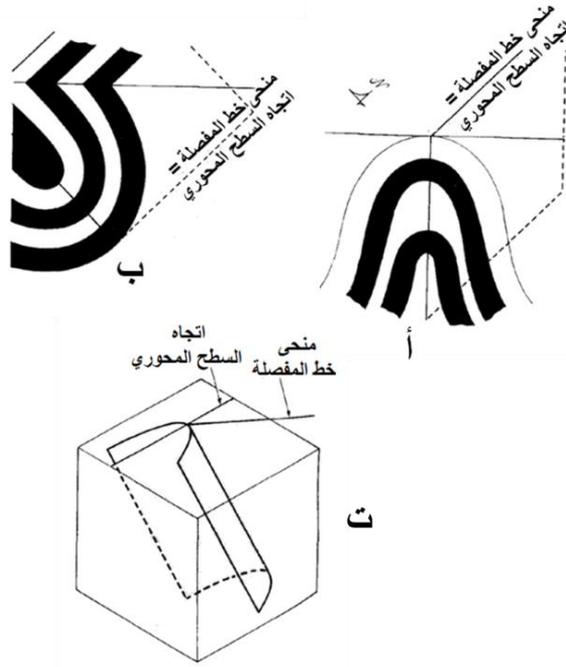
• يكون اتجاه الأثر المحوري في الطيات القائمة المتغرقة موازياً لاتجاه خط المفصلة (شكل 11-22 - أ).

• إذا كان السطح المحوري مائلاً وكان لخط المفصلة زاوية تغريق محددة فإن الأثر المحوري لايوازي اتجاه المحور (شكل 11-21 - ت وشكل 11-22 - ب).

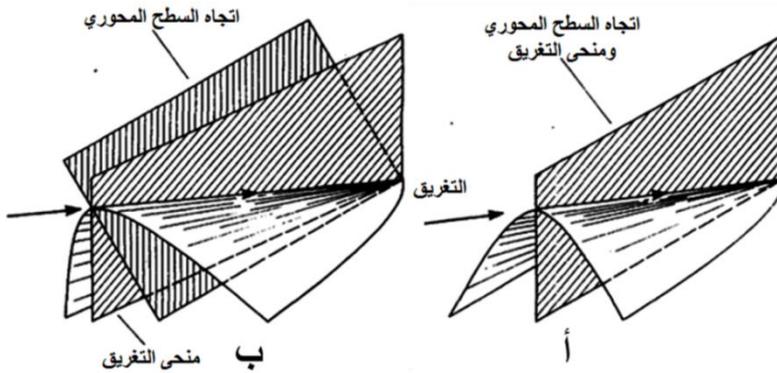
وبيين الشكل (11-23) مفهوم زاوية التغريق ومفهوم زاوية انحدار الخط Pitch (الزاوية التي يصنعها خط المفصلة مع خط أفقي على المستوي المحوري).

وهكذا يمكن تصنيف الطيات بحسب الوضعية الفراغية للمحور وللمستوي المحوري. وهذا يفيد غالباً في الوصف الحقلي للطيات التي تختلف فيها الوضعيات الفراغية لمستوياتها المحورية ولمحاورها (شكل 11-24). فقد يكون المستوي المحوري شاقولياً أو مائلاً أو أفقياً ، حيث نجد في الشكل (11-24 - أ، ب، ت) مثلاً أن المستوي المحوري شاقولي ويتجه شمال - جنوب، أما في الشكل (11-24 - ث) فإن المستوي يتجه شمال - جنوب ويميل بزاوية 45° نحو الغرب، بينما نجده في الشكل (شكل 11-24 - د) مائلاً بزاوية 60° نحو الغرب. أما في الشكل (11-24 - ج) فنجده أفقياً.

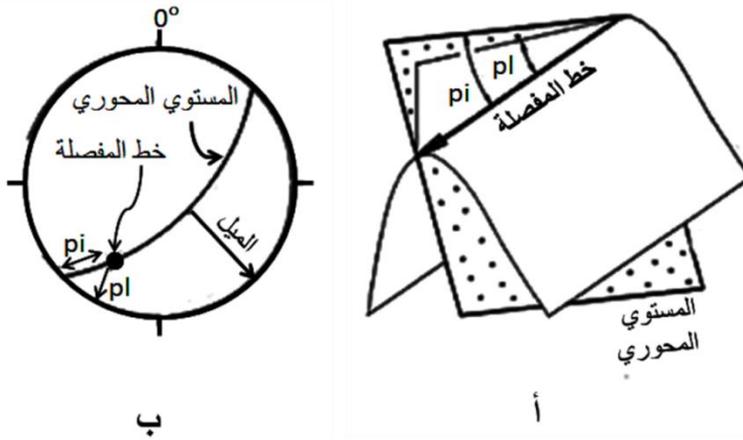
يمثل الخط aa' في الشكل (11-24) محور (خط مفصلة) الطبقة المطوية، وكما نلاحظ في هذا الشكل تكون المحاور في بعض الطيات أفقية (شكل 11-24 - أ، ث، ج)، بينما نجدها متغرقة في بعضها الآخر (شكل 11-24 - ب، د) وقد تكون شاقولية (شكل 11-24 - ت).



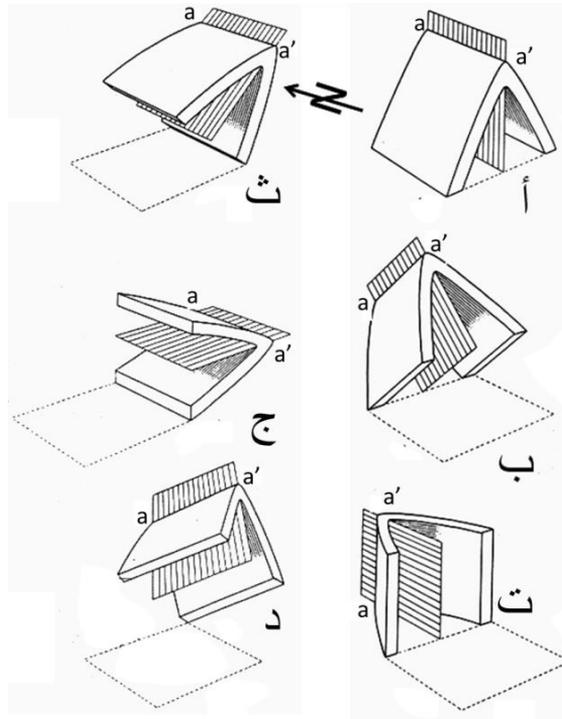
شكل (11- 21): علاقات ممكنة ما بين المنحى المحوري واتجاه المستوي المحوري. أ و ب: يتوازي منحى خط المفصلة مع اتجاه السطح المحوري. ت: اتجاه خط المفصلة لايتوازي مع اتجاه السطح المحوري (Davis and Reynolds, 1996).



شكل (11- 22): علاقات ممكنة ما بين المنحى المحوري واتجاه المستوي المحوري. (أ) طية قائمة متعرجة، (ب) طية مائلة (أو مقلوبة) متعرجة (McClay, 1999).



شكل (11 - 23): مفهوم زاوية التغيريق  $pl$  وزاوية انحدار الخط  $pi$ . أ: شكل ثلاثي الأبعاد، ب: إسقاط ستيريوغرافي (Leyshon and Lisle, 1996).



شكل (11 - 24): الوضعيات الفراغية المختلفة للمستويات المحورية (المستويات المخططة) والمحاور ( $aa'$ ) (Billings, 1972).

### 1.5.11. مخططي فلوتي وريكارد

اقترح فلوتي Fleuty (1964، 1987) مخططاً تصنيفياً يسمح بتسمية الطيات بحسب توجهها (شكل 11-25). يعين موقع زاوية ميل المستوي المحوري على محور  $x$ ، كما يعين موقع قيمة تغريق خط المفصلة على محور  $y$ ، حيث يتم التمييز بين ستة عشر صنفاً من الطيات. وهكذا نجد مثلاً أن الطية المستقلة تتميز بخط مفصلة وبمستوى محوري شبه أفقيين، أما الطية الشاقولية فتتميز بخط مفصلة وبمستوى محوري شبه شاقولين. وتمثل كل من الطية المستقلة والطيّة الشاقولية حدين أقصىين لسلسلة مستمرة من الطيات التي يصطلح على تسميتها الطيات المتكئة Reclined folds وهي طيات حيادية Neutral folds (طية جانبية الإغلاق) يميل مستويها المحوري بزوايا تقع ما بين  $10^\circ$  و  $80^\circ$ ، كما يشكل خط المفصلة فيها زاوية انحدار Pitch أكبر من  $80^\circ$  (الزاوية بين خط المفصلة وخط أفقي مقيسة على المستوي المحوري نفسه).

وضع ريكارد Rickard 1971 مقارنة أكثر بساطة من مقارنة فلوتي، وذلك باستخدامه مخططاً مثلثي الشكل (شكل 11-26). ويلاحظ على مخطط ريكارد مايلي:

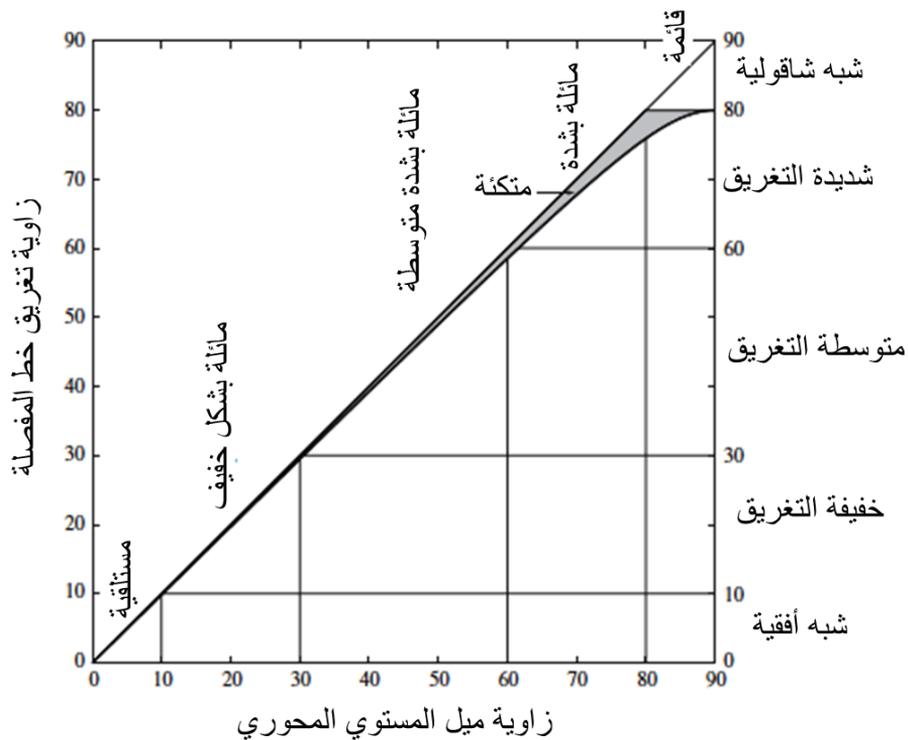
أ- تمثل رؤوس المثلث ثلاث حالات خاصة: الطيات القائمة Upright والشاقولية

Vertical والمستقلة Recumbent.

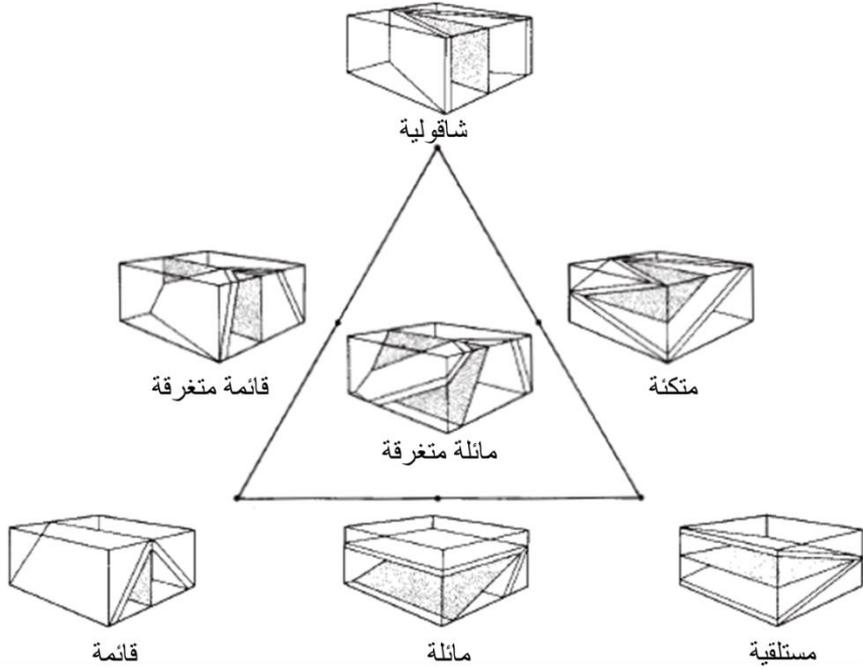
ب- تمثل أضلاع المثلث حالات انتقالية ما بين كل زوج من الطيات السابقة: قائمة متغرقة

Upright plunging ومتكئة Reclined ومائلة Inclined.

ت- تمثل الأجزاء الداخلية من المثلث حالة الطيات المائلة المتغرقة Inclined plunging.



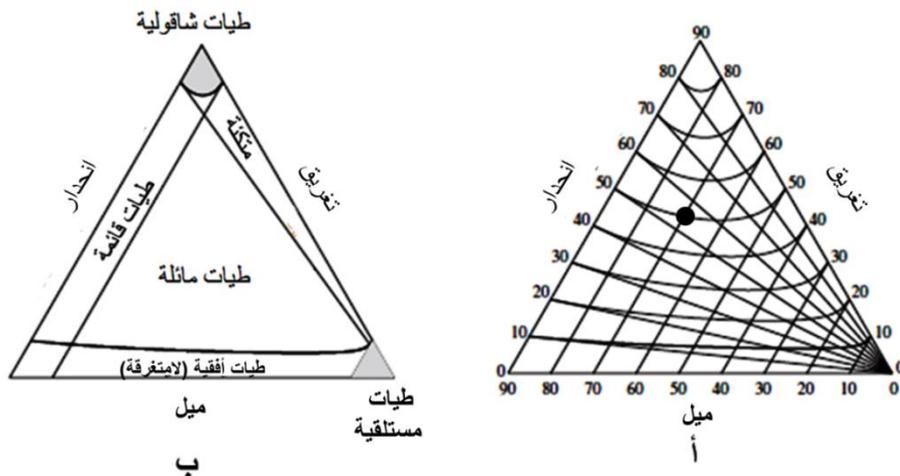
شكل (11-25): مخطط فلوتي لتصنيف الطيات بحسب وضعياتها الفراغية، وذلك بالاعتماد على العلاقة بين زاوية ميل المستوي المحوري وتغريق خط المفصلة ( Fleuty, 1987; Ramsay and Huber, 1987).



شكل (11 - 26): مخطط مثلثي للوضعيات الفراغية للطيات  
(Rickard, 1971; Fleuty, 1987).

ومن أجل التطبيقات العملية تستخدم شبكة مثلثية خاصة لتصنيف الوضعيات الفراغية للطيات (شكل 11 - 27 - أ)، حيث يمثل ضلعها الأسفل زاوية ميل المستوي المحوري، أما ضلعها الأيمن فيمثل زاوية تغريق خط المفصلة، بينما يمثل ضلعها الأيسر زاوية انحدار خط المفصلة (كما مر معنا سابقاً هي الزاوية التي يصنعها خط المفصلة مع خط أفقي على المستوي المحوري). فمثلاً من أجل الطية التي يميل مستويها المحوري بزاوية 70° ويتغرق خط مفصلتها بزاوية 50°، نجد النقطة الممثلة لهذه الطية (النقطة المسقطة في الشكل 11 - 27 - أ) ناتجة من تقاطع المستقيم المائل الموازي للضلع الأيسر للمثلث (الذي يساوي 70° في هذه الحالة) مع المنحني المعبر عن التغريق (الذي يساوي 50° في هذه الحالة). كما يمكن الحصول على النقطة نفسها باستخدام قيمة زاوية انحدار خط المفصلة (وتساوي 55° في هذه الحالة)، والتي تحدد من

خلال المستقيمت المشعة من الرأس الأيمن للمثلث. وبعد إجراء هذا الإسقاط يصار إلى تحديد نمط الطية بالمقارنة مع الحقول المحددة في الشكل (11- 27 - ب).

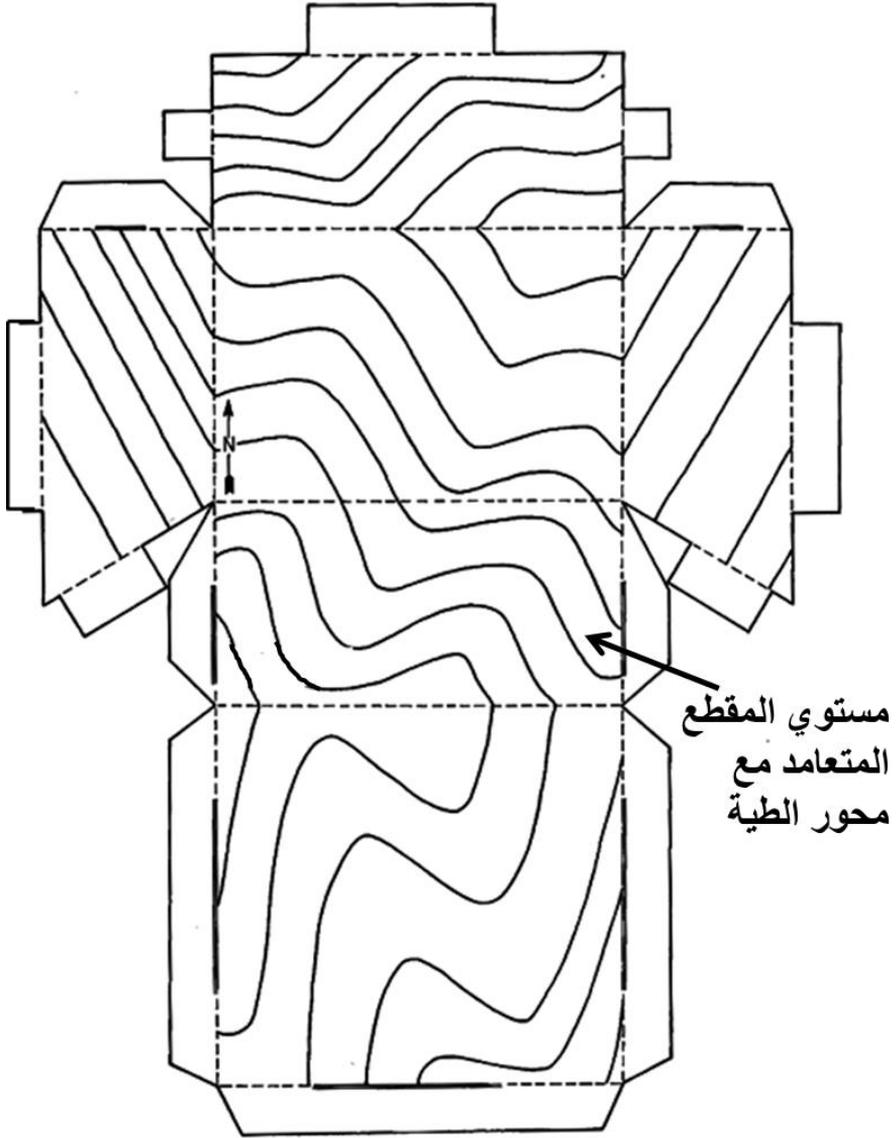


شكل (11- 27): الوضعيات الفراغية للطيات بحسب مخطط ريكارد (Rickard 1971). أ: شبكة الإسقاط، ب: تصنيف الطيات بحسب وضعياتها الفراغية. انظر النص.

## 6.11. التمارين:

### 1.6.11. التمرين الأول:

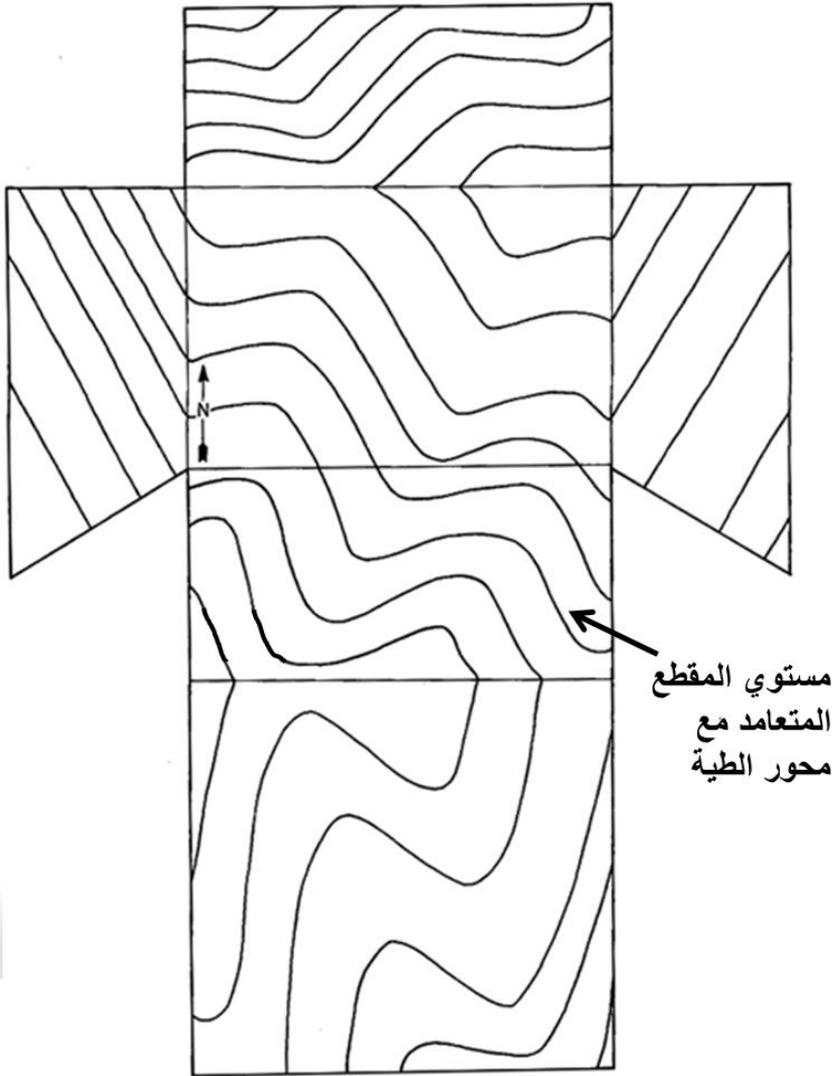
يبين الشكل (11- 28) نموذجاً ثلاثي الأبعاد لطبقات مطوية. قم بقص هذا الشكل (بعد نسخه) وقم بطيه لتحصل على الصورة ثلاثية الأبعاد لهذه البنية. صف الطيات المشمولة بهذا النموذج، ويجب أن يتضمن وصفك ما إذا كانت الطية أسطوانية أم غير أسطوانية متناظرة أم لامتناظرة، كما يجب تحديد الوضعية الفراغية لمحور الطية والمستوي المحوري (وتصنيفها بحسب مخطط فلوتي أو مخطط ريكارد) وتحديد زاوية الطية.



شكل (11 - 28): نموذج ثلاثي الأبعاد يستخدم للقص والنثي في التمرين الأول (Rowland 1986).

### 2.6.11. التمرين الثاني:

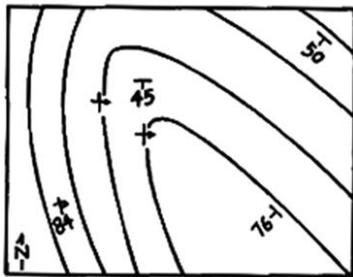
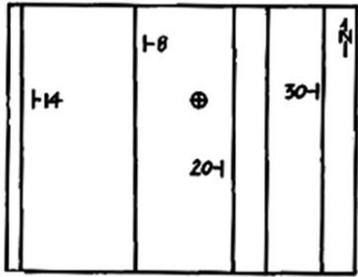
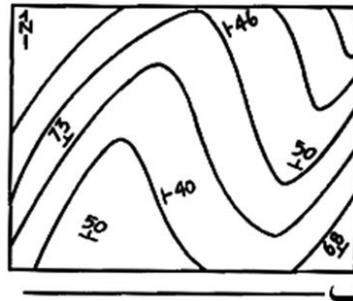
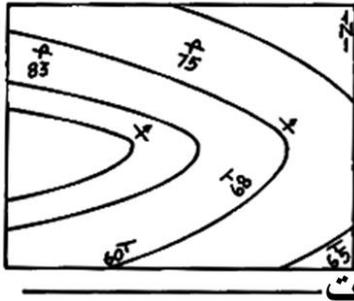
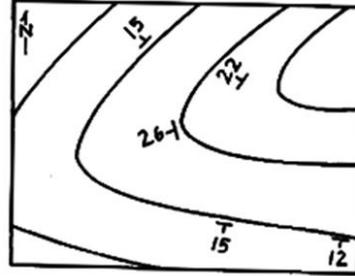
يبين الشكل (11-29) المخطط العام المستخدم في التمرين السابق نفسه (شكل 11-28). استخدم هذا النموذج دون قصه، وحدد عليه أثري القمة والمنخفض، وذلك من خلال مقارنته مع الشكل ثلاثي الأبعاد الذي استخدمته في التمرين السابق.



شكل (11-29): النموذج المستخدم للتمرين الثاني دون قص أو ثني (Rowland 1986).

### 3.6.11. التمرين الثالث:

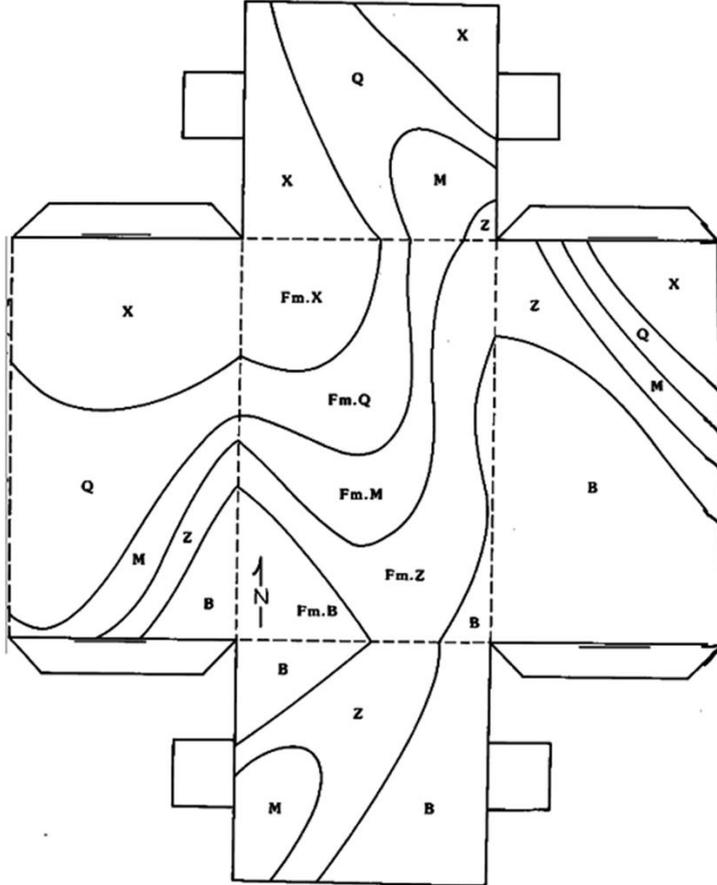
ارسم على كل من الخرائط الجيولوجية الموضحة في الشكل (11 - 30) الأثر القمي وأثر المنخفض حيث أمكن ذلك، مستخدماً الرموز المناسبة لإيضاح نمط الطية ووضعية محورها. استخدم قطعة من الورق لطبها بهدف فهم البنية وتحديد وضعيتها الفراغية. حدد منحى محور الطية وتغريقه على كل خريطة واكتب ذلك في المكان المحدد لذلك .



شكل (11 - 30): الخرائط الجيولوجية المستخدمة في التمرين الثالث (Rowland 1986).

#### 4.6.11. التمرين الرابع

يبين الشكل (11- 31) الجوانب والسطح العلوي لنموذج ثلاثي الأبعاد لطبقات مطوية. قم بقص هذا النموذج وبثنيه ليأخذ الشكل ثلاثي الأبعاد. انظر إليه من زوايا مختلفة حتى تستطيع ملاحظة الطية الأسطوانية. وبهذه الحالة تكون ناظراً لأسفل التغير، وإذا وجدت صعوبة بذلك قم بتلوين واحدة أو أكثر من الطبقات. ارسم شكل الطية الذي يظهر في نظرة أسفل التغير. ثم أجب على الأسئلة التالية: ماهي الوضعية الفراغية التقريبية للسطح المحوري؟ ماهي الوضعية الفراغية التقريبية لمحور الطية؟ ماهي صفوف الطبقات المشمولة بهذا النموذج بحسب متساويات الميل (انظر الفصل 13).



شكل (11- 31): مخطط ثلاثي البعد للاستخدام في التمرين الرابع (Rowland 1986).

### 5.6.11. التمرين الخامس

يبين الشكل (11- 32 - أ، ب) التكتشف الأفقي لصخر الغنايس الشريطي ذو الصفاح والكوارتز والبيوتيت والهورنبلاند في الجزء المركزي لأحد أغطية بينين Pennine nappes في جبال الألب السويسرية. أنشئ الآثار المحورية للطيات وبيّن ما إذا كانت الآثار لطيات محدبة الشكل antiformal أم مقعرة الشكل synformal . ما سبب كون اتجاهات الآثار المحورية ليست موازية لمحور الطية (المنحى المحوري)؟ أشر إلى الاتجاهات العامة لميل المستويات المحورية. وأخيراً ناقش علاقات المستويات المحورية ضمن إطار نموذج الطي الكلي.



شكل (11- 32): مخطط تكشف الغنايس الشريطي للاستخدام في التمرين الخامس (Ramsay and Huber, 1987). أ: صورة للعينة، ب: شكل تخطيطي للعينة.

### 6.6.11. التمرين السادس :

أجريت قياسات لزوايا تغريق خطوط المفاصل لأشكال محدبة وكذلك لزوايا ميل سطوحها المحورية، وذلك في ثلاث مناطق مختلفة (انظر اللوحة 11 - 1، القيم معطاة بالدرجات). صنف هذه الأشكال المحدبة باستخدام مخطط ريكارد.

اللوحة (11 - 1): القياسات المستخدمة في التمرين السادس (القيم بالدرجات).

منطقة أ			منطقة ب			منطقة ت		
رقم الطية	زاوية ميل السطح المحوري	تغريق خط المفصلة	رقم الطية	زاوية ميل السطح المحوري	تغريق خط المفصلة	رقم الطية	زاوية ميل السطح المحوري	تغريق خط المفصلة
1	90	0	1	10	10	1	60	45
2	85	5	2	15	14	2	64	50
3	90	10	3	12	10	3	70	60
4	87	3	4	16	15	4	55	45
5	80	13	5	18	12	5	57	40
6	88	7	6	15	10	6	70	50
7	83	11	7	20	15	7	67	40
8	85	2	8	0	0	8	65	44
			9	15	12			

### 7.6.11. التمرين السابع

تبين اللوحة (11 - 2) قيم زوايا ميل المستويات المحورية D لعدد من الطيات، كما يبين قيم زوايا التفریق pi أو زوايا انحدار خط المفصلة pi في كل منها. صنف هذه الطيات بحسب وضعياتها الفراغية باستخدام المخططات التي تراها مناسبة.

اللوحة (11 - 2): القياسات المستخدمة في التمرين السابع (Ragan, 2009).

رقم الطية	D, pi, pi (القيم بالدرجات)
1	D (90), pi (0)
2	D (0), pi (0)
3	D (20), pi (20)
4	D (10), pi (5)
5	D (40), pi (20)
6	D (65), pi (40)
7	D (85), pi (80)
8	D (65), pi (50)
9	D (85), pi (40)
10	D (90), pi(90)



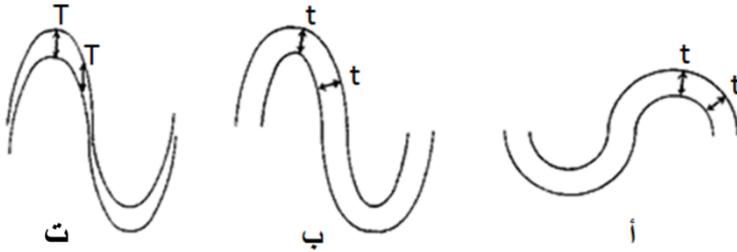
## الباب الرابع - الفصل الثاني عشر

### تصنيف الطيات بحسب طريقة تغير ثخانة الطبقة

#### Layer thickness variation method

##### 1.12. مدخل:

يمكن تصنيف الطيات بحسب شكل الطبقة المطوية. ففي "الطية المتوازية" Parallel fold تكون الثخانة الحقيقية  $t$  للطبقة المطوية ثابتة (شكل 12-1 أ، ب). أما "الطية المتشابهة" Similar fold فتبدي ترققاً للطبقات في أجنحتها بالمقارنة مع منطقة المفصلة. وفي هذه الحالة فإن أشكال السطوح الطبقيّة متطابقة، كما أن الثخانة المقيسة بشكل مواز للسطح المحوري  $T$  ثابتة (شكل 12-1 ت). يمثل هذان النمطان من الطيات حالتين خاصتين من الأشكال الممكنة للطبقات المطوية. وعموماً فإن الطيات المتوازية تتطور في الطبقات العصية من المتتاليات الرسوبية (حجر كلسي ثخين التطبق أو الكوارتزيت مثلاً) والتي تعرضت للطي في المستويات العليا من القشرة الأرضية.



شكل (12-1): أ- طية متوازية متراكزة، ب- طية متوازية لامتراكزة، ت- طية متشابهة.  $t$ : الثخانة الحقيقية (المقيسة بشكل متعامد مع السطوح الطبقيّة)،  $T$ : الثخانة المقيسة بشكل مواز للمستوي المحوري (Ramsay and Huber, 1987).

##### 2.12. تصنيف الطيات باستخدام طريقة تغير ثخانة الطبقة

طور رامزي (Ramsay and Huber, 1987) تصنيفاً شاملاً بالاعتماد على الثخانة النسبية للطبقات المطوية بين المفصلة والأجنحة. تعتمد هذه الطريقة على وصف تغيرات الثخانة مع

زاوية الميل، ويعبر عن هذه القياسات كنسبة من ثخانة الطبقة عند مفصلة الطية. تمثل شدة التقوس النسبي للسطحين العلوي والسفلي للطبقة المطوية دليلاً على تغير ثخانة الطبقة. ويمكن تمييز ثلاثة أنماط رئيسية (شكل 12-2):

أ. الصف 1 (Class 1): تكون فيه شدة تقوس القوس الداخلي أكبر من تلك العائدة للقوس الخارجي. ونميز فيها ثلاثة صنفيات:

• صنف 1A: تكون فيه ثخانة المفصلة أقل من ثخانة الأجنحة.

• صنف 1B: الثخانة الحقيقية متساوية (طية متوازية نموذجية).

• صنف 1C: ويمثل حالة متوسطة ما بين الصنف 1B والصف 2 (تخن معتدل في المفصلة وترقق معتدل في الأجنحة).

ب. الصف 2 (Class 2) : تقوس متطابق للقوسين الداخلي والخارجي (طيات متشابهة نموذجية).

ت. الصف 3 (Class 3): شدة تقوس القوس الخارجي أكبر من تلك العائدة للقوس الداخلي.

### التطبيق:

تتخذ الطريقة كما يلي شكل (12-3 و 12-4):

أ- يتم إنشاء مقطع الطية المتعامد مع خط المفصلة، ويوضع بشكل محدب قائم (شكل 12-3-أ).

ب- يرسم مماسين للسطحين الطبقيين عند نقطتي مفصلتيهما، حيث يمثل هذان المماسان مرجع الميل ذا القيمة صفر.

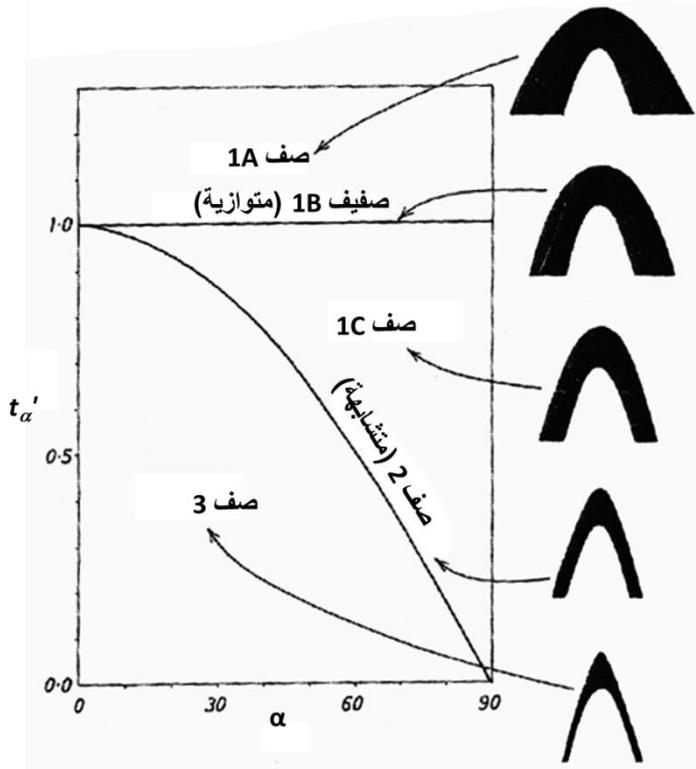
ت- تقاس الثخانة المتعامدة مع هذين المماسين، وهذه تمثل الثخانة المفصلية المرجعية  $t_0$  (شكل 12-3-أ).

ث- يتم اختيار زاوية الميل  $\alpha$ ، ثم يرسم مماسين مع سطحي الطبقة المطوية عند هذا الميل، وتقاس المسافة المتعامدة معهما  $t_\alpha$  (شكل 12-3-أ).

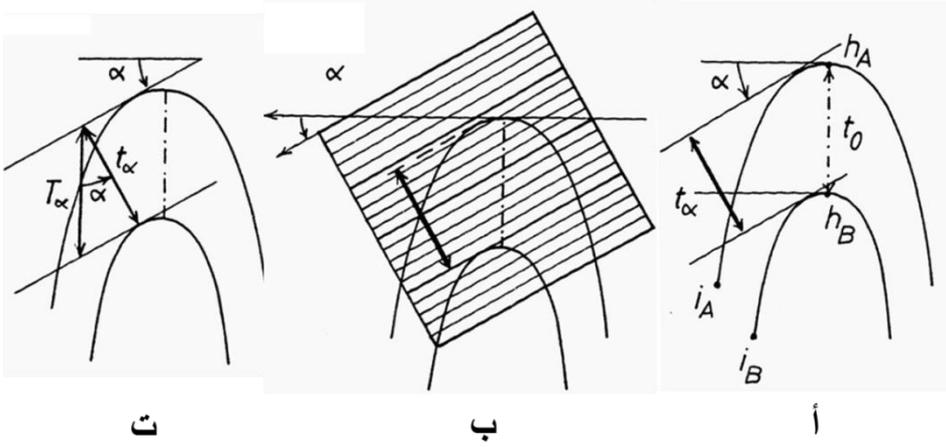
ج- وتحدد بعد ذلك الثخانة النسبية  $t'$  التي تساوي نسبة  $t_\alpha$  إلى  $t_0$ ، أي:

$$t'_\alpha = t_\alpha / t_0$$

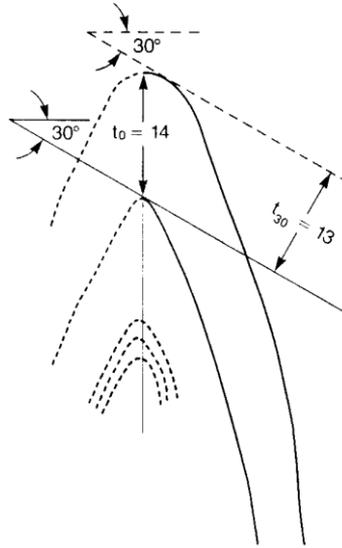
يمكن قياس قيمة  $t_\alpha$  بشكل بسيط وسريع بواسطة ورقة شفافة مرسوم عليها مجموعة من الخطوط المتوازية التي يكون التباعد فيما بينها معروفاً (شكل 12-3-ب)



شكل (12-2): مخطط بياني لعلاقة الثخانة الحقيقية  $t'_\alpha$  مع زاوية الميل  $\alpha$  والأصناف الرئيسية لصفوف الطيات (Ramsay and Huber, 1987).



شكل (12-3): تحديد الثخانة الحقيقية عند زوايا ميل محددة. أ:  $h_A$  و  $h_B$  و  $i_A$  و  $i_B$  تمثل نقاط المفصلة ونقاط الانعطاف على التوالي. ب: طريقة قياس الثخانة عند زاوية ميل محددة باستخدام ورقة شفافة مسطّرة. ت: العلاقة ما بين الثخانة الحقيقية  $t_\alpha$  والثخانة المأخوذة بشكل مواز للمستوي المحوري (Ramsay and Huber, 1987).



شكل (12-4): تحديد ثخانة الطبقة عند زاويتي الميل  $0^\circ$  و  $30^\circ$ .

ح- تسجل النتائج في اللوحة (1-12) التالية:

$\alpha$	$t_\alpha$	$t'$
10°		
20°		
30°		
40°		
50°		
60°		
70°		
90°		

اللوحة (1-12): تسجيل قيم الثخانات المسجلة.

خ- يوضع بعد ذلك مخطط بياني لعلاقة  $t'_\alpha$  (المحور الإحداثي الشاقولي) مع  $\alpha$  (المحور الإحداثي الأفقي). ثم يكرر ذلك من أجل القيم الأخرى لـ  $\alpha$ ، ليصار بعد ذلك إلى رسم منحنى متواصل يعبر عن علاقة  $t'_\alpha$  مع  $\alpha$ . وتكون المنحنيات مختلفة من أجل نماذج الطيات المختلفة (شكل 2-12).

يلاحظ من هذا المخطط (شكل 2-12) أن نموذج الطية المتوازية يبدي ثخانة حقيقية ثابتة عبر الطبقة المطوية، حيث تكون  $t'_\alpha = 1$  من أجل قيم  $\alpha$  كافة (شكل 2-12). وفي حال الطيات المتشابهة فإن:

$$T_\alpha = T_0 = t_0$$

ونلاحظ من الشكل (2-12-3 ت) أن:

$$t_\alpha = T_\alpha \cos \alpha$$

وبالربط ما بين العلاقتين السابقتين نجد:

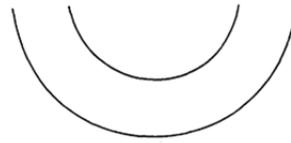
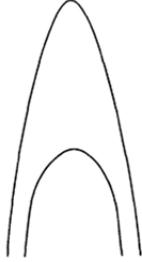
$$t'_\alpha = \cos \alpha$$

يؤدي منحنيًا  $t'_\alpha = 1$  و  $t'_\alpha = \cos\alpha$  إلى تقسيم الحقل الذي يصف شكل الطيات إلى أجزاء (شكل 12-2). ففي صف الطيات 1A تكون النخانة الحقيقية عند الأجنحة أكبر منها عند المفصلة. أما صفوف الطيات 1C و 2 و 3 فتبدي كلها ترققاً عند الأجنحة، غير أن الصف 1C يبدي ترققاً أقل منه في الطيات المتشابهة الحقيقية (صف 2)، بينما يبدي الصف 3 ترققاً أكبر.

### 3.12. التمارين:

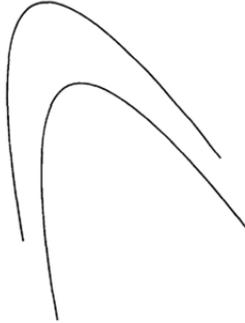
#### 1.3.12. التمرين الأول:

صنّف الطيات الآتية باستخدام طريقة تغير النخانة (شكل 12-5).



ب:.....

أ:.....



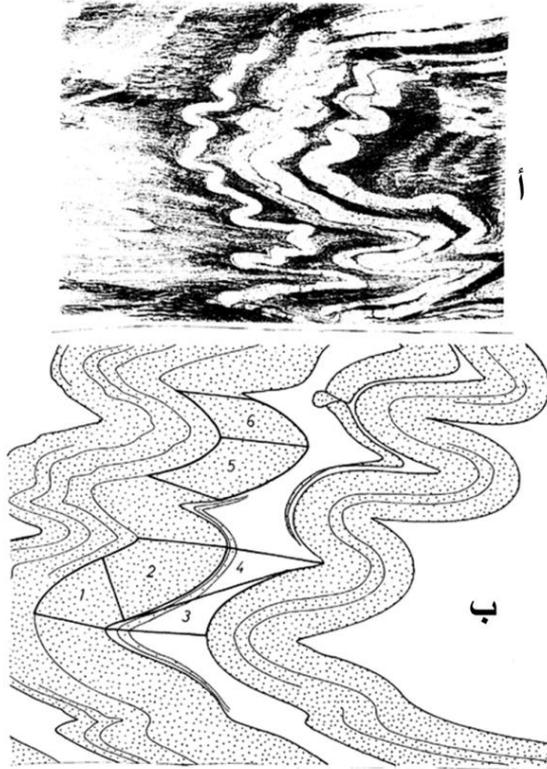
ث:.....

ت:.....

شكل (12-5): المقاطع المستخدمة في التمرين الأول.

### 2.3.12. التمرين الثاني:

يبين الشكل (12-6) شريحة رقيقة لرواسب باليوزوية مطوية بشدة مؤلفة من تناوب سيلت (اللون الباهت) والأردواز الغضاري (اللون القاتم). وقد تم تكبير جزء من هذا المقطع حيث مُيز السيلت بالنقط. كما تم تمييز الخطوط الواصلة بين المفاصل والخطوط الواصلة بين نقاط الانعطاف في بعض الطيات، وقد أُشير إلى ستة قطاعات من الطيات (1 إلى 6). والمطلوب: إنشاء مخطط العلاقة  $t_{\alpha}' / \alpha$  لكل من القطاعات الستة. قارن القطاعين 1 و 2 العائدين لطبقة السيلت مع القطاعين 3 و 4 العائدين لطبقة الأردواز. ماهي أهم الفروقات ما بين أنماط الطيات؟ ثم قارن أنماط الطيات في القطاعات 1 و 2 و 5 و 6 العائدة للطبقة نفسها، ما هو سبب هذه التغيرات باعتقادك؟



شكل (12-6): مقطع رقيق Thin section في رواسب مطوية، للاستخدام في التمرين الثاني (Ramsay and Huber, 1987).



## الباب الرابع - الفصل الثالث عشر

### تصنيف الطيات بطريقة متساويات الميل Dip Isogon Method

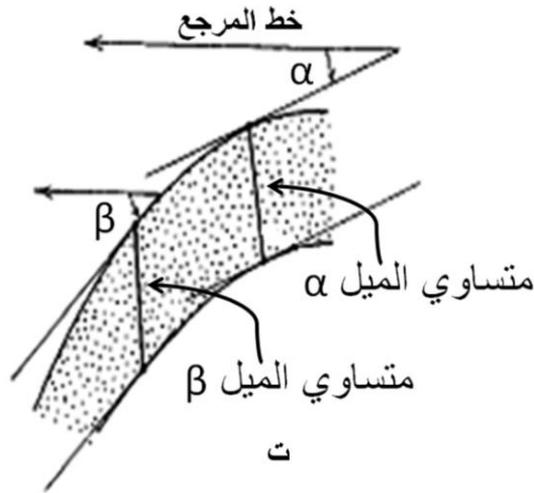
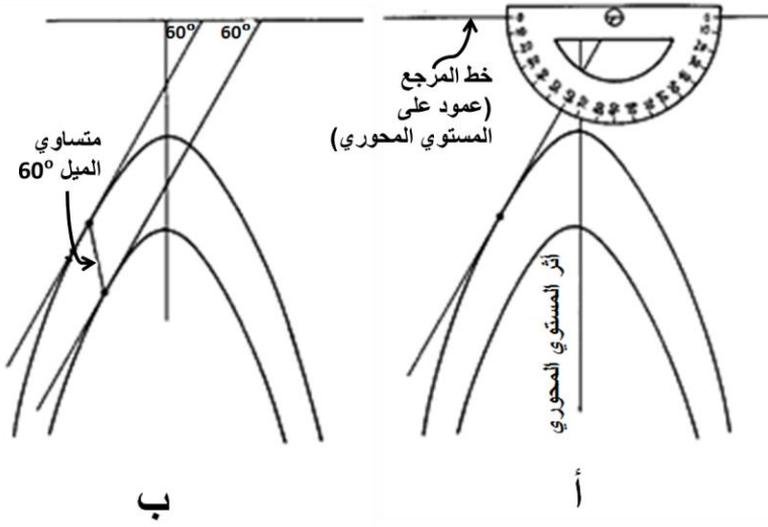
#### 1.13. مدخل:

إن العلاقة الهندسية بين السطوح المطوية المتجاورة مهمة عند تحديد شكل الطية، وهي تعتمد على التقوس النسبي لسطحي الطبقة وعلى المسافة النسبية بينهما. وتتمثل الطريقة البسيطة لوصف هذه العلاقة بإنشاء مماسات متساوية الميل على السطحين المحددين للطبقة المدروسة. ويمكن تعريف "متساويات الميل" Dip Isogons بأنها مستقيمت تريط بين نقاط متساوية الميل موجودة على السطح الخارجي والداخلي للطبقة المطوية، ويمكن تصنيف الطيات بحسبها (Ramsay and Huber, 1987).

#### 2.13. إنشاء متساويات الميل

يمكن إنشاء هذه المستقيمت بشكل تخطيطي كما يلي شكل (13-1 - أ، ب، ت):

- حدد مستوي المقطع المراد دراسته للطية (مقطع متعامد مع محور الطية).
- يتم تدوير مقطع الطية لتأخذ شكل محدب قائم.
- حدد خطأ مرجعياً يتمثل بالمماس المار من نقطة المفصلة للسطح المطوي والمتعامد مع المستوي المحوري (خط المرجع صفر في هذه الحالة، شكل 13-1 - أ).
- ترسم مماسات على جانبي الطبقة المطوية بزوايا محددة مع خط المرجع (شكل 13-1 - ب).
- يتم وصل النقطتين اللتين توجدان على سطحي الطبقة والمتساويتين بقيمة الميل بخط مستقيم: مثل: متساوي الميل  $30^0$  (dip isogon  $30^0$ ) أو متساوي الميل  $45^0$  (dip isogon  $45^0$ ).
- تُنشأ متساويات ميل أخرى عبر الطية وذلك بفواصل زاوية محددة (شكل 13-1 - ت).



شكل (13 - 1): إنشاء متساويات الميل: (أ) رسم مماسات عند زوايا محددة، (ب) رسم متساويات الميل، (ت) إنشاء متساويات الميل بقيمة  $\alpha$  و  $\beta$ .

### 3.13. تصنيف الطيات بحسب متساويات الميل

إن نموذج متساويات الميل (متوازية أو متقاربة أو متباعدة) يعكس اختلافات في شدة التقوس للقوس الخارجي أو الداخلي للطبقة المطوية، معطياً بذلك أساساً مناسباً لتصنيف الطيات (Ramsay and Huber, 1987).

هناك ثلاثة أصناف للطيات بحسب نموذج متساويات الميل (شكل 13-2):

- الصف 1 (Class 1): متساويات الميل المتقاربة **Convergent isogons**، حيث تتقارب متساويات الميل باتجاه نواة الطية، وتكون شدة التقوس للقوس الخارجي للطبقة المطوية أقل من تلك العائدة للقوس الداخلي، أي أن شدة تقوس السطوح المتتالية تزداد باتجاه القوس الداخلي للطية. وبحسب شدة التقارب يمكن تقسيم الصف 1 إلى ثلاثة صنفيات:

• صنف 1A (Sub-class 1A): تقارب شديد، وتتميز بأن ثخانات الطبقة المطوية في المفاصل أقل منها في الأجنحة (الطيات رقيقة المفصلة). ويتقارب أثر الطبقة بدءاً من الأجنحة باتجاه المفصلة بشكل واضح. أي أن متساويات الميل تأخذ ترتيباً مروحياً شديداً الواضح.

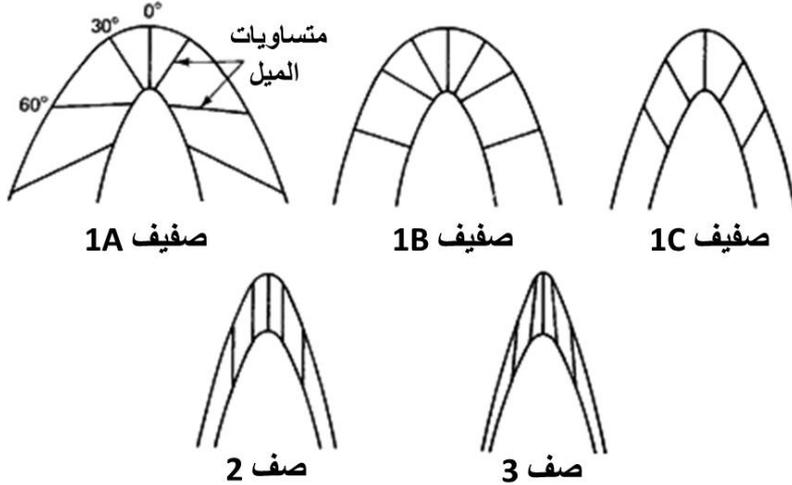
• صنف 1B (Sub-class 1B): طيات متوازية، حيث تكون متساويات الميل متعامدة مع سطحي التطبق، وتبدي ترتيباً مروحياً واضحاً.

• صنف 1C (Sub-class 1C): ضعيف التقارب، حيث يكون تقوس السطح الداخلي أكبر منه للسطح الخارجي، غير أن المسافة ما بين القوسين تكون أكبر ما يمكن عند المفصلة. لنجد بالتالي أن طول متساويات الميل القريبة من المستوي المحوري أكبر من تلك الموجودة في مجال الأجنحة.

- الصف 2 (Class 2): متساويات ميل متوازية **Parallel isogons**، حيث تتساوى شدة التقوس لكلا السطحين الخارجي والداخلي للطبقة المطوية (طية متشابهة).

- الصف 3 (Class 3): متساويات ميل متباعدة **Divergent isogons**، حيث تتباعد متساويات الميل باتجاه نواة الطية، لأن شدة تقوس القوس الخارجي أكبر من تلك العائدة للقوس الداخلي، وتكون ثخانة الطبقة المطوية في المفصلة أكبر منها في الأجنحة.

يكون نموذج متساويات الميل معبراً بشكل خاص حينما يرسم من أجل مجموعة من الطبقات المطوية المتتالية والمختلفة فيما بينها من حيث الشكل، حيث يصبح بالمستطاع تمييز صفوف الطبقات المطوية الموجودة في بنية واحدة منفردة.



شكل (13- 2): تصنيف الطيات باستخدام متساويات الميل (Ramsay and Huber, 1987).

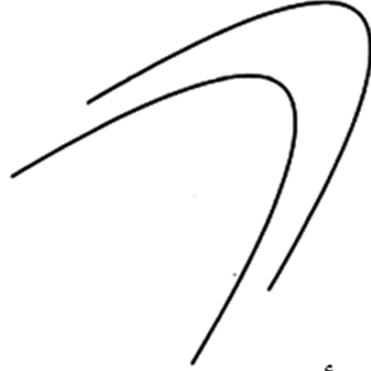
4.13. التمارين:

1.4.13. التمرين الأول:

صنف كلاً من الطيات الآتية والموضحة مقاطعها العرضية في الشكل (13- 3) وذلك باستخدام طريقة متساويات الميل.



ب:-----



أ:-----



د:-----

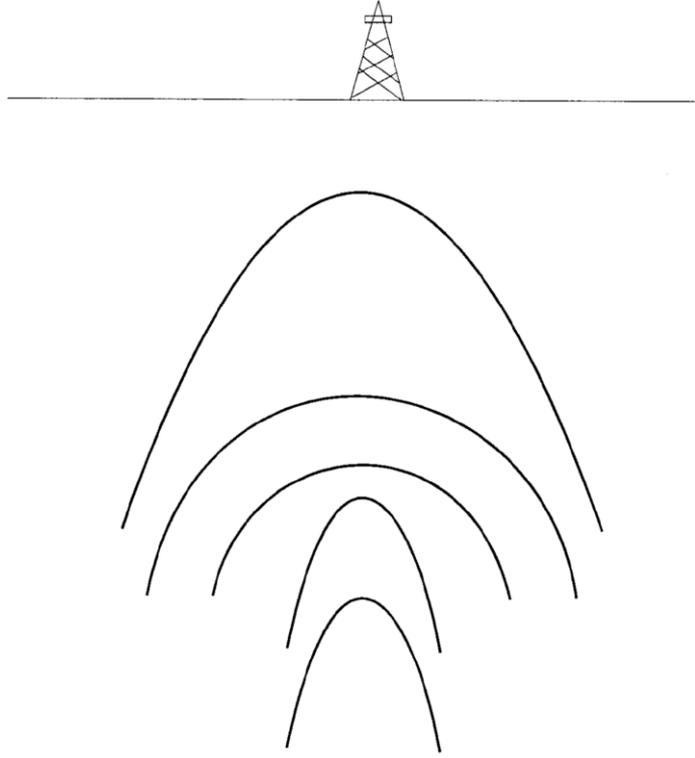


ج:-----

شكل (13-3): المقاطع العرضية للطيات المستخدمة في التمرين الأول.

### 2.4.13. التمرين الثاني:

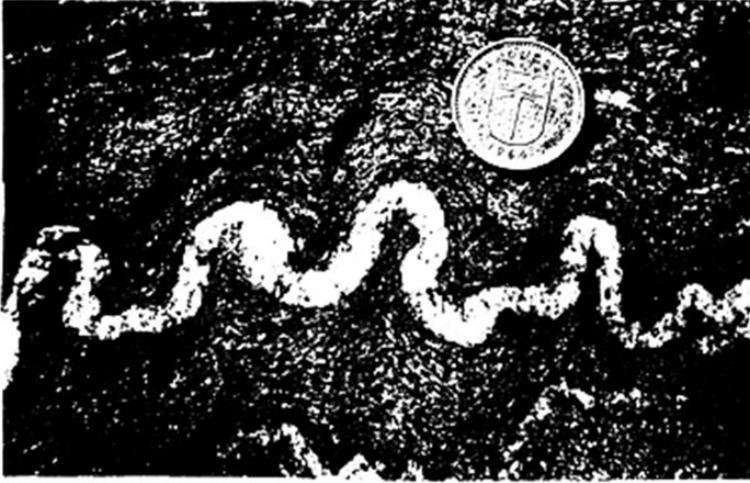
يمثل المخطط التالي (شكل 13-4) مقطعاً عرضياً لمتتالية من الطبقات المطوية. حدد الصفوف المختلفة للطيات التي تؤلف البنية الرئيسية، وذلك باستخدام طريقة متساويات الميل.



شكل (13-4): المقطع العرضي المستخدم في التمرين الثاني.

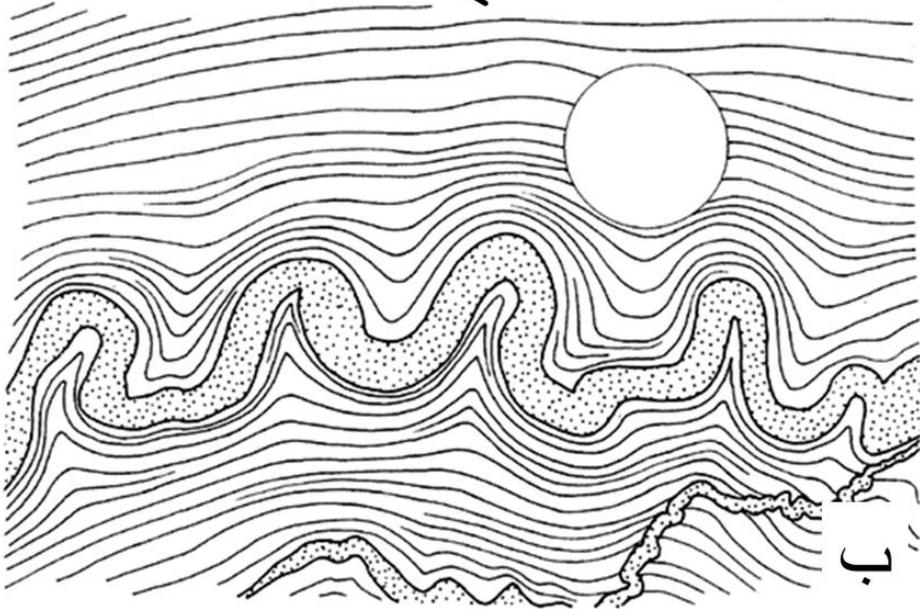
#### 1.4.12. التمرين الثالث:

يبين الشكل التالي (شكل 13-5) عرقاً مؤلفاً من الكوارتز والصفاح ومطوياً بنمط الطي الجبالي Ptygmatic fold في أمية من الغنايس الغرانيتي. أنشئ منساويات الميل بفاصل  $20^\circ$  على امتداد هذا العرق المطوي، وصنف الطيات في أجزائه المختلفة.



أ

مستقيم مرجعي للميل

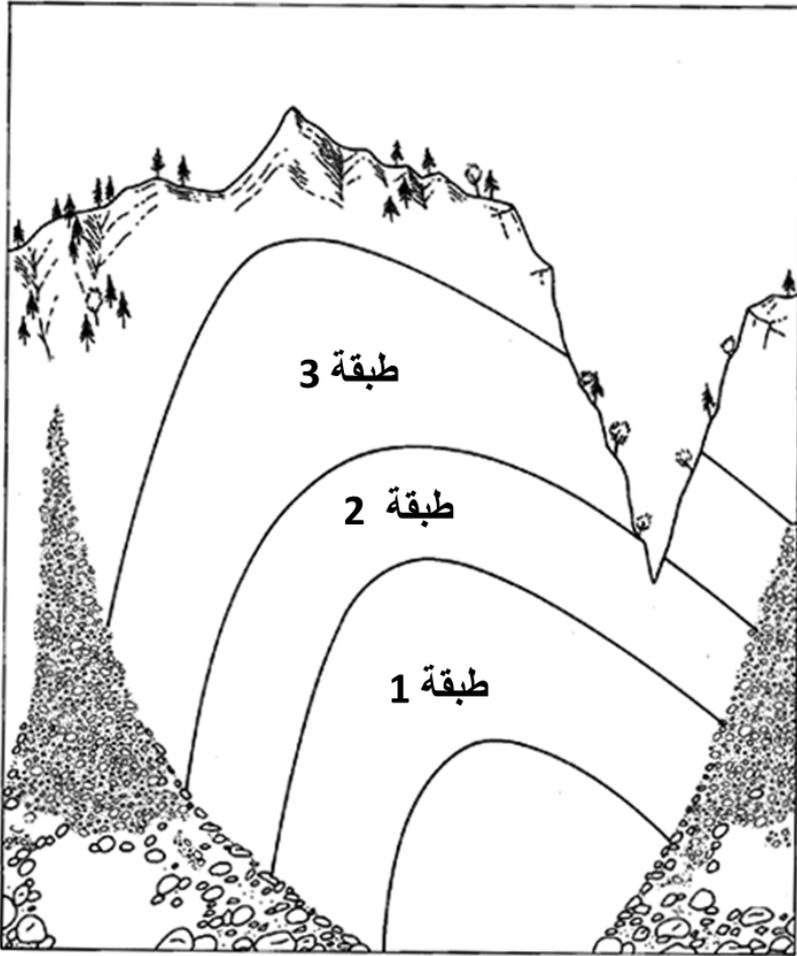


ب

شكل (13 - 5): عرق مطوي من الكوارتز للاستخدام في التمرين الثالث  
(Ramsay and Huber, 1987). أ: صورة للعينة، ب: شكل تخطيطي للعينة.

#### 4.4.13. التمرين الرابع:

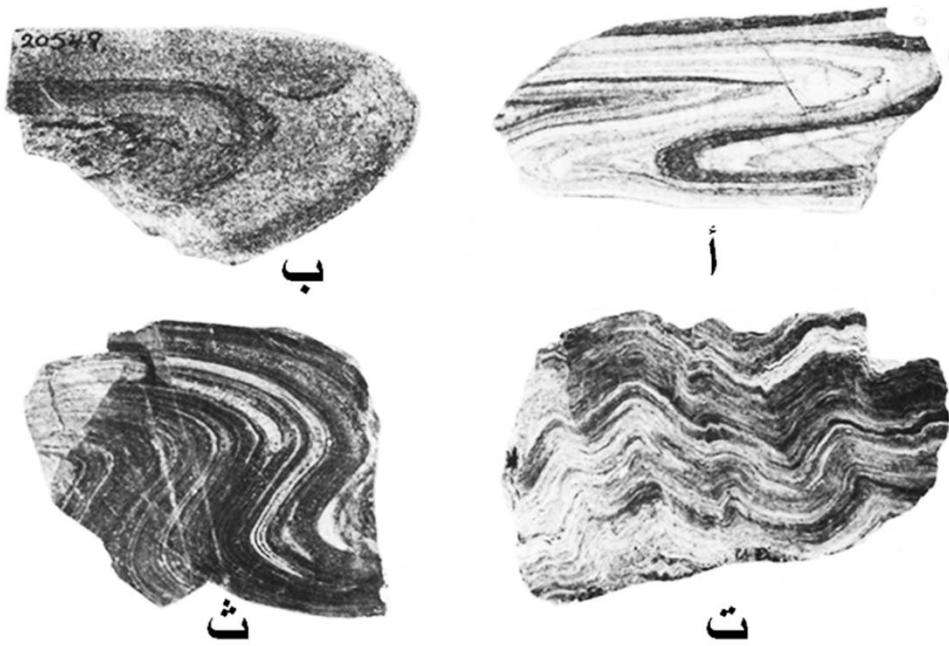
يبين الشكل (13- 6) مخططاً لمقطع عرضي لمجموعة من الطبقات المطوية والمنكشفة على جانب أحد الطرقات. ارسم متساويات الميل بفاصل  $10^0$  لكل من الطبقات الثلاث، ثم بيّن الصف الذي تنتمي إليه كل طبقة.



شكل (13- 6): مخطط حقلي لتكشف طبقات مطوية للاستخدام في التمرين الرابع (Rowland 1986).

### 5.4.13. التمرين الخامس:

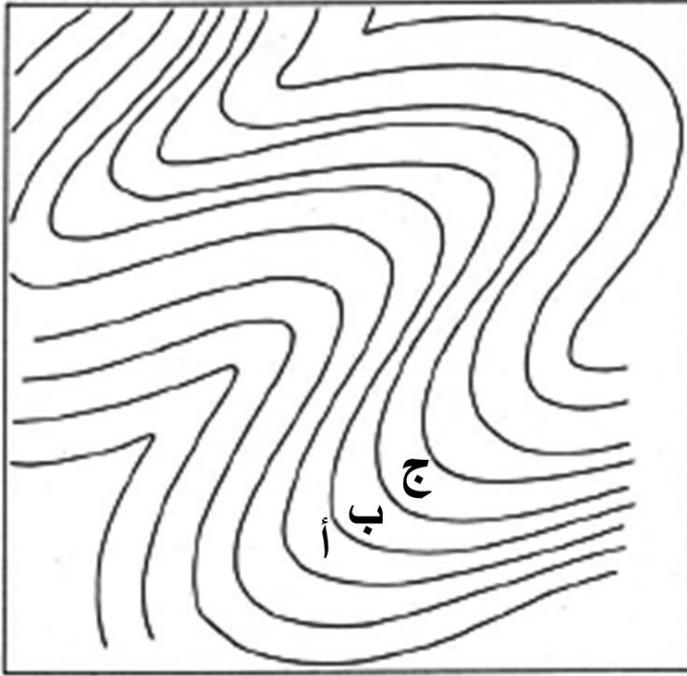
يتضمن الشكل (7-13) صوراً لأربع قطع صخرية. حاول تحديد نمط الطيات التي تمثلها كل قطعة من هذه القطع وذلك من دون رسم متساويات الميل في مرحلة أولى، ثم ضع ورقة شفافة فوق كل قطعة وارسم بعضاً من متساويات الميل وبيّن ماهو الصف الذي تنتمي إليه كل طية.



شكل (7-13): صور لعينات صخرية تتضمن طيات صغيرة للاستخدام في التمرين الخامس (Rowland 1986).

### 6.4.13. التمرين السادس:

ارسم متساويات الميل للطبقات أ و ب و ج الموضحة في المقطع العرضي التالي (شكل 13- 8)، ثم بين نمط الطي الخاص بكل منها.



شكل (13- 8): مقطع عرضي لطبقات مطوية للاستخدام في التمرين السادس (Ragan 2009).

## الباب الخامس - الفصل الرابع عشر

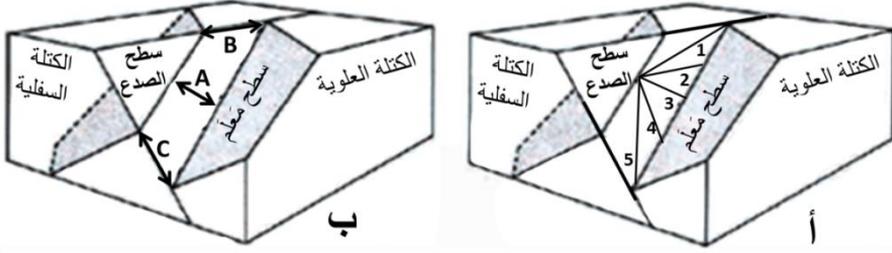
### الصدوع Faults وإزاحاتها Displacements

#### 1.14. مدخل

الصدع كسر يصيب الكتل الصخرية مؤدياً لإزاحتها بشكلٍ موازٍ لسطحه. وتتراوح قيم هذه الإزاحات ما بين ملمترات وعدة مئات من الأمتار، وقد تصل إلى مئات الكيلومترات، كما في حال صدوع الانزياح الجانبي. وتختلف الوضعيات الفراغية للصدوع، فقد يكون سطح الصدع شاقولياً أو أفقياً أو مائلاً، كما يمكن أن يكون مستوياً أو مقوساً. ويسبب التصدع في كثير من الحالات تهشيماً أو طحناً للصخور في مجاله ما يؤدي إلى تكوّن ما يسمى "صخور الصدع Fault rocks مثل البريش و الميلونيت.

#### 2.14. ما الفرق ما بين الانزلاق (الرمية) والانفصال؟

تتضمن الإزاحة Displacement التي تحصل على مستوي الصدع مصطلحين أساسيين هما الانزلاق Slip والانفصال Separation. ويمكن تعريف الانزلاق على أنه الإزاحة النسبية بين نقطتين كانتا متجاورتين قبل التصدع (شكل 14-1 أ)، ولها عدد من المركبات. أما الانفصال فيعرف على أنه المسافة بين سطحين مزاحين، ويمكن قياسه على سطح الصدع بشكل متعامد مع خط القطع Cut-off line (الناجم من تقاطع سطح الطبقة مع سطح الصدع، أي أثر الطبقة على سطح الصدع)، غير أنه يقاس غالباً بشكل مواز لاتجاه الصدع (انفصال اتجاهي) أو لميله (انفصال ميلي) (شكل 14-1 ب). وهناك أيضاً الانفصال الطبقي (الستراتغرافي) الذي يقاس بشكل متعامد مع الطبقات المزاحة، وليس على سطح الصدع.



شكل (14 - 1): سطح مَعْلَم marker plane تعرض للانزياح على سطح صدعي. (أ) متجهات انزلاق ممكنة تشير إليها الأرقام 1 - 5، (ب) A: انفصال، B: انفصال اتجائي، C: انفصال ميلي. يلاحظ هنا أن الانفصال يقاس ما بين خط قطع الكتلة العلوية وخط قطع الكتلة السفلية بغض النظر عن متجهة الانزلاق الحقيقية (Ragan, 2009).

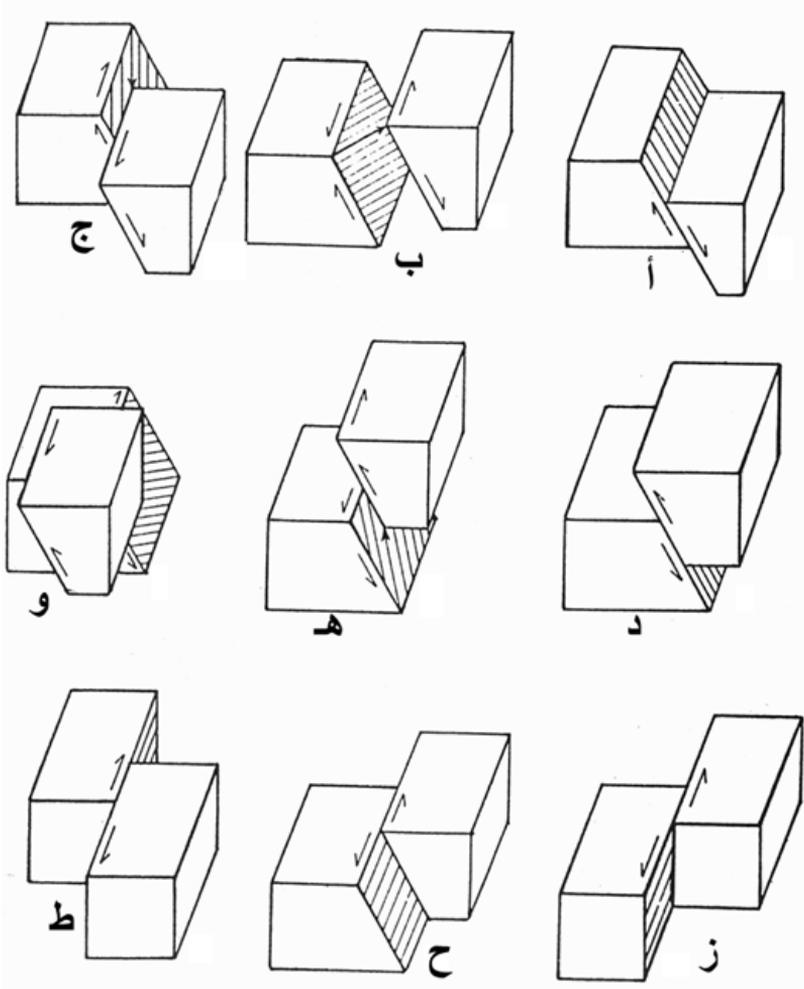
يعد الانزلاق المفهوم الأكثر أهمية لدى دراسة هندسية الصدوع. وسنعالج في هذه الفقرة تلك الصدوع المسماة "صدوع الانتقال" Translational faults، والتي تتميز بأن متجهة الحركة النسبية ذات قَدْرٍ واتجاهٍ ثابتين في كل أجزاء السطح الصدعي، أو في جزء محدد منه. وتبين اللوحة (14 - 1) والشكل (14 - 2) أنماط صدوع الانتقال.

اللوحة (14 - 1): أنماط صدوع الانتقال

Normal slip faults	صدوع انزلاق عادية	صدوع الانزلاق الميلي
Reverse slip faults	صدوع انزلاق مقلوبة	Dip slip faults
Right-slip faults	صدوع انزلاق يمينية	صدوع الانزلاق الاتجائي
Left-slip faults	صدوع انزلاق يسارية	Strike slip faults
	تترابط فيها مصطلحات الانزلاق الميلي والاتجائي	صدوع الانزلاق المنحرف Oblique slip faults

تختصر تسمية صدوع الانزلاق الميلي عادةً إلى "صدوع عادية" و "صدوع مقلوبة". كما تختصر تسمية صدوع الانزلاق الاتجائي (صدوع الانزياح الجانبي) لتسمى "صدوع الانزلاق اليميني"

و"صدوع الانزلاق اليساري". وتجب هنا ملاحظة أن الصدوع الأفقية والشاقولية تتطلب معالجة خاصة.



شكل (14-2): الأنماط الرئيسية للصدوع. أ: صدع عادي، ب: صدع عادي منحرف يساري، ج: صدع عادي منحرف يميني، د: صدع مقلوب، هـ: صدع مقلوب منحرف يساري، و: صدع مقلوب منحرف يميني، ز: صدع انزلاق اتجاهاً يساري ذو سطح شاقولي، ح: صدع انزلاق اتجاهاً يساري ذو سطح مائل، ط: صدع انزلاق اتجاهاً يميني.

إن تحديد الانزلاق غير ممكن دوماً وفي كل الحالات، أما الانفصال فأكثر قابلية للقياس. وفي الحقيقة فإن الانفصال الملاحظ في الحقل يمثل الدليل على وجود الصدع. وبذلك فإن التمييز بين هذين المصطلحين ضروري (Ragan, 2009)، لأن الانفصال الملاحظ يمكن أن ينتج من عديد من الاتجاهات الممكنة لمتجهة الانزلاق (شكل 14- 1). وتبين اللوحة (14- 2) المصطلحات المميزة لطبيعة الانفصال Sense of separation.

اللوحة (14- 2): أنماط الانفصال.

بالوقوف فوق مستوي معلم مزاح في إحدى الكتلتين وبالنظر نحو الصدع، نلاحظ أن أثر المعلم المزاح عبر الصدع أصبح نحو اليمين.	الانفصال اليميني Right separation
يصبح أثر المعلم إلى اليسار في الكتلة المقابلة	الانفصال اليساري Left separation
يقع خط قطع مستوي المعلم في الكتلة العلوية تحت خط قطع مستوي المعلم نفسه في الكتلة السفلية، وذلك في مقطع شاقولي.	الانفصال العادي Normal separation
يصبح خط قطع الكتلة العلوية فوق خط قطع الكتلة السفلية.	الانفصال المقلوب Reverse separation

### 3.14. تحليل الانزلاق (الرمية الحقيقية)

يمكن تحليل الرمية الحقيقية net slip (n) إلى مركبات مختلفة (شكل 14- 3)، حيث يعطي تحليلها على مستوي الصدع مركبتين تتمثل أولاهما برمية الاتجاه (s) Strike slip، وتكون موازية لخط اتجاه الصدع، أما ثانيهما فهي رمية الميل (d) Dip Slip التي توازي خط ميل الصدع. كما يمكن تحليل رمية الميل في المستوي الشاقولي، المتعامد مع خط اتجاه الصدع، إلى مركبتين هما الرمية الأفقية Horizontal slip أو (h) Heave وتوازي الأفق، والرمية الشاقولية Vertical slip أو (v) Throw وهي توازي خط الشاقول. ومما سبق نلاحظ مايلي:

$$n = \sqrt{d^2 + s^2}$$

$$d = \sqrt{h^2 + v^2}$$

ونستنتج مما سبق الملاحظات المهمة التالية:

1. إذا كانت  $s = 0$  فإن  $n = d$ ، وهذا يعني أن الصدع عادي أو مقلوب (أو تراكبي)

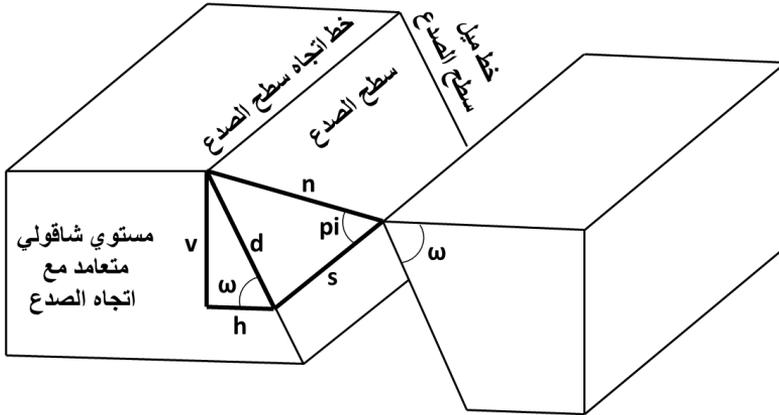
صرف

2. إذا كانت  $d = 0$  فإن  $n = s$ ، وهذا يعني أن الصدع هو صدع انزياح جانبي صرف

3. إذا كانت  $h = 0$  فإن  $v = d$  وهذا يعني أن الصدع شاقولي

4. إذا كانت  $v = 0$  فإن  $h = d$  وهذا يعني أن الصدع يتوضع بشكل افقي

يتعذر في كثير من الأحيان قياس الرميات المختلفة اللازمة لإجراء هذه الحسابات، ما يدعو للحاجة إلى التعامل معها من خلال العلاقات الزاوية المثلثانية.



شكل (14-3): مركبات الرمية الحقيقية.  $n$ : الرمية الحقيقية،  $d$ : رمية الميل،  $s$ : رمية الاتجاه،  $v$ : الرمية الشاقولية،  $h$ : الرمية الأفقية،  $\omega$ : زاوية ميل سطح الصدع،  $\pi$ : زاوية انحدار الخدوش pitch (الزاوية بين الخط الممثل للخدوش وخط اتجاه الصدع مقيسة على السطح الصدعي).

وهكذا فإن رميات الصدوع العادية والمقلوبة الصرفة تتمثل بقيم  $d$  أو  $v$  (شكل 14-3) . وتقع هاتان الرميتان ضمن المقطع الشاقولي المتعامد مع اتجاه الصدع. وتمثل  $d$  في هذه الحالة الرمية الحقيقية، بينما تمثل  $v$  مركبتها الشاقولية. وتوجد في صدوع الانزياح الجانبي (صدوع الانزلاق الاتجاهي) رمية الاتجاه  $s$  فقط. وهي تمثل الرمية الحقيقية، بينما تكون  $n$  هي الرمية الحقيقية في صدوع الانزلاق المنحرف.

#### 4.14. تمارين لتحديد مقادير الرميات

##### 1.4.14. تمارين عن صدوع (عادية ومقلوبة) متعامدة مع اتجاه الطبقات

###### • تمرين محلول

وجد أثناء العمل الحقلّي أن الوضعية الفراغية لطبقة حجر كلسي هي  $180/30W$  وقد أصيبت هذه الطبقة بصدع عادي حددت وضعيته الفراغية فكانت  $090/65S$ . وقد أدى هذا الصدع إلى انزياح ظاهري ضمن المقطع الأفقي بمقدار  $sh = 30m$ . المطلوب تحديد الرمية الشاقولية  $v$  والرمية الأفقية  $h$  ورمية الميل  $d$  (مقياس الرسم 1:1000)

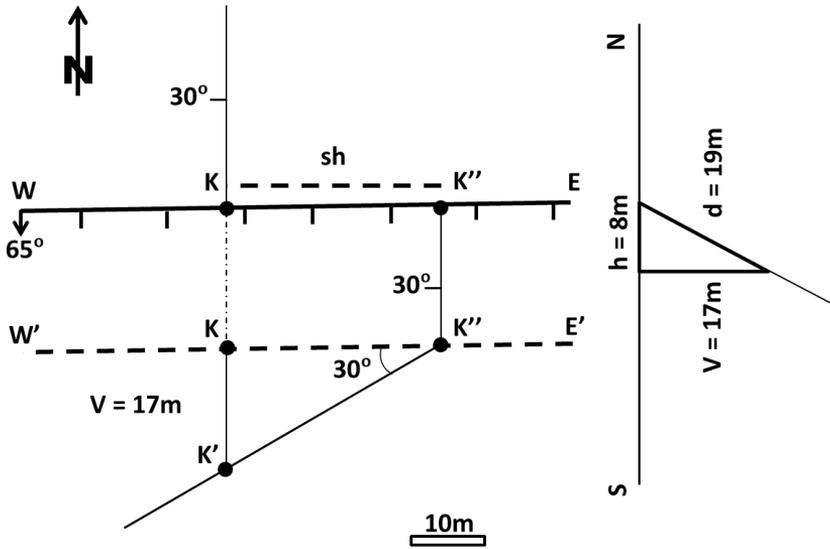
**الحل:**

أ- يتم إنشاء المقطع الأفقي من خلال تحديد الوضعيات الفراغية للطبقة العائدة للكتلة السفلية وللصدع (شكل 14-4). ويلاحظ أن الانزياح الظاهري للطبقة العائدة للكتلة العلوية حدث نحو الشرق بمقدار  $30m$ .

ب- تحديد الرمية الشاقولية  $v$ :

توجد علاقة مباشرة ما بين  $v$  و  $sh$  ضمن مقطع شاقولي ذي اتجاه شرق-غرب (المقطع  $E'-W'$ ، شكل 4 - 14) المواز للصدع والمتعامد مع التطبيق. وترسم زاوية ميل الطبقات  $30^\circ$  في النقطة  $K$ . ثم تسقط نقطة  $K$  بعد ذلك (وهي نقطة تقاطع أثر الطبقة العائدة للكتلة السفلية مع الصدع) على خط المقطع، واعتباراً من النقطة الأخيرة ( $K$ ) يتم إنشاء عمود على خط المقطع، يلاقي أثر الطبقة المائلة في  $K'$ . إن  $KK'$  يساوي قيمة الرمية الشاقولية ( $v = 17m$ ). ويمكن اختبار دقة الإنشاء الهندسي بحساب  $v$  من خلال العلاقة:  $v = \tan 30 \cdot sh$ .

ت- تحديد الرمية الأفقية  $h$  ورمية الميل  $d$ : يتم إنشاء مقطع شاقولي متعامد مع خط اتجاه الصدع، حيث ترسم زاوية ميل الصدع ( $65^\circ$ ) مع خط المقطع. ثم يُنشأ خط متعامد مع خط المقطع بحيث يلاقي أثر الصدع ويكون طوله مساوياً لـ  $17$  م. فيكون وتر المثلث القائم الناشئ مساوياً لـ  $d = 19$  م. أما الضلع القائم الثاني فيساوي  $h = 8$  م.



شكل (14 - 4): التمرين المحلول (Krausse et al., 1978).

#### 1.1.4.14. التمرين الأول:

أصببت الطبقة ذات الوضعية الفراغية  $120/45SW$  بصدع ذي وضعية فراغية  $30/50SE$  (دون رمية اتجاه)، ما أدى إلى إزاحتها ظاهرياً بمقدار  $60$  م نحو  $SE$ . والمطلوب بيان نوع الصدع إضافة إلى تحديد قيم  $h$  و  $d$ .

#### 2.1.4.14. التمرين الثاني:

أصببت طبقة ذات اتجاه  $E-W$  وميل  $30$  نحو  $N$  ( $270/30N$ ) بصدع ذي اتجاه  $N-S$ ، ما أدى إلى انشطارها إلى كتلتين، حيث أزيحت الكتلة الغربية نحو الشمال بالنسبة للكتلة الشرقية

ظاهرياً بمقدار  $sh = 50$  م . وقد تم من خلال الدراسة الحقلية تحديد الوضعية الفراغية للخدوش على سطح الصدع فكانت  $270/50W$ . المطلوب تحديد زاوية ميل الصدع ونوعه، وتحديد قيم  $v$  و  $h$  و  $d$  (مقياس الرسم 1:1000).

#### 3.1.4.14. التمرين الثالث:

أزاحت طبقة (SE 070/35) موجودة في الكتلة العلوية لصدع نحو SE بالنسبة للكتلة السفلية، وبمقدار  $sh = 40$  م. وقد وجد أن سمت اتجاه الصدع هو  $160^\circ$ ، وأن الوضعية الفراغية للخدوش  $250/60^\circ$ . والمطلوب بيان نوع الصدع ووضعيته الفراغية بالإضافة إلى تحديد  $v$  و  $h$  و  $d$ .

#### 2.4.14. تمارين عن صدوع موازية لاتجاه الطبقات

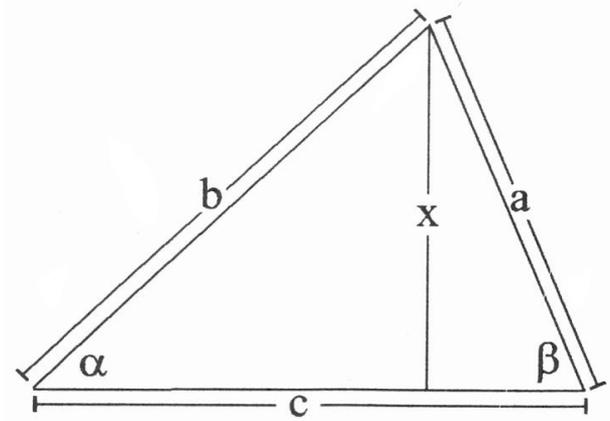
##### • تمرين محلول

تم إنشاء نفق أفقي باتجاه شرق - غرب. وقد تقاطع هذا النفق مع صدع ذي اتجاه شمال - جنوب، وميل بمقدار  $40^\circ$  نحو الغرب ( $180/40W$ ). كما تقاطع هذا النفق مع طبقة حجر رملي بعد مسافة 500 م إلى الشرق من نقطة تقاطعه مع الصدع. وقد وجد أن هذه الطبقة ذات اتجاه شمال - جنوب أيضاً وتميل بزاوية  $30^\circ$  نحو الشرق ( $000^\circ/30^\circ E$ ). وقد وجدت الطبقة نفسها مرة أخرى وبالوضعية الفراغية نفسها ( $000^\circ/30^\circ E$ ) بعد مسافة 700 م إلى الغرب من نقطة تقاطع النفق مع الصدع. وتبين لدى دراسة سطح الصدع على الكتلة السفلية أن الخدوش ترتفع من الشمال نحو الجنوب مكونة زاوية مقدارها  $30^\circ$  مع خط اتجاه الصدع. المطلوب: بيان نوع الصدع وحساب الرمية الحقيقية ورمية الميل ورمية الاتجاه والرمية الأفقية والرمية الشاقولية.

##### تمهيد للحل:

إن قانون الجيوب الذي يطبق لحل أي مثلث يفيد في حل هذا التمرين. وهو ينص على أن جيوب الزوايا تتناسب مع الأضلاع المقابلة لكل منها. وكما نلاحظ من الشكل (14 - 5)، إذا كان  $abc$  مثلثاً وكان  $x$  متعامداً مع  $c$  فإن:

$$\begin{aligned}\sin \beta &= x/a \\ \sin \alpha &= x/b \\ \sin \alpha / \sin \beta &= \frac{x/b}{x/a} \\ \sin \alpha / \sin \beta &= xa/xb \\ \sin \alpha / \sin \beta &= a/b\end{aligned}$$



شكل (14-5): مثلث يوضح قانون الجيوب (انظر النص).

**الحل:**

ننشئ مقطعاً شاقولياً باتجاه E-W، أي عمودياً على اتجاه الصدع (يتعامد أيضاً مع اتجاه الطبقات) وذلك من خلال المراحل التالية (شكل 14-6 - أ):

أ- ننشئ خطاً أفقياً ذا اتجاه E-W يمثل النفق الأفقي (الخط الممتد عبر A و

B و C).

ب- ننشئ مستقيماً يمثل أثر الصدع الذي يميل بزاوية 40° نحو الغرب ويتقاطع

مع النفق في النقطة B.

ت- ننشئ مستقيماً يمثل أثر الطبقة وذلك من النقطة C الواقعة شرق B بمسافة

500م، حيث يميل هذا المستقيم بزاوية 30° نحو الشرق فيلاقي أثر الصدع

في نقطة E.

ث- ننشئ مستقيماً ممثلاً لأثر الطبقة أيضاً ويمر من النقطة A الواقعة غرب B بمسافة 700م فيلاقي أثر الصدع في نقطة D.

إن طول المستقيم ED يمثل مقدار رمية الميل التي يمكن تجزئتها في هذه الحالة إلى BE و BD. وبحسب قانون الجيوب، نجد في المثلث ABD أن:

$$\sin 110 / \sin 30 = AB / BD$$

$$BD = AB \cdot \sin 30 / \sin 110$$

وفي المثلث BCE

$$\sin 110 / \sin 30 = BC / BE$$

$$BE = BC \cdot \sin 30 / \sin 110$$

$$ED = BD + BE = 638$$

رمية الميل  $d = 638$  م

أما الرمية الشاقولية EF فتحسب من المثلث DEF:

$$\sin 40 = EF / ED = EF / 638$$

الرمية الشاقولية  $v = 410$  م

وتحسب الرمية الأفقية DF من المثلث DEF نفسه

$$\cos 40 = DF / ED = DF / 638$$

الرمية الأفقية  $h = 488$  م

ولحساب مقدار الرمية الحقيقية ورمية الاتجاه ننشئ المثلث القائم EDH المنطبق على سطح الصدع (شكل 14- 6 - ب)، حيث يمثل الضلع ED فيه رمية الميل المحسوبة سابقاً (638 م)، بينما يمثل الضلع EH رمية الاتجاه. أما الزاوية EHD فتمثل زاوية الخدوش (30°)، ويساوي طول HD مقدار الرمية الحقيقية. ونجد بالتالي أن:

$$\tan 30 = ED / EH$$

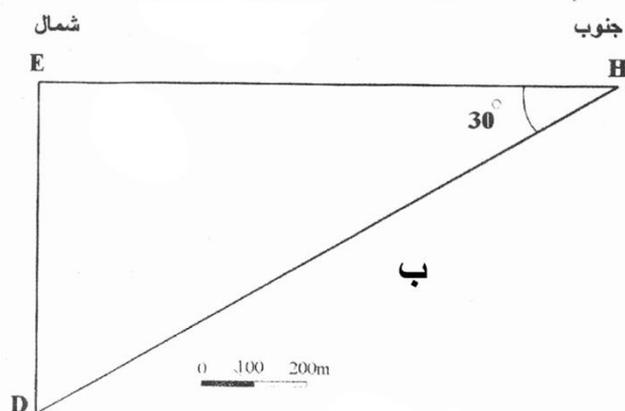
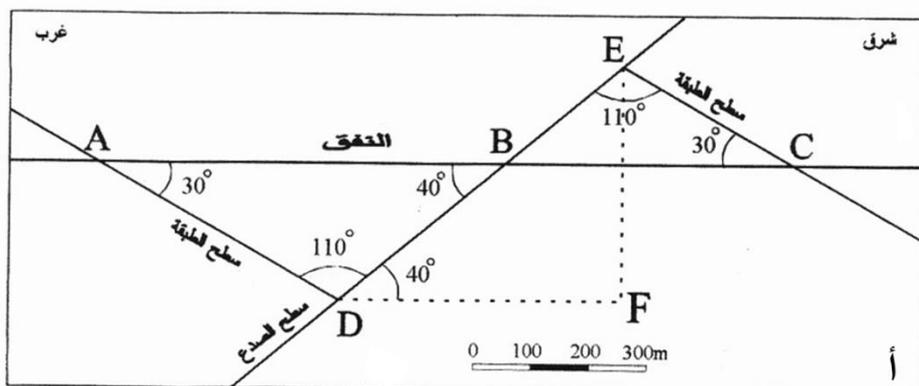
$$EH = 638 / \tan 30$$

رمية الاتجاه  $s = 1105$  م

$$\sin 30 = ED / DH$$

$$DH = 638 / \sin 30$$

الرمية الحقيقية  $n = 1276$  م



شكل (14-6): التمرين المحلول. أ: مقطع عرضي متعامد مع اتجاه الصدع ومع اتجاه الطبقات، ب: مركبات الرمية كما ترى على سطح الصدع (Billings, 1972).

#### 1.2.4.14. التمرين الأول:

أصيبت طبقة بصدع يميل بزاوية  $45^\circ$  نحو الشمال الشرقي ( $315/45^\circ\text{NE}$ ). فإذا علمت أن هذه الطبقة تميل بزاوية  $30^\circ$  نحو الجنوب الغربي ( $135/30^\circ\text{SW}$ )، وأن الكتلة العلوية تحركت مسافة 1000م بشكل مواز لخط ميل الصدع ونحو الأسفل بالنسبة للكتلة السفلية، بيّن نوع الصدع واحسب مقادير الرميات المختلفة الممكنة.

#### 2.2.4.14. التمرين الثاني:

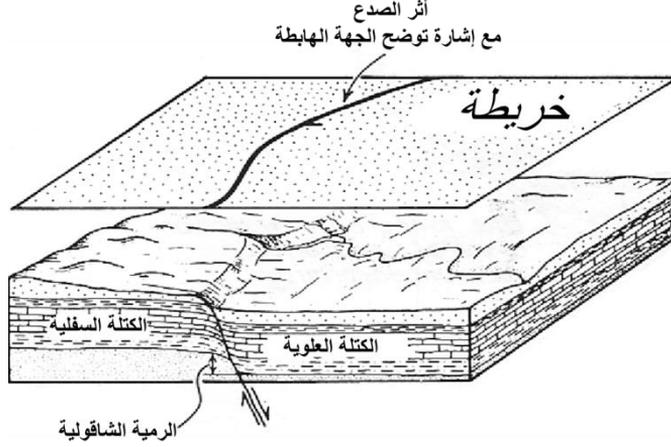
أصببت طبقة حجر كلسي تميل بزاوية  $60^\circ$  نحو SW ( $135/60^\circ$ SW) بصدع يميل بزاوية  $35^\circ$  نحو NE ( $315/35^\circ$ NE). فإذا علمت أن الكتلة العلوية تحركت نحو الأعلى بالنسبة للكتلة السفلية وبشكل مواز لخط ميل الصدع، وأن المسافة بين أثري الطبقة ضمن المقطع الشاقولي وعلى امتداد أثر الصدع تبلغ 100م، بيّن نوع الصدع واحسب مقادير الرميات المختلفة الممكنة.

#### 3.2.4.14. التمرين الثالث:

حُفر نفق باتجاه شمال - جنوب، فتقاطع مع صدع يميل نحو الجنوب بزاوية  $65^\circ$  ( $090/65^\circ$ S). وقد وجد أن الطبقات تميل بزاوية  $35^\circ$  نحو الشمال ( $270/35^\circ$ N)، وأن الكتلة العلوية تحركت مسافة 1500م بشكل منحرف نحو الأسفل والشرق بالنسبة للكتلة السفلية، وأن زاوية الخدوش مع خط الاتجاه تبلغ  $35^\circ$ . المطلوب حساب مقادير الرميات المختلفة الممكنة.

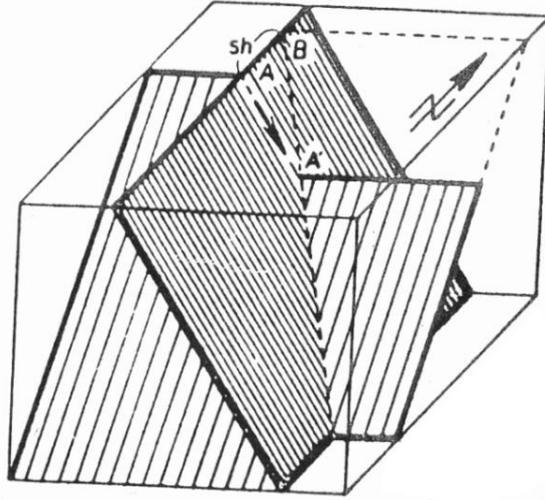
#### 5.14. الانفصال (الرمية الظاهرية) في المقطع الأفقي (الخرائط)

يبدو أن الصدوع من أكثر البنيات صعوبة من حيث التعامل معها في الخرائط. ورغم وضوحها، فإن استنتاج المعلومات عنها من خلال الخرائط يكون بالغ الصعوبة أحياناً، وذلك سواء فيما يتعلق بتحديد قيمة المسافة التي تحركتها الصخور على جانبيها، أو بتحديد اتجاه حركتها. وعلى الرغم من أن الصدوع تعرّف على أنها "مستويات"، غير أن لها عموماً أشكال سطوح منحنية. ومن ناحية أخرى تعامل الصدوع في الخرائط على أنها مستويات منفردة، غير أنها يمكن أن تتشكل من نطاق عريض من الصخور المكسرة، أو من شبكة كسور أصغر. ويسمى تقاطع السطح المنفرد مع الخارطة أو المقطع "أثر الصدع" Fault trace (شكل 14 - 7). وتحدد الوضعية الفراغية لهذا السطح، كما هو الحال بالنسبة لأي سطح آخر، من خلال قيم الاتجاه والميل.

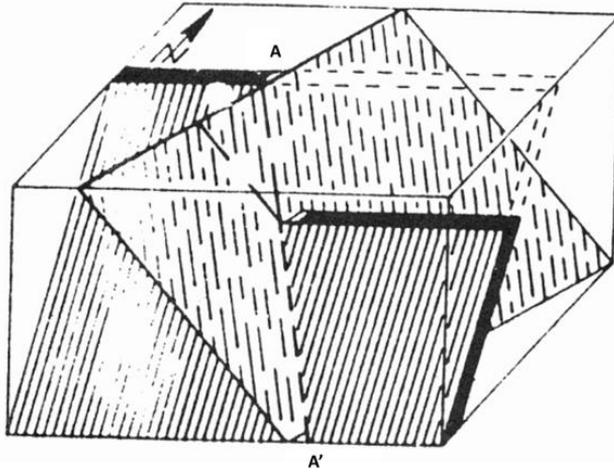


شكل (14- 7): أثر الصدع في الخريطة (Maltman, 1998).

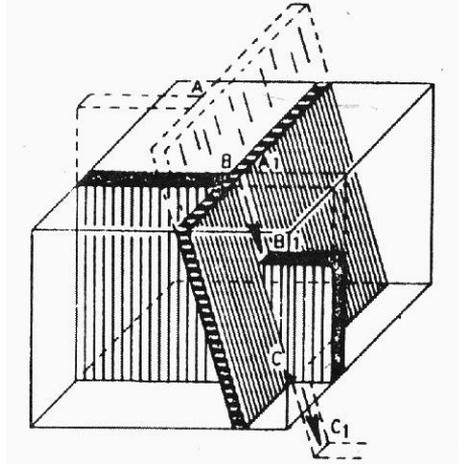
توجد إلى جانب الرمية الحقيقية في صدوع الانزلاق العادي والمقلوب والمنحرف رمية ظاهرية sh تظهر ضمن المقطع الأفقي على شكل انفصال اتجاهي للطبقات بين الكتلة السفلية والعلوية (شكل 14- 8 وشكل 14- 1 - ب). وتكون قيمة sh أصغر كلما صغرت الزاوية بين خط الإزاحة الحقيقية (المتمثل بالخدوش غالباً) وخط القطع (الخط الناتج من تقاطع سطح الصدع مع سطح الطبقة)، وتصبح sh مساوية للصفر عندما يصبح خط الإزاحة موازياً لخط القطع (شكل 14- 9 و 14- 10). وهكذا تظهر sh (انفصال اتجاهي Strike separation) وكأنها رمية اتجاه s، غير أن s غير موجودة حقيقةً في مثل هذه الحالة. لذا لا بد من تحديد قيمة sh (شكل 14- 8) عند وصف الصدوع العادية أو المقلوبة. وكما نرى من الشكل (14- 8) فإن الطبقة أصيبت بصدع أدى إلى هبوط الكتلة العلوية (الشرقية) نحو الأسفل بالنسبة للكتلة السفلية (الغربية)، حيث يبين السهم اتجاه انزياح الكتلة العلوية. يمثل هذا الصدع صدعاً عادياً صرفاً دون رمية اتجاه، أي أن  $s = 0$  و  $d = n$ . ورغم ذلك تبدو الطبقة الهابطة عند تمديدها نحو الأعلى إلى مستوى الطبقة العائدة للكتلة السفلية (الخط المتقطع في الشكل 14- 8) وكأنها مزاحة نحو الشمال على امتداد الصدع (sh في الشكل 14- 8).



شكل (14-8): الرمية الظاهرية sh التي تظهر في المقطع الأفقي لصدع عادي صرف، بينما نلاحظ أن الحركة الحقيقية حدثت موازية لخط ميل الصدع AA'، وبذلك فإن sh تؤدي لظهور الصدع في المقطع الأفقي وكأنه صدع انزياح جانبي أو ذو مركبة انزياح جانبي (Möbus, 1989).



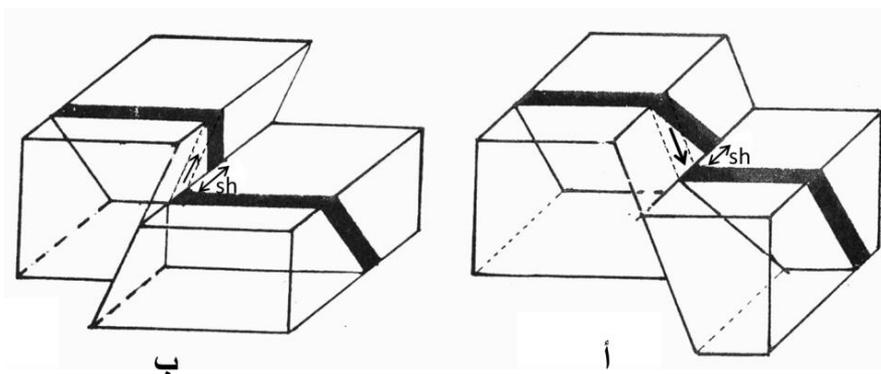
شكل (14-9): صدع عادي منحرف يتوازي فيه اتجاه الحركة مع خط القطع (AA')، وتبدو الطبقة ظاهرياً في المقطع الأفقي وكأنها غير مكسورة (Möbus, 1989).



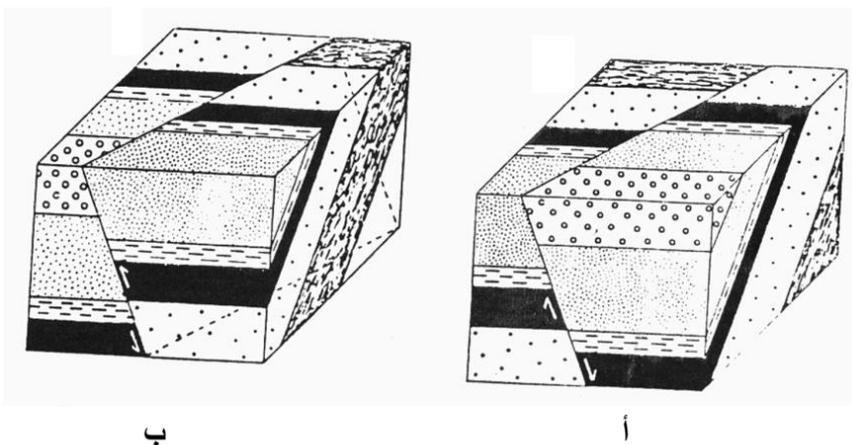
شكل (10 - 14): طبقة شاقولية أصيبت بصدع عادي، وهي تبدو في المقطع الأفقي وكأنها غير مكسورة (الحركة توازي خط القطع) (Möbus, 1989).

يتعلق مقدار الرمية الظاهرية  $sh$  بمقدار الرمية الحقيقية  $n$  (أو  $d$ )، أي بمقدار واتجاه الإزاحة. كما يتعلق أيضاً بزاوية ميل الطبقة، أما زاوية ميل الصدع فلا تؤثر فيه. وكلما كانت الطبقة أقل ميلاً كان مقدار  $sh$  أكبر (مع ثبات قيمة الرمية الحقيقية). ويعود ذلك إلى ازدياد قيمة الزاوية بين خط الإزاحة وخط القطع. أما إذا أصبحت الطبقة أشد ميلاً فإن مقدار  $sh$  يتناقص لتتناقص قيمة الزاوية بين خط الإزاحة وخط القطع. وإذا أصبحت الطبقة شاقولية فإن  $sh = 0$  (شكل 14-10) لأن خط الإزاحة وخط القطع أصبحا متوازيين.

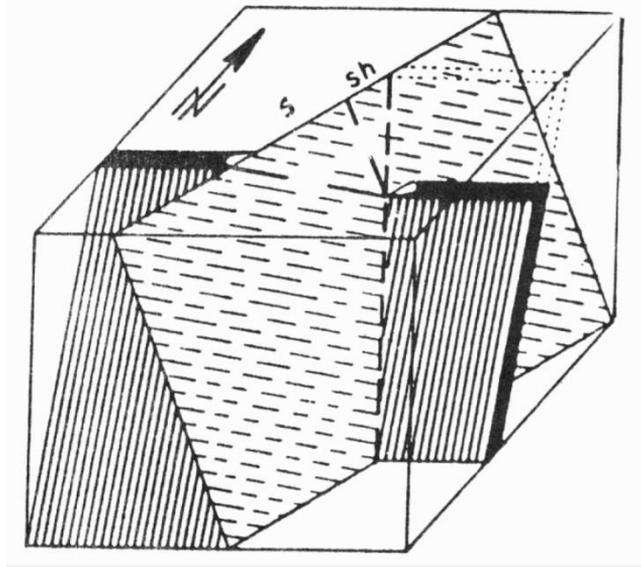
تتعلق جهة الانزياح الظاهري بجهة الحركة أي بنمط الصدوع الصرفة. ويتم الانزياح الظاهري للكثلة العلوية الهابطة في الصدوع العادية بعكس جهة ميل الطبقة (شكل 14-11 - أ و 14-12 - أ). أما في الصدوع المقلوبة الصرفة فيحدث الانزياح الظاهري للكثلة العلوية المزاحة نحو الأعلى باتجاه ميل الطبقة (شكل 14-11 - ب و 14-12 - ب). أما في صدوع الانزلاق المنحرف فإن هناك مركبة رمية الاتجاه  $s$  إضافة إلى المركبة الشاقولية، وبالتالي فإن قيمة الانزياح الجانبي الظاهر في المقطع الأفقي عبر الصدع تساوي  $s+sh$  أو  $s-sh$  (شكل 14-13).



شكل (14 - 11): أ: صدع عادي يُظهر الطبقة المكسورة في الكتلة العلوية وكأنها مزاحة (sh) بعكس اتجاه ميلها. ب: صدع مقلوب يُظهر الطبقة المكسورة في الكتلة العلوية وكأنها مزاحة (sh) باتجاه ميلها.



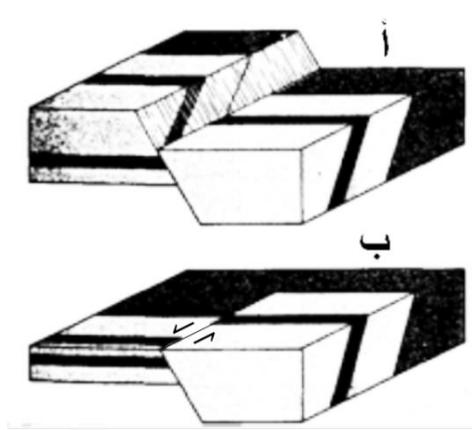
شكل (14 - 12): أ: صدع عادي معترض لاتجاه الطبقات وغير متعامد معها، ويبدو الانزياح الظاهري للكتلة العلوية بعكس اتجاه ميل الطبقات. ب: صدع مقلوب معترض لاتجاه الطبقات وغير متعامد معها، ويبدو الانزياح الظاهري للكتلة العلوية موافقاً لاتجاه ميل الطبقات (Krausse et al., 1978).



شكل (13 - 14): صدع عادي منحرف يساري ذو رمية اتجاه كبيرة. يلاحظ في هذه الحالة أن اتجاه تغريق خط القطع يتعاكس مع اتجاه تغريق خط الحركة (الخدوش). وتبدو الطبقة مزاحة بعيداً نحو الشمال بقيمة أكبر من قيمة رمية الاتجاه (Möbus, 1989).

مثال 1:

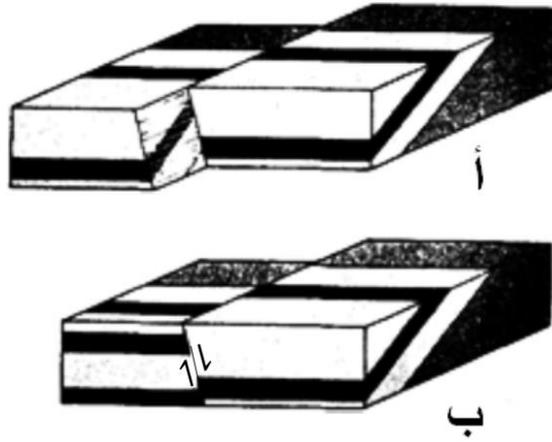
تكون الطبقات المائلة الموضحة في الشكل (14 - 14 - أ) مزاحة بصدع عادي، غير أن شكل التكشف بعد حصول التعرية (نظرة الخارطة في الشكل 14 - 14 - ب) تعطي انطباعاً خاطئاً أن هناك صدع انزلاق اتجاهي.



شكل (14-14): صدع عادي (أ) يظهر في نظرة الخريطة وكأنه صدع انزلاق اتجاهي (ب).

مثال 2:

أصيبت الطبقات المائلة الموضحة في الشكل (14-15): بصدع انزلاق اتجاهي يساري (أ)، غير أن نظرة المقطع العرضي Cross sectional view (ب) تعطي انطباعاً بأنه صدع عادي.

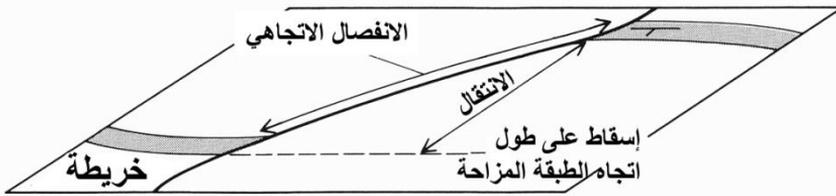


شكل (14-15): صدع انزلاق اتجاهي (أ) يبدو في نظرة المقطع العرضي (ب) وكأنه صدع عادي.

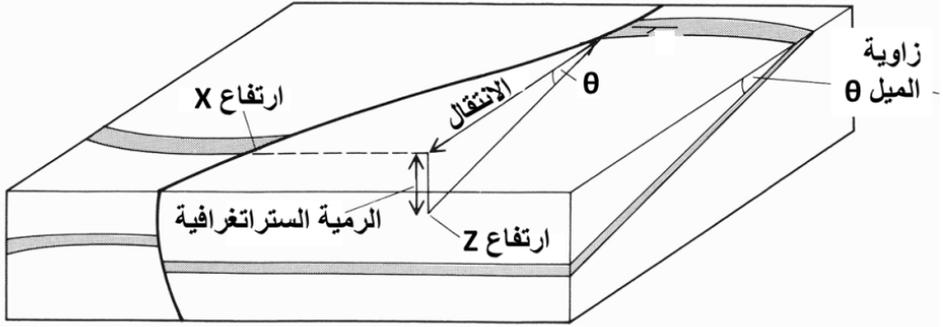
#### 6.14. الرمية الطبقيّة (الستراتغرافية) والانفصال الطبقي (الستراتغرافي)

كما لاحظنا سابقاً، يقاس الانفصال الاتجاهي Strike separation بشكل مواز لاتجاه الصدع. وهناك بالإضافة لذلك مصطلح آخر هو مصطلح "الانتقال" Offset الذي يقاس بشكل متعامد مع اتجاه الوحدة الصخرية (شكل 14-16). وكذلك، يمكن استنتاج قيمة الانفصال الشاقولي للطبقات أو مايسمى "الرمية الطبقيّة" (الرمية الستراتغرافية) Stratigraphic throw على العديد من الخرائط. وهناك طريقتان للوصول إلى هذه القيمة. تعتمد أولاهما على التقدير المثلثاتي لأعماق التشكيلات (شكل 14-17). وتعتمد الطريقة الثانية على إنشاء منحنيات تسوية بنيوية للطبقات على جانبي الصدع (شكل 14-18). ويجب في هذه الحالة الأخيرة معرفة قيمتي منحنبي تسوية في إحدى كتلتي الصدع، بحيث يمكن تحديد المسافة بينهما، ويمكن تحديد منحنيات أخرى إذا لزم الأمر، مفترضين أن الميل ثابت القيمة. وبالمقابل يكفي تحديد منحنى تسوية واحد في الكتلة الأخرى على الجانب الآخر من الصدع، مفترضين أيضاً أن الميل على هذا الجانب مساوٍ تقريباً للميل على الجانب الآخر من الصدع. وعند تلاقي منحنيين من جانبي الصدع، فإن فرق الارتفاع بينهما يعادل قيمة الرمية الطبقيّة.

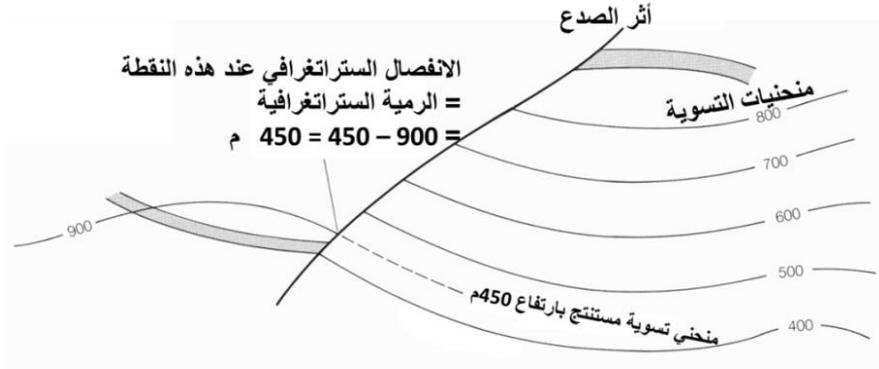
إذا تجاوزت وحدتان صخريتان، غير متجاورتين من الناحية الستراتغرافية، على جانبي صدع ما، فيمكن تحديد ما يسمى "الانفصال الطبقي" (الانفصال الستراتغرافي) Stratigraphic separation، الذي يمثل الثخانة الستراتغرافية التي حذفت جراء التصدع. يتم ذلك من خلال سلسلة من القياسات على الخريطة، أو من خلال مفتاح الخريطة نفسها. تقاس هذه الثخانة بشكل متعامد مع حدود الوحدة الصخرية بغض النظر عن الوضعية الفراغية للصدع.



شكل (14-16): قياس الانفصال الاتجاهي والانتقال من الخريطة مباشرة (Maltman, 1998).



شكل (14- 17): اشتقاق الرمية الطبقيّة (الستراتغرافية) بالحسابات المثلثانية بمعرفة زاوية الميل. لاحظ أن العمق إلى  $Z$  = الانتقال مضروباً بـ  $\sin$  زاوية الميل، وأن الرمية الطبقيّة (الانفصال الطبقي الشاقولي) = قيمة الارتفاع عند  $X$  مطروحاً منها قيمة الارتفاع عند  $Z$ . (Maltman, 1998).



شكل (14- 18): اشتقاق الرمية الطبقيّة (الستراتغرافية) من منحنيات التسوية البنيوية. (Maltman, 1998).

## 7.14. تمارين على الرميات الظاهرية

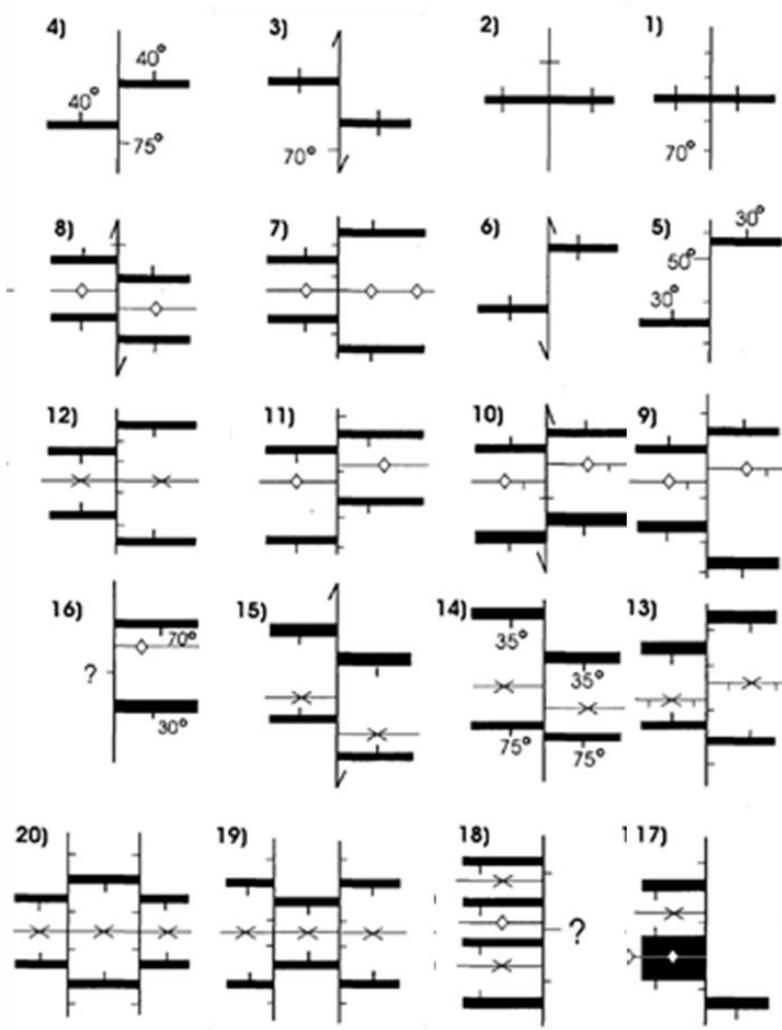
### 1.7.14. التمرين الأول:

يبين الشكل (14-19) مقاطع تخطيطية أفقية (نظرة خريطة Map view) لبنيات صدعية تأخذ الصدوع فيها اتجاهات متعامداً مع اتجاه الطبقات. والمطلوب تحديد نوع الصدع ونمط البنية المصاحبة به، وبيان ما إذا كانت الإزاحة تمثل رمية حقيقية أم رمية ظاهرية (انفصالياً).

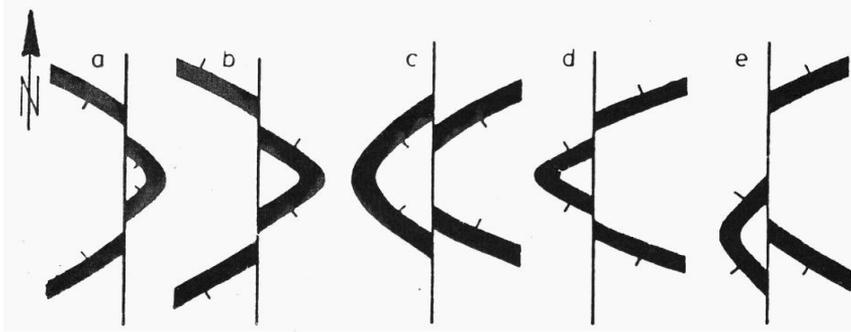
### 2.7.14. التمرين الثاني:

يبين الشكل (14-20) مقاطع تخطيطية أفقية (نظرة خريطة) لطيات متغرقة مصاحبة بصدوع عرضانية. والمطلوب تحديد اتجاه ميل الصدع في كل حالة، والإجابة عن الأسئلة التالية:

- أ- أي البنيات تمثل أشكالاً مقعرة وأيها تمثل أشكالاً محدبة؟
- ب- ما هو اتجاه تغريق الطيات؟
- ت- إذا افترضنا أن كل الصدوع العرضانية في الحالات a حتى d تمثل صدوعاً عادية، فما هو اتجاه ميل الصدع في كل حالة؟
- ث- أجب عن السؤال (ت) مفترضاً أن الصدوع مقلوبة.
- ج- ما هو نمط الصدع في الحالة e؟ حدد اتجاه ميله ومركبات رميته، وهل هو يميني أو يساري؟
- ح- أين يقع الانزياح الظاهري sh في الحالة b؟



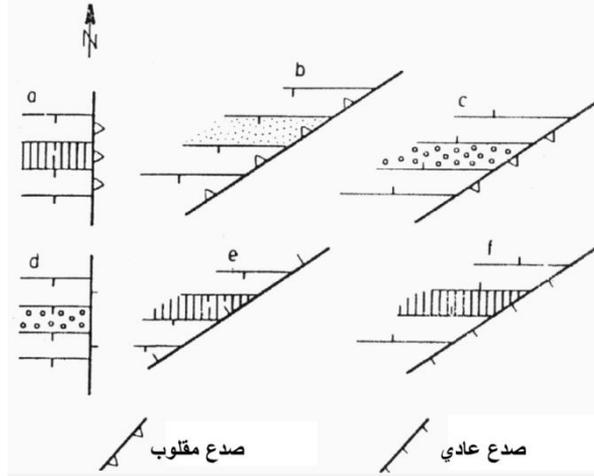
شكل (14-19): مقاطع تخطيطية أفقية (نظرة خريطة Map view) لطبقات مزاحة بصدوع متعامدة مع اتجاهها (Krausse et al., 1978).



شكل (14- 20): المقاطع الأفقية للطيات المصابة بصدوع والمستخدم في التمرين الثاني (Krausse et al., 1978).

### 3.7.14. التمرين الثالث:

يبين الشكل (14- 21) مقاطع تخطيطية أفقية لصدوع ذات اتجاه متعامد مع اتجاه الطبقات أو منحرف عنها. والمطلوب تحديد جهة الانزياح الظاهري sh، وذلك في الكتلة الشرقية العائدة لكل مقطع.



شكل (14- 21): مقاطع أفقية للصدوع في التمرين الثالث. تشير العلامات المعترضة والمثلثات الصغيرة إلى اتجاه ميل الصدع والطبقات (Krausse et al., 1978).

#### 8.14. تحديد الانزلاق والانفصال على سطح الصدع

إن وجود طريقتين لوصف الإزاحة يتطلب فهماً واضحاً لهندسية كل من الانزلاق والانفصال والعلاقة بينهما. وتعد طريقة "النظر المباشر" Direct view لسطح الصدع، جيدة لوصف التأثيرات الهندسية للإزاحة، حيث تساعد هذه النظرة على تحديد نموذج كل من الانزلاق والانفصال بطريقة بسيطة (Ragan, 2009). وتتم هذه الطريقة كما يأتي:

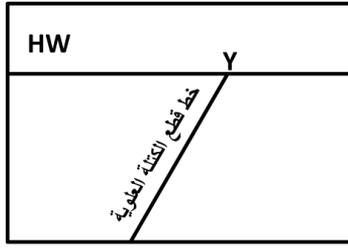
أ- نرسم خطأً أفقياً يمثل الاتجاه وخط القطع مائلاً نحو اليسار، وذلك على ورقة تمثل جانب الكتلة السفلية من الصدع. نرسم لنقطة التقاطع بين هذين المستقيمين بـ X (شكل 14-22 أ).

ب- نقوم بعمل نسخة مما سبق على ورقة شفافة، تمثل جانب الكتلة العلوية ونرسم لنقطة التقاطع بـ Y (شكل 14-22 ب).

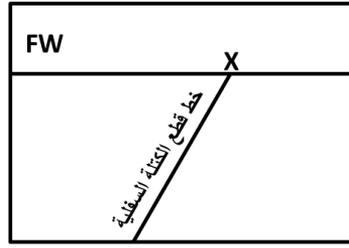
ت- نضع ورقة الكتلة العلوية على ورقة الكتلة السفلية، بحيث تتطابق الخطوط والنقاط. ويمكن نمذجة الانزلاقات الممكنة ببساطة بنقل الورقة الشفافة (شكل 14-23). إن المستقيم XY يمثل متجهة الانزلاق النسبي "D".

ث- يمكن هنا إجراء تجربتين:

- نحرك ورقة الكتلة العلوية مباشرة نحو الأسفل لنمذجة الانزلاق العادي (شكل 14-23 أ). ونلاحظ الانفصال العادي (خط قطع الكتلة العلوية يوجد تحت خط قطع الكتلة السفلية)، كما نلاحظ الانفصال اليساري على الشكل نفسه (خط قطع الكتلة السفلية يوجد إلى يسار خط قطع الكتلة العلوية).
- نعود إلى الوضع الأصلي، ثم نحرك ورقة الكتلة العلوية إلى اليمين لنمذجة الانزلاق اليساري. نلاحظ الانفصال العادي والانفصال اليساري (شكل 14-23 ب).

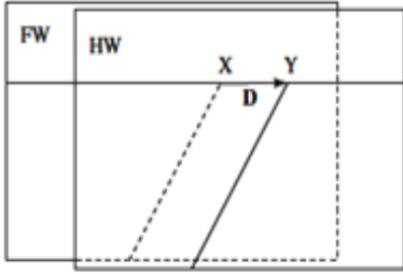


ب

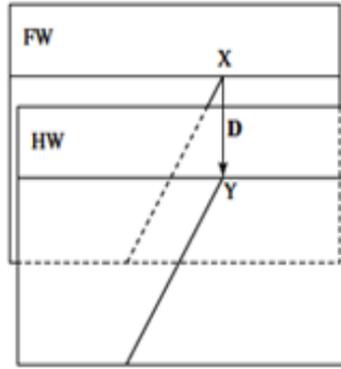


أ

شكل (14- 22): نظرة مباشرة لسطح الصدع. أ: جانب الكتلة السفلية FW ، ب: جانب الكتلة العلوية HW (Ragan 2009).



ب



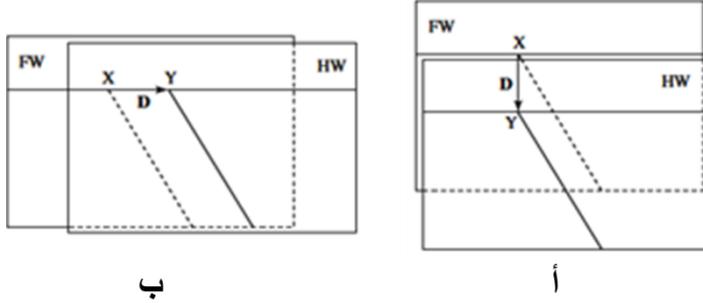
أ

شكل (14- 23): نموذج أول للانزلاق العادي (أ) والانزلاق اليساري (ب)، (Ragan 2009).

ج- نرسم مجموعة جديدة، ولكن نجعل خطي القطع الآن يميلان نحو اليمين. ونلاحظ أن:

- الانزلاق العادي يؤدي إلى انفصال عادي (كما حدث سابقاً، خط قطع الكتلة العلوية يقع تحت خط قطع الكتلة السفلية)، إنما نلاحظ معه الانفصال اليميني (خط قطع الكتلة السفلية إلى يمين خط قطع الكتلة العلوية) (شكل 14- 24 أ).

- يؤدي الانزلاق اليساري إلى انفصال يساري وانفصال مقلوب (شكل 14-24 ب).



شكل (14-24): نموذج ثان للانزلاق العادي (أ) والانزلاق اليساري (ب)، (Ragan 2009).

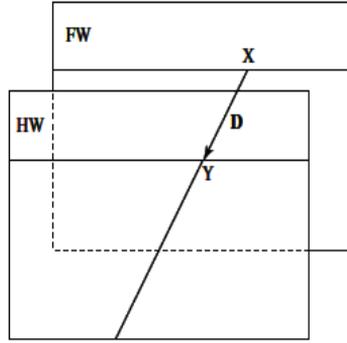
وهكذا نجد أن انزلاقاً ميلياً صرفاً يؤدي إلى انفصال يساري (شكل 14-23 أ) أو انفصال يميني (شكل 14-24 ب)، وأن انزلاقاً اتجاهياً صرفاً يؤدي إلى انفصال عادي (شكل 14-23 ب) أو انفصال مقلوب (شكل 14-24 ب)، وذلك بحسب توجه خطوط القطع. وتبين هذه النتائج أن طبيعة الانفصال الميلي و الاتجاهي يمكن أن تتوافق أو لا تتوافق مع طبيعة الانزلاق الميلي أو الاتجاهي. وهنا يتبين وجود ثلاث قواعد عامة:

أ- إذا كانت زاوية انحدار *pitch* متجهة الانزلاق متعكسة في جهتها مع زاوية انحدار خطوط القطع فإن طبيعة كل مركبة من مركبات الانزلاق تتوافق مع طبيعة الانفصال الخاصة بها.

ب- إذا كانت زاوية انحدار الانزلاق بجهة خطوط القطع نفسها إنما بزاوية أقل، فإن طبيعة الانفصال الميلي لن تكون متوافقة مع طبيعة مركبة الانزلاق الميلي، أما طبيعة الانفصال الاتجاهي فتكون متوافقةً مع طبيعة مركبة الانزلاق الاتجاهي.

ت- إذا كانت زاوية انحدار الانزلاق بجهة خطوط القطع نفسها إنما بزاوية أكبر، فإن طبيعة الانفصال الاتجاهي لن تكون متوافقة مع طبيعة مركبة الانزلاق الاتجاهي، أما طبيعة الانفصال الميلي فتكون متوافقةً مع طبيعة مركبة الانزلاق الميلي.

إن فهم مضامين هذه القواعد مهم جداً، غير أن حفظها ليس ضرورياً، لأنه يمكن الحصول على المعلومات نفسها من ملاحظة الخرائط. وسنبين طريقة القيام بذلك في الفقرة التالية. ونتيجة لهذه الالتباسات فإن مخططاً يعتمد على الانفصال لا يعد وصفاً حقيقياً للإزاحة، كما أن أي تصنيف بحسبه سيكون غير صحيح. وإذا قمنا بوصف الانفصال، فلا بد لذلك أن يكون من خلال تحديد وضعية المستوي المزاح ومن خلال معرفة الاتجاه الذي قيس فيه، وماهي طبيعته. وبالإضافة لذلك، هناك صعوبة أخرى تتمثل بالتناقض الكائن بين قيم الانزلاق والانفصال. وتكون هذه المشكلة واضحة إذا كانت متجهة الانزلاق وخطوط القطع متوازية (شكل 14 - 25)، حيث لن يكون هناك انفصال على الإطلاق. ويصطلح على تسمية العوامل الهندسية التي تؤدي إلى هذه الحال "الترابط الصفري" Null combination. ومثل هذه الحالة تكون واضحة مثلاً عندما يؤدي صدع انزلاق اتجاهي إلى إزاحة طبقات أفقية.



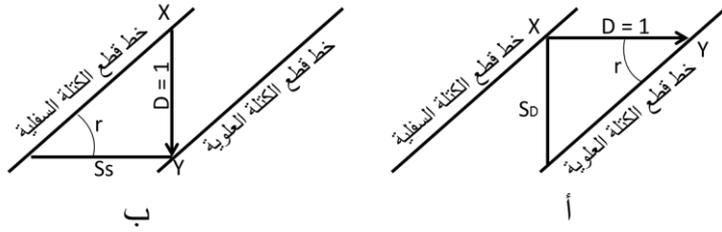
شكل (14 - 25): نموذج لانزلاق ذي انفصال مساوي للصدع (Ragan 2009).

وعلى العكس تماماً من الحالة السابقة، فإن هناك شروطاً يكون فيها الانفصال المقيس كبيراً جداً بالمقارنة مع الانزلاق. فمن أجل وحدة واحدة من قيمة الانزلاق الاتجاهي، يعطى الانفصال الميلي  $S_D$  كما يلي (شكل 14 - 26 أ):

$$S_D = \tan r$$

حيث تمثل "r" زاوية انحدار خطوط القطع على مستوي الصدع. وبشكل مشابه من أجل وحدة واحدة واحدة من الانزلاق الميلي، يعطى الانفصال الاتجاهي  $S_S$  كما يلي (شكل 14 - 26 ب):

$$S_S = 1/\tan r$$

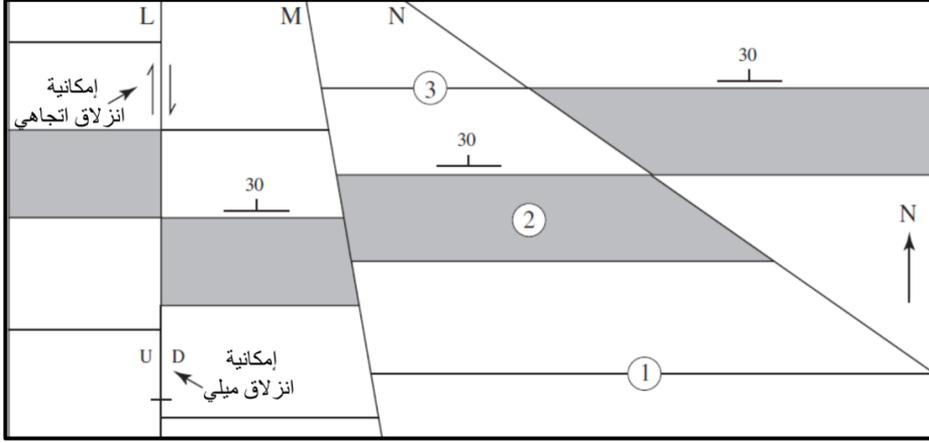


شكل (14- 26) قيمة الانفصال. أ: وحدة واحدة من قيمة الانزلاق الاتجاهي، ب: وحدة واحدة من قيمة الانزلاق الميلي (Ragan, 2009).

ومن أجل صدع انزلاق اتجاهي صرف، يصبح الانفصال الميلي  $S_D$  كبيراً جداً عندما تقترب زاوية انحدار خطوط القطع من قيمة الـ  $90^\circ$  (المعادلة الأولى السابقة)، ومن أجل صدع انزلاق ميلي صرف، يصبح الانفصال الاتجاهي  $S_S$  كبيراً جداً عندما تقترب قيمة زاوية انحدار خطوط القطع من  $0^\circ$  (المعادلة الثانية السابقة). وهكذا فبينما تكون الملاحظة الدقيقة للانفصال ووصفه مهماً، نجد أن طبيعة وقيمة الانفصال تمثل أدلة غير موثوق بها، لتفسير طبيعة الانزلاق وقيمته.

#### 9.14. الصدوع في الفراغ ثلاثي البعد

تسمح طريقة "أسفل البنية" Down-structure method المستخدمة عند قراءة الخرائط باستنتاج بعض العلاقات ثلاثية الأبعاد (Ragan, 2009). فمثلاً تبين الخريطة الجيولوجية الموضحة في الشكل (14- 27) وجود ثلاثة صدوع شاقولية أزاحت طبقات مائلة. ويمكن تحديد طبيعة الانفصال الاتجاهي Strike separation مباشرة من الخريطة. ونلاحظ أن الصدع L بيدي انفصلاً يمينياً، بينما بيدي كل من الصدعين M و N انفصلاً يسارياً، ولكن ماذا عن طبيعة الانفصال الميلي Dip separation ؟



شكل (14- 27): رؤية "أسفل البنية" للصدوع (Ragan 2009).

إن النظر إلى الطبقات بأسلوب "أسفل الميل" Down-dip view في جوار الصدع L يبين أن الطبقة 2 أعلى في الجهة الغربية من الصدع بالمقارنة مع الجهة الشرقية. ولذلك فإن طبيعة الانفصال الميلي تمت بحركة الطرف الغربي نحو الأعلى (لانطبق هنا معيار الصدع العادي أو المقلوب لأن الصدع شاقولي).

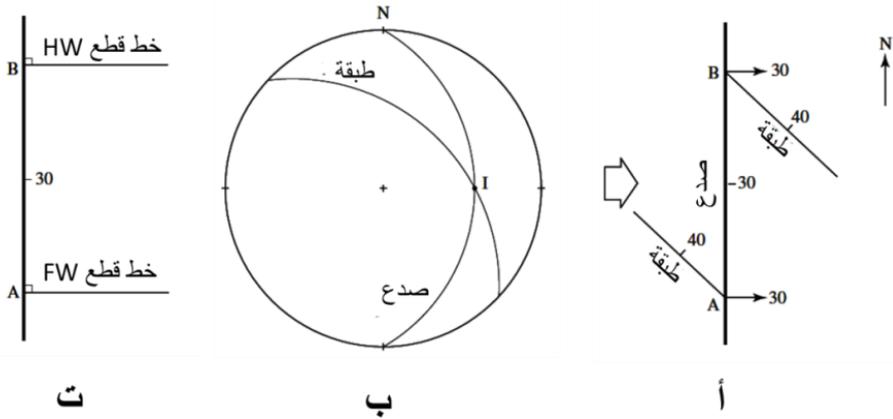
إن مايساعد في هذه الرؤية هو أن تمثل الطبقات على جانبي الصدع من خلال الكفين، بحيث تشير أصابع اليد إلى ميل الطبقات. نضع الكفين بجانب بعضهما في البداية، ثم نحرك أحدهما بشكل مواز لسطح الصدع، وذلك للوصول إلى الانفصال الملاحظ بطريقتين خاصتين:  
أ- حرك اليد اليسرى الممثلة للكتلة الغربية نحو الأعلى بإزاحة ميلية صرفة.

ب- حرك اليد اليسرى نحو الشمال بإزاحة اتجاهية صرفة.

يمكن أيضاً ملاحظة أنه من الممكن إجراء عديد من الانزلاقات المنحرفة المختلفة، والتي تمثل الوضع البنيوي بسهولة. ويمكن رؤية طبيعة الانفصال الميلي للصدع M من خلال طريقة "أسفل الميل"، حيث نلاحظ هنا أن الجهة الشرقية هي الصاعدة. ورغم ذلك، توجد طريقة أفضل لرؤية الخريطة في حالة هذه الصدوع، وهي باتجاه خط القطع الكائن بين الصدع والمستوي المزاح. فمن أجل الصدع M يكون منحنى خط القطع موازياً لاتجاه الصدع الشاقولي، أما تغريقه فيعادل الميل الظاهري للطبقة في ذلك الاتجاه، أي 350/28.

يأخذ خط القطع في الصدع N قيمة 295/18، ولونظرنا في ذلك الاتجاه فإننا سنحصل على صورة مختلفة، إنما بالمعنى نفسه.

تتوضح طريقة نظرة "أسفل التغيريق" "Down-plunge" بشكل أفضل عندما يكون الصدع مائلاً. ويبين الشكل (14 - 28 أ) خريطة لصدع مائل نحو الشرق، وقاطع بشكل منحرف لطبقة مائلة بزواوية 40°. وكما هو موضح في شبكة الإسقاط (شكل 14 - 28 ب) فإن خط التقاطع "ا" ما بين الصدع والطبقة يوازي خط ميل الصدع، أي أن زاوية انحدار خطي القطع للكتلة العلوية والكتلة السفلية تساوي 90°. وتوضح الخريطة انفصلاً يسارياً بشكل واضح. ورغم ذلك فإن الانفصال الميلي غير محدود، وهذا ما يمكن أن نراه من خلال رؤية "أسفل الميل" بشكل واضح (انظر أيضاً شكل 28 - ت).

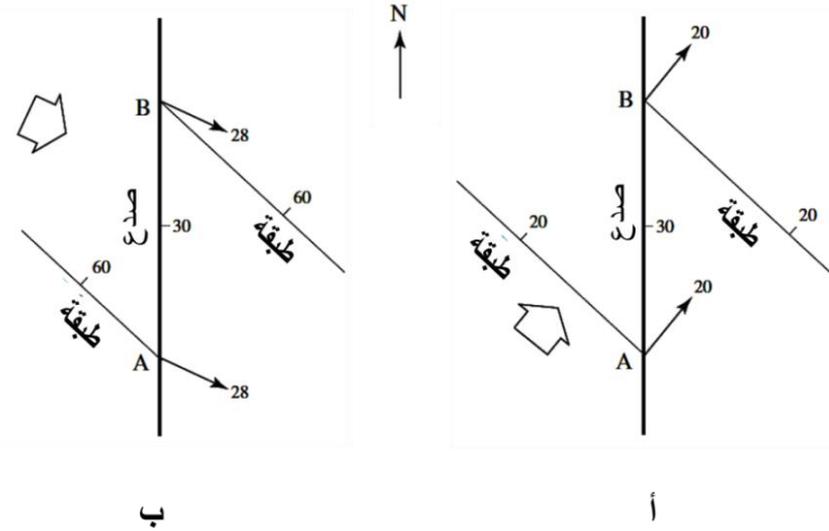


شكل (14 - 28): حالة  $r=90^\circ$ : (أ) خريطة، (ب) شبكة إسقاط ستيريوغرافي، (ت) رؤية مباشرة (Ragan 2009).

أدت الوضعية الفراغية للطبقة في هذا المثال إلى أن يكون خط القطع موازياً تماماً لخط ميل الصدع، وهو ما يمثل الحد ما بين حالتين عامتين:

أ- إذا كان ميل الطبقات أقل من 40°، فإن انحدار خط القطع سيكون نحو الشمال، ويكون الانفصال الميلي مقلوباً (شكل 14 - 29 أ).

ب- إذا كان ميل الطبقات أكبر من  $40^\circ$  فإن انحدار خط القطع سيكون نحو الجنوب ويكون الانفصال الميلي في هذه الحالة عادياً (شكل 14-29-ب).



شكل (14-29-أ): نظرة "أسفل التغيريق": (أ) انفصال مقلوب، (ب) انفصال عادي (Ragan 2009).

تبين نظرة "أسفل التغيريق" في مثل هذه الحالات مباشرة مفهومي هامين لهندسية الصدوع:  
 أ- ترى الكتلة العلوية فوق الكتلة السفلية، أي أنهما تتصان بالعلاقة الشاقولية الصحيحة.  
 ب- يرى خطأ القطع على جانبي الكتلة العلوية والكتلة السفلية بأنهما متصان بالعلاقة الشاقولية الصحيحة. وإذا كان خط قطع الكتلة العلوية تحت خط قطع الكتلة السفلية، فإن الانفصال الميلي يكون عادياً، أما إذا كان فوقه كان الانفصال الميلي مقلوباً.

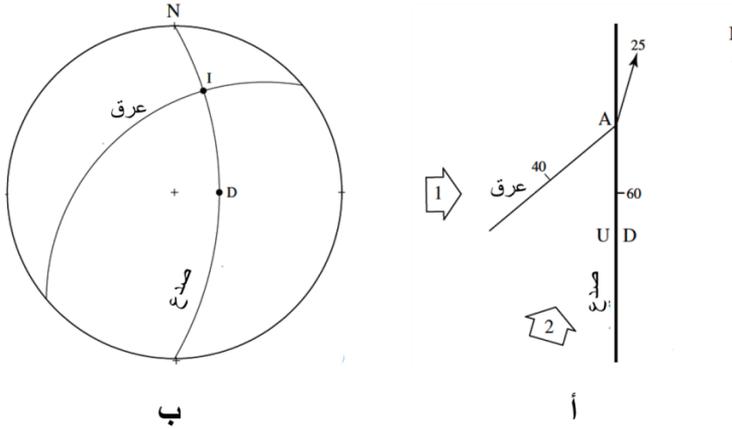
لذلك وفي كل الحالات تبين نظرة "أسفل التغيريق" الطبيعة الصحيحة للانفصال الميلي. ومن الواضح أن "الانزلاق" وليس "الانفصال" هو من يصف الإزاحة عبر الصدوع بشكل أساسي، حيث أن التصنيف المبني على الانزلاق يمثل الطريقة الوحيدة ذات المعنى لتصنيف الصدوع.

### 10.14. تمارين محلولة لتحديد الانزلاق (الرمية)

إن تحديد هندسية الانزلاق في الصدوع تعد من الأمور الأساسية لدى دراسة هذه البنيات. وبهدف تبسيط عملية تحليل الإزاحة الصدعية سنبدأ أولاً بالحالات الأبسط التي يكون فيها اتجاه وقيمة الانزلاق على الصدع معروفاً.

#### 1.10.14. تمرين محلول:

يميل صدع بزاوية  $60^\circ$  نحو الشرق (شكل 14 - 30 - أ) قاطعاً عرقاً ذو وضعية فراغية: N50E, 40N، حيث يتكشف هذا العرق في الجانب الغربي من الصدع فقط. حددت الرمية بقيمة 100 م. المطلوب حدد موقع هذا العرق على الجهة المقابلة من الصدع.



شكل (14 - 30): العرق المزاح: (أ) خريطة، (ب) شبكة الإسقاط الستيريوغرافي (Ragan 2009).

#### مدخل للحل:

أولاً، لننظر للخريطة باتجاه أسفل ميل الصدع، حيث نجد أن الجهة الشرقية تعلقو الجهة الغربية، أي أن الكتلة الشرقية هي الكتلة العلوية للصدع. ثانياً لنقم بتقدير الوضعية الفراغية لخط القطع ما بين الصدع والعرق، حيث نجد أنه ذو منحى باتجاه شمال الشمال الشرقي تقريباً ويتعرق بزاوية أقل من زاوية ميل العرق. لننظر الآن إلى الخارطة بهذه الجهة ولنحاول أن نتخيل استمرارية أثر

العرق على الخريطة في المرحلة السابقة للتصدع. إن الانزلاق العادي يحرك الكتلة العلوية مباشرة إلى أسفل ميل الصدع. ولذلك فإن العرق سيبيدي انفصلاً عادياً، كما أن خط القطع للكتلة العلوية سيبدو تحت خط القطع للكتلة السفلية. وهذا يعني أيضاً أن العرق سيبيدي انفصلاً يمينياً.

**الحل:**

أ- يتم أولاً إسقاط مستويي الصدع والعرق على شبكة الإسقاط الستيريوغرافي Stereogram بشكل دوائر كبيرة (شكل 14 - 30 - ب). فنجد أن الوضعية الفراغية لخط القطع Cut-off line "I" : 016/25 كما أن زاوية انحداره على سطح الصدع  $r = 29^\circ$ .

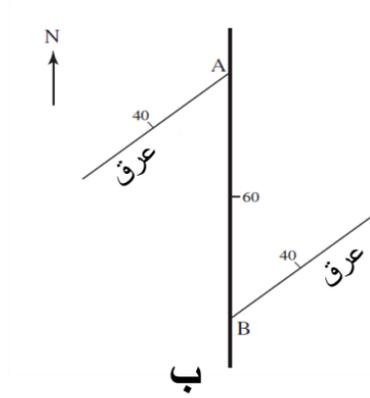
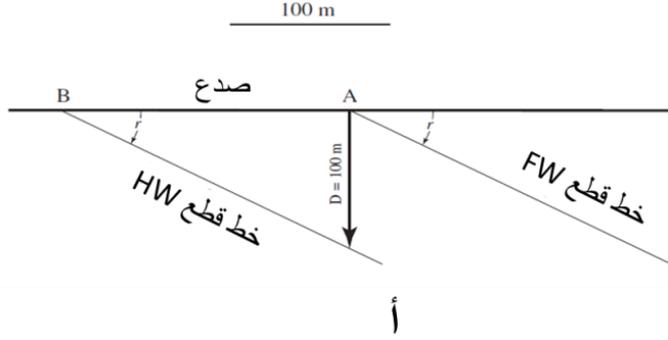
ب- ويهدف إجراء نظرة مباشرة على السطح الصدعي من جانب الكتلة العلوية، نرسم خط اتجاه، ثم نوقع النقطة A التي تمثل النقطة السطحية المشتركة بين الصدع والعرق. وبمعرفة زاوية الانحدار يرسم خط القطع على الكتلة السفلية (شكل 14 - 31 - أ).

ت- ترسم متجهة انزلاق D بشكل متعامد مع خط الاتجاه عبر النقطة A. نحدد نقطة على متجهة الانزلاق تبعد مسافة 100م عن النقطة A، حيث تقع النقطة الجديدة على خط قطع الكتلة العلوية. يمرر من هذه النقطة خط قطع مواز حتى يقطع خط الاتجاه في النقطة B التي تقع إلى اليسار على الكتلة العلوية.

ث- تمثل المسافة AB الانفصال الاتجاهي، حيث يمكن قياسها بهدف تحديد النقطة B على خريطة أثر الصدع، ثم يتم إكمال أثر العرق المتكشف في الكتلة العلوية (شكل 14 - 31 - ب).

**الإجابة:**

الانفصال الاتجاهي المقيس يعادل 180.4م.

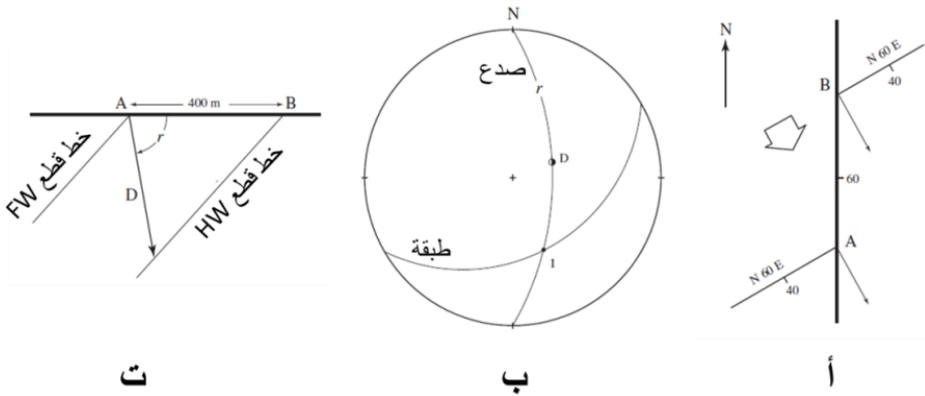


شكل (14 - 31): انزلاق معروف: (أ) نظرة مباشرة للصدع من جانب الكتلة العلوية، (ب) خارطة الصدع والعرق (Ragan, 2009).

لاتعد هذه المسألة واقعية كثيراً لأن قيمة الانزلاق واتجاهه كانا قد أعطيا فيها. إلا أننا يجب أن نحدد اتجاهها وطبيعة حركتها وقيمتها من الملاحظة الحقلية، وهناك عديد من الطرائق لتحديد ذلك، وبخاصة ملاحظة بعض المظاهر الدالة على الحركة النسبية كالخدوش وغيرها.

#### 2.10.14. تمرين محلول:

يميل صدع بزاوية 60° نحو الشرق (شكل 14 - 32 - أ). أصاب هذا الصدع طبقة ذات وضعية فراغية تساوي N60E, 40S، ما أدى إلى انفصال يساري بقيمة 400 م. وقد وجد بالملاحظة الحقلية أن الخدوش تتغرق نحو N75E. المطلوب حدد قيمة الانزلاق وطبيعته.



شكل (14- 32): اتجاه الانزلاق معروف: (أ) خارطة، (ب) شبكة إسقاط، (ت) مستوي الصدع (Ragan, 2009).

**مدخل للحل:**

تم باستخدام شبكة الإسقاط تحديد الوضعية الفراغية لخط القطع "ا" ما بين الصدع والطبقة فكانت 151/40. وتبين نظرة أسفل التغيريق بهذا الاتجاه أن خط قطع الكتلة العلوية يقع تحت خط قطع الكتلة السفلية، أي أن الانفصال الميلي من النمط العادي.

**الحل:**

أ- يسقط مستويا الصدع والطبقة على شبكة الإسقاط بشكل دائرتين كبيرتين، كما تسقط الخدوش بشكل نقطة D على الصدع. يتقاطع المستويان عند I، أي أن زاوية انحدار خط القطع للطبقة في مستوي الصدع تساوي  $r_B = 40S$ . ثم تقاس زاوية انحدار D (الخدوش)، فنجد  $r_D = 80N$  (شكل 32 - ب).

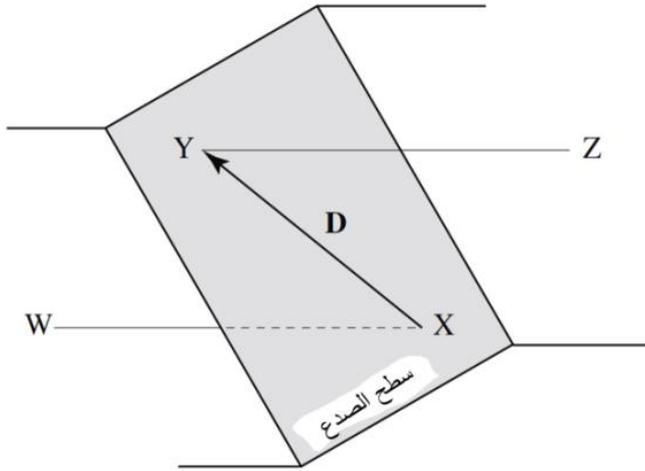
ب- يتم النظر المباشر إلى مستوي الصدع من جهة الكتلة العلوية باستخدام زاوية انحدار  $r_B$ ، وهذا ما يوضح الانفصال AB بحسب المقياس. ثم يرسم خط قطع الكتلة السفلية عبر النقطة A، وخط قطع الكتلة العلوية عبر النقطة B (شكل 14- 32- ت)، حيث يتوضح ان هذين الخطين يبديان انفصلاً عادياً، وهذا ما يتوافق مع نتائج نظرة أسفل التغيريق.

ت- ترسم متجهة الانزلاق D بمعرفة زاوية انحدار  $r_D$ ، مارة من النقطة A حتى تتقاطع خط قطع الكتلة العلوية، ثم يقاس طولها.

#### الإجابة:

قيمة الانزلاق تعادل 377م، وطبيعته عادية بشكل أساسي. ويمكن التعبير عن طبيعة الحركة هذه على شبكة الإسقاط بأكثر من طريقة، كأن نرسم دائرة صغيرة مقسومة إلى جزأين أحدهما أسود اللون يعبر عن الكتلة الصدعية الهابطة.

في حال عدم توفر مثل هذه المعلومات المباشرة عن اتجاه الانزلاق، فإن تحديد الانزلاق يتطلب تمييز نقطتين على سطح الصدع كانتا متجاورتين قبل التصدع. وعموماً فإن أمثلة جيولوجية على مثل هذه النقاط غير موجودة، ولذلك يجب إيجاد مظاهر أخرى يمكن من خلالها تحديد نقاط. ومن الناحية العملية، يمكن تمييز مستقيمات مزاحة في حالات عديدة، حيث تتقاطع هذه المستقيمات مع مستوي الصدع أو تخترقه، مرة في الكتلة السفلية وأخرى في الكتلة العلوية، وهذا ما يحدد النقاط المطلوبة. تسمى هذه النقاط "نقاط الاختراق" Piercing points. تمثل النقطة X في الشكل (14- 33) نقطة اختراق الخط WX و النقطة Y هي نقطة اختراق الخط YZ.

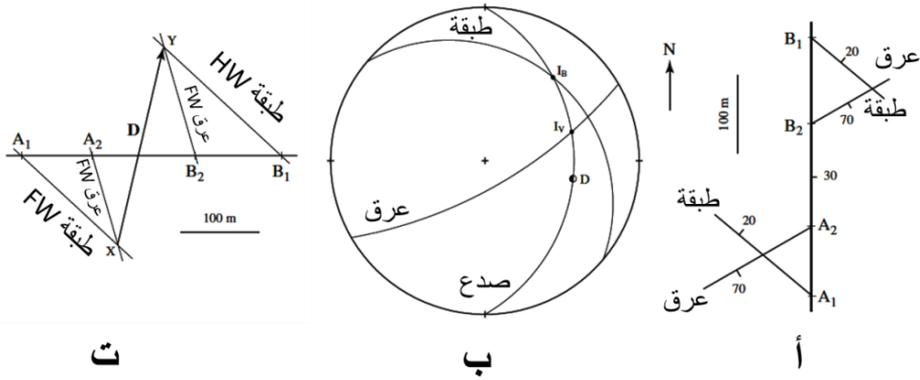


شكل (14- 33): نقطتي الاختراق X و Y، حيث تمثل القطعة المستقيمة XY متجهة الانزلاق D (Ragan 2009).

يمكن لمثل هذه الخطوط أن تتشكل من خلال بنيات متنوعة، بما فيها مستويات متقاطعة أو أثر مستوي على مستوي آخر (مثل طبقات مقطوعة من خلال سطح لاتوافق)، أو أجسام جيولوجية خطية (عروق خامات خطية وغيرها) أو خطوط طبقية (كخطوط الترقق pinch-out lines أو خطوط الشواطئ القديمة وغيرها). وقد يمكن إنشاء مثل هذه الخطوط من المعطيات الحقلية كمحننيات تساوي الثخانة، وخطوط السحنات الصخرية Lithofacies lines أو خطوط مفاصل الطيات.

### 3.10.14. تمرين محلول:

أدى صدع (090/30): القياس بطريقة اتجاه الميل) إلى إزاحة طبقة وعرق بآن معاً (شكل 14-34 - أ). وتبلغ قيم المسافات كما يلي:  
 $A_1A_2 = 120m$ ,  $A_2B_1 = 180m$ ,  
 $B_1B_2 = 105m$ . أوجد متجهة الانزلاق.



شكل (14-34): مستويات مزاحة. أ: خريطة، ب: شبكة إسقاط ستيريوغرافي، ت: نظرة مباشرة للصدع (Ragan, 2009).

الحل:

1. يمكن من خلال شبكة الإسقاط الستيريوغرافي، وبعد توقيع السطوح الثلاثة، تحديد التقاطعات فيما بين الصدع والطبقة  $I_B$  وما بين الصدع والعرق  $I_V$ . ويمكن من ذلك

قياس زاوية انحدار خط قطع الطبقة في سطح الصدع  $B/33N$  وللعرق في سطح الصدع  $60N$  (شكل 14-34-ب).

2. باستخدام زوايا الانحدار هذه والانفصالات الاتجاهية المقيسة، ترسم خطوط القطع بنظرة مباشرة على سطح الصدع، أولاً على جانب الكتلة السفلية لتعطي نقطة الاختراق X، ثم على جانب الكتلة العلوية لتعطي نقطة الاختراق Y (شكل 14-34-ت). لاحظ أن توقيع النقطة Y يتطلب أن تسقط خطوط القطع نحو الأعلى.

3. يمثل الخط XY متجهة الانزلاق D، حيث يمكن قياس طولها وزاوية انحدارها بسهولة.

#### الإجابة:

قيمة الانزلاق الصرف (الرمية الحقيقية) 330 م، وزاوية انحدار متجهة الانزلاق 82S. والصدع من النمط التراكبي مع مركبة انزلاق يميني صغيرة.

#### 4.10.14. تمرين محلول:

يبين الشكل (14-35-أ) خريطة جيولوجية تبين أثر سطح صدعي (N50E, 60SE) وطبقة (N45W, 40SW). وقد قيست قيمة الانفصال الاتجاهي فبلغت 300 م. ويمثل الشكل (14-35-ب) مخططاً ثلاثي الأبعاد لهذه البنية. إن عدم وجود معلومات أخرى يجعل من غير الممكن تحديد ما إذا كان هذا الصدع يمثل صدع انزلاق اتجاهي يساري، أم صدعاً عادياً، أم صدعاً منحرفاً. وكذلك لن يكون من الممكن تحديد الرمية الحقيقية. أما طبيعة الحركة النسبية فيمكن رؤيتها بسهولة بتطبيق طريقة "رؤية أسفل الميل"، حيث يتم توجيه الشكل (14-35-أ) بطريقة يكون فيها خط الرؤية بجهة أسفل التغير لخط القطع ما بين الصدع والطبقات في واحدة من كتلي الصدع. ويمكن رؤية الكتلة العلوية (الكتلة اليسارية أو الشرقية) كيف تحركت نحو الأسفل بالنسبة للكتلة السفلية (اليمينية أو الغربية)، غير أن هذه لاتوضح مسار الانزلاق الحقيقي.

لنفترض أن الصدع في الشكل (14-35 أ) عادي، كما وضحته الخطوطية على سطحه. فإنه يمكن تحديد الرمية الحقيقية كما يلي:

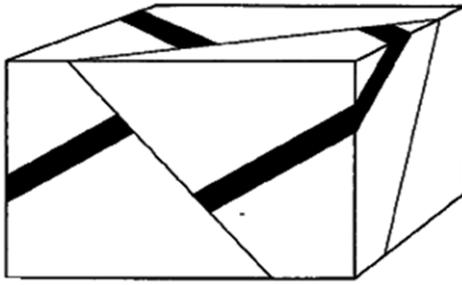
أ- ترسم دائرة كبيرة على شبكة الإسقاط، تمثل الصدع والمستوي المزاح (شكل 14-35 ت).

ب- تحدد زاوية انحدار المستوي المزاح (زاوية انحدار خط القطع) على سطح الصدع (شكل 14-35 ت)، فنجد أنها تساوي 44°.

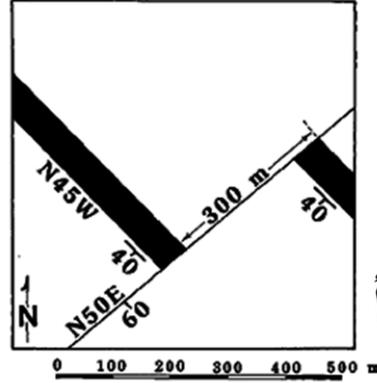
ت- توضع ورقة شفافة فوق الخريطة، وترسم الطبقة المزاحة الموجودة في الكتلة المتحركة نحو الأعلى Upright block. ثم توضع علامة في المكان الذي تتقاطع عنده الطبقة المزاحة في الكتلة المتحركة نحو الأسفل Downthrown block مع الصدع، ولكن من دون رسمها (شكل 14-35 ث).

ث- يعد أثر الصدع على الورقة الشفافة أنه "خط طي" fold line، ويمكن تخيل أنه تم تدوير مستوي الصدع نحو الأعلى ليُرى ضمن المستوي الأفقي. وكما نعلم فإن زاوية الانحدار للطبقة المزاحة في الصدع يبلغ 44°. وبهذه الحالة التي وضعنا فيها مستوي الصدع بوضعية أفقية، ترسم هذه الزاوية على الورقة الشفافة، لتوضح كيف تبدو الطبقة المزاحة ضمن مستوي الصدع (شكل 14-35 ث).

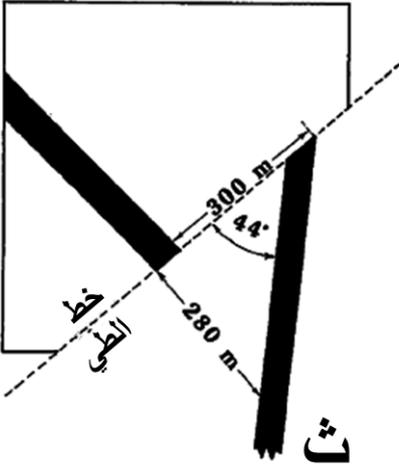
ج- وإذا عرفت قيمة زاوية الانحدار لتوجه الرمية الحقيقية ضمن مستوي الصدع، فإنه يمكن قياس قيمة الرمية الحقيقية. وبما أننا نعرف أن البنية تمثل صدعاً عادياً، فإن جهة الرمية الحقيقية (الانزلاق) تتعامد مع أثر الصدع ضمن مستوي الصدع، أي بشكل مواز لخط ميل الصدع. وتكون قيمة الرمية الحقيقية في هذا المثال بقيمة 280م (شكل 14-35 ث). ويكون توجه الرمية الحقيقية مع ميل مستوي الصدع أي 60, S40E.



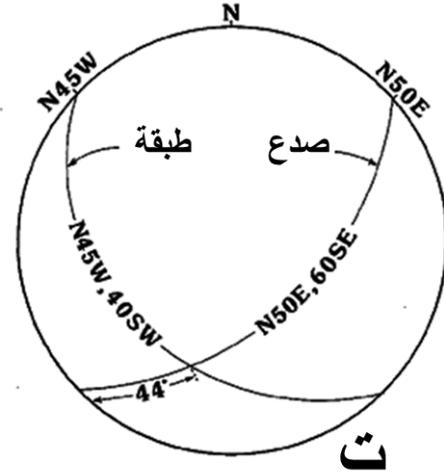
ب



أ



ث



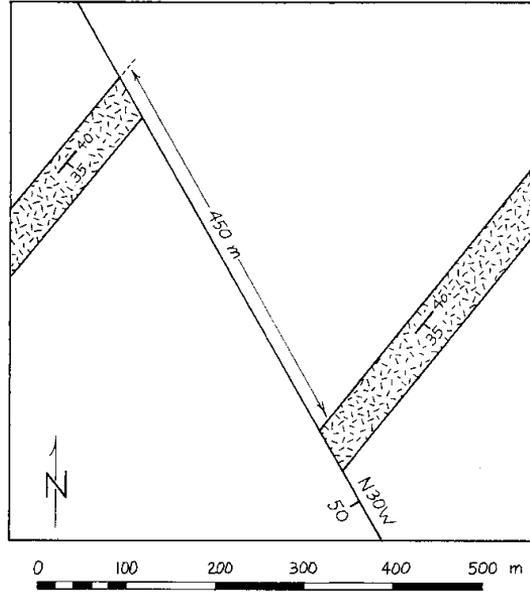
ث

شكل (14-35): مخططات توضح حل مسألة الرمية الحقيقية (Rowland, 1986).  
 (أ) خريطة جيولوجية، (ب) مخطط ثلاثي البعد، (ت) مستوي الصدع ومستوي الطبقة على شبكة الإسقاط الستيريوغرافي. (ث) مسقط أورثوغرافي orthographic لمستوي الصدع يوضح انحدار pitch الطبقة (44°). الرمية الحقيقية تساوي 280 م بشكل متوافق مع الميل (الاتجاه المحدد من خلال خطوطية سطح الصدع).

## 11.14. تمارين على الرميات الحقيقية

### 1.11.14. التمرين الأول:

يبين الشكل (14-36) أثر صدع (N30W, 50SW) وجدار اندساسي (N40E, 35SE)، مع انفصال اتجاهاي بقيمة 450 م. افترض أن هذا الصدع عادي، ماهي قيمة الرمية الحقيقية.



شكل (14-36): خريطة جيولوجية للتمرين الأول (Rowland, 1986).

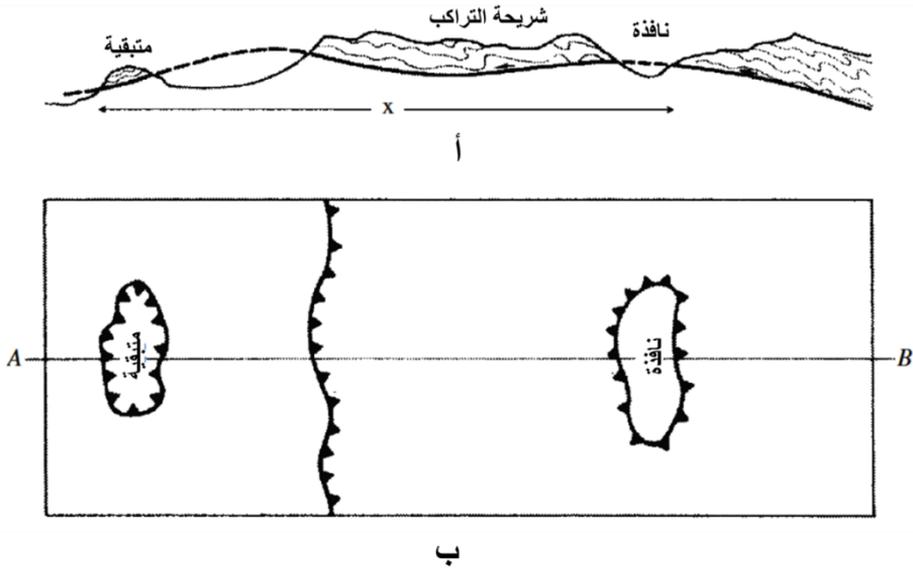
### 2.11.14. التمرين الثاني:

قس الرمية الحقيقية في المسألة السابقة، في حال كون خطوطية سطح الصدع ذات اتجاه NW وزاوية انحدار 60°.

## 12.14. صدوع الدثر Overthrusts

تتمتع صدوع الدثر (صدوع تراكيبية) ذات زوايا الميل الصغيرة بعدد من الصفات الخاصة والمهمة، ما يجعلها تستحق معالجة خاصة. وتوجد كذلك بعض المشكلات الخاصة، بسبب كون هذه الصدوع شبه مسطحة، حيث تكون البنيات الموجودة تحت شريحة التراكب Thrust sheet

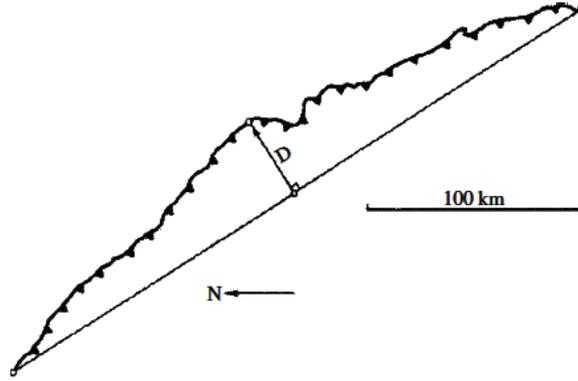
مخفية عادة. وتصل قيم الانزلاقات إلى عشرات الكيلومترات، ما يؤدي إلى مشاكل لدى مقارنة المظاهر الموجودة فوق مستوى الصدع مع تلك الموجودة تحته. يتأثر شكل تكشف مستوي صدع الدثر بالتعرية بشكل كبير، وذلك بسبب زاوية ميله الصغيرة. وتتمثل إحدى نتائج هذه التأثيرات بوجود كتل متبقية عن التعرية، تسمى المتبقيات Klippe. وكذلك قد تؤدي التعرية إلى كشف صخور الكتلة السفلية من خلال "النوافذ" Window (شكل 14 - 37).



شكل (14 - 37): المتبقيات والنوافذ. أ: مقطع عرضي، ب: خريطة توضح كلتا البنيتين (Ragan, 2009).

إن تحديد انزلاق شريحة تراكبية يكون غالباً صعباً، ولتحقيق هذا الهدف تطبق على الصدوع التراكبية الطرائق المطبقة من أجل الأنماط الأخرى من الصدوع. فمثلاً يمكن تحديد الانزلاق من خلال نقطتين متجاورتين أصلاً، لكن يصعب إيجاد مثل هاتين النقطتين. يمكن استنتاج اتجاه حركة الشريحة التراكبية من خلال قاعدة "القوس والسهم" (Elliott, 1976) Bow and arrow rule. تتضمن هذه القاعدة رسم خط مستقيم ما بين نهايتي أثر التكشف لصدع تراكبي منفرد. إن المنصف المتعامد مع هذا الخط يعطي تقديراً

لاتجاه الانزلاق، كما أن طول هذا الخط يمثل تقديراً لقدر الانزلاق (شكل 14 - 38). ورغم ذلك يجب اختبار هذا التحديد من خلال دلائل أخرى إن أمكن.



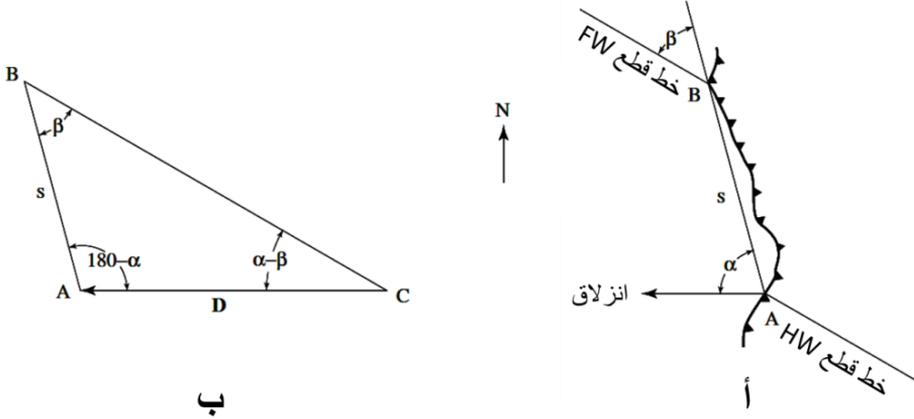
شكل (14 - 38): قاعدة القوس والسهم (Elliott, 1976).

يمكن تطبيق تقانات أخرى لتقدير اتجاه الانزلاق باستخدام توجه الطيات والانفصال الأردوازي Slaty cleavage في الشرائح التراكبية، كما يمكن استخدام توجه التورق والخطوطية في الميلونيت.

يمكن بعد معرفة اتجاه الانزلاق تقدير قيمة الإزاحة الكلية، وذلك بطرائق مختلفة. ومن أبسطها رسم مقطع عرضي مواز لهذا الاتجاه، على طول خط يعبر مستوى الصدع التراكبي المكتشف، ويمر من نافذة وكتلة متبقية. وبالتالي فإن العرض الأعظمي لتكشف الصدع التراكبي يعطي قياساً للإزاحة الأصغرية (المسافة X في الشكل 14 - 37). غير أن هذه الطريقة (طريقة نافذة - إلى - متبقية "Window-to-Klippe method) المستخدمة لتقدير حد لقيمة الإزاحة لن تكون فعالة في حال كون الصخور الموجودة تحت الصدع التراكبي أقدم من تلك الموجودة فوقه، أو في حال حصول انعكاس طبقي قبل مرحلة التراكب من خلال طي مستلق، أو عندما يكون الخط المرسوم من النافذة إلى المتبقية ليس موازياً ولو بشكل تقريبي لجهة الإزاحة. وإذا تم تمييز مستوى منفرد مزاح في كل من الكتلة العلوية والسفلية، فإن قيمة الانزلاق يمكن تحديدها باستخدام الطرائق المذكورة أعلاه.

### تمرين محلول:

أخذت شريحة تراكيبية موقعها الحالي بالانزلاق نحو الغرب ( 14 - 39 - أ). وقد وجد مستوي معلم مزاح في منطقتين: هما النقطتان A في الكتلة العلوية و B في الكتلة السفلية. المطلوب تحديد الانزلاق.



شكل (14 - 39): تحديد الانزلاق من خلال الانفصال في صدع تراكبي (Elliott and Johnson, 1980).

### الحل:

1. في مستوي رؤية أفقية Plan view لمستوي الصدع التراكبي، حدد توجه خط القطع على مستوي الصدع التراكبي من جانبي الكتلة العلوية والكتلة السفلية (شكل 14 - 39 - ب).
2. ارسم خطاً موازياً لهذا الأثر بدءاً من النقطة B على جانب الكتلة السفلية، حتى يتقاطع مع متجهة الانزلاق عند C.
3. إن طول AC يمثل قدر الانزلاق.

يمكن أيضاً حساب قدر الانزلاق من هذه القيم المقيسة نفسها. إن الخط AB على الخريطة يمثل الانفصال المنحرف "S" Oblique separation. وهذا الخط يصنع زاوية  $\alpha$  مع متجهة الانزلاق D، وزاوية  $\beta$  مع خط قطع المستوي المزاح. وبالتالي:

$$A = 180 - \alpha, \quad B = \beta, \quad C = 180 - (A + B) = |\alpha - \beta|$$

ومن المثلث المنحرف ABC ومن قانون الجيوب، نجد:

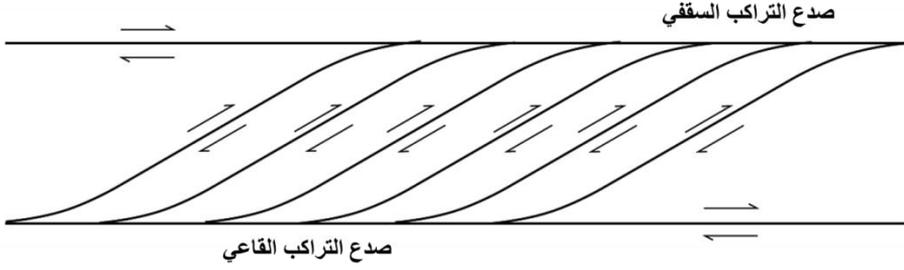
$$D = S \frac{\sin \beta}{\sin |\alpha - \beta|}$$

ويمكن، بالإضافة لذلك، أن يكون هناك صدوع تراكيبية رئيسة أو ثانوية في جانب الكتلة العلوية. وتبدي مثل هذه الصدوع الإضافية نمطين مميزين. يتضمن أولهما وجود صدوع تراكيبية ثانوية تتجذر في الصدع التراكبي الرئيس القاعدي Main basal thrust، وتتحني نحو الأعلى باتجاه السطح، وتدعى هذه الصدوع "صدوعاً تراكيبية مجرفية" Listric thrusts. وفي حال وجود عدد منها، فإنها تؤدي إلى تجزئة الكتلة العلوية إلى سلسلة من البلاطات المنحنية، لتشكل مايسمى "البنية الحرفية" Imbricate structure (شكل 14-40).



شكل (14-40): صدوع تراكيبية حرفية في جبال الروكي الكندية (Ragan, 2009).

وفي حالات أكثر تعقيداً، يتشكل مايسمى "ثنائية" Duplex (أو ثنائية تراكيبية Thrust duplex)، حيث تكون البنية محاطة من الأعلى والأسفل بصدعين تراكبيين هما "صدع التراكب السقفي" Roof thrust و "صدع التراكب القاعي" Floor thrust (شكل 14-41).



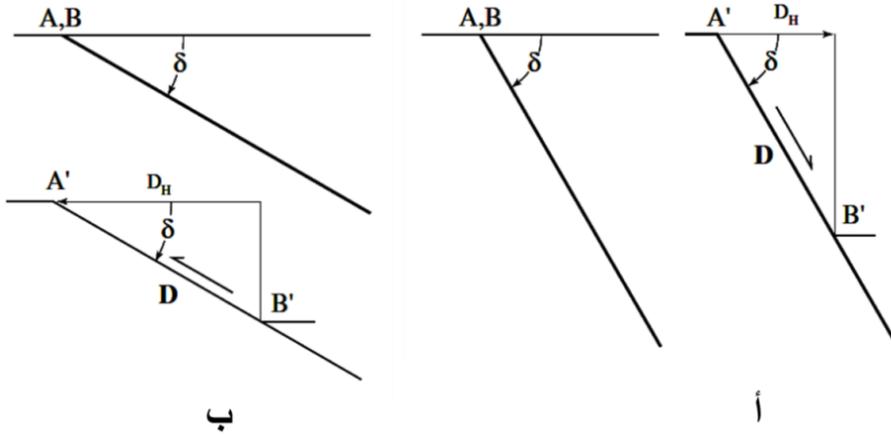
شكل (14 - 41): ثنائية التراكم Thrust duplex (Ragan, 2009).

وفي كلتا الحالتين فإن تحديد قيمة الإزاحة الكلية يتم بحساب مجموع الانزلاقات لكل من الصدوع المشاركة بها، غير أن ذلك قد يكون صعباً في كثير من الحالات.

#### 13.14. التمدد والتقلص Extension and Contraction

يكون لمتجهات الانزلاق مركبات أفقية أيضاً، حيث تعد هذه المركبة إضافة إلى طبيعة الحركة مقياساً للتمدد أو التقلص المترافق مع الصدع. ويتطلب تحديد هذه المركبة نظرة إلى المستوي الشاقولي المتضمن لمتجهة الانزلاق. ويمكن تصور هذه الطريقة من خلال أمثلة عن انزلاق ميلي صرف:

- أ- إن قيمة التمدد المرافقة لصدع عادي يميل بزاوية ( $\delta = 60^\circ$ )، بفرض حدوث انزلاق بقيمة واحدة واحدة ( $D = 1$ )، تبلغ 0.50 (شكل 14 - 42 - أ).
- ب- إن قيمة التقلص المرافقة لصدع تراكمي يميل بزاوية ( $\delta = 30^\circ$ ) ذي انزلاق واحد تبلغ 0.87 (شكل 14 - 42 - ب).



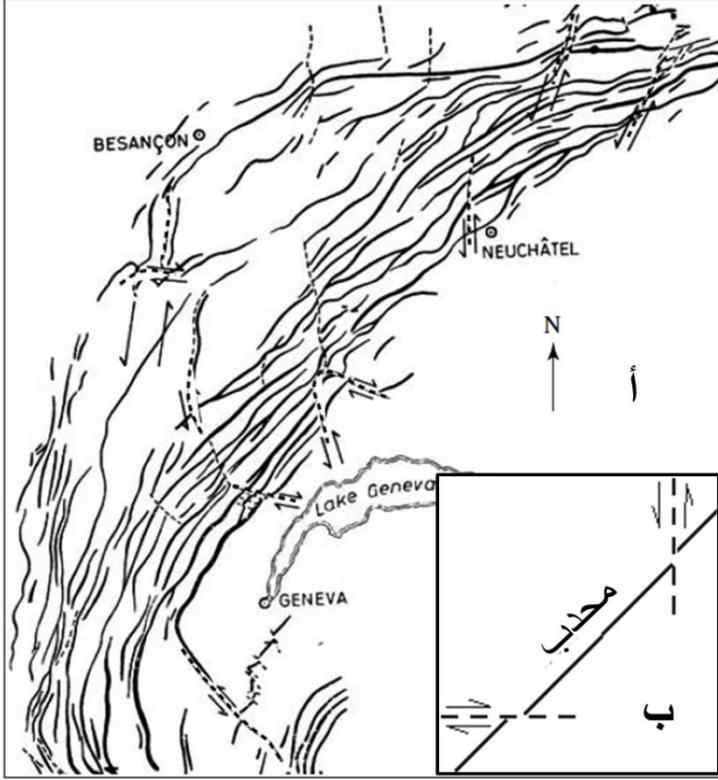
شكل (14- 42): التمدد والتقلص. أ: صدع عادي، ب: صدع مقلوب

وبشكل عام، فإن قدر المركبة الأفقية  $D_H$  للانزلاق يمكن حسابها كما يلي:

$$D_H = D \cos \delta$$

حيث أن  $D$  تمثل قدر متجهة الانزلاق و  $\delta$  تمثل ميلها. وإذا كان للصدع مركبة منحرفة، يجب استخدام الميل الظاهري لمتجهة الانزلاق على سطح الصدع في هذه المعادلة.

تترافق صدوع الانزلاق الاتجاهي مع تمدد وتقلص أفقيين. وتعد جبال الجورا في فرنسا وسويسرا مثلاً جيداً على ذلك (شكل 14- 43)، حيث تكون الصدوع ذات الاتجاه الشمالي ذات انزياح جانبي يساري، أما ذات الاتجاه الغربي فهي ذات انزياح جانبي يميني. وكلاهما يشير إلى زيادة في الطول بشكل مواز لحزام الطي المقوس.

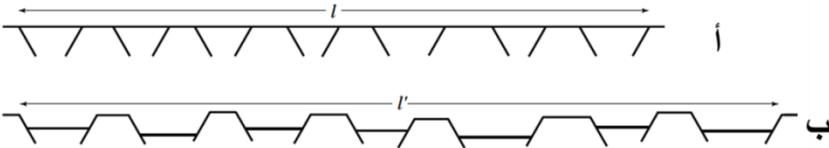


شكل (14- 43): التمدد والتقلص الأفقيين المترافقين مع صدوع الانزياح الجانبي. أ: حزام الطي والتراكب في جبال الجورا، ب: مخطط يبين التمدد المرافق للطّي (Ragan, 2009).

ويحسب كل من التمدد والتقلص من خلال المعادلتين التاليتين (شكل 14 - 44):

$$e = (l' - l)/l$$

$$S = l'/l = e + 1$$



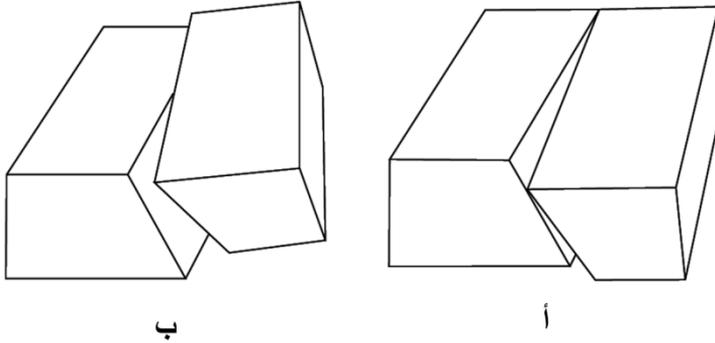
شكل (14 - 44): التمدد المرافق لجملة صدوع عادية. أ: الطول الأفقي قبل التصدع  $l$ ، ب: الطول الأفقي بعد التصدع  $l'$ .

#### 14.14. Rotation الدوران

يمكن للدوران أن يحدث لكلاكتي الكتلتين المتصدعتين أو لإحدهما، وبناء عليه فإن هناك صنفين أساسيين:

#### 1.14.14. الصنف الأول

يتضمن دوراناً حول محور متعامد مع مستوي الصدع. وتتضمن هذه الصدوع الدورانية صدوعاً مفصلية Hinge faults وصدوعاً محورية الدوران Pivotal faults (شكل 14 - 45). ويجب التمييز بانتباه ما بين هاتين الحالتين، وبخاصة إذا كان التكشف غير مكتمل، إذ أن قيمة الإزاحة ستكون كبيرة بشكل مفرط بعيداً عن محور الدوران.

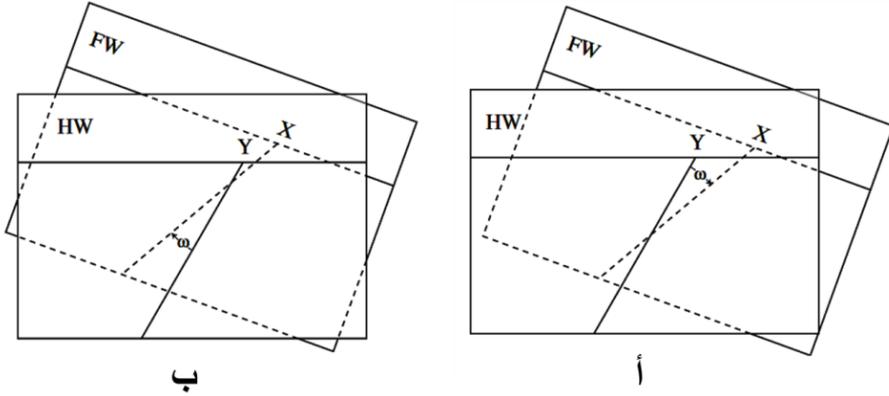


شكل (14 - 45): صدوع الدوران. أ: صدع مفصلي، ب: صدع محوري الدوران.

وعلاوة على ذلك، لا بد من وجود مركبة دورانية في كل صدوع الانتقال وذلك حيثما تكون نهاية هذه الصدوع. وتصنف صدوع الدوران بحسب طبيعة الدوران إلى صدوع دوران باتجاه عقارب الساعة Clockwise rotational faults، حيث تدور الكتلة المقابلة باتجاه عقارب الساعة، وإلى صدوع دوران بعكس عقارب الساعة Anticlockwise rotational faults، حيث تدور الكتلة المقابلة بعكس عقارب الساعة.

يمكن تحديد مركبة الدوران إذا تمت إزاحة مستوي عبر صدع. ويمكن استخدام النموذج الورقي الذي استخدم لتصوير العلاقات بين الانزلاق والانفصال هنا أيضاً لتوضيح تأثيرات مركبة الدوران. وكما في السابق، نقوم برسم منفصل لكل من جانبي الكتلة العلوية والسفلية لصدع، مع خط قطع منفرد لكل منهما. وبدءاً من الوضعية الابتدائية يستخدم قلم ليقوم مقام محور الدوران،

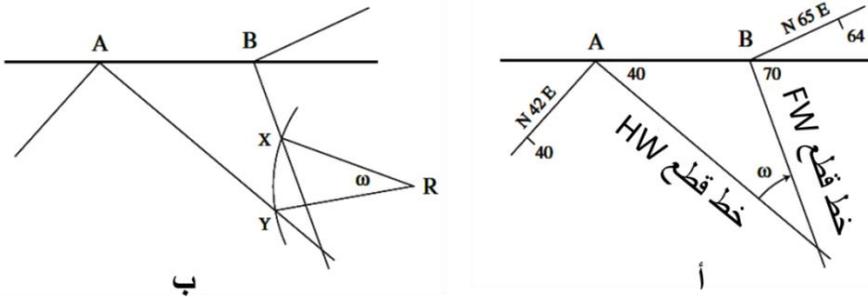
ثم يتم تدوير ورقة الكتلة العلوية (شكل 14-46 أ). ويمكن لمثل هذا الدوران أن يترافق أيضاً مع انتقال (شكل 14-46 ب)، ولكن تجب ملاحظة أن ترتيب حركتي الدوران والانتقال تحدث فرقاً.



شكل (14-46): نموذج الدوران. أ: دوران صرف، ب: دوران وانتقال (Ragan, 2009).

#### تمرين محلول:

حدد زاوية الدوران وطبيعته من أجل الصدع المستوي الموضح في الخريطة على الشكل (14-47).



شكل (14-47): صدع دوراني. أ: خريطة ونظرة مباشرة، ب: مركز الدوران (Ragan, 2009).

**الحل:**

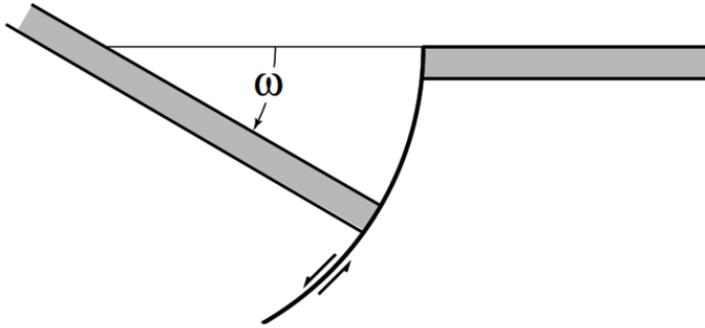
يرسم خطا القطع على جانبي الكتلة العلوية والكتلة السفلية بعد معرفة زاوية انحدارهما من خلال شبكة الإسقاط، حيث تكون الزاوية بينهما هي زاوية الدوران. أي أن زاوية الدوران تساوي الفرق ما بين زاويتي الانحدار.

**الإجابة:**

ييدي الصدع دورانياً باتجاه دوران عقارب الساعة بزواوية قدرها  $\omega = 30^\circ$ . إذا كان من الممكن تحديد نقطتي اختراق (X و Y في الشكل 14 - 47 - ب)، فإنه يمكن إيجاد مركز دوران R. وهو يقع عند رأس المثلث متساوي الساقين ذي القاعدة XY، وتكون زاوية رأسه هي زاوية الدوران.

#### 2.14.14. الصنف الثاني

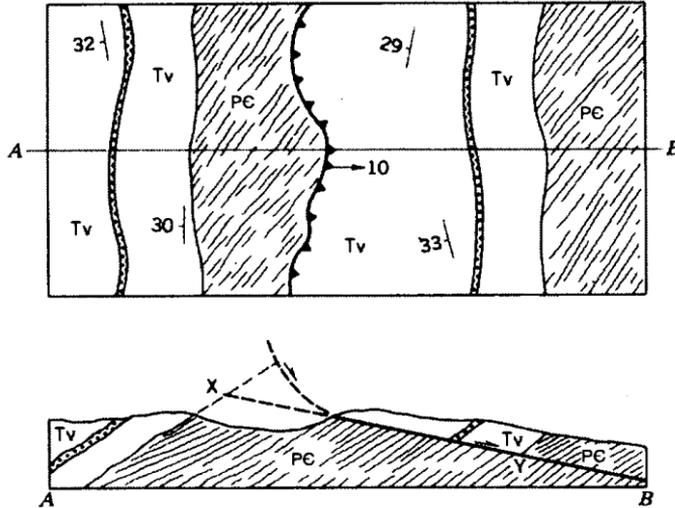
يحدث عندما يكون محور الدوران موازياً لسطح الصدع. وإن إحدى حالات الدوران لجسم صلب تتم عندما يكون لسطح الصدع شكل جزء من دائرة في مقطعه العرضي. ويبين الشكل (14 - 48) صدعاً عادياً ذا شكل منحن، مآدى إلى كتلة متصدعة تعرضت للإمالة Tilted fault block. وهنا يمكن ملاحظة أن زاوية ميل الصدع كبيرة في جزئه الأعلى وتقل هذه الزاوية بالاتجاه نحو الأعرق. يوصف هذا الدوران من خلال الزاوية  $\omega$  الكائنة ما بين الخطين الابتدائي والنهائي في المستوي المتعامد مع محور الدوران.



شكل (14 - 48): الدوران على صدع منحن.

يمكن أن يحدث تغير في شكل الصدع مع العمق ما يؤدي إلى وجود جزء مسطح أو قليل الميل (صدع انفصال Detachment fault)، وبشكل عام يتشكل مايسمى "صدع عادي مجرفي" Listric normal fault.

وتوضح الخريطة والمقطع العرضي في الشكل (14- 49) أهمية تمييز الشكل الحقيقي للصدع المجرفي في تقدير الانزلاق، حيث يتوضح وجود صدع عادي يميل بزاوية 5° نحو الشرق، وبزيج صخوراً بركانية (Tv) تعود للتلاثي وصخوراً واقعة تحتها تعود للركيزة قبل الكامبرية (Pc). وتمثل النقطة Y في العمق نقطة اختراق، حيث نحتاج إلى نقطة اختراق ثانية لتحديد قيمة الانزلاق. وبما أن الصدع المكتشف ذو شكل مستو، وأن الطبقات في كلتا الكتلتين متشابهة في الوضعية الفراغية، فإنه من الممكن إسقاط الصدع كخط مستقيم لإيجاد النقطة X، بحيث تعطي المسافة XY تقديراً للانزلاق. وعلى الرغم من ذلك، فإذا الصدع المكتشف يمثل الجزء المسطح من صدع مجرفي كان في الأصل أشد ميلاً فوق المقطع العرضي، فإن الانزلاق أقل بكثير من القيمة المقدرة هنا.

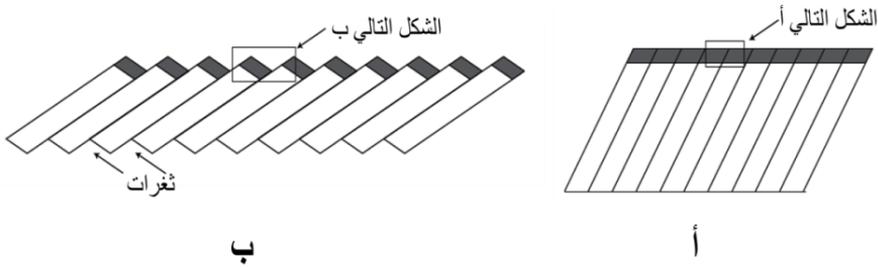


شكل (14- 49): صدع عادي قليل الميل (Wernicke and Burchfiel 1982).

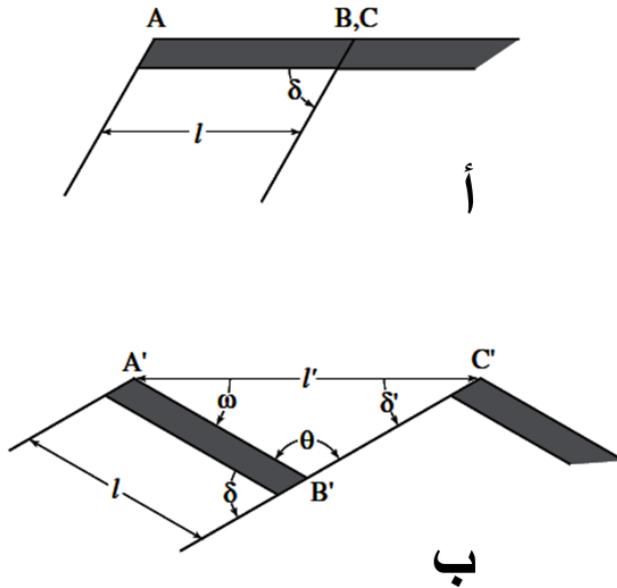
إن نوعاً آخر مهماً من الدوران يشمل كلاً من الصدع والكتلة الصدعية المحاطة بالصدع (شكل 14- 50). وتجب هنا ملاحظة أن دوران الصدع يزيد من قيمة المركبة الأفقية للانزلاق بشكل

كبير. وهذا النوع من الصدوع قابل لأن يتشكل في مجموعات، وتتطلب خصائصها الهندسية في العمق وجود سطح انفصال.

تدور الصدوع المستوية Planar faults مع الطبقات المزاحة (شكل 14-50). ونلاحظ هنا حدوث تأثيرات مترابطة مابين الانزلاق والدوران. وكما يتبين في الشكل (14-51-ب) فإن  $\omega$  تمثل زاوية دوران الطبقات التي كانت في الأصل أفقية، أما  $\delta$  فتتمثل زاوية ميل الصدع قبل الدوران، بينما تمثل  $\delta'$  زاوية ميله بعد الدوران.



شكل (14-50): الدوران عبر صدوع عادية مستوية متعددة.



شكل (14-51): الانزلاق والدوران. أ: الهندسية الابتدائية، ب: الهندسية النهائية. انظر إلى موقع هذين الشكلين في الشكل (14-50) السابق (Ragan, 2009).

ويتطبيق قانون الجيوب على المثلث A'B'C'

$$l' / \sin \theta = l / \sin \delta'$$

أو

$$l' / l = \sin \theta / \sin \delta'$$

وكما يتوضح من هذا الشكل أيضاً

$$\theta = 180^\circ - (\omega + \delta')$$

وبما أن

$$\sin \theta = \sin(\omega + \delta')$$

يكون

$$l' / l = \sin(\omega + \delta') / \sin \delta'$$

ومن تعاريف المعادلة التالية والمذكورة سابقاً

$$e = (l' - l) / l$$

نصل إلى المعادلة

$$e = \frac{\sin(\delta' + \omega)}{\sin \delta'} - 1$$

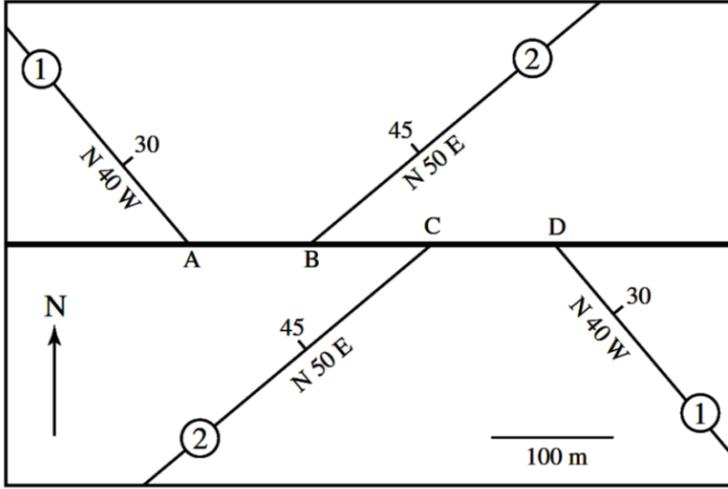
#### 15.14. تمارين على الدوران:

##### 1.15.14. التمرين الأول

يتجه مستوي صدع عادي شمالاً ويميل بزاوية 60° نحو الغرب. أدى هذا الصدع إلى إزاحة مستو بنيوي ذي وضعية فراغية N90W, 30N، وهو يبدي انفصلاً يسارياً بقيمة 100 م. حدد الانزلاق.

##### 2.15.14. التمرين الثاني

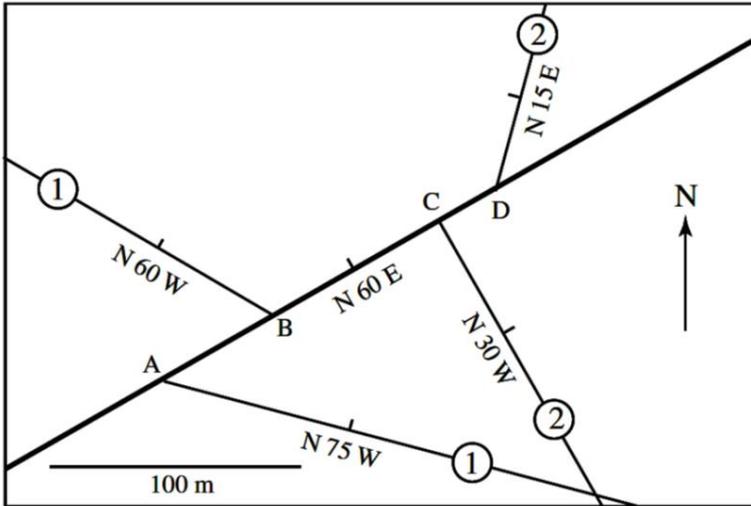
يأخذ صدع الوضعية الفراغية N90W, 60N ويقطع مستويين بنيويين: المستوي 1 (N45W, 30NE)، والمستوي 2 (N50E, 45NW). ويوضح الشكل (14-52) قيمة الانفصال وطبيعته. ماهو توجه متجهة الانزلاق النسبية وقدرها؟ وماهو نمط الصدع بحسب الانزلاق؟



شكل (14 - 52): مخطط التمرين الثاني (Ragan, 2009).

### 3.15.14. التمرين الثالث

صدع وضعيته الفراغية  $N30E, 60W$  أزاح مستويين كما هو موضح في الشكل (14 - 53). ماهي زاوية الدوران وطبيعته؟ حدد موقع مركز الدوران الذي أدى إلى الإزاحة الملاحظة.



شكل (14 - 53): مخطط التمرين الثالث (Ragan, 2009).

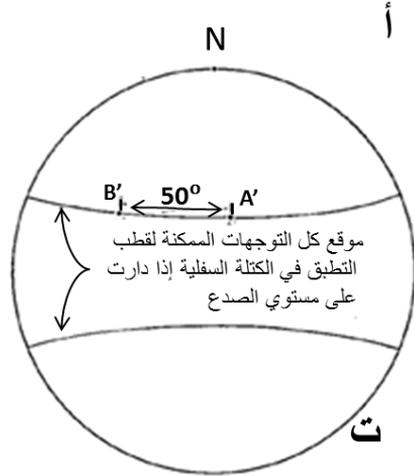
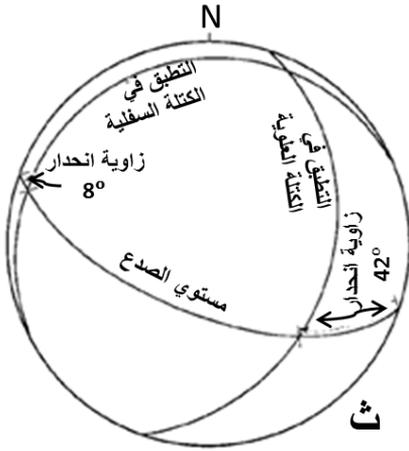
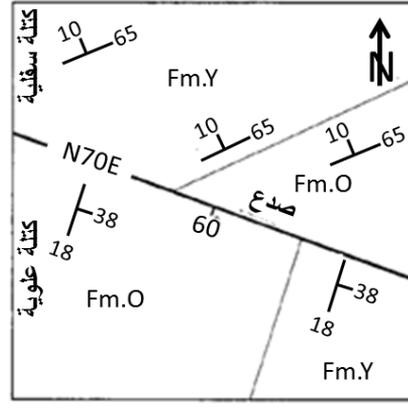
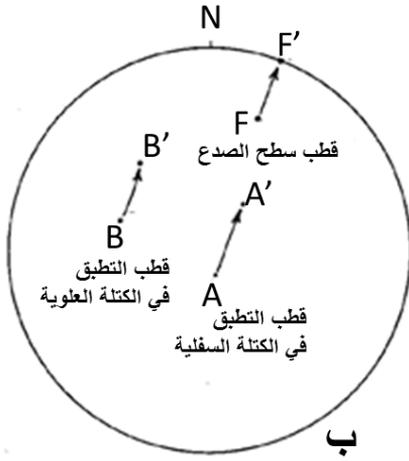
#### 4.15.14. التمرين الرابع (محلول)

يبين الشكل (14 - 54 - أ) حدوث دوران على الصدع، ودليل ذلك أن الوضعية الفراغية للطبقات مختلفة ما بين كتلتي الصدع، حيث يتبين أن الكتلة العلوية تعرضت لدوران معاكس لدوران عقارب الساعة بالنسبة للكتلة السفلية. وقبل أن نحدد قيمة الدوران في هذا المثال، يجب أولاً معرفة الوضعيات الفراغية الممكنة التي يؤدي إليها الدوران على هذا الصدع. وهذا ما يمكن القيام به كما يلي:

- أ- يسقط قطب الصدع (نقطة F) وقطب الكتلة العلوية (نقطة A) وقطب الكتلة السفلية (نقطة B) على شبكة الإسقاط (شكل 14 - 54 - ب).
- ب- يجب توجيه الصدع ليصبح شاقولياً، حيث نحرك النقطة F إلى F' الموجودة على الدائرة الخارجية للشبكة. وبهذه الطريقة تتحرك النقطتان A و B بقيمة 30° إلى النقطتين A' و B' (شكل 14 - 54 - ب).
- ت- يكون محور الدوران خلال التصدع الدوراني متعامداً مع سطح الصدع. ولنعد الآن إلى الخريطة الجيولوجية (شكل 14 - 54 - أ) ولنتخيل الدوران الذي حصل للصدع من كونه مائلاً (60° نحو S) إلى الوضع الشاقولي. ولنستخدم اليد اليسرى لتمثيل الصدع واليد اليمنى لتمثيل الطبقات في الكتلة السفلية. ضع قلماً عبر أصابع اليد اليمنى لتمثيل قطب التطبيق. وبالإحتفاظ باليد اليسرى شاقولية، نقوم بتدوير كلتا اليدين 180° ولنلاحظ العلاقة بين سطح الصدع الشاقولي وقطب الطبقات. يمكن تمثيل هذه العلاقة على شبكة الإسقاط من خلال تدوير الورقة الشفافة لوضع قطب الصدع (النقطة F') عند القطب الشمالي (أو الجنوبي) للشبكة. إن الدائرة الصغيرة التي تقع عليها النقطة A' الآن، بالإضافة إلى مناظرتها المرآتية عبر خط الاستواء، تحدد مواقع توجهات كل أقطاب التطبيق الممكنة، وذلك إذا دارت الكتلة السفلية حول محور متعامد مع الصدع (شكل 14 - 54 - ت).

إن رسم كل الوضعيات الممكنة التي يمكن أن يؤدي إليها الدوران على الصدع، يوضح أن النقطة B' مشمولة بهذه المجموعة. ويكون الدوران على هذا الصدع مساوياً للزاوية بين A' و B'، وهي 50° (شكل 14-54-ت).

وهناك طريقة أخرى لقياس الدوران على الصدوع، وهي تتضمن تحديد زاوية الانحدار لكل ميل ظاهري في مستوي الصدع. وبما أن زاويتي الانحدار على الكتلة السفلية والكتلة العلوية كانتا متطابقتين قبل الدوران، فإن الفرق في قيمة زاوية يساوي قيمة الدوران. وفي هذه المسألة فإن الميول الظاهرية باتجاهين متعاكسين، أي أنه يجب إضافة قيمتي زاويتي الانحدار لبعضهما. وقد بلغت قيمة زاوية الانحدار على الكتلة العلوية في مستوي الصدع 42°، وعلى الكتلة السفلية 8° (شكل 14-54-ث)، ما يشير إلى دوران بقيمة 50°.



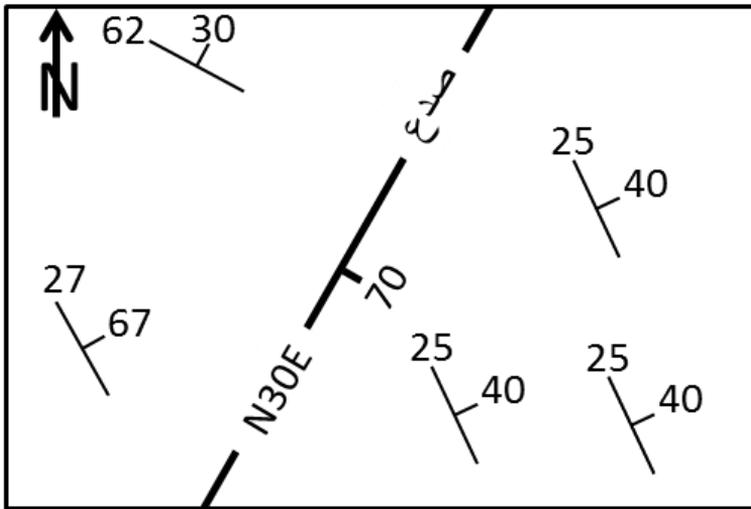
شكل (14-54): مخططات تبين الحل لمسألة الانزلاق الدوراني (Rowland, 1986):  
 (أ) خريطة جيولوجية، (ب) إسقاط قطب الصدع (F') وقطبي الطبقات في الكتلتين المتصدعتين، (ت) دوائر صغيرة تحدد مواقع الأقطاب الممكنة للطبقات في الكتلة السفلية إذا حصل لها دوران على مستوي الصدع، (ث) قياس الدوران من خلال زاوية الانحدار للطبقات على كتلتي الصدع .

#### 5.15.14. التمرين الخامس:

يمثل الشكل (14-55) خريطة جيولوجية لصدع، حيث يكون للطبقات في الجانب الشرقي للصدع الوجيه N25W, 40E. أما على الجانب الغربي فيكون تكشف الصخور في منطقتين تختلفان في وضعيتهما.

أ- مثل الوجيه الفراغية لطبقات الكتلة العلوية على شبكة الإسقاط، وكذلك الوجيهات الفراغية للطبقات في الكتلة السفلية والتي نتجت من الدوران على الصدع. حدد فيما إذا كان الكشف في كل من المنطقتين الواقعتين غرب الصدع يمكن أن تكونا ناتجتين من الدوران على الصدع.

ب- حدد جهة الدوران وقيمه.



شكل (14-55): خريطة جيولوجية لحل التمرين الخامس.



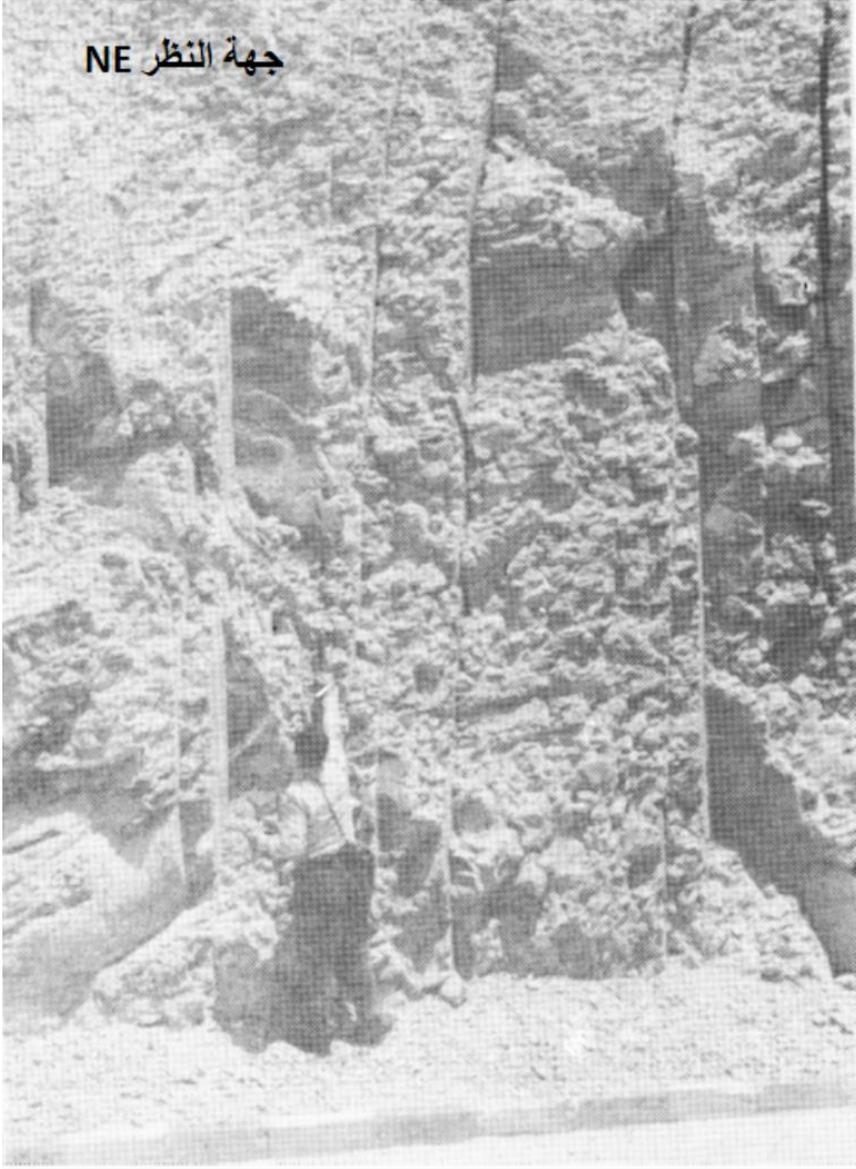
## الباب السادس - الفصل الخامس عشر

### الدراسة الإحصائية للشقوق (مخطط الوردة Rose Diagram)

#### 1.15. مدخل

الشقوق Joints سطوح انقطاع أو انفصال في الجسم الصخري لايؤدي تشكلها إلى تغير ملحوظ في وضعية الكتل المحيطة بها. وهي تتميز بعدم حدوث حركة موازية لسطوحها أو أن هذه الحركة صغيرة إلى حد يمكن معه إهمالها (شكل 15 - 1). غير أن حركة متعامدة مع سطوحها يمكن أن تحدث لتؤدي إلى تكون الشقوق المفتوحة Open Joints. تعد الشقوق من أكثر البنيات التكرسية انتشاراً في صخور القشرة الأرضية، وتصادف في معظم الصخور الرسوبية والنايرية والمتحولة. وهي ذات أنماط متنوعة ومناشئ مختلفة، لكن معظم الشقوق تعزى إلى المنشأ التكتوني. وهي تتمثل بالشقوق الشدية أو شقوق القص. ويدرس منشأ الشقوق عادة في ضوء البيئة الجيولوجية الحاوية عليها. وإن للشقوق أهمية علمية كبيرة في الدراسات التكتونية على الصعيد الإقليمي والمحلي، وذلك رغم صعوبة تفسيرها أحياناً. كما أن لها أهمية تطبيقية في الدراسات الجيولوجية المختلفة وبخاصة فيما يتعلق بمتانة الصخور بالنسبة للأعمال الهندسية (شكل 15 - 2)، وفي استثمار المقالع والأعمال المنجمية، وكذلك فيما يتعلق بحركة السوائل كالماء والنفط.

يمكن للشقوق الظاهرة على سطح الأرض أو القريبة منه أن تتعرض لعمليات انفتاح فنتوسع مشكلة ثلمات أو أفنية. وكثيراً ما تنعكس صورة الشقوق الرئيسية من خلال المسيلات المائية. وقد تغلق الشقوق بتوضعات لاحقة مثل الكالسييت والكوارتز وغيرها لتشكل عروقاً Veins. تصادف الشقوق عادة على شكل مجموعات sets تتألف من شقوق متوازية أو شبه متوازية (شكل 15 - 1)، أو على شكل جمل systems تتألف كل منها من مجموعتين تتقاطعان مع بعضهما بزواوية محددة، ما قد يؤدي إلى تجزؤ الصخر إلى كتل تتحدد أشكالها بحسب تلك الجمل (شكل 15 - 3).



شكل (15-1): شقوق شاقولية في صخور السينوني المتكشفة على الجناح الشمالي لمحدب قاسيون بالقرب من قرية معربا (دركل، 1996).



شكل (15- 2): دور الشقوق في انهيار كتل صخرية. صخور الإيوسين في منطقة طيوي بالقرب من مدينة صور على ساحل خليج عمان (المؤلف).

### 2.15. تحديد نمط الشقوق

إن تحديد نمط الشقوق يمثل المهمة الأولية المناطة بالجيولوجي في معظم الدراسات المتعلقة بالشقوق. ويتطلب ذلك وصف مجموعات في الموقع، ووصف طريقة تغير هندسيها من موقع لآخر عبر المنطقة أو عبر البنية المدروسة. ولهذا الهدف يتم تحديد مجموعات الشقوق ضمن موقع محدد (محطة Station)، ثم تجرى المقارنة بين المحطات المختلفة. وتوزع هذه المحطات بشكل منتظم قدر الإمكان من خلال معرفة الصفات الجيولوجية والبنوية المحلية، كأن نحدد بعضها في مواقع مفاصل الطيات أو أجنحتها أو مواقع مختارة أخرى، وذلك بهدف تحديد العلاقة بين الشقوق والبنيات الأخرى في منطقة الدراسة (صدوع أو طيات أو اندساسات أو بنيات تكتونية أخرى). أما إذا كانت البنية المحلية غير معروفة فيمكن توزيع المحطات عند نقاط تقاطع شبكة مختارة. ويمكن للصور الجوية أن تساعد في حالات محددة في تحديد اتجاهات الشقوق (شكل 15- 4).



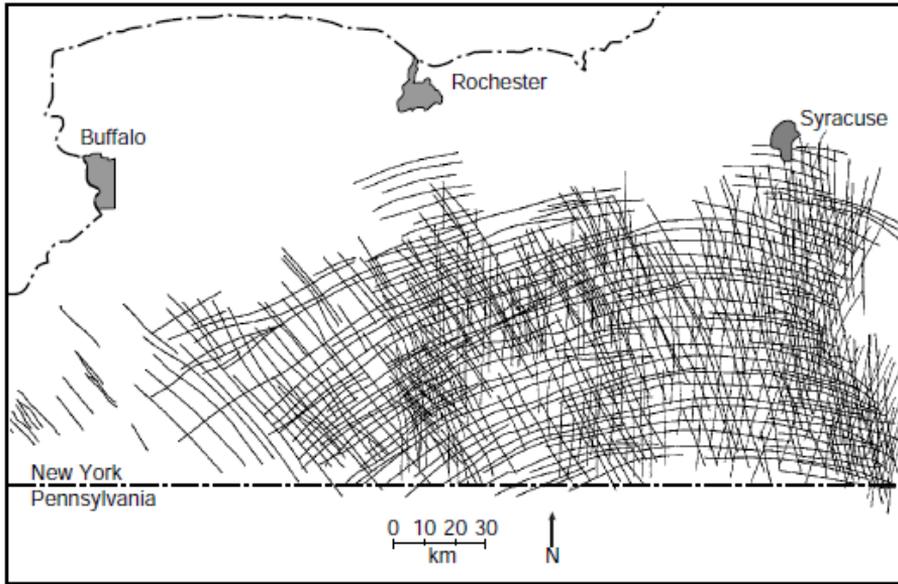
شكل (3-15): جملة شقوق متعامدة في صخور التوروني المتكشفة على الجناح الجنوبي لمحدب قاسيون (نظرة باتجاه الشمال). ط: سطح طبقي، م1 و م2: مجموعتا شقوق. لاحظ التعامد بين السطوح الطباقية وسطوح مجموعتي (جملة) الشقوق. لاحظ أيضاً الكتل الصخرية المنهارة أسفل الصورة بحسب هذه الشقوق. المطرقة الجيولوجية إلى يمين الصورة تمثل المقياس (دركل، 1996).



شكل (15- 4): صورة جوية لشقوق إقليمية في الحجر الرملي المكتشف في ولاية أوتا الأمريكية، لاحظ نهر كولورادو في أعلى ويسار الصورة كقياس (Van der Pluijm and Marshak, 2004).

### 3.15. تمثيل الشقوق

يمكن للشقوق أن تُمثَّل مباشرة على الخرائط الجيولوجية، وذلك برسم خطوط تعبر عن مساراتها (Trajectories، شكل 15- 5). كما يمكن للشقوق أن تُمثَّل من خلال المخططات البيانية الإحصائية Statistical diagrams التي تقدم معلومات مفيدة عن وضعياتها الفراغية المختلفة في منطقة معينة. وتظهر الوضعيات الفراغية للشقوق المختلفة في موقع ما للوهلة الأولى وكأنها خليط غير ذي معنى، غير أنها ستتمايز من خلال المخططات البيانية الإحصائية إلى مجموعات محددة. وهكذا فإن الدور الأساسي لمثل هذه المخططات يتمثل بتمكين الجيولوجي من تحديد أنماط الشقوق ومقارنتها في المواقع (المحطات) المدروسة.

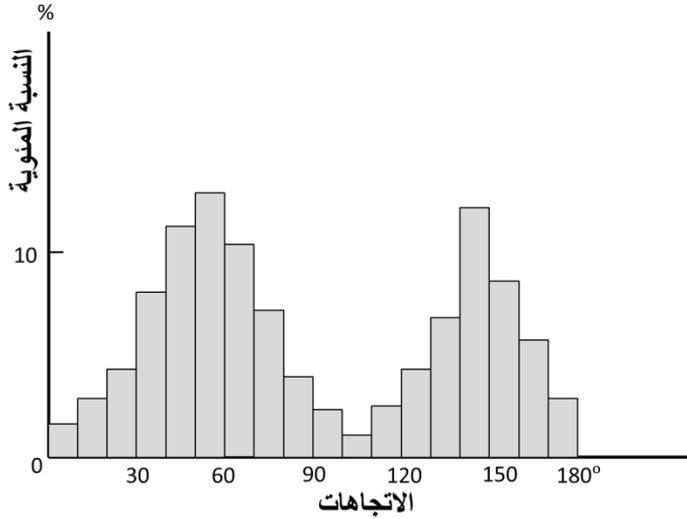


شكل (15 - 5): خريطة مناحي الشقوق في جزء من ولاية نيويورك (Van der Pluijm and Marshak, 2004).

توجد عدة طرائق لتمثيل الشقوق. وسنبين فيما يلي طريقتي مخططات الأعمدة Histograms ومخطط الوردة Rose diagram، وسنناقش الطريقة الثانية بشيء من التفصيل.

### 1.3.15. طريقة مخطط الأعمدة

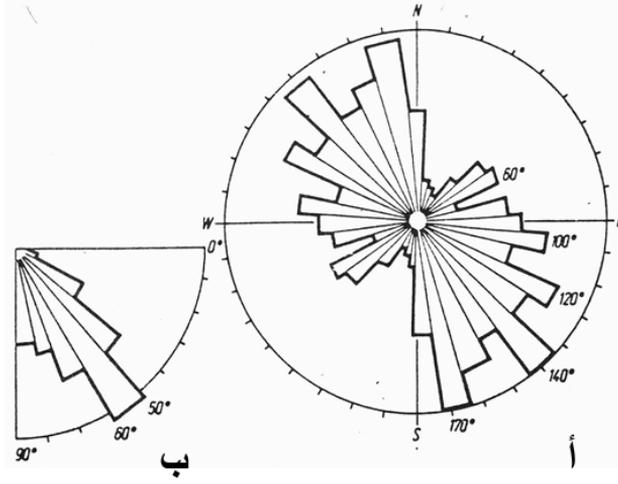
يمثل المحور الأفقي قيم الاتجاهات من  $0^\circ$  حتى  $180^\circ$ ، بينما يمثل المحور الشاقولي النسبة المئوية لعدد الشقوق في كل اتجاه. تفيد هذه الطريقة في تحديد الاتجاهات دون الميل، كما يمكن أن تستخدم في تحديد الاتجاهات السائدة للمظاهر الخطية Lineaments في الصور الفضائية (شكل 15 - 6).



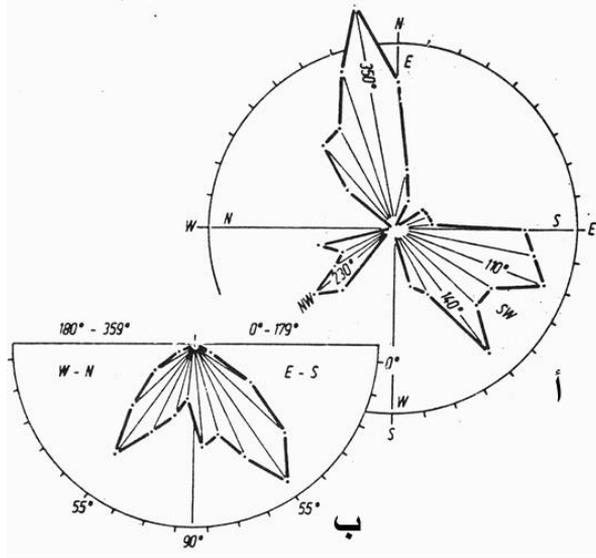
شكل (15 - 6): مخطط الأعمدة لتمثيل تواتر اتجاهات الشقوق.

### 2.3.15. طريقة مخطط الوردية (وردات الشقوق)

تفضل هذه الطريقة عن طريقة التمثيل بالأعمدة أنفة الذكر، لأنها تبين الاتجاه مباشرة وبشكل مماثل لاتجاهات البوصلة. كما يمكن إضافتها إلى الخرائط الجيولوجية أو البنيوية في المواقع التي تم فيها القياس. وكما هو الحال في طريقة الأعمدة أنفة الذكر، فهي تستخدم لإظهار اتجاهات (سموت اتجاهات) الشقوق المدروسة من دون إظهار قيم زوايا الميل. غير أنه يمكن إضافة مخططات بيانية خاصة بزوايا الميول لإعطاء فكرة أكثر وضوحاً عن الوضعية الفراغية السائدة للشقوق المدروسة، أو أية بنيات جيولوجية أخرى. ويمكن بشكل عام بيان اتجاهات السطوح من خلال الوردات ذات المئة وثمانين درجة (وردات  $180^\circ$ ، نصف دائرة)، حيث يمكن إتمام هذه الوردات تخطيطياً من خلال رسم الصورة نفسها في المئة وثمانين درجة المقابلة (النصف المكمل للوردة إلى دائرة كاملة، شكل 15 - 7). أما وردات ذات الثلاثمئة وستين درجة (وردات  $360^\circ$ ) فتعطي معلومات عن اتجاهات الميول إضافة إلى اتجاهات السطوح المدروسة (شكل 15 - 8).



شكل (15 - 7): أ: مخطط الوردة (وردة 180°)، بطريقة بيان عرض الصف. ب: مخطط زوايا الميول (Möbus, 1989).



شكل (15 - 8): أ: مخطط الوردة (وردة 360°)، بطريقة بيان القيمة المتوسطة. ب: مخطط زوايا الميول (Möbus, 1989).

### 1.2.3.15. إنشاء مخطط الوردية

يعتمد إنشاء مخطط الوردية على وضع قائمة إحصائية لقياسات الوضعية الفراغية التي أجريت في الحقل بوساطة البوصلة الجيولوجية (قياسات سطوح الشقوق على الأغلب). تقسم هذه القائمة إلى صفوف يحتوي كل منها على عشر درجات (اللوحة 15 - 1)، ويتم التنفيذ من خلال الخطوات التالية:

أ- يحدد على القائمة الإحصائية (اللوحة 15 - 1) عدد القياسات (الشقوق) التابعة لكل صف.

ب- يحول عدد القياسات الموجودة في كل صف إلى نسبة مئوية (يعد العدد الكلي للقياسات مساوياً 100%).

ت- يتم استخدام المسقط القطبي لشبكة شميت كقاعدة (وفي حال عدم وجود شبكة يمكن رسم مخطط قطبي بالوسائل الهندسية البسيطة بحيث تكون الزوايا الكائنة بين أشعته مطابقة لزوايا الصفوف المختارة). وتثبت ورقة شفافة فوق هذه القاعدة ليتم عليها وبمساعدة الشبكة توقيع النقاط بحيث تبعد كل نقطة عن مركز الشبكة بمقدار النسبة المئوية لعدد القياسات في اتجاه الصف الذي تمثله هذه النقطة (شكل 15 - 8). تتم قراءة الزوايا باتجاه دوران عقارب الساعة اعتباراً من  $N = 0^\circ$  (فوق) إلى  $E = 90^\circ$  (يمين) وهكذا...

ث- توصل هذه النقاط بمستقيمات (شكل 15 - 8). وفي حال عدم وجود نقطة (عدم وجود قياسات) في اتجاه ما، يعود المستقيم إلى مركز الشبكة القطبية، لينطلق منه مرة أخرى إلى النقطة التالية. تدعى هذه الطريقة "بيان القيمة المتوسطة". كما أن هناك طريقة أخرى للتعبير عن الصفوف، تدعى "بيان عرض الصف" وموضحة في الشكل (15 - 7).

اللوحة (15 - 1): القائمة الإحصائية المستخدمة لرسم مخطط الوردية.

76	- 66	- 56	- 46	- 36	26	16	- 6	356	الصف
-	75	65	55	45	-	-	15	5 -	
85					35	25			
80	70	60	50	40	30	20	10	0	
									عدد القياسات
									النسبة المئوية

166	-156	-146	-136	-126	-116	-106	-96	86	الصف
-	165	155	145	135	125	115	105	-	
175								95	
170	160	150	140	130	120	110	100	90	
									عدد القياسات
									النسبة المئوية

-256	246	-236	226	-216	206	-196	-186	176	الصف
265	-	245	-	225	-	205	195	-	
	255		235		215			185	
260	250	240	230	220	210	200	190	180	
									عدد القياسات
									النسبة المئوية

الصف	-266	-276	286	296	-306	-316	-326	336	-346
	275	285	-	-	315	325	335	-	355
	270	280	290	300	310	320	330	340	350
عدد القياسات									
النسبة المئوية									

تتضمن الطريقة الموصوفة توضيحاً للسطوح المدروسة (سطوح شقوق على الأغلب) في مخطط الوردية من خلال اتجاهاتها. وعلاوة على ذلك فإن مخططات الوردية ذات  $360^\circ$  تُمكن من توضيح سمت الميل إضافة إلى سمت الاتجاه، وذلك بحسب العلاقة المحددة بينهما (علاقة التعامد)، بحيث يمكن التعبير عن اتجاهات الميول على الناحية الداخلية لمحيط مخطط الوردية، بينما تعبر ناحيته الخارجية عن الاتجاهات (شكل 15-8). وهكذا فإن اتجاه الميل  $E = 90^\circ$  المحدد على الناحية الداخلية يوضع تحت إشارة  $N = 0^\circ$  المحددة للاتجاه على الناحية الخارجية لمحيط مخطط الوردية. أي أن ذلك يحدث بتدوير الناحية الداخلية بقيمة  $90^\circ$  بعكس دوران عقارب الساعة. وهذا يعني أن الأمر نفسه سينطبق على بقية الاتجاهات. ومثال ذلك أن صف الشقوق ذو الاتجاه  $N = 0^\circ$  يميل نحو  $E = 90^\circ$ ، بينما تكون الشقوق من الاتجاه نفسه  $S = 180^\circ$  مائلة نحو  $W = 270^\circ$ .

#### ملاحظة:

يمكن استخدام مخططات الوردية لبيان الاتجاهات السائدة للعناصر الجيولوجية الخطية (محاور طيات، محاور ستيلوليت وغيرها...)، وكذلك العناصر المستوية الأخرى كالصدوع وغيرها.

#### 2.2.3.15. إنشاء مخططات زوايا الميل:

تضاف هذه المخططات إلى مخططات الوردية لتبين التوزع الإحصائي لقيم زوايا الميل. ولإنشاء هذه المخططات، توضع قائمة مشابهة للقائمة الإحصائية السابقة (اللوحة 15-2). إلا أن هذه القائمة ستكون مقسمة إلى تسعة صفوف فقط، وترسم بطريقة إنشاء مخطط الوردية نفسها. وعندما

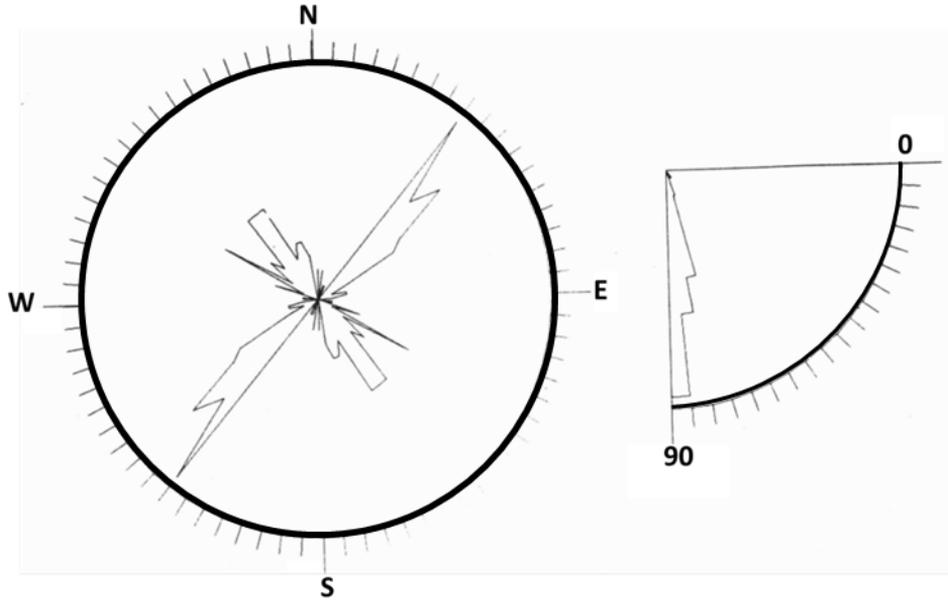
تضاف إلى مخططات الوردية ذات 180° لاتبتم مقارنتها مع الاتجاهات (شكل 15 - 7)، أما عندما تضاف إلى مخططات الوردية ذات 360° فيمكن مضاعفتها (شكل 15 - 8) ليعبر كل نصف منها عن زوايا الميول السائدة في أحد مجالي القياس (0° - 179° و 180° - 359°). ولهذا الهدف لابد من تنظيم جدولين للقياسات، يعبر أولهما عن زوايا الميول العائدة للسطوح التي تكون سموت اتجاهها واقعة ما بين 0° و 179°، بينما يعبر ثانيهما عن زوايا الميول العائدة للسطوح التي تكون سموت اتجاهها واقعة ما بين 180° و 359°.

اللوحة (15 - 2): القائمة الإحصائية لرسم زوايا الميول.

الصف	-1	-11	-21	-31	-41	-51	-61	-71	-81
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	5	15	25	35	45	55	65	75	85
عدد القياسات									
النسبة المئوية									

مثال:

يوضح الشكل (15 - 9) مجموعات الشقوق الموجودة في أحد المواقع العائدة لصخور التوروني في محذب قاسيون. ويلاحظ في هذا المخطط أن المجموعة الرئيسة من الشقوق تأخذ الاتجاه العام شمال شرق - جنوب غرب، وأن هناك مجموعة أقل تواتراً ذات اتجاه شمال غرب - جنوب شرق. وكذلك هناك مجموعات من درجات أدنى باتجاهات أخرى. أما مخطط زوايا الميول فيبين أن معظم الشقوق تتراوح ما بين شديدة الميل والشاقولية (عدد القياسات مئة وعشرون قياساً).



شكل (9-15): مخطط الوردة (وردة 180°) ومخطط زوايا الميول للشقوق في أحد المواقع العائدة لصخور التوروني في محذب قاسيون (المعطيات بحسب دركل، 1996).

#### 4.15. تمرين

أجريت القياسات التالية للوضعيات الفراغية للشقوق في أحد المواقع التي تعود صخره للكريتاسي العلوي في محذب قاسيون (المعطيات بحسب دركل، 1996). المطلوب رسم مخطط الوردة ومخطط الميل لهذه القياسات وتفسير النتائج (القياسات معطاة بالدرجات وأخذت بطريقة الاتجاه).

122/79	044/81	035/82	134/79	065/75	215/76
124/80	047/80	040/78	042/85	045/85	065/80
125/83	215/70	034/82	044/84	060/80	045/80
055/68	302/82	033/82	222/85	030/75	125/82
132/80	290/83	055/75	088/45	055/76	115/85
040/83	306/84	131/80	290/85	052/72	300/85
046/81	050/85	046/83	290/75	045/80	058/76

085/78	300/76	048/86	295/80	050/85	055/75
115/85	305/77	050/81	300/81	254/80	065/75
045/79	040/88	045/82	305/78	055/75	060/85
060/80	220/85	045/80	302/82	300/81	110/80
040/45	224/85	044/ 81	304/83	302/80	295/80
044/80	219/79	050/83	295/80	065/65	300/81
050/85	045/79	062/84	300/85	136/85	110/85
060/82	135/85	085/87	132/84	225/86	302/81
058/80	120/75	300/85	050/80	055/80	090/45
055/80	125/81	344/82	134/88	050/79	300/87
130/80	290/77	130/86	135/88	308/82	129/82
055/82	129/88	133/85	055/78	131/78	065/70
048/81	130/82	032/74	120/85	065/75	030/79
052/68	300/85.				

5.15. حل التمرين السابق باستخدام برنامج **StereoNett** (Johannes, 2000)، وذلك بهدف المقارنة.

أ. إدخال المعطيات:

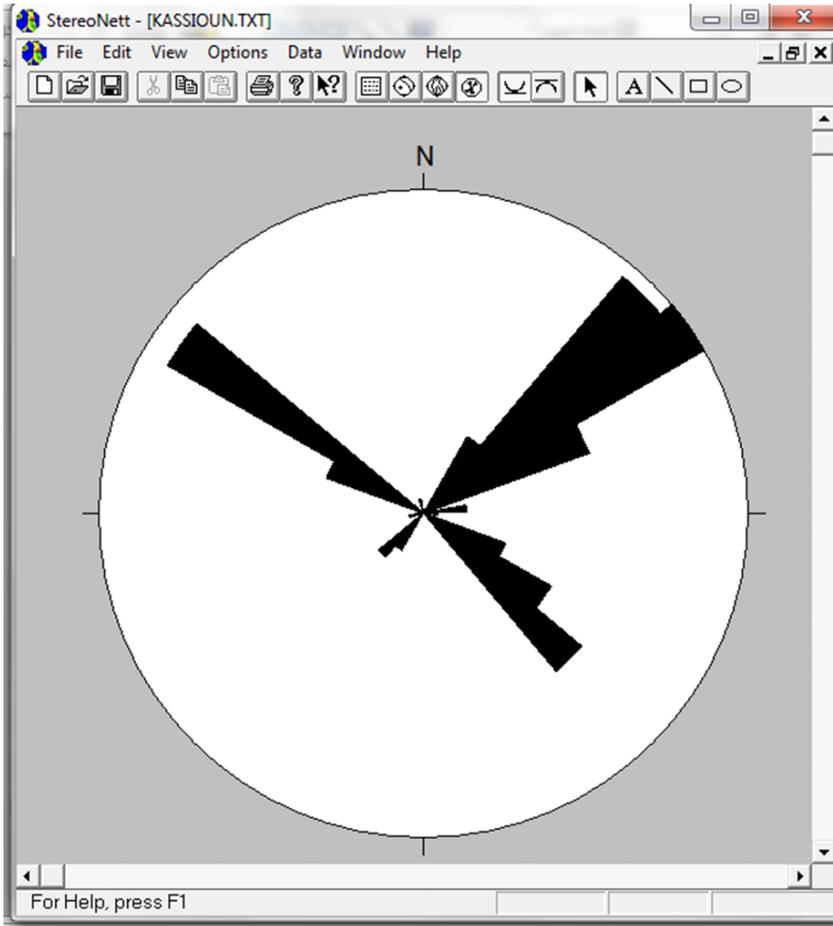
يتم إدخال معطيات الوضعية الفراغية للشقوق من خلال الصفحة الخاصة بذلك في البرنامج (شكل 15 - 10).

No	Azimut	Dip	Type	Mark	Comment
1:	300.0	85.0	P	+	
2:	300.0	85.0	P	+	
3:	32.0	74.0	P	+	
4:	55.0	78.0	P	+	
5:	308.0	82.0	P	+	
6:	300.0	87.0	P	+	
7:	90.0	45.0	P	+	
8:	302.0	81.0	P	+	
9:	305.0	82.0	P	+	
10:	52.0	68.0	P	+	
11:	130.0	82.0	P	+	
12:	133.0	85.0	P	+	
13:	135.0	88.0	P	+	
14:	50.0	79.0	P	+	
15:	55.0	80.0	P	+	
16:	225.0	86.0	P	+	
17:	60.0	80.0	P	+	
18:	30.0	79.0	P	+	
19:	48.0	81.0	P	+	
20:	129.0	88.0	P	+	
21:	130.0	86.0	P	+	
22:	134.0	88.0	P	+	
23:	50.0	80.0	P	+	
24:	132.0	84.0	P	+	
25:	131.0	81.0	P	+	
26:	65.0	75.0	P	+	
27:	65.0	70.0	P	+	
28:	55.0	82.0	P	+	
29:	290.0	77.0	P	+	
30:	344.0	82.0	P	+	
31:	300.0	85.0	P	+	
32:	85.0	87.0	P	+	
33:	58.0	77.0	P	+	
34:	120.0	85.0	P	+	
35:	131.0	78.0	P	+	
36:	129.0	82.0	P	+	
37:	120.0	80.0	P	+	

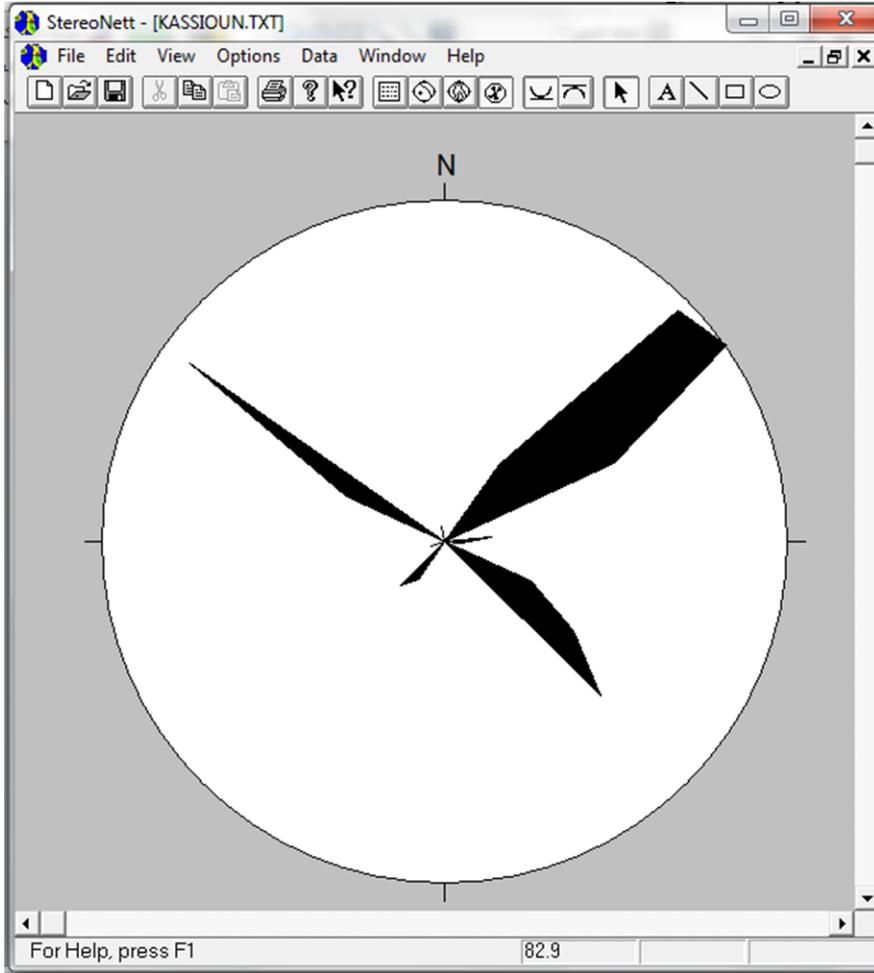
شكل (15 - 10): إدخال معطيات الوضعية الفراغية في برنامج StereoNett.

ب. يتم تحويل القيم المدخلة إلى مخطط وردة من نمط "بيان عرض الصف" (شكل

15 - 11)، أو من نمط "بيان القيمة المتوسطة" (شكل 15 - 12).



شكل (15 - 11): مخطط الوردية (وردية 360°) من نمط "بيان عرض الصف" باستخدام برنامج StereoNett.



شكل (15 - 12): مخطط وردة (وردة 360°) من نمط "بيان القيمة المتوسطة" باستخدام برنامج StereoNett.



**الباب السابع - الفصل السادس عشر**  
**تقانات الإسقاط الستيريوغرافي (الإسقاط المجسم)**  
**Stereographic Projection Techniques**

**1.16. مدخل**

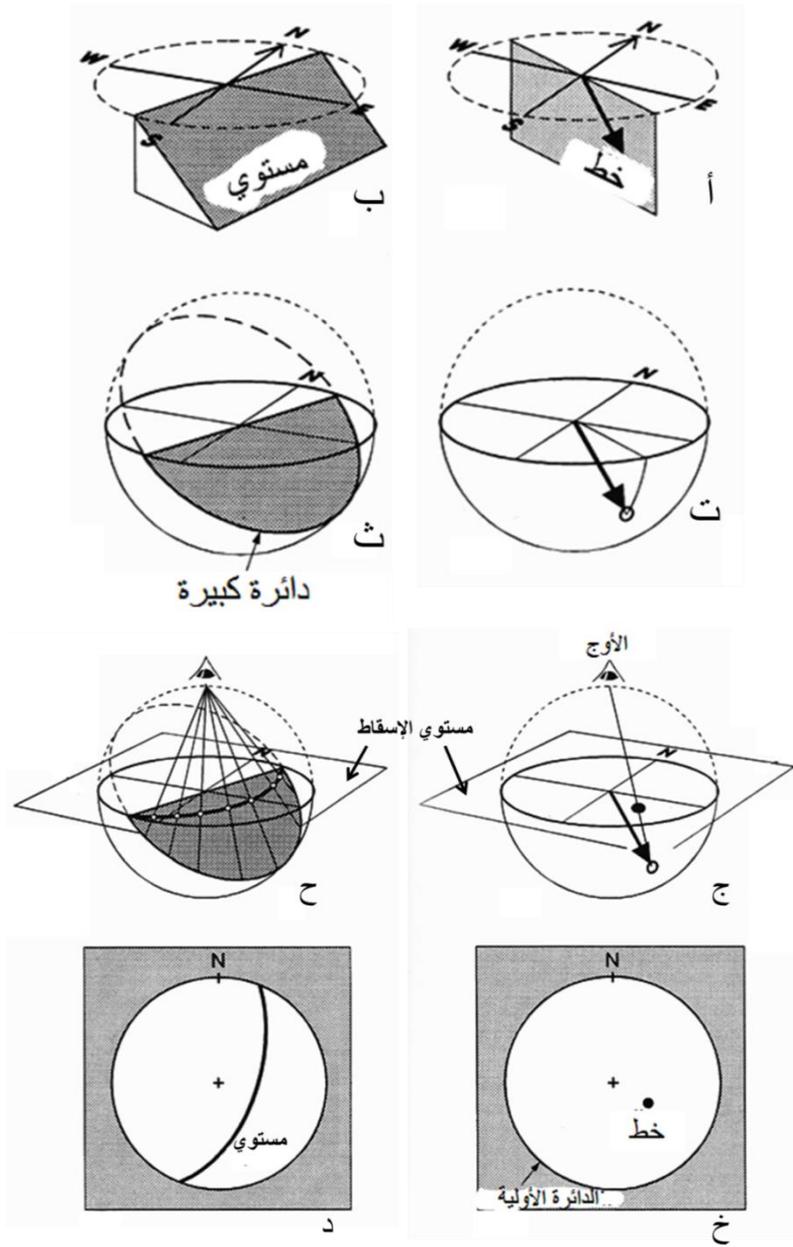
يعد الإسقاط الستيريوغرافي أداة أساسية يستخدمها الجيولوجي البنيوي لتمثيل ومعالجة معطيات الوضعيات الفراغية ثلاثية الأبعاد، أي أن الإسقاط الستيريوغرافي يُمكننا من تمثيل التوجهات ثلاثية الأبعاد على مخططات ثنائية البعد، ومن حل كثير من المسائل الهندسية المتعلقة بها ( Möbus, 1989, Leyshon and Lisle, 1996, Lisle and Leyshon, 2004 )  
(Duebendorfer et. al, 2007, Ragan, 2009).

**2.16. ماهو مبدأ الإسقاط الستيريوغرافي؟**

يمكن فهم هذا المبدأ عبر مرحلتين:

**مرحلة 1: إسقاط خط أو مستو بنيوي على كرة**

يبين الشكل (16-1 أ) خطاً متعرجاً، ولنتصور أننا وضعنا هذا الخط في كرة (شكل 16-1 ت). يتقاطع هذا الخط مع الكرة في نقطة تسمى المسقط الكروي Spherical projection للخط. وتكون هذه النقطة عادة في النصف الأسفل للكرة. ويبين الشكل (16-1 ب) مستويًا تم إسقاطه بالطريقة نفسها، حيث يتقاطع هذا المستوي مع نصف الكرة الأسفل مشكلاً ما يسمى دائرة كبيرة Great circle (تمثل خطوط الطول على سطح الكرة الأرضية دوائر كبيرة أما خطوط العرض فنتمثل دوائر صغيرة، شكل 16-1 ت). وهكذا فإننا يمكن أن نصف الوضعية الفراغية لأي خط بنيوي بتحديد موقعه على نصف الكرة الأسفل، ولأي مستو من خلال دائرة كبيرة على نصف الكرة الأسفل. ومن أجل إجراء هذا التمثيل على الورق المسطح (ذو البعدين) نستخدم طريقة الإسقاط الستيريوغرافي.



شكل (1-16): مبدأ الإسقاط الستيريوغرافي (Leyshon and Lisle 1996).

مرحلة 2: إسقاط النقاط والدوائر الكبيرة من نصف الكرة الأسفل إلى قطعة مسطحة من الورق  
نستخدم مستويًا أفقيًا يمر من مركز الكرة كمستوي إسقاط Plane of projection (شكل 16-1 ج ، ح). إن تقاطع الكرة مع مستوي الإسقاط يعطي دائرة كبيرة تسمى "الدائرة الأولية" Primitive circle، ويتم إسقاط النقاط الموجودة في نصف الكرة الأسفل على مستوي الإسقاط بتحريكها على طول مستقيمات تمر عبر أعلى نقطة من نقاط الكرة (نقطة الأوج Zenith، شكل 16-1 ج). أما الدائرة الكبيرة الموجودة في نصف الكرة الأسفل فتسقط على شكل قوس دائري (شكل 16-1 ج). وهكذا فإن النتيجة النهائية لهذا الإسقاط تؤدي إلى تمثيل لمعطيات ثلاثية الأبعاد على قطعة مسطحة من الورق، وهو ما يسمى المخطط المجسم (الستيريوغرام Stereogram (شكل 16-1 خ ، د).

### 3.16. طريقة تقريبية لتوقيع Plotting الخطوط والمستويات

تمثل هذه الفقرة طريقة عملية تقريبية تهدف لتعميق فهم الإسقاط الستيريوغرافي.

#### 1.3.16. رسم ستيريوغرام لبنية خطية

مثال: لدينا خط يتغرق بزاوية  $25^\circ$  نحو  $120^\circ$ .

- لندون هذا القياس بطريقة معيارية، مثلاً  $120^\circ - 25^\circ$  أو  $120^\circ / 25^\circ$  (شكل 16-2 أ)

- نرسم رمز الخط على الخريطة (شكل 16-2 ب)

- نرسم دائرة (بقطر اختياري وليكن 3 أو 4 سم) لتمثل "الدائرة الأولية" للستيريوغرام، ونحدد

علامة الشمال والمركز (شكل 16-2 ث).

- تمثل هذه الدائرة نظرة لنصف الكرة الأسفل بالشكل الذي ترى عليه من نقطة الأوج (شكل

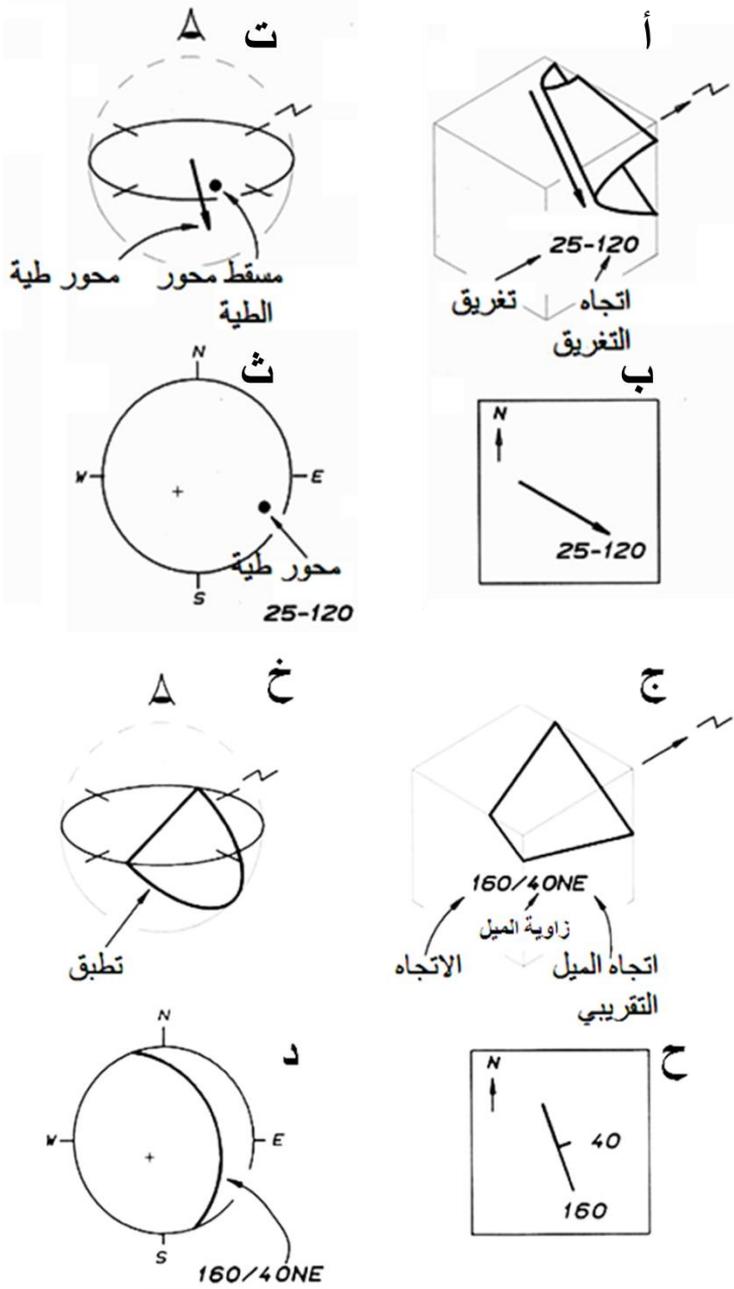
16-2 ت). ولنتصور هنا أننا نقلنا البنية الخطية من الخريطة المرسومة آنفاً (شكل

16-2 ب) إلى مركز هذه الكرة. ونجد أن هذا الخط سيتقاطع مع نصف الكرة الأسفل في

نقطة بحسب اتجاه تغريقه وزاويته. لنقدر الآن أين هو موقع هذه النقطة داخل الدائرة الأولية.

لاحظ أن الخطوط ذات زوايا التغريق الخفيفة ستكون مساقطها أقرب للدائرة الأولية، أما

الخطوط ذات زوايا التغريق الشديدة ستكون مساقطها أقرب لمركز الستيريوغرام.



شكل (16-2): رسم ستيريوغرام لبنية خطية (أ، ب، ت، ث) ولمستوي (ج، ح، خ، د) (Leyshon and Lisle 1996).

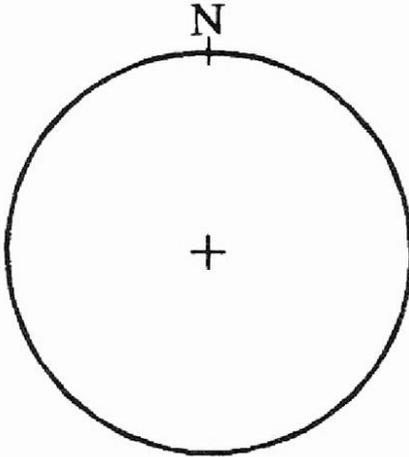
### 2.3.16. رسم ستيريوغرام لمستوي

تمثل الأشكال (16- 2 -ج، ح، خ، د) المراحل المتتالية سابقاً نفسها إنما من أجل عنصر بنيوي مستو في هذه المرة. لاحظ أن الدائرة الكبيرة الممثلة للمستوي ذات شكل منقوس باتجاه ميل المستوي، وأن درجة تقوسها تتعلق بقيمة زاوية ميل المستوي. أي أن الدوائر الكبيرة الممثلة لمستويات ذات ميول خفيفة ستكون أكثر تقوساً وأقرب إلى الدائرة الكبيرة من تلك الممثلة لمستويات أشد ميلاً. أما المستويات الشاقولية فتؤدي إلى دوائر كبيرة بشكل خطوط مستقيمة.

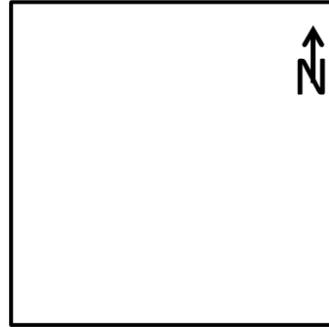
### 4.16. تمارين

#### 1.4.16. التمرين الأول

ارسم شكلاً مشابهاً للشكل (16- 3) على دفترك، متضمناً لخريطة وستيريوغرام وكرره بعدد القياسات المرفقة في اللوحة التالية (اللوحة 16- 1). أسقط قياسات الوضعيات الفراغية للخطوط والمستويات المبينة في هذا الجدول على هذه الخرائط وعلى مخططات الستيريوغرام باستخدام الرموز المناسبة في كل منها.



ستيريوغرام



خريطة

شكل (16- 3): خريطة وستيريوغرام لإسقاط الوضعيات الفراغية للخطوط والمستويات المبينة في اللوحة (16- 1).

اللوحة (16 - 1): القياسات المستخدمة في التمرين الأول.

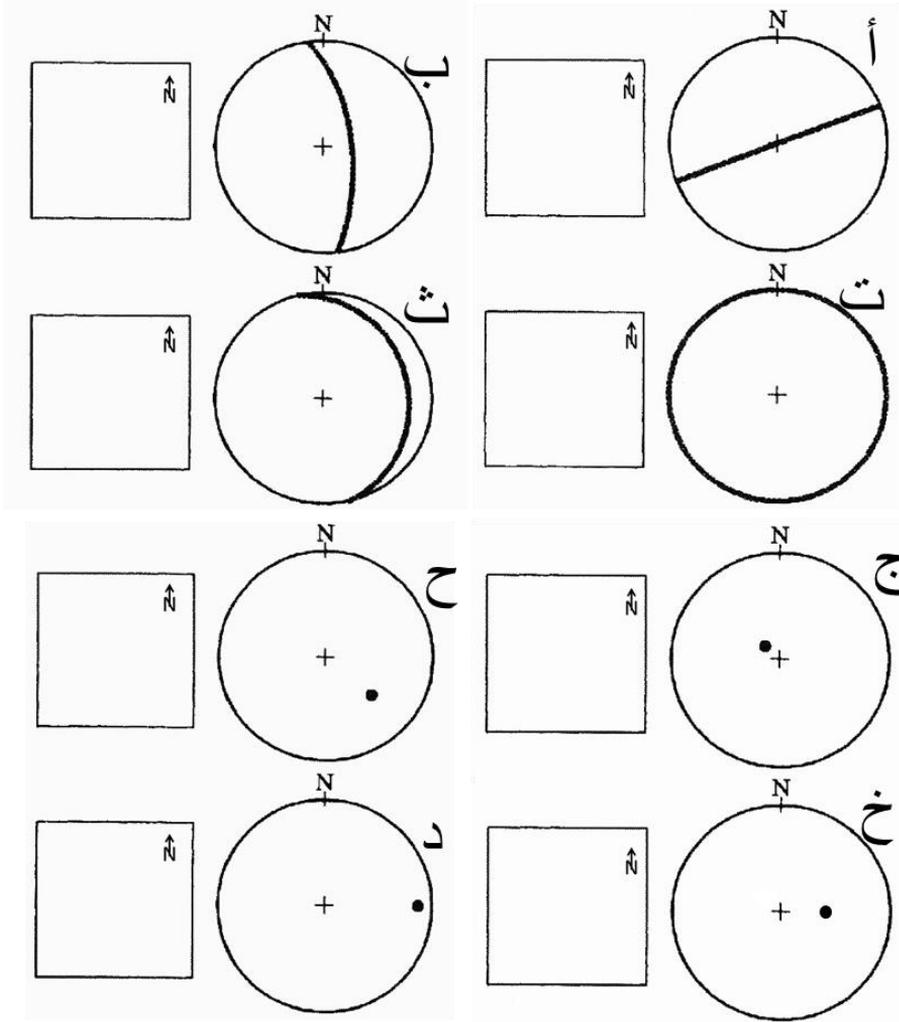
القياس	البنية
030/20W	سطح طبقي
030/70W	سطح شق
140/40E	سطح انفصال
220/90	سطح طبقي
10-290	خط مفصلة محدب
70-120	خطوطية فلزية
0-080	خط تقاطع مستويين

#### 2.4.16. التمرين الثاني

مثلّ المستويات والخطوط المسقطة على الستيريوجرامات الموضحة في الشكل التالي (شكل 16- 4) من خلال الرمز المناسب على الخريطة المرافقة لكل منها واكتب قيمة الوضعية الفراغية، حيث مُثلّت المستويات بدوائر كبيرة والخطوط بنقاط.

#### 3.4.16. التمرين الثالث

لنفترض وجود مستو اتجاهه  $080^\circ$  وميله  $60S$ . ارسم رمز هذا المستوي على الخريطة وارسم مخطط الستيريوجرام وذلك بشكل مشابه لما قمت به في التمرين الأول. ماهي زاوية تغريق واتجاه تغريق ناظم هذا المستوي، أسقط هذا الناظم على مخطط الستيريوجرام (استخدم الشكل 16- 3).



شكل (16-4): الستيريوغرامات والخرائط المستخدمة لحل التمرين الثاني. تعبر الدوائر الكبيرة عن المستويات، بينما تعبر النقاط عن الخطوط.



## الباب السابع - الفصل السابع عشر

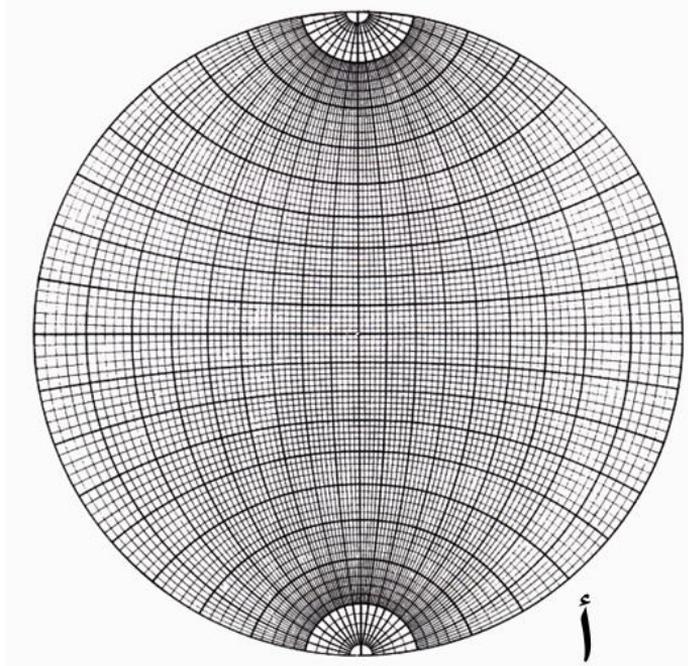
### الإسقاط الستيريوغرافي للعناصر البنيوية المستوية والخطية

#### Stereographic Projection of planar and Linear Structures

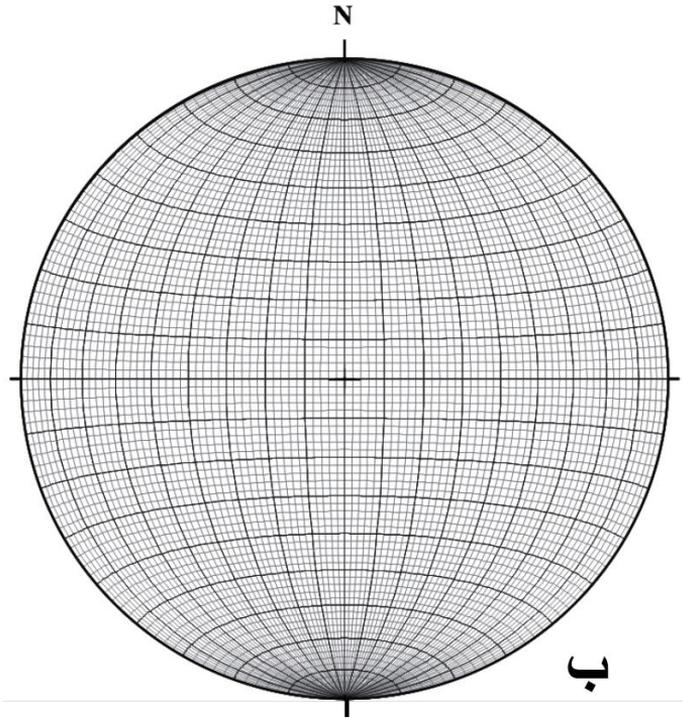
#### 1.17. إسقاط (توقيع) المستويات Plotting plane : دوائر كبيرة وأقطاب Great circles and poles

يمثل الشكل (1-17) شبكة وولف Wulff net وشبكة شميت Schmidt net اللتين تستخدمان في عديد من التطبيقات الهندسية.

يتم تمثيل المستويات من خلال دوائر كبيرة، أو من خلال مستقيم متعامد مع المستوي، حيث يُسقط المستوي على الستيريوغرام بشكل نقطة تسمى "قطب المستوي" Pole of the plane.



شكل (1-17 - أ): شبكة وولف.



شكل (17-1 - ب): شبكة شميت.

مثال:

أجري قياس للوضعية الفراغية لطبقة فوجد أن الاتجاه يساوي  $60^\circ$  والميل يساوي  $30^\circ$  نحو الجنوب الشرقي (060/30SE).

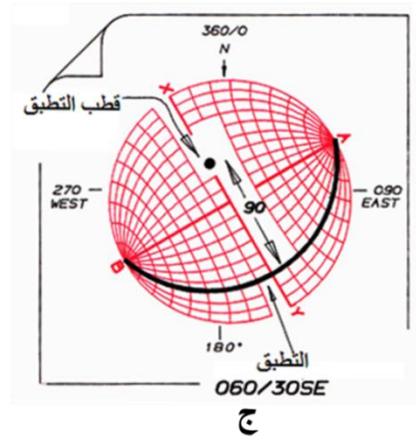
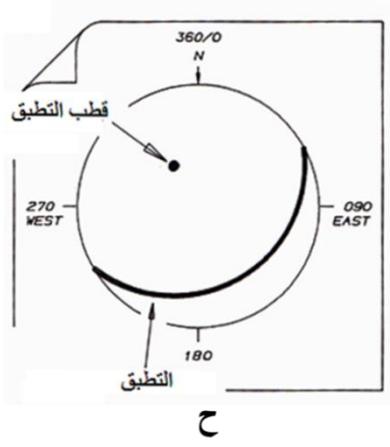
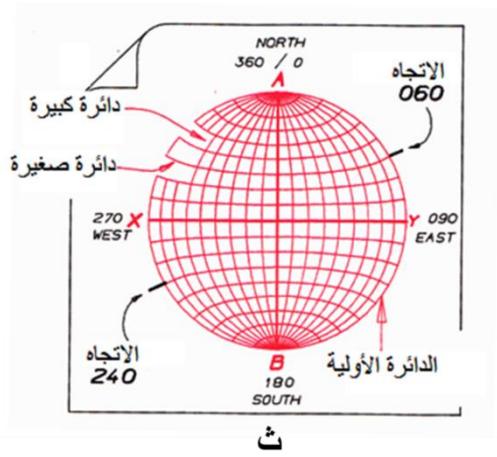
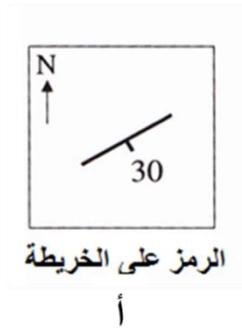
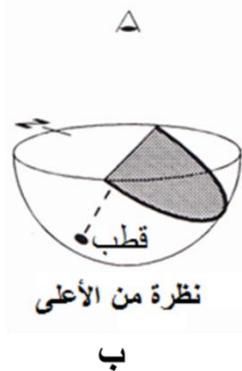
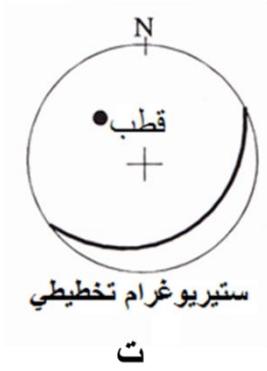
طريقة الإسقاط:

أ- يمكن للمبتدئ أن يبدأ تدريبه على عملية الإسقاط بمحاولة توقع شكل مسقط المستوي على الشبكة. ليرسم أولاً خريطة مصغرة لهذا القياس باستخدام الرمز المناسب (شكل 17-2 - أ)، ولنتخيل كيف سيبدو هذا المستوي إذا تموضع في نصف كرة أسفل (شكل 17-2 - ب) ثم نرسم الستيريوغرام، وذلك من خلال نظرة من أعلى (نظرة الطائر Bird's eye view) لنصف الكرة الأسفل (شكل 17-2 - ت). تُمكن هذه الطريقة من تجنب الوقوع بأخطاء في أثناء عملية الإسقاط.

- ب- اكتب الأحرف  $A - B$  و  $X - Y$  عند نهايات أقطار الشبكة (شكل 17 - 2 - ث).
- ت- ضع الورقة الشفافة فوق الشبكة ثم أدخل دبوساً في مركزهما.
- ث- ارسم الدائرة الأولية وضع علامة  $N$  على الورقة الشفافة.
- ج- نحافظ على وضع الشبكة كما هو في الشكل (17 - 2 - ث) نضع علامة على الورقة الشفافة عند الاتجاهين  $60^\circ$  و  $240^\circ$  على الدائرة الأولية.
- ح- نحافظ على وضعية الورقة الشفافة وندور الشبكة التي تحتها حتى يتطابق قطرها  $A-B$  مع النقطتين المحددتين للاتجاهين أنفي الذكر  $60^\circ$  و  $240^\circ$ . ثم نقيس زاوية الميل نحو الداخل على طول القطر  $X-Y$  بدءاً من  $Y$  نحو مركز الشبكة ونضع نقطة على الورقة الشفافة. نرسم الدائرة الكبيرة المارة من هذه النقطة ومن النقطتين  $60^\circ$  و  $240^\circ$ ، وهذه هي الدائرة الكبيرة التي تمثل المستوي الطبقي المطلوب (شكل 17 - 2 - ج).
- خ- مع المحافظة على الشبكة والورقة الشفافة بوضعيهما الأخيرة (شكل 17 - 2 - ج) نقيس  $90^\circ$  بدءاً من الدائرة الكبيرة المرسومة وعلى طول القطر  $X-Y$  باتجاه  $X$  ونوقع نقطة تمثل القطب على المستوي الطبقي.
- د- ننزع الورقة الشفافة من فوق الشبكة ونكون قد حصلنا على الستيريوغرام الممثل للمستوي الطبقي (شكل 17 - 2 - ح).

#### ملاحظات:

- تتقوس الدائرة الكبيرة الممثلة للسطح الطبقي باتجاه الميل، أما القطب فيقع في الربع المتعاكس مع اتجاه الميل. ولو أريد إسقاط السطح الطبقي  $060/30NW$  فإن الدائرة الكبيرة ستتقوس باتجاه  $NW$  وبالتالي فإن القطب سيقع في الربع الجنوبي الشرقي. ولذلك فإن قياس زاوية الميل  $30^\circ$  الوارد في الفقرة "ح" أعلاه يتم على طول القطر  $X-Y$  بدءاً من  $X$  باتجاه المركز.
- إن نقاط التماس ما بين الدائرة الكبيرة والدائرة الأولية تشير إلى قيمة اتجاه المستوي.
- الدوائر الكبيرة الأقل انحناءً تشير إلى مستويات أقل ميلاً.



شكل (17-2): إسقاط مستوي على الستيريوغرام (Leyshon and Lisle 1996).

## 2.17. إسقاط العناصر البنيوية الخطية:

### 1.2.17. إسقاط الخطوط بمعرفة التغيريق

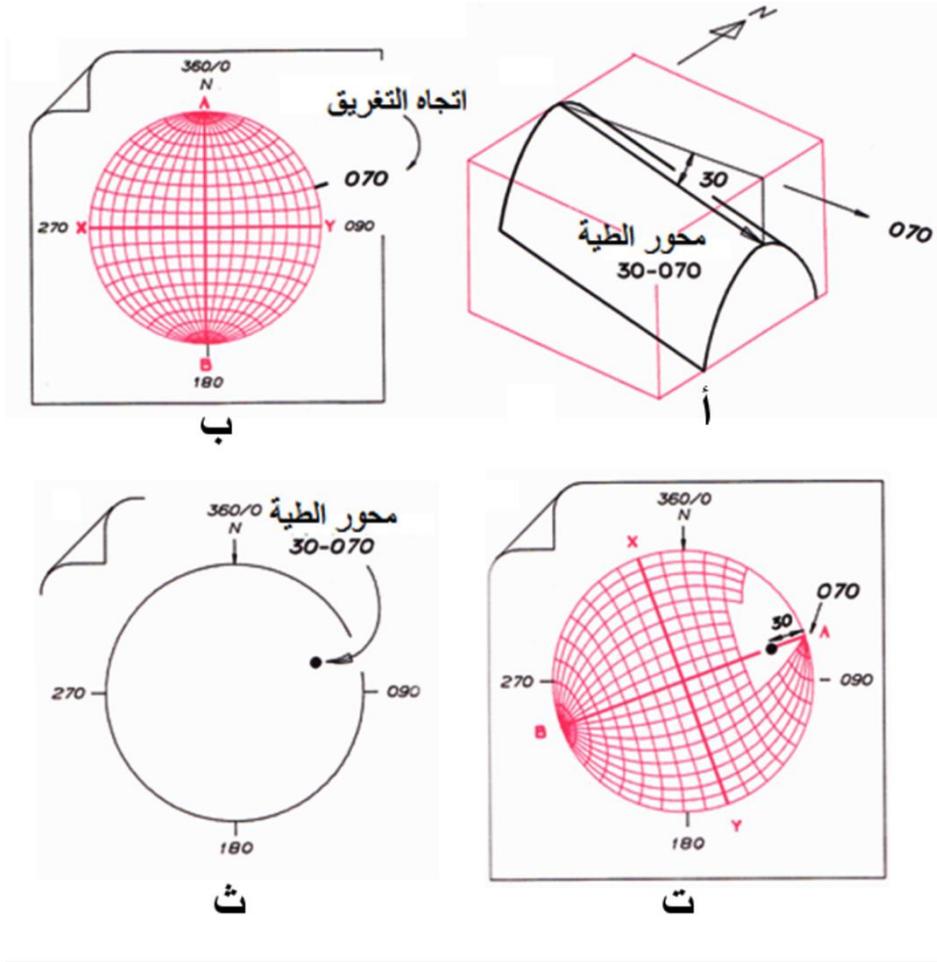
التغيريق زاوية يصنعها خط مع الأفق مقيسة في مستو شاقولي. وكما يلاحظ في الشكل (17-3-أ) فإن محور الطية ليس أفقياً، بل يتغرق بزاوية  $30^\circ$  باتجاه  $70^\circ$  (أي أن القياس يدون بالشكل: 30-070). وهذا يعني أن الخط يتغرق بزاوية  $30^\circ$  عن الأفق، حيث قيس في مستو شاقولي ذي اتجاه  $070^\circ$ . وتتم طريقة الإسقاط كما يلي:

- أ- نحدد الاتجاه  $070^\circ$  على الدائرة الأولية على الورقة الشفافة (شكل 17-3-ب).
- ب- نُدَوِّرُ الشبكة تحت الورقة الشفافة حتى يصل القطر A-B إلى الاتجاه  $070^\circ$  المحدد على الورقة الشفافة، أي اتجاه التغيريق (شكل 17-3-ت).
- ت- نعد قيمة زاوية التغيريق  $30^\circ$  بدءاً من حافة الشبكة (من A في هذه الحالة) باتجاه مركزها (شكل 17-3-ت).

وبهذا يكون الخط 30-070 تم إسقاطه على الستيريوغرام (شكل 17-3-ث)، وذلك بشكل نقطة منفردة.

### 2.2.17. إسقاط الخطوط بمعرفة زاوية انحدار الخط

إن كلاً من التغيريق Plunge وانحدار الخط pitch يتمثلان بالزاوية بين الخط المائل والأفق، غير أن الفرق بينهما يتمثل في أن الأول يقاس ضمن مستو شاقولي، أما الثاني فيقاس ضمن المستوي الحاوي على هذا الخط (شكل 17-4-أ). وبالتالي فإن كلا الزاويتين تقاسان على الستيريوغرام (شكل 17-4-ب) بدءاً من الخط المُسَقَط (أي من النقطة L التي تمثل هذا الخط على الستيريوغرام) حتى الدائرة الأولية. وهكذا تقاس زاوية التغيريق ضمن دائرة كبيرة تمثل القطر (مستوي شاقولي)، أما انحدار الخط فيقاس ضمن دائرة كبيرة تمثل المستوي المائل الحاوي على الخط.



شكل (17-3): إسقاط خط بمعرفة التغيريق (Leyshon and Lisle 1996).

مثال: تم تحديد عنصر خطي يمثل بلورات الأمفيبول فوجد أن انحدار الخط يساوي 50W وذلك على مستوي التورق ذي الوضعية الفراغية 048/40SE (شكل 17-4 ت)، المطلوب تمثيل الوضعية الفراغية لهذا الخط على الستيريوغرام.

أ- أسقط مستوي التورق 048/40SE بشكل دائرة كبيرة على الورقة الشفافة (شكل 17-4 ت) وذلك بإحدى الطرائق المذكورة آنفاً.

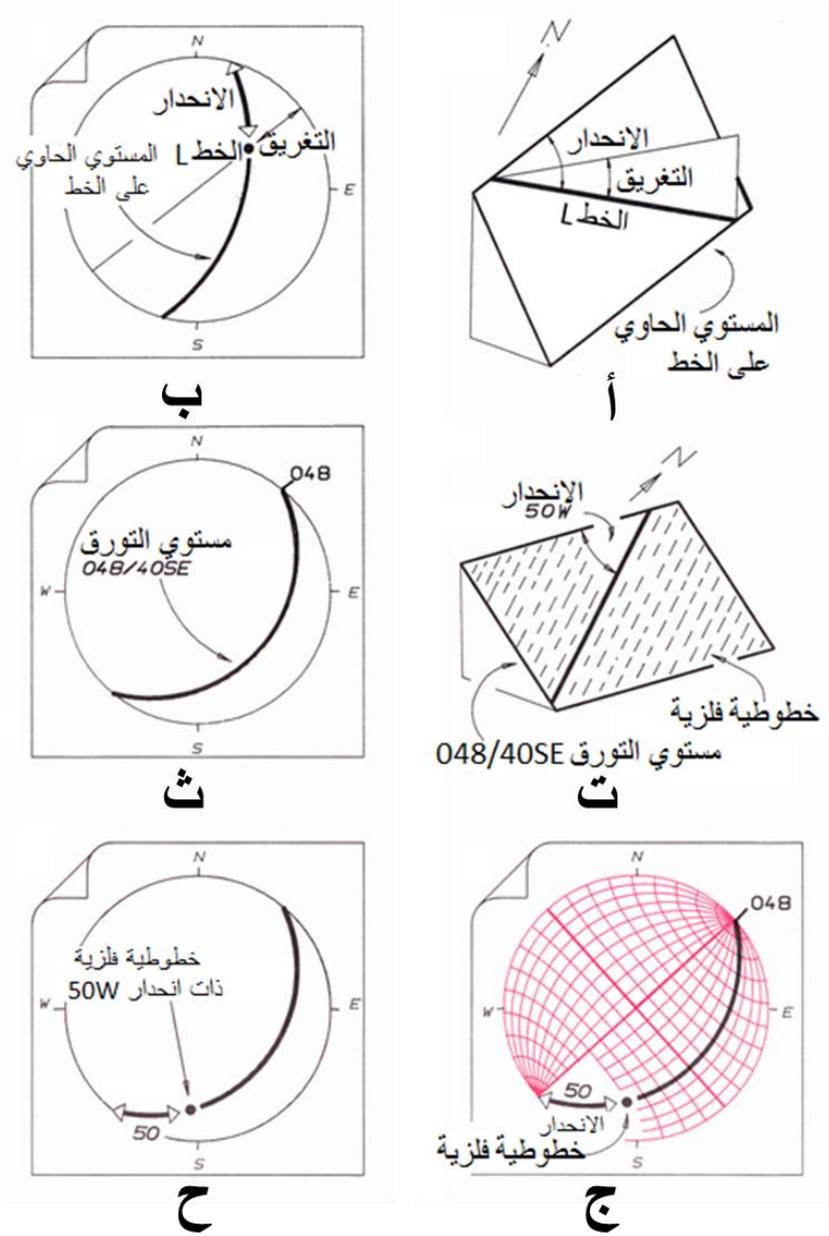
ب- دوّر الشبكة تحت الورقة الشفافة حتى تتطابق إحدى دوائرها الكبيرة مع الدائرة الكبيرة الممثلة للتورق والمرسومة على الورقة الشفافة (شكل 17-4-ج).

ت- نأخذ على امتداد الدائرة الكبيرة قيمة تساوي زاوية انحدار الخط (هنا 50W)، وذلك بدءاً من الدائرة الأولى باتجاه الداخل. ونكون بهذه العملية حددنا موقع النقطة التي تمثل الخط المطلوب (شكل 17-4-ج). وهنا يجب الانتباه إلى أن الحرف W يعني أن انحدار الخط يقاس نحو الأسفل بدءاً من الطرف الغربي لخط اتجاه المستوي (شكل 17-4-ج).

ث- يبين الشكل (17-4-ح) الستيريوغرام النهائي الذي يمثل الخط.

#### تمارين

- أ- تبلغ قيمة زاوية انحدار خط  $30^\circ$ ، حيث أن هذا الخط يوجد على المستوي 120/50S. ماهي اتجاهات التغريق الممكنة لهذا الخط؟
- ب- مستوي 080/20N يحتوي على بنية خطية بزاوية انحدار 80W. ماهو اتجاه التغريق وزاويته لهذا الخط؟
- ت- بالعودة إلى الشكل (17-4-ب)، اذكر الحالات التي تكون فيه زاوية التغريق لبنية خطية تساوي زاوية انحدار الخط.
- ث- تبلغ زاوية انحدار خط  $60^\circ$ ، ويقع هذا الخط على مستوي تورق يميل بزاوية  $48^\circ$ . ماهي قيمة زاوية التغريق؟
- ج- تبلغ زاوية انحدار خط  $40^\circ$  وزاوية تغريقه  $20^\circ$ . ماهي قيمة زاوية ميل المستوي الذي قيست عليه زاوية انحدار الخط؟



شكل (17-4): إسقاط خط بمعرفة زاوية انحداره (Leyshon and Lisle 1996).

### 3.17. طريقة بديلة لتوقيع المستويات والخطوط

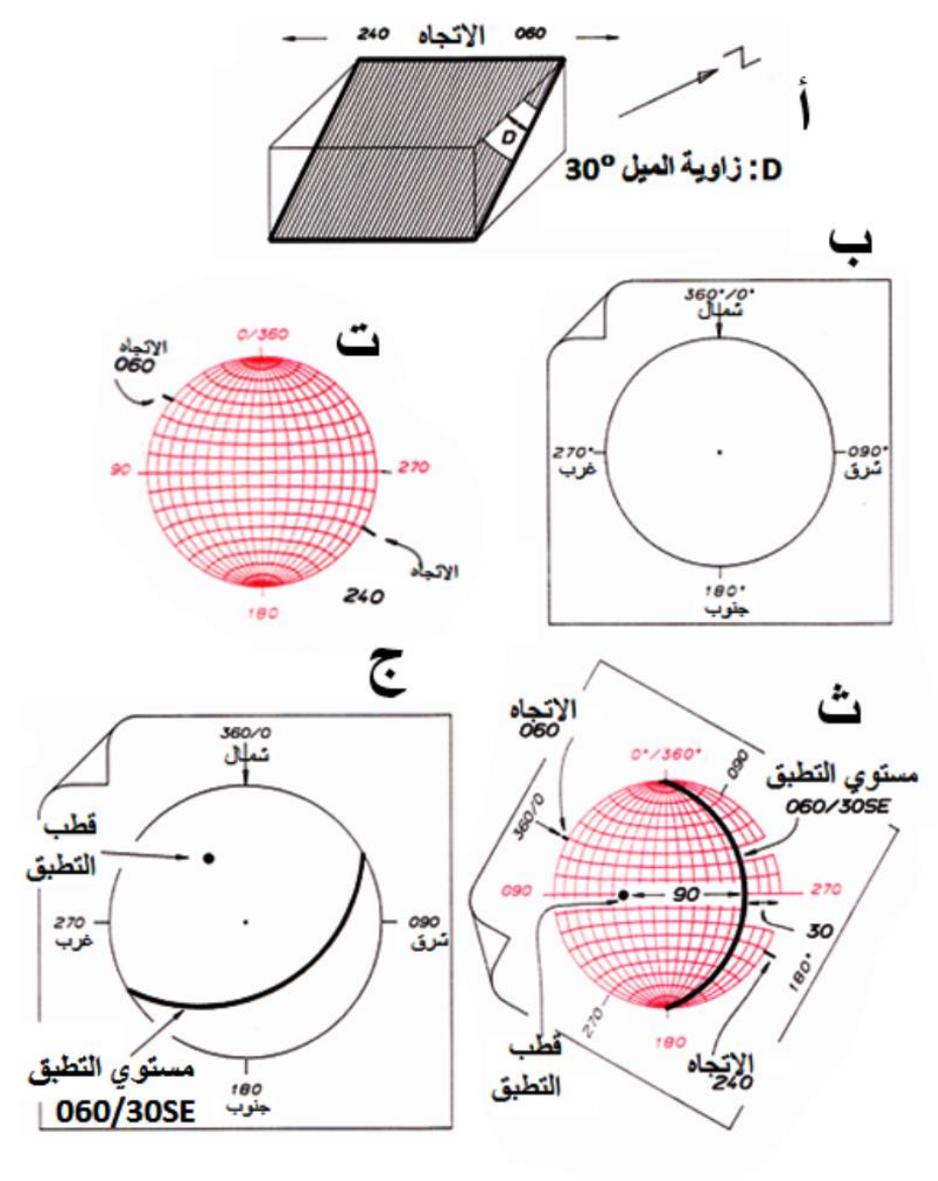
توجد طرائق أخرى لتوقيع العناصر البنيوية مختلفة عما وصف آنفاً (الفقرة 1.17 والفقرة 2.17). وتتضمن الطريقة البديلة للتوقيع تدوير الورقة الشفافة فوق الشبكة الثابتة. ويمكن شرح هذه الطريقة من خلال المثال التالي:

إسقاط المستوي 060/30SE (شكل 17-5 أ) بشكل دائرة كبيرة وقطب:

- أ- نضع الورقة الشفافة فوق الشبكة.
- ب- نعين الدرجات  $0^\circ - 360^\circ$  بفواصل  $10^\circ$  على الورقة الشفافة بحسب دوران عقارب الساعة، ونحدد علامة الشمال (شكل 17-5 ب).
- ت- نقوم بتعيين الدرجات على الشبكة أيضاً إنما بعكس دوران عقارب الساعة (شكل 17-5 ت).
- ث- ندور الورقة الشفافة حتى تصل علامة الشمال المرسومة عليها إلى قيمة  $060^\circ$  المحددة على الشبكة (أي أن التدوير يتم هنا بعكس عقارب الساعة، شكل 17-5 ث).
- ج- نقيس  $30^\circ$  على قطر  $090 - 270$  العائد للشبكة، بدءاً من علامة  $270$  نحو المركز ونرسم الدائرة الكبيرة المناسبة. ومع المحافظة على هذه الوضعية للشبكة والورقة الشفافة، نقيس  $90^\circ$  على القطر  $090 - 270$  نفسه، وبدءاً من الدائرة الكبيرة التي رسمناها للتو، محددین بذلك نقطة القطب (شكل 17-5 ث).
- ح- ندور الورقة الشفافة لنعيدها إلى وضعها الأصلي (شكل 17-5 ج).

### إسقاط الخط 050 - 30

- أ- ندور الورقة الشفافة حتى تصل علامة الشمال إلى قيمة  $050^\circ$  المحددة على الشبكة.
- ب- نقيس  $30^\circ$  على طول قطر  $0 - 180$  العائد للشبكة بدءاً من المحيط ( $0^\circ$ ) نحو المركز ونوقع نقطة تمثل المستقيم  $050 - 30$ .
- ت- ندور الورقة الشفافة لنعيدها إلى وضعها الأصلي.



شكل (17- 5): طريقة بديلة للإسقاط: تدوير الورقة الشفافة فوق الشبكة الثابتة (Leyshon and Lisle 1996).

## الباب السابع - الفصل الثامن عشر العلاقات بين المستويات والخطوط

### 1.18. تقاطع مستويين

يبين الشكل (18-1-أ) الخط L الناتج من تقاطع المستويين 1 و 2. ولو اعتبرنا أن هذين المستويين يمران من مركز كرة (شكل 18-1-ب) لوجدنا أن خط تقاطعهما L يمتد من مركز الكرة حتى نقطة تقاطع دائرتيهما الكبيرتين. وهكذا يمكن إيجاد خط تقاطع أي مستويين من خلال التمثيل الستيريوغرافي بإسقاط الدائرتين الكبيرتين الممثلتين لهذين المستويين، حيث تعد نقطة تقاطع الدائرتين الكبيرتين المسقط الستيريوغرافي لخط التقاطع. ويتم بعد ذلك تحديد قيمة التغيرق واتجاهه بطريقة معاكسة لطريقة إسقاط العناصر البنيوية الخطية بمعرفة التغيرق (المذكورة آنفاً).

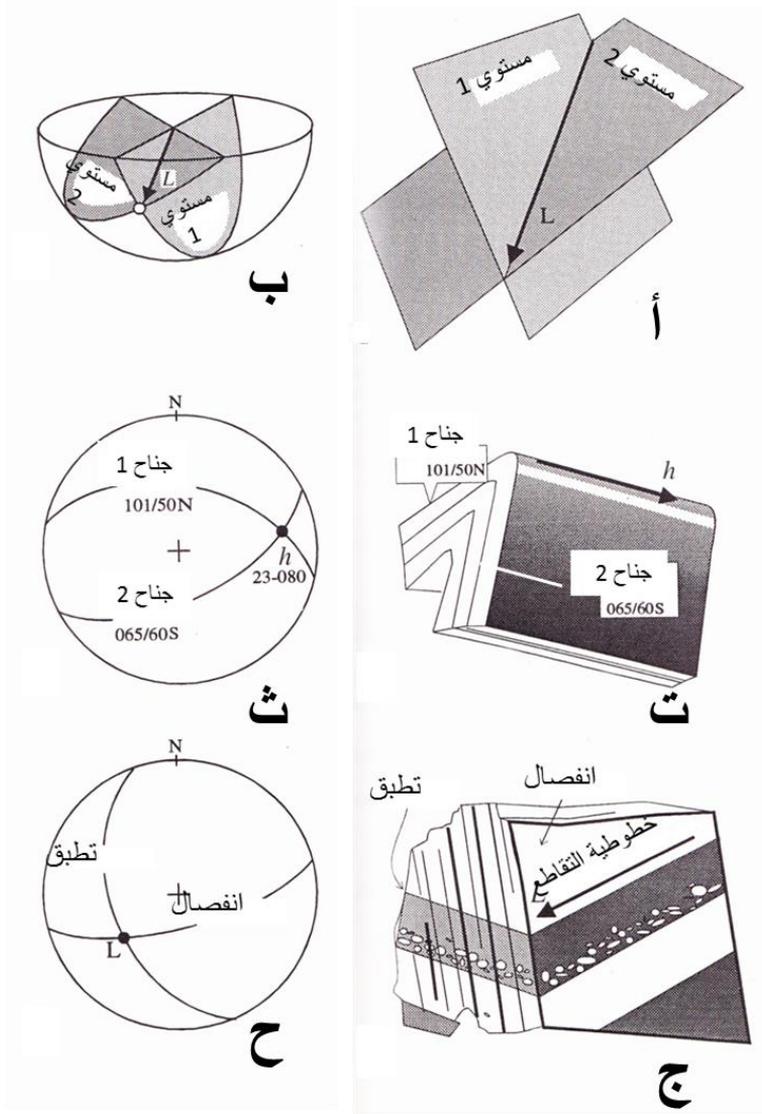
### 1.1.18. أمثلة محلولة:

**مثال 1 محلول:** قيست الوضعية الفراغية لجناحي طية زاوية Chevron-style fold فكانت قيمها: 101/50N و 065/60S (شكل 18-1-ت)، والمطلوب تحديد قيمة الوضعية الفراغية لخط مفصلة هذه الطية.

**الحل:** يتم إسقاط الدائرتين الكبيرتين الممثلتين لهذين المستويين على الشبكة (شكل 18-1-ث)، فنجد أنهما تتقاطعان عند نقطة تمثل الوضعية الفراغية لخط تقاطع المستويين (خط المفصلة) الذي يتغيرق بزاوية 23° باتجاه 080° (أي أن قيمته وضعيته الفراغية 080-23).

### مثال 2 محلول:

يبين الشكل (18-1-ج، ح) كيف أن قياس الوضعية الفراغية للتطبيق ولمستوي الانفصال في تكشف صخري يسمح بتحديد الوضعية الفراغية للبنية الخطية L الناتجة من تقاطعهما (خطوطية تقاطع التطبيق والانفصال Bedding/Cleavage intersection lineation).



شكل (1-18): تقاطع مستويين (Leyshon and Lisle 1996).

## 2.1.18. تمارين:

- أ- أجري قياس للوضعية الفراغية لطبقة فأعطى 010/25E، وقد وجد أن هذه الطبقة مزاحة بصدع 240/50N. حدد الوضعية الفراغية لخط القطع (أثر المستوي الطبقي على سطح الصدع).
- ب- يتكشف صخر اندفاعي بشكل صفيحة اندسائية ذات الوضعية الفراغية 130/75N، ووجد أن هذا الاندساس مصاب بمجموعة شقوق شاقولية ذات اتجاه 100°. حدد تغريق (زاوية واتجاه) خط التقاطع ما بين الاندساس والشقوق.
- ت- طبقات 100/25S مصابة ببنية انفصال 220/60NW. حدد قيم تغريق البنية الخطية الناتجة من تقاطع الطبقات مع الانفصال. احسب زاوية انحدار هذه البنية الخطوية مرتين: مرة مع سطوح التطبيق ومرة مع سطوح الانفصال.
- ث- قيست الوضعية الفراغية لجناح طية فوجد أنه شاقولي ذو اتجاه 126°. ماذا يمكن أن نستنتج عن الوضعية الفراغية لخط المفصلة؟

## 2.18. مستوي يحوي خطين

كما هو معروف فإن مستقيمين يحددان مستويًا، وهذه ميزة هندسية يمكن الاستفادة منها في مسائل جيولوجية بنيوية، أي تحديد الوضعية الفراغية لمستو من خلال معرفة خطين محتويين ضمنه. فلو أخذنا السطح المحوري للطيات كمثال على ذلك، فإن قياس الوضعية الفراغية لهذا السطح في الحقل صعب عادةً، لأنه ليس سطحاً حقيقياً مرئياً في التكتشف. وبدلاً من ذلك فإن ما نلاحظه في الحقل يتمثل بأثر السطح المحوري (الخط  $x$  أو الخط  $y$  في الشكل 18-2-أ). وهذه الخطوط موازية للسطح المحوري ويمكن استخدامها لإنشائه (شكل 18-2-ب).

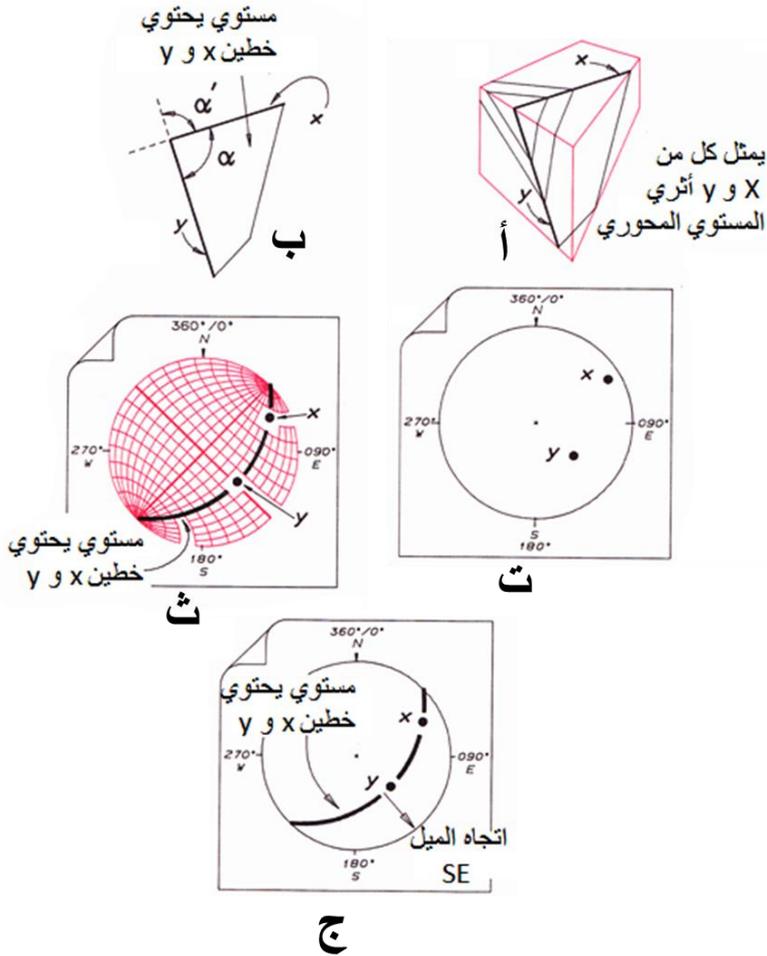
إيجاد المستوي الحاوي على مستقيمين  $x$  و  $y$

أ- أسقط الخطين  $x$  و  $y$  (كما هو مشروح في الفقرات السابقة، شكل 18-2-ت).

ب- دَوِّر الشبكة تحت الستيريوغرام (المرسوم على الورقة الشفافة) حتى تأتي النقطتان x و y إلى دائرة كبيرة مشتركة بينهما (شكل 18-2-ث). ارسم هذه الدائرة الكبيرة على الورقة الشفافة.

ت- حدد قيم الوضعية الفراغية للسطح المحوري من خلال دائرته الكبيرة (شكل 18-2-ث، ج).

تمرين: حدد قيم الوضعية الفراغية للمستوي الحاوي على المستقيمين 120-26 و 350-50.



شكل (18-2): مستوي يحوي خطين (Leyshon and Lisle 1996).

### 3.18. الزاوية بين خطين

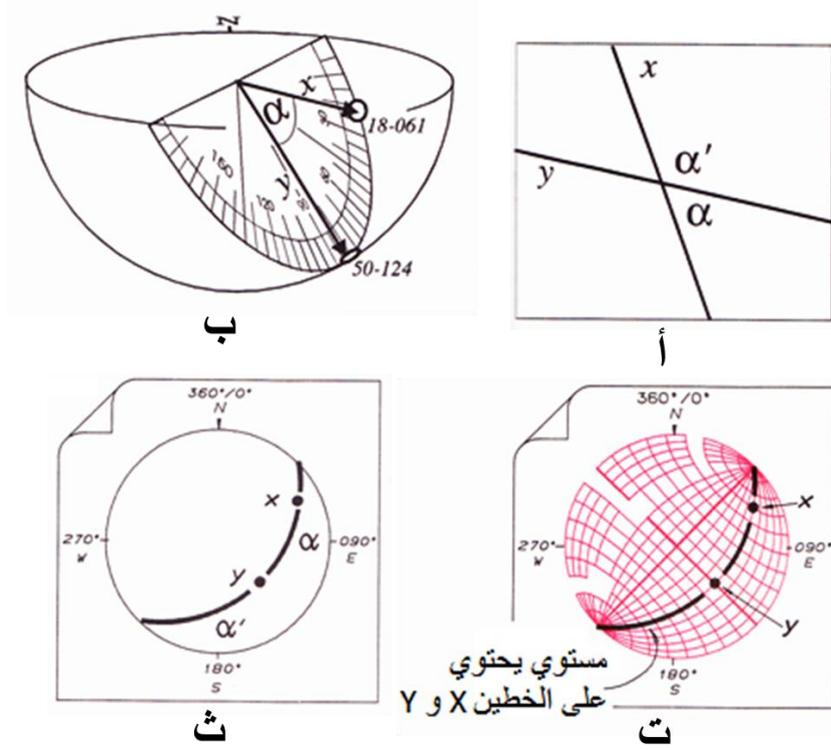
تقاس الزاوية بين خطين ضمن المستوي الحاوي على هذين الخطين (شكل 18-3-أ، ب).  
يبين الشكل (18-3-ب) مثلاً على خطين  $x$  و  $y$ . يتغرق الخط  $x$  بزاوية  $18^\circ$  نحو  $061^\circ$ ،  
بينما يتغرق الخط  $y$  بزاوية  $50^\circ$  نحو  $124^\circ$ . ويمكن إيجاد الزاوية بينهما بطريقة ستيريوغرافية  
كما يلي:

- أ- نسقط الخطين  $x$  و  $y$  (شكل 18-3-ت) بالطريقة الموضحة في الفقرة (17-2).
- ب- ندور الشبكة حتى تصل هاتان النقطتان إلى دائرة كبيرة واحدة مشتركة (شكل 18-3-ت). تمثل هذه الدائرة المستوي الحاوي على هذين الخطين (المنقلة في الشكل 18-3-ب).
- ت- نقيس الزاوية بين هذين الخطين على طول الدائرة الكبيرة (a) أو  $a'$  بحسب المطلوب،  
شكل 18-3-ث). وهي تبلغ في المثال الحالي  $60^\circ$  أو  $120^\circ$ .

### تمرين

حدد قيم الزوايا بين أزواج الخطوط التالية:

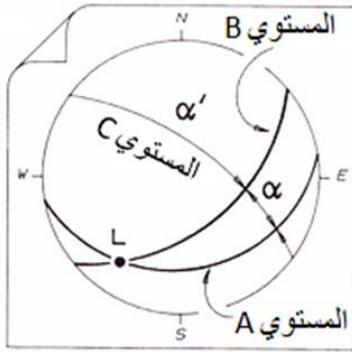
- أ- 56-135 و 23-080
- ب- 80-210 و 56-340
- ت- 00-175 و 70-270



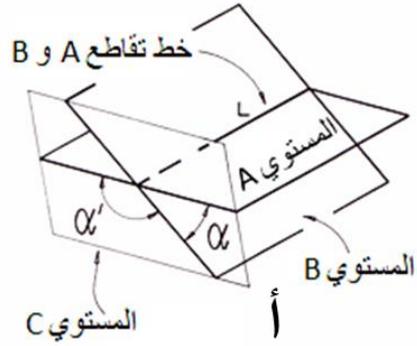
شكل (18 - 3): الزاوية بين خطين (Leyshon and Lisle 1996).

#### 4.18. الزاوية بين مستويين

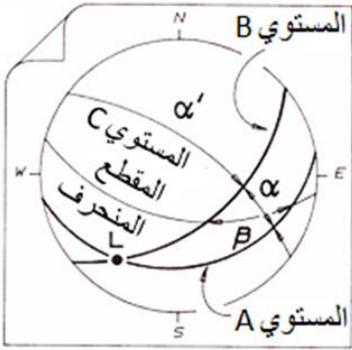
يستخدم هذا النوع من الإنشاء بشكل متكرر خلال الدراسات الجيولوجية البنيوية، كأن نحسب قيمة زاوية الطية *inter-limb angle* أو زاوية لاتوافق بين متتاليتين من الطبقات. تبين الأشكال (18-4 أ، ب، ت، ث) معنى الزاوية بين مستويين. يتقاطع المستويان A و B على طول الخط L. وتَعتمد قيمة الزاوية بينهما على المقطع العرضي المختار لرؤية هذه الزاوية. فمثلاً تختلف الزاوية  $\alpha$  المقاسة في مستوي المقطع C (المتعامد مع خط التقاطع، شكل 18-4 أ) عن الزاوية  $\beta$  المقاسة في مستوي المقطع المنحرف (شكل 18-4 ت). وبالحقيقة فإن الزاوية  $\alpha$  هي الزاوية الحقيقية (أو الزاوية ثنائية الوجه *Dihedral angle*) بين المستويين A و B كونها تقاس في المستوي المتعامد مع خط التقاطع بين هذين المستويين.



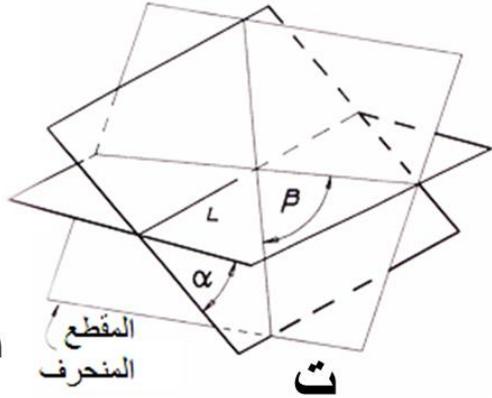
ب



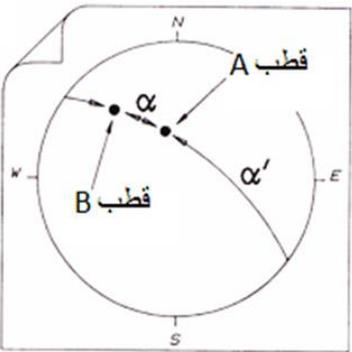
أ



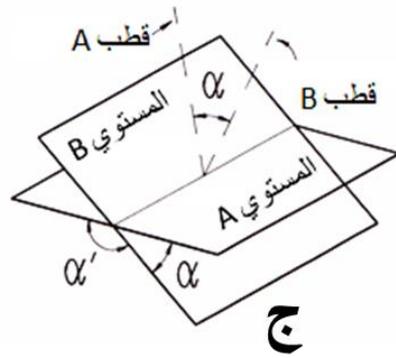
ث



ت



ح



ج

شكل (18-4): الزاوية بين مستويين (Leyshon and Lisle 1996).

## تحديد الزاوية ثنائية الوجه بين مستويين A و B بالطريقة الستيريوغرافية

### • طريقة استخدام الدائرة الكبيرة

- أ- نسقط الدائرتين الكبيرتين الممثلتين للمستويين (A و B في الشكل 18-4-ب).
- ب- إن نقطة تقاطع هاتين الدائرتين تمثل مسقط خط التقاطع L بين هذين المستويين.
- ت- يرسم المستوي C المتعامد مع L على الستيريوغرام (تمثل نقطة L قطب المستوي C).
- ث- تقاس الزاوية  $\alpha$  في المستوي C بين أثري المستويين A و B (خطي تقاطعهما مع المستوي C).

وهنا تجب ملاحظة:

- أن هناك زاويتين يمكن قياسهما هما  $\alpha$  و  $\alpha'$  (الحادة والمنفرجة بين المستويين).
- إذا قيست الزاوية بين A و B في مستو آخر (غير C) فإنها ستختلف عن  $\alpha$ . وكما يلاحظ في الشكل (18-4-ت، ث) فإن الزاوية  $\beta$  تقاس في مستوي مقطع منحرف.

### • طريقة استخدام ناظمي (قطبي) المستويين

تتضمن هذه الطريقة الثانية أن الزاوية بين مستويين تساوي الزاوية بين ناظمي هذين المستويين (العمودين عليهما، شكل 18-4-ج).

- أ- نسقط المستويين A و B بشكل قطبيين (شكل 18-4-ح).
- ب- نقيس الزاوية بين القطبين بنفس الطريقة المشروحة آنفاً للزاوية بين خطين (الفقرة 18-3)، أي أن الزاوية ( $\alpha$  أو  $\alpha'$ ) تقاس على امتداد الدائرة الكبيرة الحاوية على القطبين.

### 5.18. المستوي المنصف للزاوية بين مستويين

يتوضح من الشكل (18-5 أ) أن المستوي المنصف للزاوية بين المستويين P و Q يحتوي على خط التقاطع بين هذين المستويين L، كما يحتوي على الخط c الموجود في المستوي N (المتعامد مع L). ويلاحظ هنا أن الخط c ينصف الزاوية  $\alpha$  الكائنة بين a و b: أثري المستويين P و Q.

### 1.5.18. طريقة استخدام الدائرة الكبيرة

- أ- نسقط المستويين (P و Q في الشكل 18-5 أ) بشكل دائرتين كبيرتين (شكل 15-5 ب). إن نقطة تقاطع هاتين الدائرتين تمثل خط التقاطع L.
- ب- نرسم الدائرة الكبيرة الممثلة للمستوي N المتعامد مع L (شكل 18-5 ب).
- ت- نحدد نقطتي a و b على الدائرة الكبيرة N، وهما اللتان تمثلان تقاطع N مع P و Q.
- ث- نقيس الزاوية الحادة  $\alpha$  بين a و b، ونحدد c في منتصف هذه المسافة (شكل 18-5 ب).

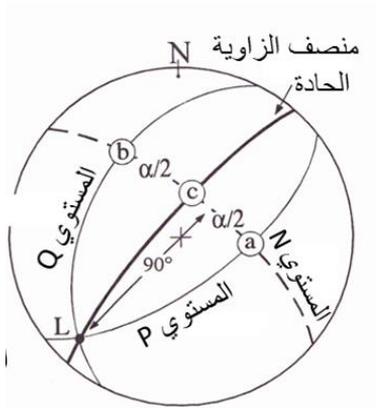
ج- نرسم دائرة كبيرة ما بين L و c. إن هذه الدائرة الكبيرة تمثل المستوي المنصف للزاوية الحادة ما بين المستويين P و Q.

ملاحظة: يمكن تحديد المستوي المنصف للزاوية المنفرجة بين المستويين بالطريقة نفسها، على أن تحدد النقطة d بدلاً من c، التي تنصف الزاوية المنفرجة بينهما على امتداد الدائرة الكبيرة N.

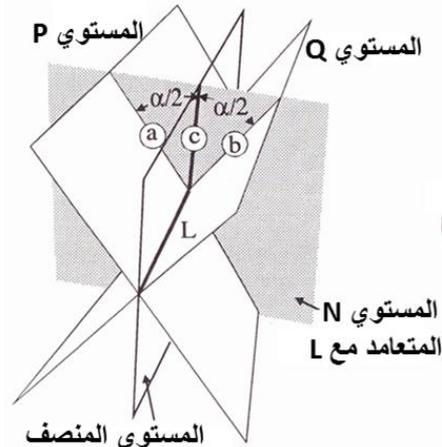
### 2.5.18. طريقة استخدام الأقطاب

يمثل الشكل (18-5 ت) العلاقات الزاوية بين الخطوط في المستوي N. ونلاحظ أن ناظم (العمود على) المستوي المنصف للزاوية الحادة ينصف الزاوية بين ناظمي المستويين P و Q. يمكن استخدام هذه الحقيقة في الستيريوغرام لإيجاد المنصف بين مستويين:

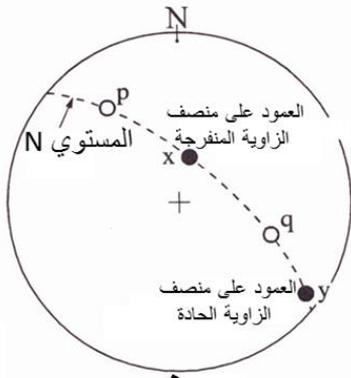
- أ- أسقط قطبي المستويين P و Q (شكل 18-5 ث).
- ب- نرسم الدائرة الكبيرة بين هذين القطبين، ونحدد نقطتي منتصف المسافة الزاوية بين هذين القطبين أي x و y. وتمثل هاتان النقطتان قطبي المستويين المنصفين للزاويتين بين المستويين P و Q.



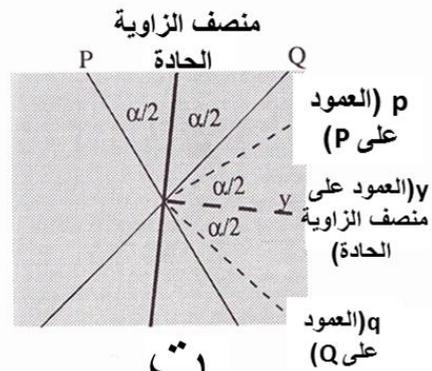
ب



أ



ت



د

شكل (18-5): المستوي المنصف للزاوية بين مستويين (Leyshon and Lisle 1996).

## الباب السابع - الفصل التاسع عشر

### الميل الحقيقي والميل الظاهري True and Apparent dip

تقاس زاوية الميل الحقيقي في مستو شاقولي متعامد مع خط الاتجاه (T في الشكل 19-1 - أ). أما زاوية الميل الظاهري فتقاس في مستو شاقولي لايتعامد مع خط الاتجاه (A في الشكل 19-1 - أ)، وفي مستو شاقولي مواز لخط الاتجاه تظهر الطبقات المائلة بزواوية ميل ظاهرية تساوي الصفر. وتعتمد قيمة زاوية الميل الظاهري على قيمة الميل الحقيقي وعلى الزاوية ما بين اتجاه المستوي والمقطع، حيث نلاحظ مثلاً في الشكل (19-1 - ب) أن المستوي 030/40E يظهر بزوايا ميل ظاهرية تساوي 33° (في الجدار 1) و 19° (في الجدار 2) و 0° (في الجدار الموازي لخط الاتجاه)، أي أن قيمة زاوية الميل الظاهرية تختلف بحسب اتجاه المقطع.

#### 1.19. الإسقاط الستيريوغرافي والميل الظاهري

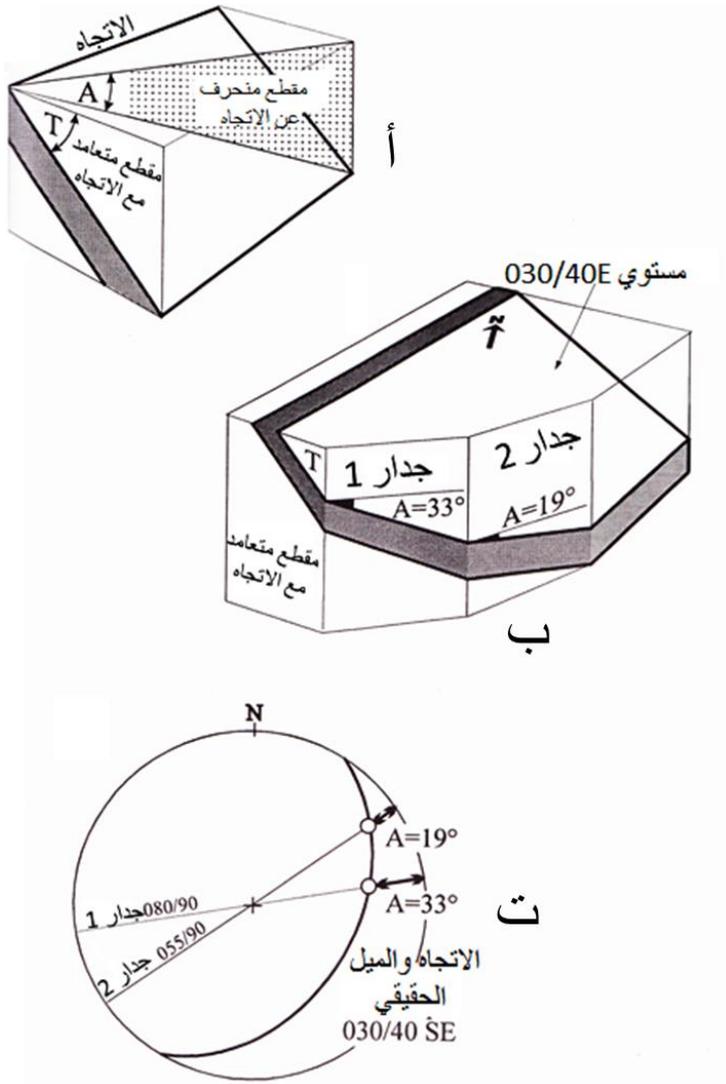
يمكن استخدام الإسقاط الستيريوغرافي لحل نوعين من المسائل المتعلقة بالميل الظاهري:

##### 1.1.19. تحديد قيمة الميل الظاهري في مقطع معروف الاتجاه

تستخدم هذه الطريقة لدى إنشاء مقاطع عرضية لطبقات مائلة أو صدوع أو غير ذلك من المستويات البنيوية. تعد هذه الطريقة تطبيقاً لإنشاء خط التقاطع بين مستويين الموضح سابقاً. إن الميل الظاهري يساوي زاوية التخرق لخط التقاطع بين مستويين هما: المستوي البنيوي المائل والمستوي الشاقولي للمقطع.

#### مثال 1 محلول:

يتوضح في الشكل (19-1 - ت) أن الزاوية  $A=33^\circ$  هي زاوية الميل الظاهري للمستوي 030/40E، وذلك ضمن المقطع 080/90. أما في المقطع 055/90 فإن الزاوية  $A=19^\circ$ .



شكل (19 - 1): الميل الظاهري (Leyshon and Lisle 1996).

مثال 2 محلول:

حددت الوضعية الفراغية لطبقة بقيمة 300/30SW (أي أن الميل 30° باتجاه 210°). ماهي قيمة الميل الظاهري باتجاه 225°.

### خطوات الحل:

- أ- تسقط الدائرة الكبيرة الممثلة للسطح طبقي.
- ب- لتحديد الميل الظاهري يرسم خط ممتد باتجاه الميل الظاهري المطلوب ( $225^\circ$  بدءاً من مركز الستيريوغرام).
- ت- ندور الشبكة حتى يصل الخط المرسوم إلى جهة الغرب.
- ث- نقرأ قيمة زاوية الميل الظاهري عند تقاطع الخط الممثل لاتجاه الميل الظاهري مع الدائرة الكبيرة الممثلة للمستوي.

### 2.1.19. تحديد الاتجاه والميل الحقيقي بمعرفة ميلين ظاهريين

تستخدم هذه الطريقة لتحديد الوضعية الفراغية للمستويات البنيوية المرئية في مقطعين شاقوليين لايمثل أي منهما مقطعها الحقيقي، كأن يكون المستوي البنيوي واضحاً في تكشفين شاقوليين (في مقلع أو منجم مثلاً) غير متعامدين مع خط اتجاه هذا المستوي البنيوي. تشابه هذه المسألة مسألة تحديد مستو حاو على مستقيمين معروفين والموضحة آنفاً. ولهذا الهدف يتم إسقاط المستقيمين المعبرين عن الميلين الظاهريين من خلال زاويتي تغريقهما واتجاههما، لنحصل على نقطتين على الستيريوغرام. ويعطى الاتجاه والميل الحقيقي للمستوي البنيوي من خلال الدائرة الكبيرة التي تمر من هاتين النقطتين على الستيريوغرام.

#### مثال 1 محلول:

يتوضح في الشكل (19 - 1 - ت) أن الدائرة الكبيرة الممثلة للاتجاه والميل الحقيقي تم رسمها من خلال الميلين الظاهريين  $A=19^\circ$  و  $A=33^\circ$ .

#### مثال 2 (محلول):

لدى دراسة طبقة قبيست قيم الميل الظاهري في اتجاهين فكانت:  $13^\circ$  نحو  $295^\circ$  (295-13) و  $20^\circ$  نحو  $200^\circ$  (200-20). ماهو الميل الحقيقي لهذه الطبقة؟

### خطوات الحل:

- نوقع النقطتين a و b الممثلتين للميلين الظاهريين (كمستقيمين).
- ندور الشبكة حتى تصل كل من النقطتين a و b إلى دائرة كبيرة واحدة مشتركة. ونرسم هذه الدائرة.
- إن هذه الدائرة تحوي كلاً من الميلين الظاهريين بالإضافة إلى الميل الحقيقي.
- نقرأ قيمة زاوية الميل الحقيقي.
- ندور الشبكة إلى وضعها الأصلي لقراءة اتجاه الميل الحقيقي.

### 2.19. تمارين:

#### 1.2.19. التمرين الأول

قيست الوضعية الفراغية لطبقة فأعطت 030/35W (الميل الحقيقي  $35^\circ$  نحو  $300^\circ$ ). ماهي قيمة الميل الظاهري في كل من الاتجاهات التالية: نحو الشمال ونحو الغرب ونحو  $336^\circ$  ونحو  $020^\circ$  ونحو  $030^\circ$ ؟

#### 2.2.19. التمرين الثاني

حدّد ميلين ظاهريين لطبقة كما يلي:  $36^\circ$  نحو  $197^\circ$  و  $23^\circ$  نحو  $298^\circ$ . ماهو الميل الحقيقي لهذه الطبقة؟

## الباب السابع - الفصل العشرون

### الإسقاط الستيريوغرافي والإسقاط المحافظ على المساحة

### Stereographic and equal-area projections

#### 1.20. شبكة وولف وشبكة شميت

يبين الشكل (20-1 أ) نوعاً من المعطيات التي توضح من خلال الستيريوغرامات. إن النقاط في هذا المخطط تمثل المحاور الطويلة لشطايا حطامية قيست في رواسب جليدية. إن الهدف من مثل هذه القياسات وتمثيلها في المخططات لايهدف إلى توضيح كل محور لوحده بل يهدف إلى تحليل نمط التوجهات الموجود في العينة بكاملها. فمثلاً إن نمط التوجه السائد للشطايا الجليدية يشير إلى جهة تحرك الجليد. وهنا يجب أن نختبر فيما إذا كان الإسقاط الستيريوغرافي يمثل التجمع الحقيقي للاتجاهات في الفراغ.

يمكن اختبار إمكانية حصول تشوه للمعطيات المسقطة على الشبكة الستيريوغرافية، وذلك من خلال إسقاط معطيات معروفة سلفاً بأنها لا تتصف بأي اتجاه سائد. يبين الشكل (20-1 ب) إسقاطاً من خلال الشبكة الستيريوغرافية ("شبكة وولف"، شكل 20-1 ث) لألف قياس تم اختيارها بالحاسوب بشكل عشوائي. ليست هذه الاتجاهات موزعة بالتساوي عبر الستيريوغرام، غير أنها متجمعة أكثر في الجزء المركزي من الشبكة. وهذا التجمع نتيجة مباشرة لطريقة الإسقاط المستخدمة. أي أن الإسقاط الستيريوغرافي يؤدي إلى اتجاه سائد غير حقيقي تتجمع من خلاله الاتجاهات المسقطة في مركز الستيريوغرام.

تؤدي هذه النتيجة بنا إلى أن التعامل مع أنماط الاتجاهات السائدة، التي يعبر عنها من خلال كثافات الخطوط أو المستويات المسقطة، يجب أن يتم بطريقة لاتؤدي إلى تشوه في المساحة. وقد صُمم إسقاط لميرت المحافظ على المساحة Lambert equal-area projection أو مايسمى "شبكة شميت" Schmidt net (شكل 20-1 ج) لهذا الهدف. ويبين الشكل (20-1 ت) الإسقاط للقياسات الألف أنفة الذكر، وذلك باستخدام شبكة شميت، حيث يلاحظ أن نمط التوزع أكثر اتساقاً.

متى يستخدم الإسقاط الستيريوغرافي ومتى يستخدم الإسقاط المحافظ على المساحة؟

أ- يستخدم الإسقاط المحافظ على المساحة عندما يكون هناك أهمية لكثافة الاتجاهات المسقط.

ب- يستخدم كلا النوعين من الإسقاط في كل التطبيقات الأخرى، بما فيها الإنشاءات الهندسية المذكورة آنفاً في الفقرات السابقة.

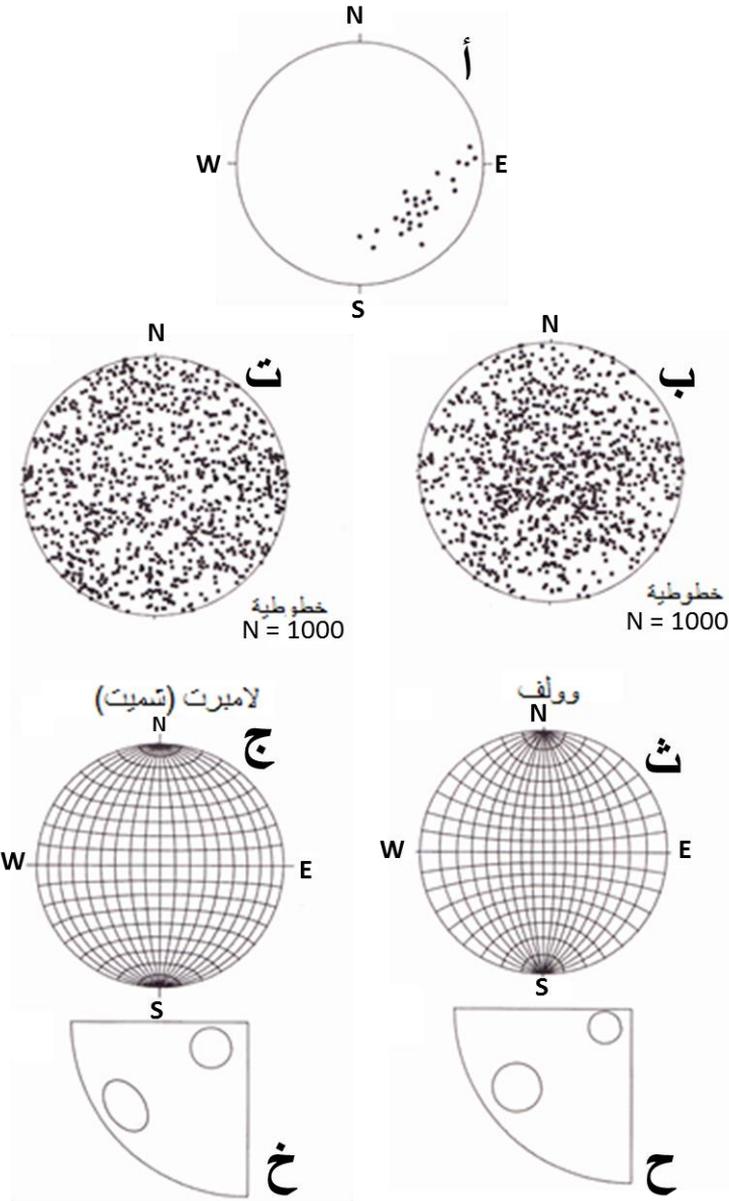
ت- يكون الإسقاط الستيريوغرافي أكثر ملاءمة في بعض الإنشاءات التي تتضمن رسم دوائر صغيرة، وذلك بسبب أن الدوائر الصغيرة في الإسقاط الستيريوغرافي تمثل أجزاء من دوائر حقيقية (شكل 20-1 - ت، ح).

وبالرغم من ذلك فإن كلا طريقي الإسقاط متشابهتان من حيث المفهوم إلى درجة أننا نستخدم في كليهما الإجراءات نفسها في توقيع المعلومات وفي إظهارها.

## 2.20. الشبكة القطبية The polar net

تعد الشبكة الستيريوغرافية Stereographic net وسيلة لإنشاء مخطط الستيريوغرام Stereogram. وما وصف حتى الآن هي الشبكات الاستوائية Equatorial nets. وهي مناسبة لتوقيع الدوائر الكبيرة لمستويات مائلة، أو لتوقيع زوايا انحدار خطوط واقعة على مثل هذه المستويات المائلة، وهي تستلزم تدوير الشبكة بهدف توقيع مسقط العنصر البنيوي المستوي أو الخطي (شكل 20-2 - ب).

يمكن بالإضافة لذلك استخدام نموذج آخر للشبكة الستيريوغرافية، هو نموذج "الشبكة القطبية" (شكل 20-2 - أ)، وهذا النموذج لا يستلزم تدوير الشبكة في أثناء عملية الإسقاط. يبين الشكل (20-2 - ت، ث) شبكة قطبية محافظة على المساحة. وهناك أيضاً شبكات قطبية تعتمد على الإسقاط الستيريوغرافي.



شكل (20-1): الإسقاط الستيريوغرافي والإسقاط المحافظ على المساحة (Leyshon and Lisle 1996).

### استخدام الشبكات القطبية لتوقيع الخطوط

مثال: أسقط محور الطية ذي الوضعية الفراغية 070-30 شكل (20-2-ت).

#### خطوات الإسقاط:

- أ- حدد اتجاه تغريق الخط على الدائرة الكبيرة (شكل 20-2-ت).
- ب- يتم توقيع النقطة الممثلة للخط من خلال عد قيمة زاوية التغريق باتجاه الداخل على المستقيم الواصل ما بين جهة التغريق ومركز الشبكة (شكل 20-2-ت).

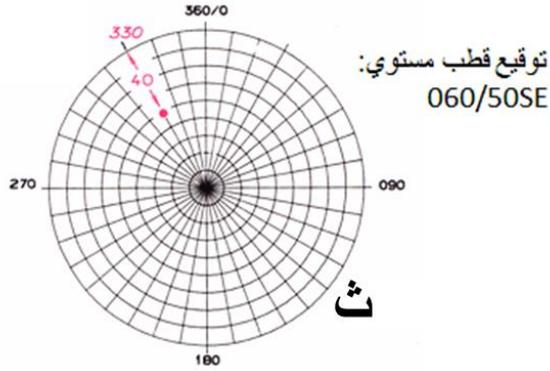
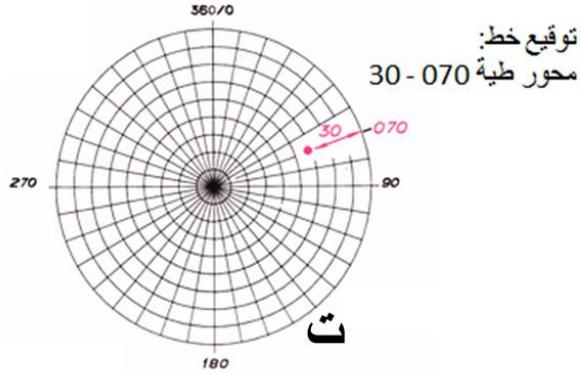
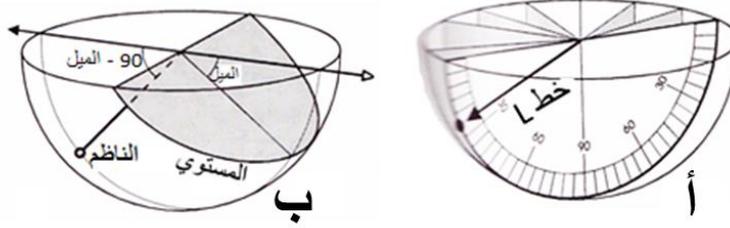
### استخدام الشبكة القطبية لتوقيع قطب (ناظم) المستوي Pole to plane

ترتبط الوضعية الفراغية لناظم مستو محدد مع المستوي كما يلي:

- تغريق الناظم =  $90^\circ$  - زاوية ميل المستوي
  - اتجاه تغريق الناظم = اتجاه ميل المستوي  $\pm 180^\circ$
- مثال: لدينا مستو ذي وضعية فراغية 060/50SE. أسقط ناظم (قطب) هذا المستوي باستخدام الشبكة القطبية.

#### خطوات الإسقاط:

- أ- باستخدام العلاقات السابقة نجد أن اتجاه ميل المستوي هو  $150^\circ$ .
- ب- يتغريق ناظم هذا المستوي بزاوية  $40^\circ$  ( $90^\circ - 50^\circ = 40^\circ$ ) وذلك باتجاه  $330^\circ$  ( $150^\circ + 180^\circ = 330^\circ$ )
- ت- مما سبق نستنتج أن قطب المستوي يُسقط كخط ذي وضعية فراغية 40-330 (شكل 20-2-ث).



شكل (20 - 2): الشبكة القطبية واستخدامها في تمثيل الخطوط والمستويات (Leyshon and Lisle 1996).



## الباب السابع - الفصل الحادي والعشرون

### تحليل بنيات باستخدام الإسقاط الستيريوغرافي

#### (طيات، صدوع، شقوق)

#### 1.21. تحليل الطيات

#### 1.1.21. الأسطوانية وتغريق المحور Cylindricity and plunge of axis

يمكن، في حالة الطيات التي تكون بمقاس التكتشفات، قياس الوضعيات الفراغية للعناصر البنيوية كالأجنحة وخط المفصلة بواسطة البوصلة الجيولوجية بشكل مباشر. وفي مثل هذه الحالات يمكن استخدام الإسقاط الستيريوغرافي لإسقاط هذه القياسات ومعالجتها كإجراء عملية دوران عليها أو حساب زوايا الطيات وغير ذلك. أما في حال الطيات الأكبر من مقاس التكتشفات فإنه يمكن استخدام الإسقاط الستيريوغرافي، بالإضافة لما سبق، بهدف تقدير الوضعية الفراغية لمحور الطية وللمستوي المحوري.

#### هل الطية أسطوانية؟

الطيات الأسطوانية هي التي يمكن إنشاء سطحها بتحريك خط مستقيم في الفراغ بحيث يبقى موازياً لنفسه (شكل 21-1-أ، ب). ويكون توجه محور الطية هو توجه هذا الخط المستقيم الذي يوازي خط المفصلة. وتتصف هذه الطيات بأن شكلها يبقى نفسه في سلسلة من المقاطع المتتالية.

يمكن تمييز طية أسطوانية بسهولة من خلال قياسات الوضعيات الفراغية للسطوح المطوية (التطبيق) والتي أخذت في مواقع مختلفة من الطية (شكل 21-1-ث). وتكون نواظم المستويات الطباقية في هذه الحالة موازية كلها لمستوى واحد، هو مستوى المقطع المتعامد مع المحور. ونختبر طية ما فيما إذا كانت أسطوانية كما يلي:

أ- نسقط كل قراءات الوضعيات الفراغية للطبقات على الستيريوغرام بشكل أقطاب (شكل

21-1-ج، ح).

ب- ندور الشبكة حتى تصل هذه الأقطاب إلى دائرة كبيرة أو تصبح قريبة جداً منها (شكل 21-1-ح).

ت- إذا كان بالإمكان إيجاد الدائرة الكبيرة من دون أي إشكال أو صعوبة، يمكن وصف الطية بأنها أسطوانية، وإلا فإن الطية غير أسطوانية Non-cylindrical fold (شكل 21-1-ت).

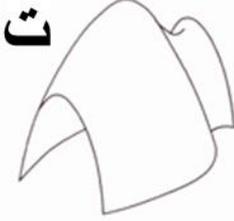
ومن الناحية العملية لن يكون هناك تطابق كامل ما بين الأقطاب ودائرة كبيرة. ويرجع ذلك إلى أن الطيات لن تكون من النمط الأسطواني النموذجي، أو إلى أخطاء في أثناء القياس بالبوصلية الجيولوجية.

#### تقدير الوضعية الفراغية لمحور طية

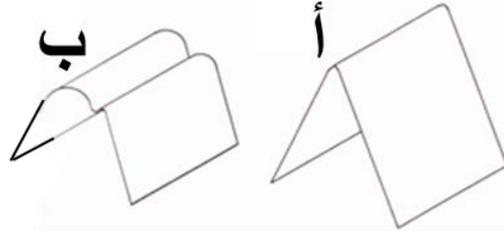
كما وجدنا في الفقرة السابقة فإن نواظم السطوح الطبقيّة تقع في مستوي مقطع الطية الذي يتعامد مع محور الطية. ولذلك يتم إيجاد الوضعية الفراغية لمحور الطية كما يلي (طريقة  $\pi$ ):  
أ- يتم تحديد الدائرة الكبيرة لمستوي المقطع بالطريقة المذكورة في الفقرة السابقة (شكل 21-1-ح).

ب- يتم توقيع قطب مستوي المقطع (شكل 21-1-خ)، وهو موقع محور الطية.

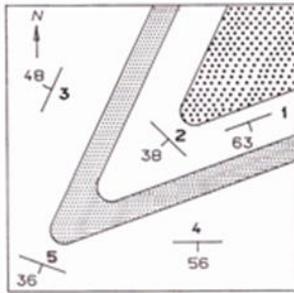
طيات غير أسطوانية



طيات أسطوانية



ج

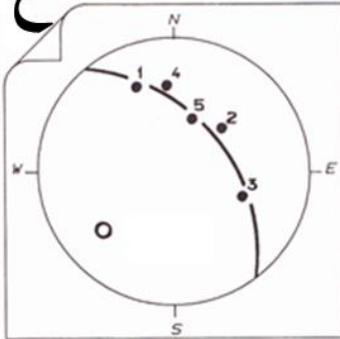


عمود على التطبيق

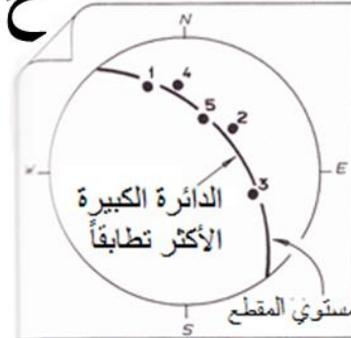
ث



د



ح



شكل (21-1): الطيات الأسطوانية والوضعية الفراغية للمحور

(Leyshon and Lisle 1996).

### 2.1.21. زاوية الطية والمستوي المحوري Inter-limb angle and axial plane

تتمثل زاوية الطية بالزاوية الكائنة بين الجناحين كما هو موضح في الشكل (21-2-أ)، حيث يلاحظ أن المستويين المحددين لهذه الزاوية ينطلقان من خطي الانعطاف inflexion lines (قارن مع الفقرة 11 - 1). وتتضمن الطريقة الستيريوغرافية توقيع أقطاب الجناحين وقياس الزاوية بين هذه الأقطاب (الفقرة 4.18). ورغم ذلك فإن الستيريوغرام يحدد، كما مر معنا سابقاً، زاويتين ممكنتين (الزاوية  $\alpha$  أو متممها، شكل 21-2-ب). ولذلك فإن تحديد أي الزاويتين هي الصحيحة يتطلب معلومات إضافية، كأن يكون لدينا فكرة أولية عن قيمة زاوية الطية، أو أن لدينا فكرة أولية عن الوضعية الفراغية للمستوي المنصف لزاوية الطية. ولنتذكر أن قطب المستوي المنصف يقع ضمن زاوية الطية المحددة من خلال أقطاب الأجنحة.

#### تحديد السطح (المستوي) المحوري للطيّة

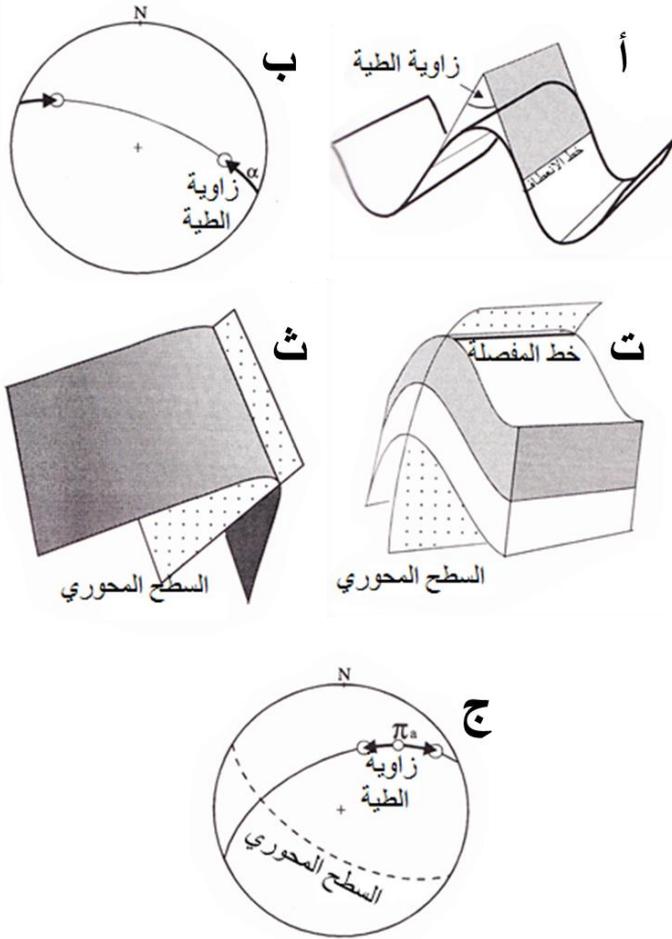
يعرف السطح المحوري بطريقتين مختلفتين نسبياً. وبحسب أحد التعريفين فهو يتضمن خطوط مفاصل الطبقات المطوية (شكل 21-2-ت). وبحسب تعريف ثان فهو المنصف لزاوية الطية (شكل 21-2-ث). وبحسب هذا التعريف الثاني، يحدد المستوي المحوري بالطريقة التالية:

أ- تسقط أقطاب الأجنحة.

ب- تحدد أي من الزاويتين الواقعتين بين قطبي الأجنحة يوافق زاوية الطية.

ت- تحدد النقطة الوسطى لزاوية الطية ( $\pi a$ ) في الشكل 21-2-ج). تمثل هذه النقطة قطب المستوي المحوري.

إن المستوي المحوري لطيّة أسطوانية يحتوي من الناحية الهندسية على الخط الموافق لمحور الطية. لذلك سنجد أن محور الطية عند توقيعه على الستيريوغرام سيقع بالقرب من الدائرة الكبيرة الممثلة للمستوي المحوري.



شكل (21-2): زاوية الطية والمستوي المحوري (Leyshon and Lisle 1996).

### 3.1.21. نمط الطي Style of folding

تسمح قياسات الوضعيات الفراغية للطبقات (أو التورق) المطوية، إذا حُلَّت بالطريقة الستيريوغرافية، بتحديد بعض المميزات الهندسية للطيات. وهذا ما يمكن تنفيذه حتى في المناطق التي تكون التكتشفات الصخرية فيها قليلة، ما قد يؤدي إلى صعوبة في المشاهدة الحقلية للطيات. ومثال ذلك ما ورد معنا آنفاً في الفقرة (1.1.21) التي تبين أنه إذا انتظمت أقطاب الطبقات على طول دائرة كبيرة فإن ذلك يعني أن الطية من النمط الأسطواني. وبالإضافة لذلك تبين طريقة

توزع الأقطاب ضمن حزام الدائرة الكبيرة Great circle girdle مظاهر أخرى للطي من مثل التضيق (زاوية الطية) والتقوس واللاتناظر .

### تضيق (تضام) الطية Fold tightness

إن مجال توجهات السطح المطوي محدود في الطيات المفتوحة Open folds (شكل 21-3) غير أنه أكبر في الطيات الضيقة Tight folds (شكل 21-3-ذ). ويبيد السيتريوغرام الناتج من طيات مفتوحة درجة منخفضة لانتشار الأقطاب مقارنة مع السيتريوغرام الناتج من طيات ضيقة. يلاحظ في بعض مخططات السيتريوغرام (شكل 21-3-ب، ت، ح) أن جزءاً من الدائرة الكبيرة خال من الأقطاب. إن مقياس هذا الجزء الخالي من الأقطاب في السيتريوغرام يمثل قياساً لزاوية الطية. وبكلام آخر فإن اكتمال حزام الدائرة الكبيرة يعبر عن تضيق الطية.

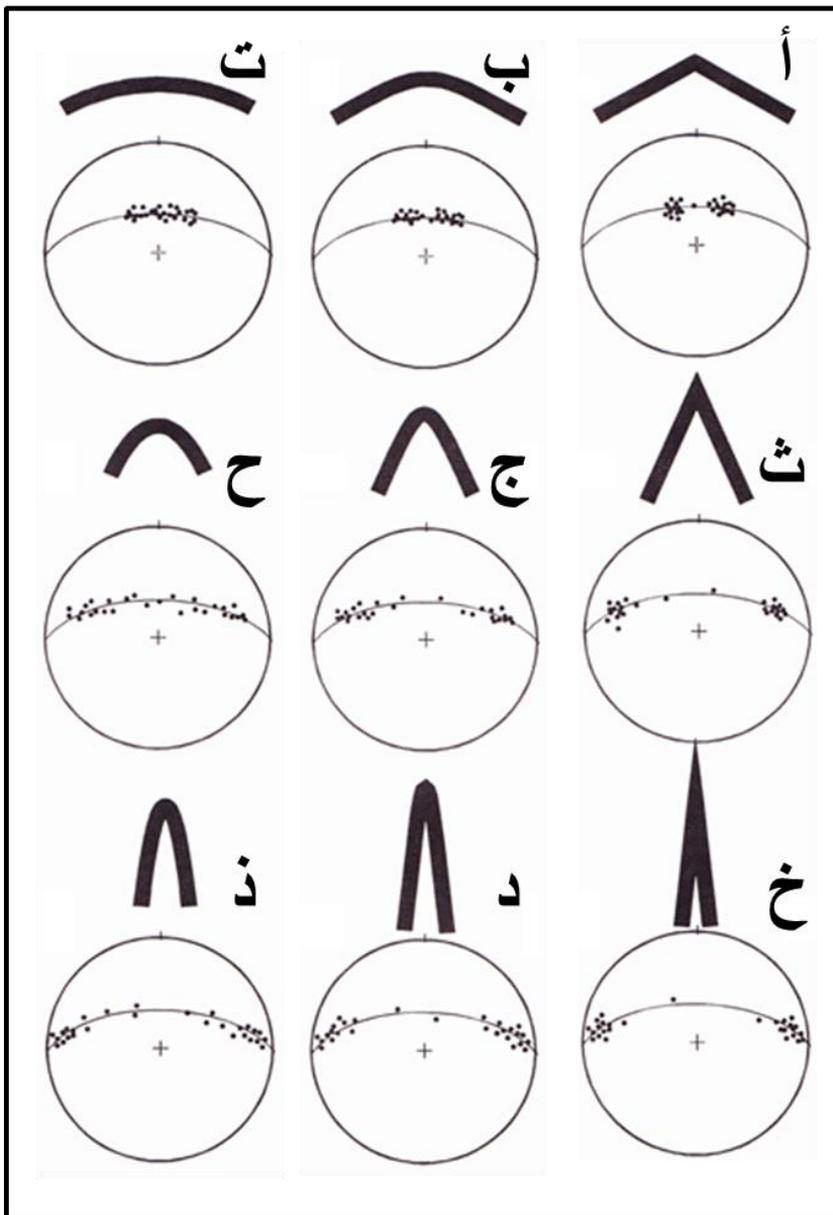
### تقوس الطيات Curvature of the folds

إن نماذج السيتريوغرامات في العمود الأيمن من الشكل (21-3) يختلف ليس فقط في مقياس "الثغرة" التي تصنعها الأقطاب المنتشرة على الدوائر الكبيرة، بل أيضاً في درجة تجمع هذه الأقطاب. وهكذا فإن أشكال الطيات المتميزة بأجنحة مستوية (أو شبه مستوية) تتميز بتجمع مزدوج للأقطاب في السيتريوغرام (شكل 21-3-أ، ث، خ)، بينما تعطي الأشكال الأقرب إلى الدائرية (شكل 21-3-ت، ح، وإلى حد ما، ذ) نماذج أكثر انتشاراً.

### عدم التناظر في الطيات Asymmetry of folds

إن الطيات الموضحة في الشكل (21-3) متناظرة، كونها ذات جناحين متساويين في طولهما. وتكون السيتريوغرامات النموذجية في هذه الحالات ذات تجمعات للأقطاب الناتجة عن قياسات على جناحي هذه الطيات. أما إذا كانت الطيات لامتناظرة، أي أن جناحي الطية غير متساويين في طوليهما، فإنه من المتوقع أن يكون واحد من تجمعي الأقطاب على السيتريوغرام أكثر وضوحاً وأكثر بروزاً من الآخر.

توزيع التقوس Curvature distribution



زاوية الطية Inter-limb angle

شكل (21-3): نمط الطي (Leyshon and Lisle 1996).

#### 4.1.21. توجه الطيات The orientation of folds

تستخدم مميزات الوضعيات الفراغية (التوجه) للطيات في وصف ومقارنة الطيات وتصنيفها إلى مجموعات تطور كل منها في شروط متشابهة من التشوه (قارن مع الفقرة 11 - 5). وتصنف الطيات بالاستناد إلى ميل المستوي المحوري وتغريق محور الطية (اللوحة 21- 1 واللوحة 21- 2 وشكل 21- 4- أ، ب). وليست هذه المواصفات مرتبطة بشدة التقوس ولا بزوايا الطية. وتمثل المخططات البيانية (الستيريوجرامات) الموضحة في الشكل (21- 4- ت) أمثلة عن صفوف مختلفة من الطيات، حيث يتوضح توجه المستوي المحوري من خلال دائرة كبيرة مسقط عليها نقطة تمثل محور الطية.

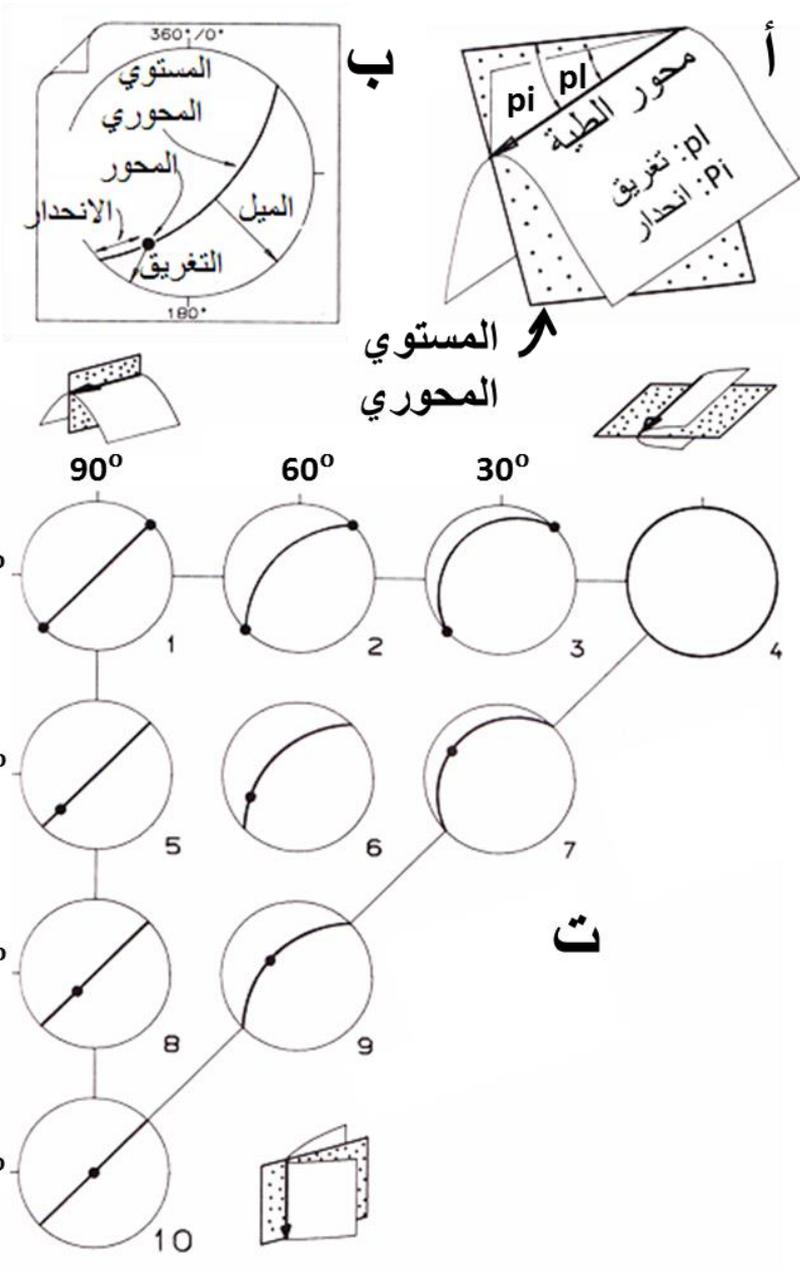
اللوحة (21- 1): تصنيف الطيات بالاستناد إلى التغريق (طية غير متغرقة Non-plunging، طية خفيفة التغريق Gently plunging، طية متوسطة التغريق Moderately plunging، طية شديدة التغريق Steeply plunging، طية شاقولية Vertical fold).

التغريق	الصف	رقم الستيريوجرام في الشكل 20 - ت
°0 - °10	طية غير متغرقة	1 و 2 و 3 و 4
°10	طية خفيفة التغريق	
°30	طية متوسطة التغريق	5 و 6 و 7
°60	طية شديدة التغريق	8 و 9
°80		
°80-°90	طية شاقولية	10

اللوحة (21- 2): تصنيف الطيات بالاستناد إلى ميل المستوي المحوري (طية مستلقية Recumbent، طية مائلة بشكل خفيف Gently inclined، طية مائلة بشكل متوسط Moderately inclined، طية مائلة بشدة Steeply inclined، طية قائمة Upright).

الميل	الصف	رقم الستيريوغرام في الشكل 20 - ت
°0 - °10	طية مستلقية	4
°10		
°30	طية مائلة بشكل خفيف	3 و 7
°60	طية مائلة بشكل متوسط	2 و 6 و 9
°80	طية مائلة بشدة	
°80 - °90	طية قائمة	1 و 5 و 8 و 10

وفي هذا السياق يمكن تعريف الطية المتكئة Reclined fold (الشكل 21- 4- ت ستيريوغرام 7 و 9) بأنها تتميز بمحور يتعرق بشكل متساير مع خط ميل المستوي المحوري، أي أن زاوية انحدار المحور تقارب التسعين درجة. وتتشابه هذه الطيات مع الطيات الشاقولية في أن إغلاقها ليس نحو الأعلى أو الأسفل وتصنف بالتالي كطيات حيادية.



شكل (21-4): توجه الطيات (Leyshon and Lisle 1996).

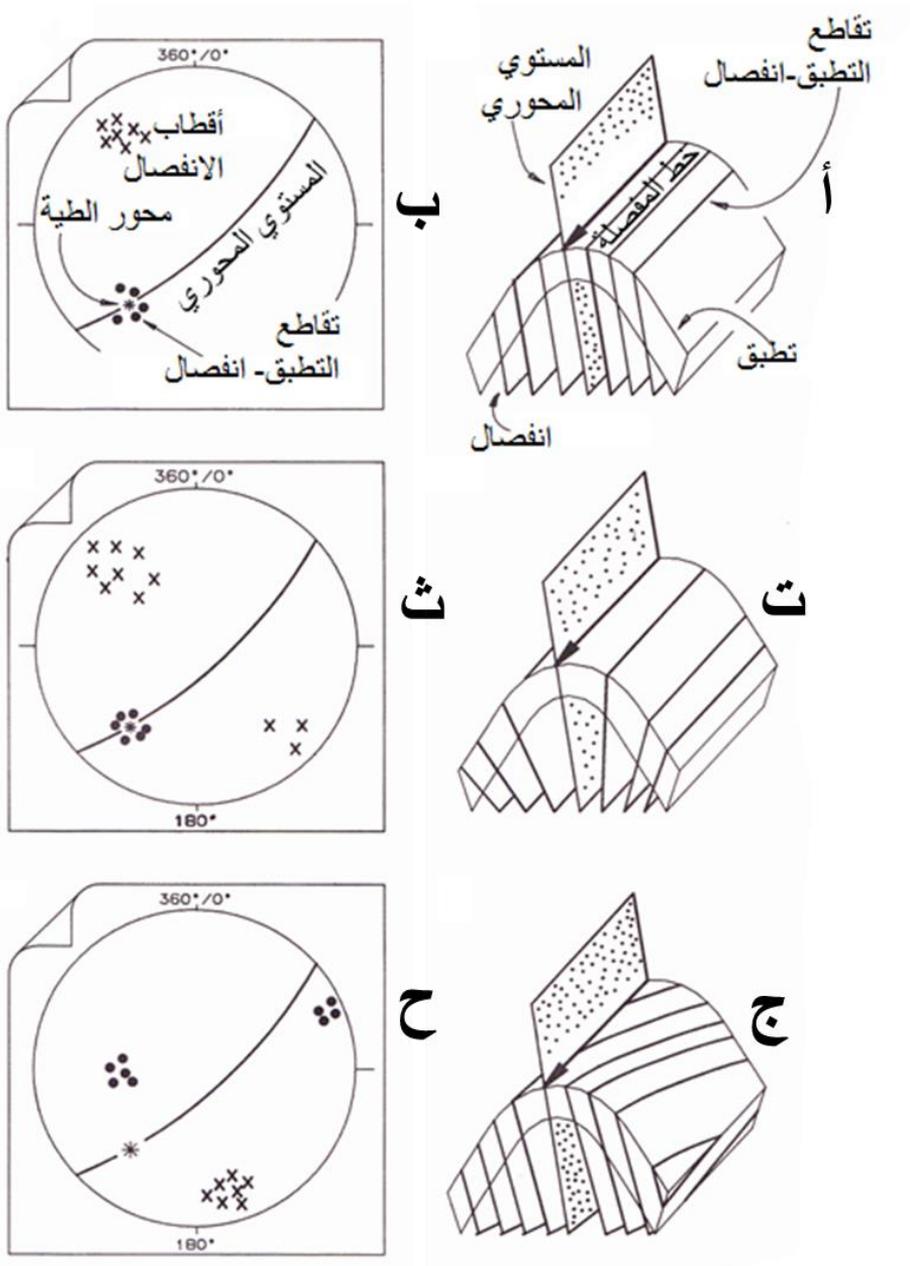
### 5.1.21. الطيات والانفصال Folds and Cleavage

يمثل الانفصال أحد الأمثلة على البنيات المستوية الخالية Pervasive planar structures الناتجة من الانفعال التكتوني المترافق مع تعديلات تحويلية Metamorphic modification على النسيج الصخري Rock's fabric. ومن المعروف أن انفعال التقصير المسبب للانفصال يؤدي إلى طي مستويات أخرى كالسطوح الطبقيّة مثلاً. ولهذا السبب نجد أن الطي يترافق مع الانفصال في كثير من الحالات.

يكون الانفصال موازياً عادة للمستويات المحورية أو شبه مواز لها (انفصال المستوي المحوري Axial-planar cleavage، شكل 21-5-أ). وبذلك نجد أن خطوط التقاطع مابين سطح التطبق المطوي والانفصال توازي محور الطية (شكل 21-5-ب). وبالتالي فإن القياسات الحقلية لمستويات الانفصال تشير إلى الوضعية الفراغية للمستوي المحوري وإلى الوضعية الفراغية للمحور، وذلك من خلال علاقتها مع التطبق. ويمكن لخطوطية تقاطع التطبق - انفصال Bedding-cleavage intersection lineation أن تقاس مباشرة في الحقل أو أن يتم استنتاجها بالإنشاء الستيريوغرافي باستخدام معطيات الوضعية الفراغية للتطبق وللانفصال.

تكون انفصالات المستوي المحوري عادة غير متوازية تماماً مع المستوي المحوري للطية. ويعزى ذلك إلى أن الانفعالات المحيطة بالطية متغيرة من حيث القيمة والاتجاه بسبب تباين صفات المساواة بين الطبقات الصخرية المطوية. ولذلك تتشكل مراوح انفصال Cleavage fans نتيجةً لمثل هذه الانفعالات اللامتجانسة. ويمكن لمستويات الانفصال أن تتقارب باتجاه نواة الطية (مروحة انفصال متقاربة Convergent cleavage fan، شكل 21-5-ت) أو أن تتباعد بعيداً عن النواة Divergent cleavage fan. وفي هذه الحالات فإن قياسات الانفصال ستبدي انتشاراً أكبر على الستيريوغرام، حيث تنتشر أقطابها على طول دائرة كبيرة (وهي دائرة المستوي المتعامد مع محور الطية). ورغم ذلك تبقى خطوطية التطبق - انفصال موازية لخط مفصلة الطية (شكل 21-5-ث).

تكون مستويات الانفصال في بعض حالات ذات اتجاه منحرف عن محور الطية، وبالتالي فإن خطوطية التطبق - انفصال لن تكون موازية لمحور الطية، وهي بالتالي ذات وضعية فراغية مختلفة على جناحي الطية (شكل 21-5-ج، ح). وقد يعزى ذلك إلى أن الانفصال تشكل بعد الطي، أو إلى أن الانفعال تتابع بشكل منحرف.



شكل (21-5): الطيات والانفصال (Leyshon and Lisle 1996).

تمرين:

أجريت القياسات التالية في تكشف صغير يمثل جزءاً من طية ذات مقاس كبير: التطبيق 050/80S، الانفصال 110/70S. أعط تصنيفاً للطية ذات المقاس الكبير من حيث توجيهها مستخدماً معلومات الفقرة السابقة (توجه الطيات: الفقرة 21 - 1 - 4). أعط أية استنتاجات أخرى ممكنة.

### 6.1.21. تحليل الطيات المترافقة مع انفصال

يبين الشكل (21 - 6 - أ) مثالاً على خريطة جيولوجية لطية مرفقة برمز بنيوية تشير إلى الوضعيات الفراغية للتطبيق وللانفصال في مواقع مختلفة. وفيما يلي شرح لكيفية استخدام مثل هذه المعلومات لتفسير هندسية الطية.

### 1.6.1.21. استنتاج موقع الطيات الموجودة

يساعد إنشاء المقاطع العرضية على تفسير المعطيات الموضحة في الخرائط. يبين الشكل (21 - 6 - ب) مقطعاً عرضياً يتطابق مع الخط X-Y المتعامد تقريباً مع اتجاه الانفصال. عندما تكون سطوح كل من الانفصال والتطبيق مرئية في مقطع أو تكشف فإنه يمكن تطبيق القاعدة البسيطة التالية لتحديد موقع الطية الرئيسة:

أ- نقف بشكل مواجه للمقطع شكل (21 - 7).

ب- نجعل جسمنا مائلاً بشكل متوافق مع سطوح الانفصال

ت- نرفع إحدى يدينا بشكل متواز مع ميل التطبيق.

ث- إن الشكل المحدب المجاور يوجد بعيداً إلى اليمين أو إلى اليسار بحسب اليد التي رفعت.

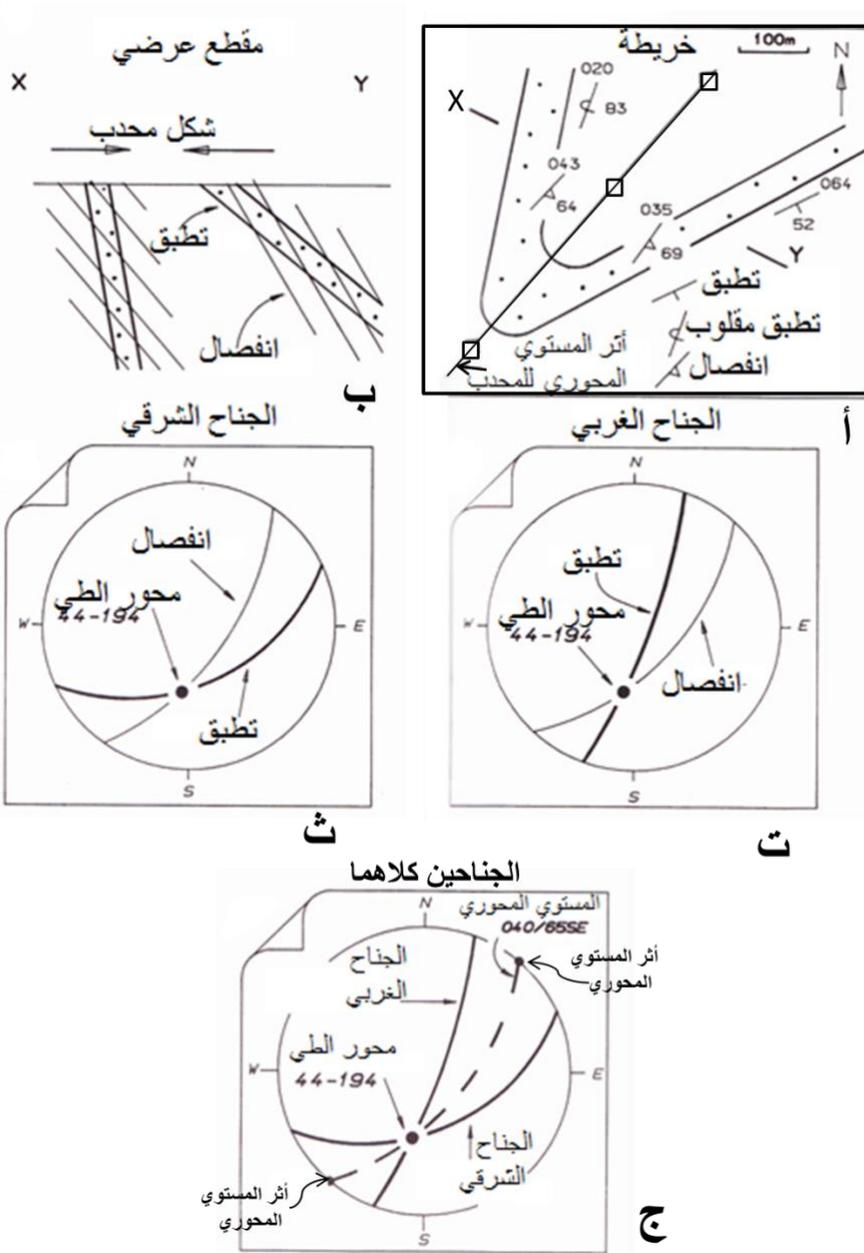
إن تطبيق هذه القاعدة (شكل 21 - 6 - ب) يشير إلى وجود شكل محدب إلى الشرق من X أو إلى الغرب من Y. أي أن هناك شكلاً محدباً واقعاً ما بين X و Y.

### 2.6.1.21. تحديد تغريق خط مفصلة الطية

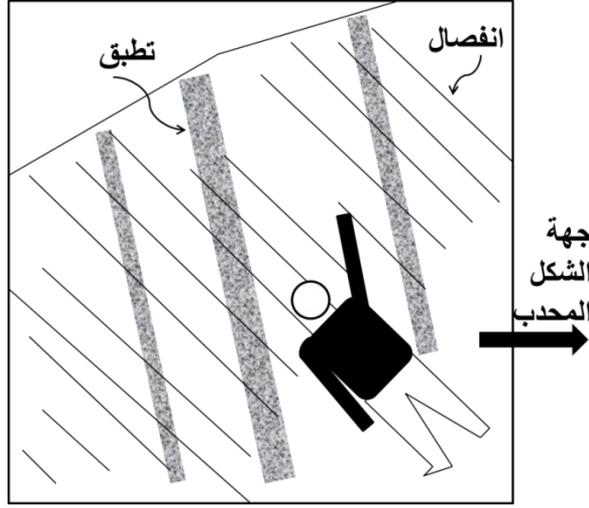
يمكن إيجاد تغريق الطية بالطريقة الستيريوغرافية باستخدام الوضعيات الفراغية المقيسة للتطبيق في مواقع مختلفة حول البنية (طريقة  $\pi$ ، الفقرة 1.1.21). إذا كان الانفصال من النمط الموازي للمستوي المحوري، فإن خطوطية التقاطع تطبق - انفصال توازي محور الطية، كما مر معنا آنفاً (الفقرة 5.1.21). ويبين الشكل (21-6-ت، ث) تحديد خطوطية التقاطع من أجل كل من الجناحين الشرقي والغربي للطيّة. ومن الواضح أنه تم الحصول على تقدير متشابه للتغريق في كلا الجناحين (أي بقيمة  $194^\circ-44^\circ$ )، وهذا يؤكد أن الانفصال مواز للمستوي المحوري.

### 3.6.1.21. تقدير الوضعيّة الفراغية للمستوي المحوري

يستند الإنشاء الستيريوغرافي للمستوي المحوري للطيّة (شكل 21-6-ج) إلى أن هناك خطين يحددان المستوي المحوري هما: محور الطية وأثر المستوي المحوري (خط تكشف المستوي المحوري). حيث يؤخذ منحى أثر المستوي المحوري من الخريطة (شكل 21-6-أ).



شكل (21-6): تحليل الطيات المترافقة مع الانفصال.



شكل (21-7): استنتاج موقع طيبة من خلال تحديد علاقة الوضعية الفراغية بين التطبق والانفصال (Leyshon and Lisle 1996).

## 2.21 الصدوع Faults

### 1.2.21 حساب الرمية الحقيقية Calculating net slip

تعرف الرمية الحقيقية للصدوع بأنها المسافة بين نقطتين كانتا متجاورتين قبل التصدع (النقطتين  $p$  و  $p'$  في الشكل 21-8 أ). ويمكن تحديد مثل هاتين النقطتين من خلال أجسام صغيرة (حصى مهشمة، مستحاثات...) أزيحت بعملية التصدع (قارن مع الفقرة 14 - 3). وفي أغلب الحالات يتم تحديد مثل هذه النقاط من خلال تقاطع ثلاثة مستويات هي مستوي الصدع نفسه ومستويان آخران غير متوازيين.

يلاحظ في الشكل (21-8 أ) وجود مستويين غير متوازيين (طبقات أو اندساسات صفيحية Sheet intrusions أو سطوح لاتوافق) يتقاطعان عبر الخط "i". وهذا يعني أن التصدع أدى إلى انقطاع الخط  $i$  إلى جزأين  $i$  و  $i'$ . كما أن النقطتين  $p$  و  $p'$  توجدان حيث يتقاطع الخطان  $i$  و  $i'$  مع سطح الصدع، ما يسمح بقياس الرمية الحقيقية ( $n$  في الشكل 21-8 أ). وفي بعض الحالات يمكن تحديد رمية الميل "d" Dip slip ورمية الاتجاه "s" Strike slip. ويوضح الشكل

(21-8-ب) المعطيات اللازمة لحساب الرمية الحقيقية، وهي خريطة الصدع والمستويين المزاحين a و b.

### طريقة تخطيطية لإيجاد الرمية الحقيقية لصدع

تتضمن الطريقة إنشاء شكل المستويين المزاحين بالشكل الذي يظهران به على سطح الصدع نفسه، أي رسم مقطع على سطح الصدع، وذلك من خلال المراحل التالية:

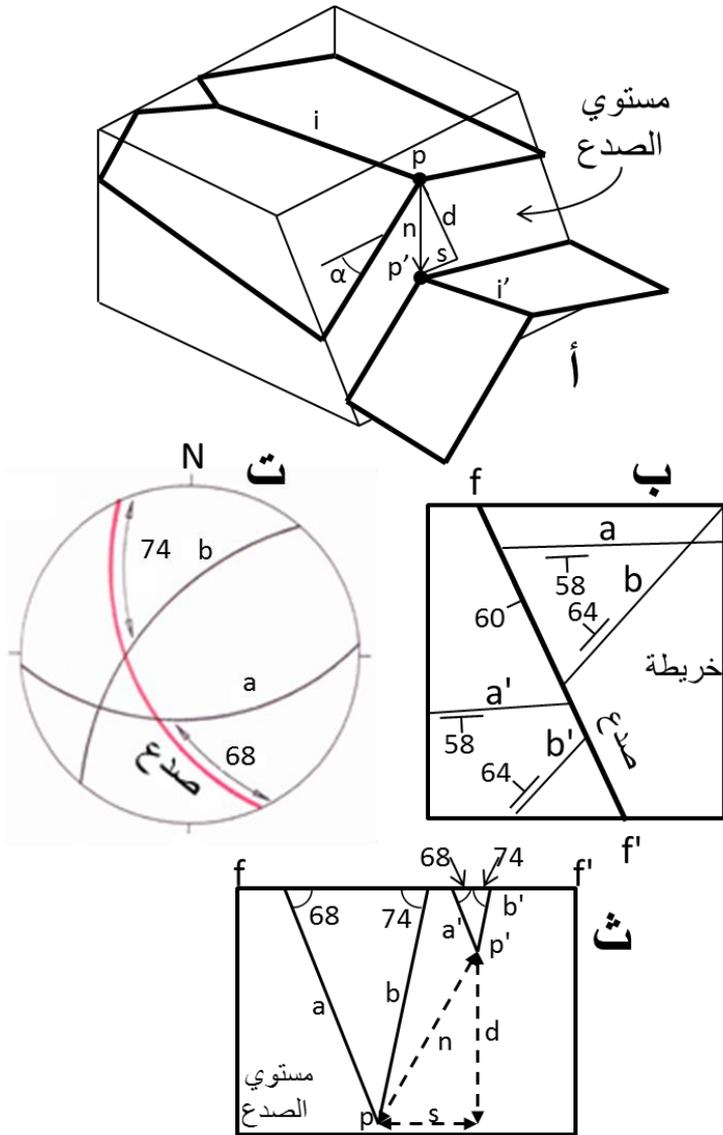
أ- تسقط الدوائر الكبيرة لمستوي الصدع ولكل من المستويين a و b على الستيريوغرام (شكل 21-8-ت).

ب- نعتبر خط الصدع (ff' في الخريطة: شكل 21-8-ب) يمثل خط المقطع، وننقل مواقع التكتشافات السطحية للمستويين a و b ومايقابلها في الكتلة المزاحة a' و b' إلى المقطع العرضي (شكل 21-8-ث).

ت- إن آثار المستويين a و b في مستوي المقطع (أي مستوي الصدع) تتمثل من خلال خطي القطع Cut-off lines لهذين المستويين (أي خطي تقاطع سطح الصدع مع a و b على التوالي، شكل 21-8-ت). إن الزوايا التي تصنعها خطوط القطع هذه مع خط اتجاه الصدع (أي الزاوية  $\alpha$  في الشكل 21-8-أ) تمثل زوايا انحدار pitches خطوط القطع في مستوي الصدع (الزاويتين  $68^\circ$  و  $74^\circ$  في الشكل 21-8-ت). تستخدم زوايا الانحدار هذه لرسم خطوط القطع في المقطع (شكل 21-8-ث). وهذه هي الزوايا التي تصنعها خطوط القطع مع الأفق (المتمثل في الشكل 21-8-ث بخط اتجاه الصدع).

ث- إن النقطة p الموجودة في المقطع العرضي (شكل 21-8-ث)، الذي يوضح العلاقات الهندسية في مستوي الصدع، يتم تحديدها من خلال تقاطع a و b. وكذلك تحدد النقطة p' عند تقاطع a' و b'. وبذلك فإن المسافة p-p' تمثل الرمية الحقيقية n. ويمكن تحديد تعريق متجهة الرمية الحقيقية n واتجاه تعريقها بقياس زاوية انحدار n

مباشرة من المقطع، ثم توقيع توجهها بشكل نقطة على الدائرة الكبيرة الممثلة للصدع في الشكل (21-8 ت).



شكل (21-8): حساب رمية صدع (Leyshon and Lisle 1996).

### 2.2.21. تقدير اتجاهات الإجهادات Estimating stress directions

تمثل الصدوع، كما هو معروف، استجابة الصخور الكسورة Brittle rocks للإجهادات المطبقة عليها. وإذا أُجريت قياسات حقلية مناسبة لهذه الصدوع فإنه يمكن تقدير طبيعة الإجهادات القديمة Paleostresses التي أدت إلى تكون هذه الصدوع، أو يمكن على الأقل معرفة الاتجاهات العامة لهذه الإجهادات.

### 1.2.2.21. الصدوع المزدوجة Conjugate pairs of faults

الصدوع المزدوجة صدوعٌ متزامنة التكوّن عموماً، وتكونت في شروط إجهاد متشابهة. ومن المعروف بحسب تجارب تشوهات الصخور أن مثل هذه الصدوع تنتظم بشكل متناظر بالعلاقة مع محاور الإجهاد الرئيسية (شكل 21-9 أ، ب). كما أن العلاقة الازدواجية تُحدّد بوجود مجموعتين من الصدوع، بحيث تبدي صدوع هاتين المجموعتين علاقات تقاطع مختلفة فيما بينهما (شكل 21-9 أ). وبالإضافة لذلك يكون اتجاه الانزلاق الحاصل على كل صدع متعامداً مع خط التقاطع بين سطحي الصدعين المزدوجين.

يمكن إيجاد اتجاهات الإجهادات الرئيسية المسؤولة عن تشكل جملة صدوع مزدوجة كما يلي:

أ- يحدد خط التقاطع ما بين الصدعين المزدوجين من خلال توقيع الدائرتين الكبيرتين الممثلتين لكل منهما. ويُعدّ خط التقاطع هذا ممثلاً لاتجاه محور الإجهاد المتوسط  $\sigma_2$  (شكل 21-9 ت).

ب- بما أن محاور الإجهاد الرئيسية متعامدة فيما بينها، فإن محوري  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  يجب أن يقعا في مستو متعامد مع محور  $\sigma_2$ . ولذلك يتم توقيع الدائرة الكبيرة لهذا المستوي على الستيريوغرام (شكل 21-9 ت).

ت- يتم إيجاد محوري  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  على امتداد هذه الدائرة الكبيرة كمنصفين للزاويتين الحادة والمنفرجة المتكونتين من تقاطع سطحي الصدعين (شكل 21-9 ت).

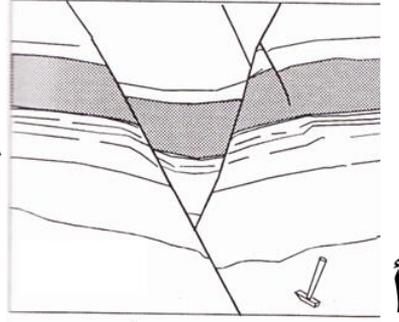
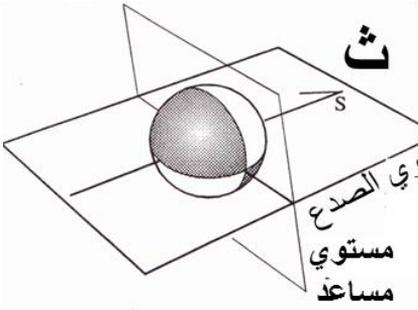
### 2.2.2.21. طريقة ثنائي الوجوه القائم The right dihedral method

تسمح معطيات الوضعيات الفراغية للصدوع المنفردة بالحصول على معلومات عامة فقط عن محاور الإجهاد الرئيسية كما هو موضح في الشكل (21-9-ث). وفي هذه الحالة يؤدي تحديد السطح الصدعي بالإضافة إلى سطح ثان متعامد مع سطح الصدع ومع اتجاه الانزلاق (ما يسمى المستوي المساعد Auxiliary plane) بتقسيم كل الاتجاهات الممكنة على كرة إلى زوجين من الأرباع (مظللة وغير مظللة في الشكل 21-9-ث). وبحسب طبيعة الحركة على الصدع، يحدد كل زوج من هذه الأرباع التوجه الممكن لمحور الإجهاد الأعظمي  $\sigma_1$ ، بينما يحدد الزوج الآخر التوجه الممكن لمحور الإجهاد الأصغري  $\sigma_3$ .

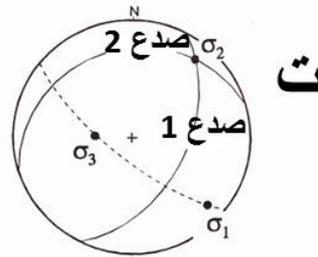
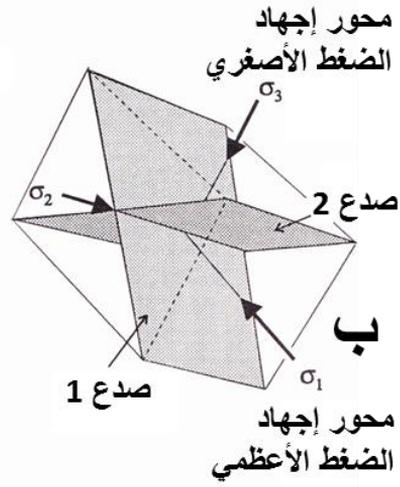
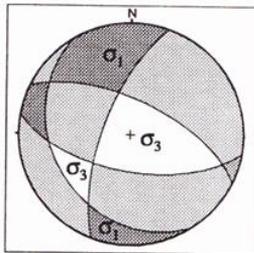
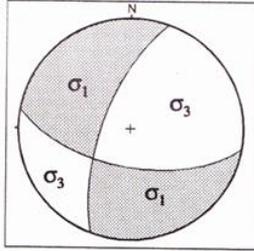
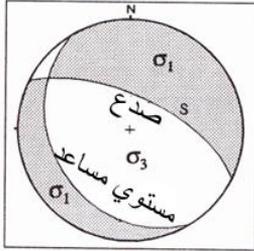
إذا توفرت معطيات عدد من الصدوع التي تكونت بتأثير إجهاد بعينه، فإن اتجاهات الإجهاد يمكن تقديرها بالطريقة الستيريوغرافية التالية:

أ- يتم، لكل صدع لوحده، إسقاط الدائرة الكبيرة الممثلة للسطح الصدعي والمستوي المساعد الخاص به. ويتم بعد ذلك تحديد الربيعين الخاصين بـ  $\sigma_1$  والربيعين الخاصين بـ  $\sigma_3$ ، وذلك من خلال معرفة طبيعة الحركة الصدعية، ليصار بعد ذلك إلى تظليل ربعي  $\sigma_1$  (شكل 21-9-ج، ح).

ب- نضع الستيريوغرامات (الأوراق الشفافة) العائدة لكل صدع فوق بعضها (شكل 21-9-خ). إن التوجه المقبول لمحور الإجهاد  $\sigma_1$  يوجد ضمن الجزء الأكثر تظليلاً من هذه الستيريوغرامات، كما أن  $\sigma_3$  يوجد في المنطقة غير المظللة المشتركة.



صدوع مزدوجة



شكل (21-9): تقدير اتجاهات الإجهادات من خلال الصدوع (Leyshon and Lisle 1996).

### 3.21. الشقوق

#### 1.3.21. التسوية الكثافية في الستيريوغرام Density contouring on stereograms

إن طريقة رسم منحنيات التسوية الكثافية توضح كثافات المستويات والخطوط الموقّعة على الستيريوغرام وتغيرات الكثافة بين أجزائه المختلفة . ويتم ذلك بهدف توضيح نمط التوجه السائد الموجود في موقع الدراسة. وهناك عدد من الطرائق التي يمكن من خلالها حساب كثافات النقاط في الستيريوغرام. ويشمل معظمها عد النقاط الواقعة ضمن مساحة معيارية من الشبكة. ويعبر عن الكثافة بأنها النسبة المئوية لعدد النقاط الموقّعة والموجودة في مساحة معيارية مقسومة على مساحة المنطقة المعيارية كنسبة مئوية من المساحة الكلية للستيريوغرام. ويعبر عن الواحدة على أنها % في المساحة % أو بشكل أبسط يعبر عنها برقم دون واحدة. وتعد هذه الطريقة مناسبة من أجل الدراسة الإحصائية للشقوق، وتصنيفها إلى مجموعات وجمل. ولإنشاء منحنيات التسوية تستخدم شبكة عداد كالسيك Kalsbeek counting net بالطريقة التالية:

أ- توقع المعطيات (بنيات خطية أو أقطاب بنيات مستوية) باستخدام الشبكة المحافظة على المساحة (شكل 21 - 10 - أ).

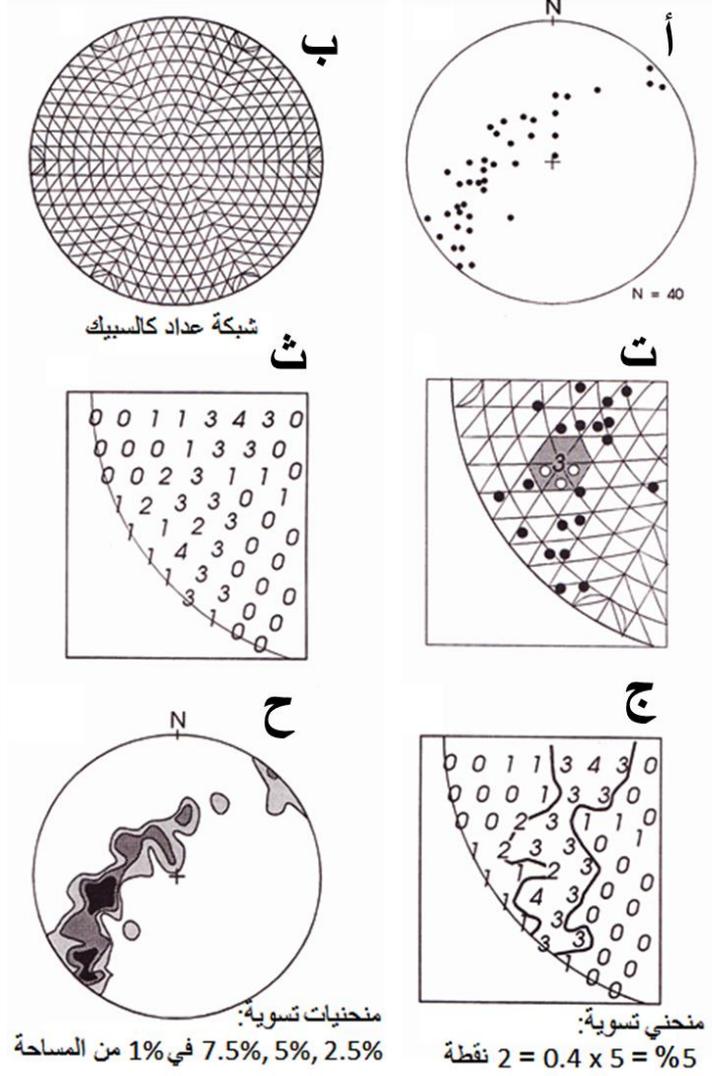
ب- توضع شبكة عداد كالسيك (شكل 21 - 10 - ب)، وتثبت تحت الستيريوغرام الذي أسقطت عليه المعطيات. تتألف هذه الشبكة من سداسيات أضلاع متراكبة بشكل متبادل، حيث يأخذ كل سداسي أضلاع مساحة تعادل 1/100 من المساحة الكلية للستيريوغرام.

ت- يسجل عدد النقاط الموجودة في كل مضلع (شكل 21 - 10 - ت)، لتتشكل مجموعة أرقام تغطي الدياترام (شكل 21 - 10 - ث).

ث- يُحسب عدد الأرقام التي تمثل 1% من العدد الكلي للمعطيات، وذلك بتقسيم العدد الكلي للنقاط على 100. مثلاً في الشكل (21 - 10 - أ)  $N=40$  ولذلك فإن 1% تساوي  $40/100=0.4$  نقطة.

ج- تحدد قيم كثافة مناسبة (مثلاً 2.5%، 5%، 7.5%...) ثم يحسب عدد النقاط المتوافق مع هذه القيم (أي  $2.5 \times 0.4$  و  $5 \times 0.4$ ... وهكذا)

ح- ترسم منحنيات التسوية من عدد النقاط التي حسبت في الخطوة السابقة (شكل 21-10 ج). ويجب الانتباه في أثناء الرسم إلى أن منحنيات التسوية لا تتقاطع. وهي مستمرة ولا تتوقف عند الدائرة الأولية، بل تستمر على الجانب المقابل من الستيريوجرام (شكل 21-10 ح).



شكل (21-10): التسوية الكثافية في الستيريوجرام (Leyshon and Lisle 1996).



## الباب الثامن - الفصل الثاني والعشرون

### المبالغة الشاقولية Vertical Exaggeration في المقاطع العرضية

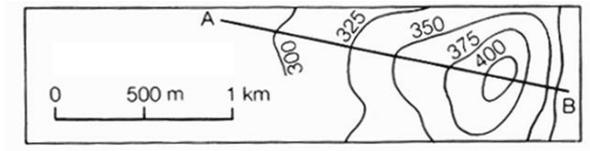
#### 1.22. مقدمة:

تعد المقاطع العرضية من أهم المخططات الجيولوجية التي تساعد الجيولوجي في فهم البنيات الصخرية، فهي توضح شكل وترتيب الصخور والطبقات الصخرية في مستويات شاقولية. ولهذا السبب ترفق الخرائط الجيولوجية عادة بمقاطع عرضية، حيث أن كلا هذين النمطين من المخططات الجيولوجية يمثلان معاً الترتيب ثلاثي الأبعاد للصخور في منطقة ما. ويمكن من خلال المقاطع العرضية تحديد قيم مهمة كزوايا ميل الطبقات أو الصدوع وثمانات الطبقات وأعماقها. تُنشأ المقاطع العرضية عادة من خلال الخرائط الجيولوجية، غير أنه يمكن للجيولوجي أن يُنشئ مقاطع عرضية تخطيطية من خلال عمله الحقلية أيضاً. ومن الجدير ذكره أنه يمكن للخرائط أن تُشتق من المقاطع الجيولوجية وبخاصة خلال الدراسات النفطية، حيث أن الآبار والخطوط السيزمية تزودنا بمعظم المعطيات تحت السطحية. ومن هنا تأتي أهمية الإنشاء الدقيق لهذه المخططات الجيولوجية. ويعد موضوع المبالغة الشاقولية من الأمور الأساسية التي يجب أخذها بالحسبان لدى إنشاء المقاطع العرضية.

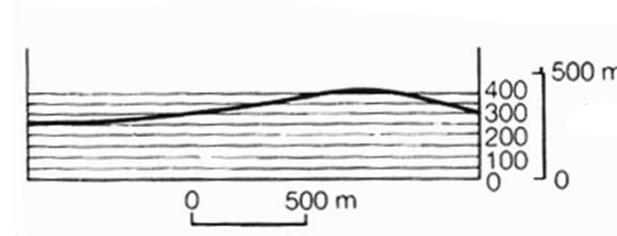
#### 2.22. تأثيرات المبالغة الشاقولية على المقاطع العرضية

يكون المقياس الأفقي للخريطة والمقياس الأفقي للمقطع متساويين عادة. غير أن المقياس الشاقولي للمقطع يمكن أن يخضع للتغيير، وبخاصة عندما نستخدم مقياساً شاقولياً أكبر من المقياس الأفقي بهدف إعطاء تفاصيل أكثر عما يتضمنه المقطع، وإبراز شكل بعض المظاهر التي قد لا تكون واضحة عندما يكون كلا المقياسين الأفقي والشاقولي للمقطع متساويين. يؤدي ذلك إلى حصول تشوه في شكل المقطع. وهذا مايسمى "المبالغة الشاقولية". تؤدي المبالغة الشاقولية إلى ازدياد في قيمة انحدار السطوح التضاريسية وهو ما لا يتطابق مع الواقع (شكل 22-1). وتحسب المبالغة الشاقولية كما يلي:

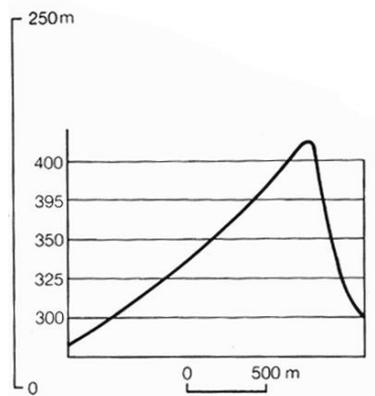
$$\text{المبالغة الشاقولية} = \frac{\text{المقياس الشاقولي}}{\text{المقياس الأفقي}}$$



أ



ب



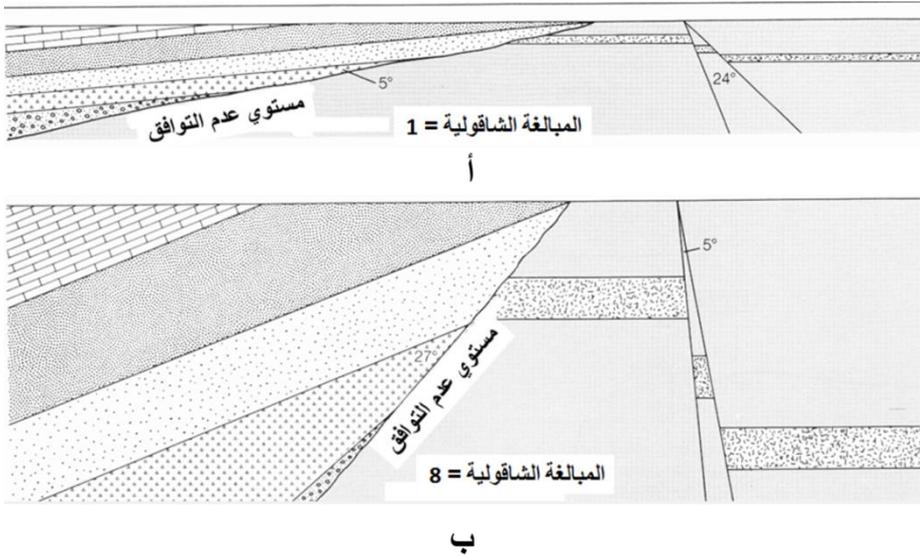
ت

شكل (22-1): تأثير المبالغة الشاقولية في الانحدار التضاريسي (Maltman, 1998). أ: مقطع تضاريسي AB في خريطة، ب: المقطع ذو مقياس شاقولي = المقياس الأفقي، ت: المقطع ذو مقياس شاقولي =  $10 \times$  المقياس الأفقي.

وكذلك تؤدي المبالغة الشاقولية إلى ازدياد ميل السطوح (الطبقيّة أو الصدوع أو غيرها) في المقطع المبالغ فيه، أي إلى ازدياد ظاهري في قيم زوايا الميل، ويستنتى من ذلك السطوح التي

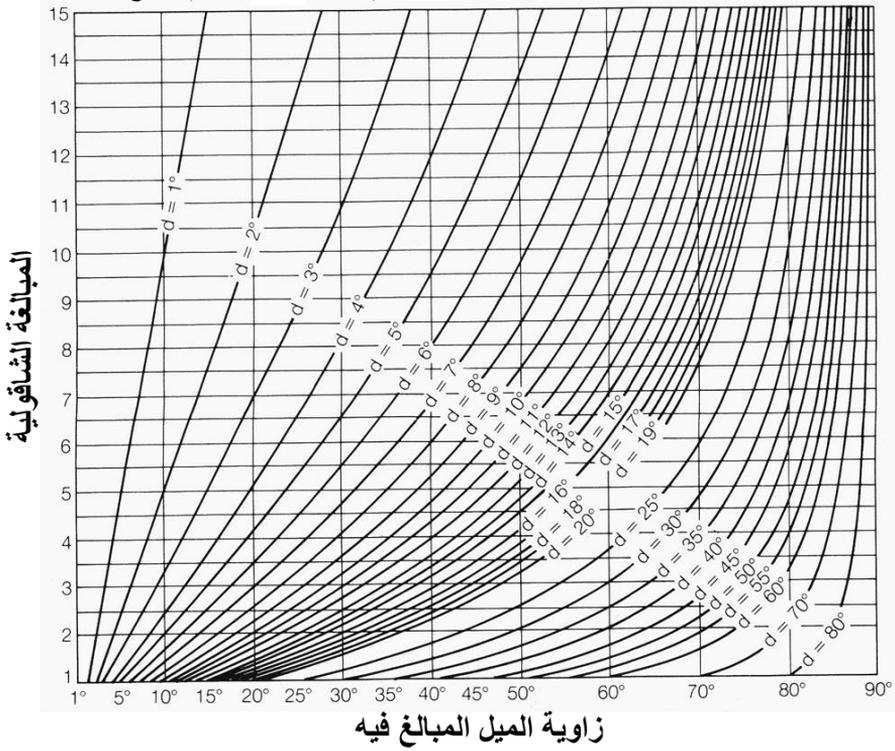
تكون أصلاً شاقولية أو أفقية تماماً. وكلما كان السطح أقل ميلاً كان تأثيره بالمبالغة أكثر. فمثلاً إذا تضمن المقطع صدعين أحدهما أكثر ميلاً من الآخر، فإنهما سيظهران وكأنهما متقاربان في قيمة الميل فيما لو أجريت مبالغة شاقولية كبيرة (شكل 22-2).

وفي حال وجود مقطع تمت عليه عملية مبالغة شاقولية، فإن قيمة الميل المبالغ به ترتبط بقيمة الميل غير المبالغ به (الحقيقي) من خلال العلاقة التالية (شكل 22-3):  
 ظل الميل المبالغ به = قيمة المبالغة الشاقولية X ظل الميل غير المبالغ به



شكل (22-2): تأثير المبالغة الشاقولية على السطوح الجيولوجية. أ: مقطع غير مبالغ فيه، ب: إعادة رسم المقطع السابق بشكل مبالغ فيه (8 ×). لاحظ أن المبالغة الشاقولية تؤثر في السطوح ذات الميول الخفيفة أكثر من تأثيرها في السطوح الأشد ميلاً، كما أن الفروقات الزاوية بين السطوح قليلة الميل تزداد، بينما تتناقص الزوايا بين السطوح شديدة الميل (Maltman, 1998).

### منحنيات الميل، الميل غير المبالغ فيه

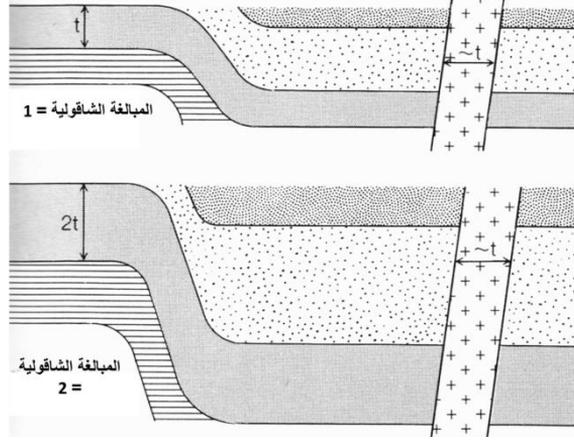


شكل (22-3): العلاقة بين المبالغات الشاقولية وزوايا الميل (Maltman, 1998). مثال 1: لإيجاد زاوية الميل المبالغ فيه، نختار منحنى الميل غير المبالغ فيه، ثم نحدد نقطة تقاطع هذا المنحنى مع الخط الأفقي المعبر عن المبالغة الشاقولية، ونسقطها نحو الأسفل لمعرفة قيمة الميل المبالغ فيه. مثال 2: لإيجاد زاوية الميل غير المبالغ فيه نحدد قيمة زاوية الميل المبالغ فيه على المحور الأفقي ونرفع عموداً منها نحو الأعلى، حتى يتقاطع مع الخط الأفقي المعبر عن المبالغة المعطاة، ثم نحدد أقرب منحنى ميل لمعرفة زاوية الميل غير المبالغ فيه.

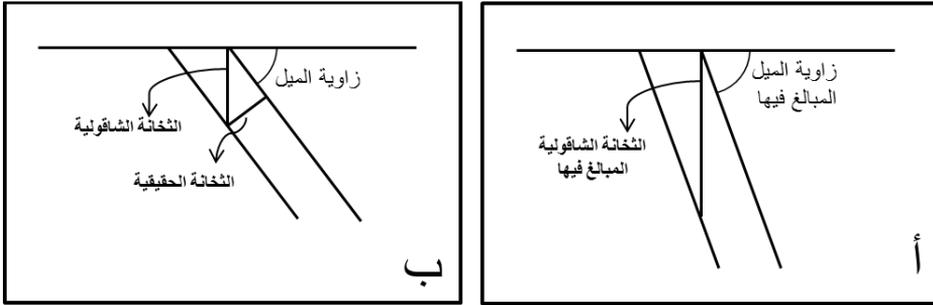
ومن ناحية أخرى تؤدي المبالغة الشاقولية إلى تشويه ثخانة الطبقات (شكل 22 - 4) ، حيث يتمثل التأثير العام بزيادة في قيمة الثخانة. وكذلك فإن فروقات الثخانة سوف تزداد أيضاً، بحيث يمكن استخدام المقاطع التي أجريت عليها المبالغة لإظهار الفروقات البسيطة بشكل أوضح. وتعتمد قيمة الزيادة في الثخانة على زاوية ميل الطبقة. ففي حال الطبقات الأفقية يكون ازدياد

الثخانة أكبر ما يمكن وبالنسبة نفسها التي حصلت بها المبالغة. أما الطبقات الشاقولية فلا تتأثر بالمبالغة، بينما تتأثر الطبقات المائلة بدرجات متفاوتة. عندما يكون الميل بقيم تتراوح ما بين  $1^0$  و  $20^0$  تكون الثخانة أكثر تأثراً، فمثلاً لو أن طبقتين متساويتين بثخانتها الحقيقية، إنما بميلين خفيفين مختلفين، فإنهما ستظهرا وكأنهما مختلفتان بقيم الثخانة في المقاطع المبالغ فيها. ويمكن لطبقة مطوية ذات ثخانة ثابتة أن تأخذ شكلاً مترقفاً في بعض أجزائها (شكل 22-4). وهنا يجب الحذر حيث أن بعض الطيات في التكتشفات يأخذ حقيقة مثل هذه الأشكال، لذا يجب التمييز ما بين الترقق الحاصل نتيجة المبالغة والترقق الحقيقي في الطبقات المطوية. وعندما يكون هناك تغير في الثخانة نتيجة المبالغة الشاقولية فإنه يجب إجراء التصحيحات اللازمة (شكل 22-5).

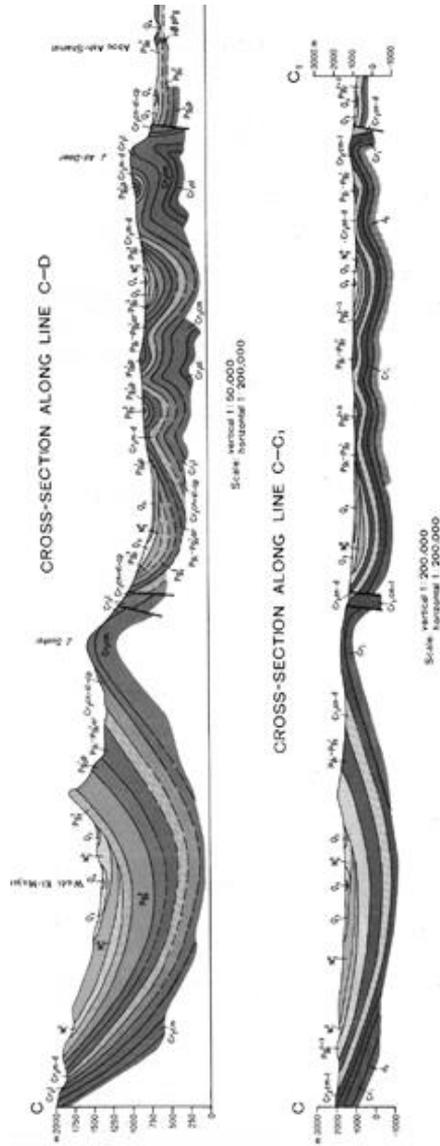
أما عند حساب الأعماق من خلال مقطع مبالغ فيه، فإن التصحيح اللازم أقل عناءً مما هو عليه الحال عند حساب الميول والثخانات. وبما أن العمق يؤخذ بشكل شاقولي، فإن ذلك يعني أن العمق الظاهر في المقطع المبالغ فيه أكبر من العمق الحقيقي بقيمة المبالغة الشاقولية نفسها. ورغم أنه يمكن إجراء التصحيحات آنفة الذكر، فإنه يفضل بشكل عام أن نرسم مقطعاً يتساوى فيه المقياس الشاقولي مع المقياس الأفقي. ويبين الشكل (22-6) مثلاً على مقطع باتجاه NW-SE، يمتد من منطقة أبو الشامات حتى منطقة بيروود. ويتوضح في هذا الشكل الفروقات ما بين المقطع المبالغ فيه والمقطع غير المبالغ فيه.



شكل (22 - 4): تأثير المبالغة الشاقولية في ثخانة التشكيلات الصخرية (Maltman, 1998). لاحظ التأثير الكبير في ثخانة الطبقات الأفقية، والتأثير القليل في الطبقات شديدة الميل، وكذلك التأثير المتوسط في الطبقات متوسطة الميل. وإذا كان ميل طبقة متغيراً فيلاحظ مايسمى "تأثير الترقق الظاهري" Apparent attenuation effect في هذه الطبقة.



شكل (22 - 5): طريقة تخطيطية بسيطة لإيجاد الثخانة الحقيقية لطبقة موضحة في مقطع عرضي مبالغ فيه. نفترض هنا أن المقطع متعامد مع اتجاه الطبقات. أ: مقطع مبالغ فيه مرتين ( $\times 2$ )، ب: مقطع حقيقي. لاحظ أن قيمة المبالغة = 2. يتم قياس زاوية الميل المبالغ فيها =  $70^\circ$ . نستخدم الشكل (22 - 3) لحساب زاوية الميل الحقيقي ( $53^\circ$ ). نقيس الثخانة المبالغ فيها (36 وحدة قياس)، ثم نقسم هذه القيمة على قيمة المبالغة الشاقولية لتحديد قيمة الثخانة الشاقولية (18 وحدة). الثخانة الحقيقية = الثخانة الشاقولية  $\times$  جب زاوية الميل (18  $\times$  جب  $53 = 14.4$  وحدة).



شكل (22-6): مقطع جيولوجي ممتد ما بين منطقة أبو الشامات (جبل الضمير) ومنطقة بيروود (مقعر المجر) مروراً بمحدهم النبك، مرسوماً بطريقتين، أعلاهما مبالغ فيه شاقولياً، أما الثاني فيتساوى فيه المقياسان الأفقي والشاقولي. لاحظ الفرق. (الخريطة الجيولوجية لسورية، رقعة دمشق، 1963، Ponikarov).



## الباب الثامن - الفصل الثالث والعشرون إنشاء المقاطع العرضية

### 1.23. مقدمة:

نظراً للأهمية الكبيرة للمقاطع الجيولوجية العرضية في توضيح البنيات الجيولوجية، فإنه لا بد من إيضاح أهم الطرائق التي يمكن من خلالها إنشاء هذه المقاطع. ولا بد قبل ذلك، من بيان أهم المُحدِّدات التي يتم الاعتماد عليها لإنشاء المقاطع العرضية، التي تتلخص بما يأتي:

- أ- يجب اختيار خط المقطع العرضي Line of cross section بحيث يكون في المنطقة التي يتوفر فيها أكبر قدر من المعطيات وأن تتصف بأقل التعقيدات.
- ب- تُنشأ المقاطع باتجاه متعامد مع اتجاه الطبقات ومع محاور الطي الإقليمي.
- ت- يجب أن تتميز المقاطع التضاريسية بالدقة بحيث تبين ارتفاعات كل نقطة على طول خط المقطع.
- ث- يكون المقياس الأفقي مساوياً للشاقولي عادة، حيث أن المبالغة الشاقولية تؤدي إلى تشويه المقطع (الميل والثخانة).
- ج- حالما يتم إنشاء المقطع التضاريسي، توضع عليه المعطيات الجيولوجية الأساسية (الاتجاه والميل والسطوح الطبقيّة والصدوع)
- ح- إذا كان اتجاه الطبقات والبنيات الأخرى غير متعامد مع المقطع، تحسب قيمة الميل الظاهري.
- خ- توضح الميول عادة من خلال مستقيمات قصيرة مع دائرة صغيرة أو نقطة وذلك في مكان أخذ القياس على المقطع.
- د- يتم توجيه خط المقطع عادة بحيث تكون نهايته الشمالية أو الشرقية على الجانب اليميني منه.

### 2.23. طريقة "بسك" وطريقة "الانعطاف" في رسم الطيات المتوازية

تُستخدم طريقة "بسك" Busk method وطريقة "الانعطاف" Kink Method في رسم المقاطع العرضية للصخور المتطبقة المطوية التي لم يحصل فيها تغيير شامل في ثخانتها (طيات متوازية). وتفترض كلتاها أن الطبقات ذات ثخانة حقيقية ثابتة ( Busk, 1929; Dahlstrom, 1969; Elliott, 1983; De Paor, 1988; Marshak and Woodward, 1988; McClay, 1992, 1999; Ragan, 2009 ).

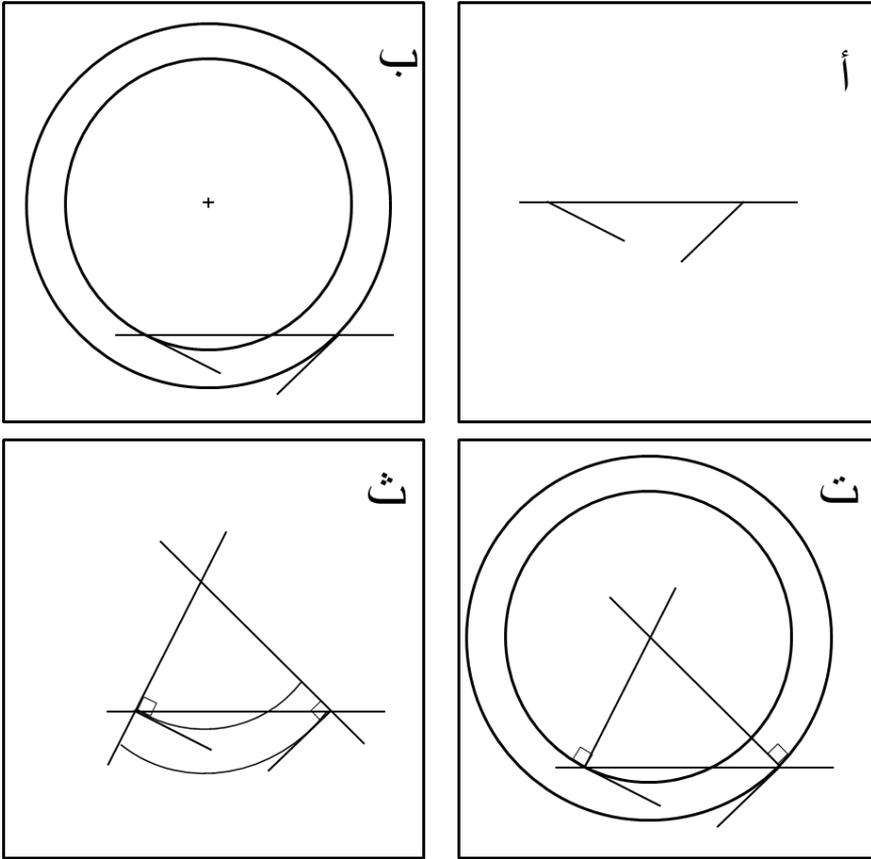
تفترض طريقة بسك أن الطيات متوازية parallel ومتراكزة Concentric. وهذا يعني أن الطبقات المطوية ذات ثخانة حقيقية ثابتة. أما كونها متراكزة فهذا يعني أنها تتألف من أجزاء من أقواس دائرية، لكل منها مركز تقوس واحد. تعطي طريقة بسك نتائج جيدة في البنيات المطوية ذات الهندسية القوسية المتراكزة. غير أن معظم الطيات ليست متراكزة، ما يعني أن طريقة بسك يمكن أن تؤدي إلى توقعات خاطئة في بعض الحالات.

أما طريقة الانعطاف فتفترض أن الطيات متوازية أيضاً، غير أنها تفترض أن لها أجنحة مستقيمة ومفاصل زاوية، أي أن الطيات الكبيرة في الصخور الرسوبية تتألف من سلسلة من الالتواءات الحادة. وقد أدت طريقة الانعطاف إلى توقعات صحيحة في العديد من الحالات التي درست فيها المناطق المطوية، وتم اختبارها بأبار حفرت في تلك المناطق. وعلاوة على ذلك فإن رسم المقاطع بهذه الطريقة يجعل من عملية التشوه الراجع Retro-deformation للبنيات المؤلفة من أجنحة مستقيمة أمراً سهلاً.

### 3.23. إنشاء مقطع عرضي لطية باستخدام طريقة بسك (طريقة القوس Arc Method):

تُقرب هذه الطريقة الطية إلى سلسلة من الأقواس الدائرية. وقد وصفها بسك لأول مرة في عام 1929 (Busk, 1929)، وهي تدعى لذلك "طريقة بسك". نفترض في الشكل (23-1) أن هناك ميلين معطيين (شكل 23-1-أ)، فكيف نقرب الطية لشكل أقواس دائرية؟ إنه من غير الممكن الافتراض بأن القياسات أجريت على الطبقة نفسها. حيث تتمثل المشكلة هنا بإيجاد دوائر متراكزة تكون بتماس مع قياسي الميل الموضوعين على المقطع (شكل 23-1-ب). إن أنصاف أقطار الدوائر تتعامد مع مماسات هذه الدوائر في النقاط التي تلتقي فيها أنصاف الأقطار هذه مع الدوائر (شكل 23-1-ت). ولذلك ننشئ عموداً على كل إشارة ميل فنجد أن

هذه الأعمدة تتقاطع في نقطة هي مركز الأقواس المطلوبة (شكل 23-1-ث). وهكذا نحدد مراكز النقوسات بين قياسات الميل المتجاورة ونرسم الأقواس الخاصة بكل منها. أي أن هذه الأقواس تُحدد بالعمودين على كل من إشارتي الميل المتجاورتين.



شكل (23-1): استنتاج شكل الطية المتوازية (المتراكزة) بمعرفة ميلين معطيين (Dutch, 2012).

### 1.3.23. طريقة الإنشاء (مثال محلول، Ragan, 2009):

أجريت قياسات لميول الطبقات على امتداد مقطع ذي اتجاه E-W، وذلك في المواقع المبينة في اللوحة (23-1). والمطلوب إنشاء الطية الموجودة في هذا المقطع بطريقة بسك على اعتبار

أنها طية متوازية، وأن خط المعلم (الأثر الطبقي) الأول ينطلق من الموقع A الواقع في أقصى الطرف الغربي للمقطع.

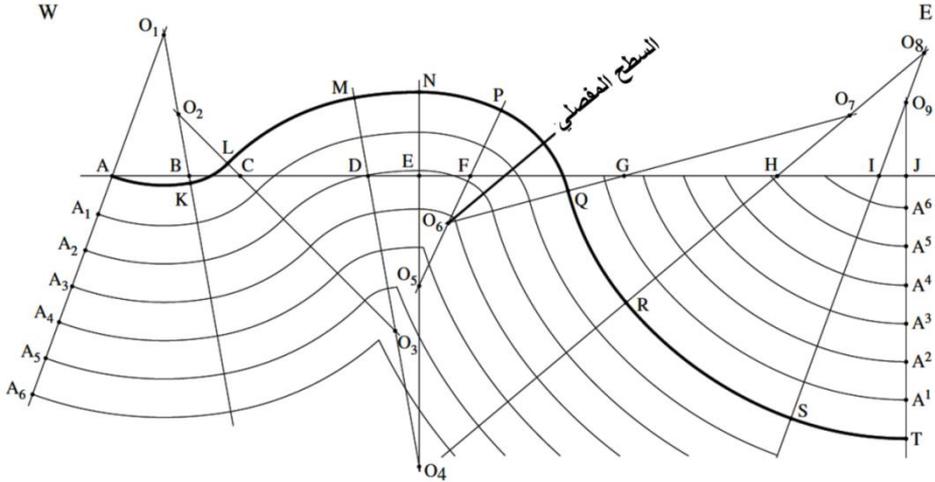
اللوحة (23 - 1): معطيات المثال الأول.

الموقع	الميل (بالدرجات)	الموقع	الميل (بالدرجات)
A	20 E	F	25 E
B	10 W	G	75 E
C	45W	H	50 E
D	10 W	I	20 E
E	0	J	0

خطوات الإنشاء (شكل 23 - 2):

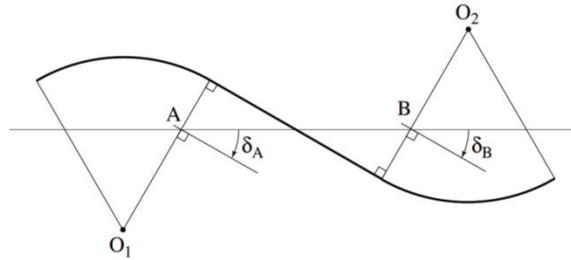
- أ- يرسم عمود على إشارة الميل في كل موقع، فيلاحظ أن كل زوج من الأعمدة المتجاورة سيتقاطع في نقطة (المراكز O1 حتى O9).
- ب- يتم البدء بخط المعلم الأول (أثر سطح الطبقة المتكشف في الموقع A)، وتستخدم المراكز O1 - O9 على التوالي، لرسم أقواس دائرية، وتحدد النقاط K حتى T التي تمثل تقاطع خط المعلم مع كل من الأعمدة المقامة على إشارات الميل. أي أننا نصل في النهاية إلى رسم المنحني AKLMNPQRST الممثل لأثر السطح الطبقي المار من A.
- ت- يتم إنشاء آثار السطوح الطبقيّة للطبقات الأخرى (A1 - A3) بالطريقة نفسها، من خلال معرفة الثخانة الحقيقية للطبقات.
- ث- إن رسم الأثر A4 والآثار الأخرى الواقعة تحته يتطلب إجراء تعديل على الطريقة. وذلك بهدف المحافظة على الثخانة الحقيقية للطبقات. ويعود سبب ذلك إلى أن مركز النقيس O6 يقع فوق هذه الآثار، ما يؤدي بها إلى أن تأخذ شكلاً زاوياً بدلاً من الشكل المنحني، أي أن المركز O6 لم يعد له تأثير على شكل الطية في الأجزاء الأعمق.

ج- لتحديد أثر المستوي المفصلي (المحوري) في هذا المحذب اللامتناظر، يصار إلى رسم منصف الزاوية PO<sub>6</sub>Q.



شكل (23-2): إنشاء الطية المتوازية في تمرين المثال الأول. لاحظ أن مركز القوس O<sub>6</sub> لم يعد له تأثير في الطبقات الأعمق (Ragan, 2009).

هناك حالة معينة تتطلب معالجة خاصة، وهذه تتمثل بوجود نقطتي تكشف متتاليتين على امتداد المقطع المدروس تتساوى فيهما قيمة الميل واتجاهه. وهذا يعني أن المستقيمين المتعامدين مع أثري الطبقة في هذين الموقعين سيكونان متوازيين، أي أن القوس الذي سيرسم بينهما سيأخذ شكلاً مستقيماً (شكل 23-3).

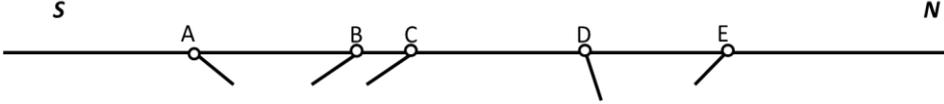


شكل (23-3): رسم أثر الطبقة ما بين نقطتي تكشف (A و B) متساويتي الميل (Ragan, 2009).

### 2.3.23. التمارين:

#### 1.2.3.23. التمرين الأول

ارسم على المقطع المبين في الشكل (23-4) مسار أثر السطح الطبقي المنطلق من الموقع A على أساس أنه يمثل أثراً لأحد سطحي طية متوازية وذلك باستخدام طريقة بسك.



شكل (23-4): المقطع المستخدم في حل التمرين الأول

#### 2.2.3.23. التمرين الثاني

حُفر نفق باتجاه شمال - جنوب مخترقاً صخوراً تتجه طبقاتها شرق - غرب. أجريت قياسات ميل لهذه الطبقات في خمسة مواقع على امتداد هذا النفق. يبين العمود الأوسط من اللوحة (23 - 2) بُعد موقع القياس عن النهاية الشمالية للنفق، أما العمود الأيسر فيبين قيمة زاوية الميل واتجاه الميل في كل موقع. المطلوب إنشاء أثر السطح الطبقي المطوي بطريقة بسك على فرض أن الطية التي يخترقها هذا النفق متوازية. مقياس الرسم 1:10.000.

(اللوحة 23 - 2): القيم المستخدمة في حل التمرين الثاني.

الموقع	البعد (م)	الميل (درجة)
A	0	45S
B	230	30N
C	350	25S
D	530	40N
E	700	28S

### 3.2.3.23. التمرين الثالث

يمتد مقطع شاقولي باتجاه شرق - غرب قاطعاً سلسلة من الطبقات ذات الاتجاه شمال - جنوب. وقد تم في مواقع محددة على امتداده قياس زوايا واتجاهات ميول الطبقات. يبين العمود الأوسط من اللوحة (23- 3) بُعد هذه المواقع عن النهاية الغربية للمقطع ويبين عموده الأيسر زاوية الميل واتجاهه في كل موقع. المطلوب:

- أ. إنشاء الطية الموجودة في مجال هذا المقطع بطريقة بسك على اعتبار أنها طية متوازية، وأن الأثر الطبقي الأول يتكشف عند النهاية الغربية للمقطع (موقع A).
- ب. حدّد عمق الأثر الطبقي السابق في بئر حفرت عند الموقع G الذي يبعد مسافة 500م عن النهاية الغربية للمقطع. مقياس الرسم 1:5000.

اللوحة (23- 3): القيم المستخدمة في حل التمرين الثالث.

الموقع	البعد (م)	الميل (درجة)
A	0	35E
B	100	20W
C	210	35E
D	240	20W
E	310	15E
F	420	40E
G	500	40E
H	590	25W
I	700	0

### 4.2.3.23. التمرين الرابع

يخترق نفق اتجاهه شرق - غرب سلسلة من الطبقات ذات اتجاه شمال - جنوب. تبين اللوحة (23- 4) قيم زوايا الميل واتجاهه للطبقات (العمود الأيسر) المقيسة في المواقع التي حددت

أبعادها عن النهاية الغربية للمقطع (العمود الأوسط). المطلوب إنشاء الطية التي يخترقها هذا النفق بطريقة بسك على اعتبار أنها متوازية وأن الأثر الطبقي الأول يتكشف في النهاية الغربية للنفق (موقع A). مقياس الرسم 1:100.000.

اللوحة (23-4): القيم المستخدمة في حل التمرين الرابع.

الموقع	البعد (م)	الميل (درجة)
A	0	60E
B	1600	10W
C	2400	10W
D	2700	25W
E	3600	10E
F	4000	35E
G	5700	60E
H	6800	0

#### 4.23. إنشاء مقطع عرضي لطية باستخدام طريقة الانعطاف

تبدي الطيات عموماً ميولاً موحدة عبر مسافات عريضة ثم يتغير الميل بشكل مفاجئ. أي أنها تبدي سلسلة من الانعطافات Kinks بدلاً من الأقواس اللطيفة، بمعنى أن الطيات تعد أقرب لنمط الطيات الزاوية. تُعتمد طريقة الانعطاف في رسم مقاطع الطيات حالياً أكثر من طريقة بسك. وتُعتمد هذه الطريقة على افتراضين، أولهما أن الطيات هي من النمط المتوازي، أي أن ثخانة أية طبقة معطاة متساوية محلياً، وثانيهما أن الطيات تتألف من نطاقات ذات ميل موحد ومفصولة عن بعضها بانعطافات مميزة.

#### 1.4.23. الطيات الزاوية في المقاطع العرضية

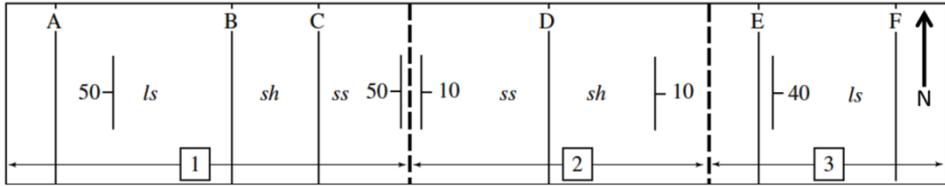
تتميز الخرائط الجيولوجية في مناطق الطيات الزاوية بنمط مميز تكون فيه زاوية الميل واتجاهه شبه متساوية في نطاقات متوازية، وهي تتغير فجأة من نطاق لآخر. يمكن تمييز هذه النطاقات

في الحقل وهي تسمى "قطاعات الميل" Dip domains (Ragan, 2009). وبالإعتماد على الوضعية الفراغية لهذه القطاعات، أمكن وضع طريقة لإنشاء المقاطع في مناطق الطيات الزاوية (طريقة الانعطاف).

يتضمن إنشاء مثل هذه الطيات الزاوية الإسقاط المباشر للحدود الصخرية (الليثولوجية) بشكل مواز للميل في القطاع. وتتمثل الخطوة المهمة بتحديد نقاط المفصلة ومن ثم تحديد أثر المستوي المفصلي.

### مثال محلول:

ارسم مقطعاً عرضياً يوضح الطيات الظاهرة في الخريطة الجيولوجية المرفقة (شكل 23-5).



شكل (23-5): الخريطة الجيولوجية للطيات الزاوية المنتشرة في القطاعات الثلاث 1 و 2 و 3. /s: حجر كلسي، /sh: غضار، /ss: حجر رملي. تمثل الخطوط المتقطعة الحدود بين قطاعات الميل (Ragan, 2009).

### الإنشاء (شكل 23-6)

أ. حدد نقاط التماس بين الحجر الرملي والغضار والحجر الكلسي على خط المقطع (النقاط A حتى F). وحدد الميل الممثل لكل قطاع:  $\delta_1 = 50^\circ$  غرب و  $\delta_2 = 10^\circ$  شرق و  $\delta_3 = 40^\circ$  شرق (شكل 23-6). أضف نقاطاً تمثل الحدود بين القطاعات (الدوائر الصغيرة).

ب. في القطاع 1: ارسم الحدود الصخرية (الليثولوجية) A و B و C بشكل مواز للميل  $\delta_1$ .

ت. في القطاع 2: ارسم الحد الصخري الوحيد D بشكل مواز للميل  $\delta_2$ . إن التقاطع مع الحد C من القطاع الأول يساعد في تحديد نقطة المفصلة  $h_1$  على المستوي المفصلي الأول H1. وتبلغ زاوية الطية هنا:

$$\gamma_{12} = 180^\circ - (\delta_1 + \delta_2) = 120^\circ$$

ث. ارسم أثر المستوي المفصلي H1 بالربط ما بين النقطة الممثلة لحد القطاع (الموضحة من خلال دائرة صغيرة) وبين النقطة  $h_1$ ، ونلاحظ أن هذا المستوي ينصف زاوية الطية  $\gamma_{12}$  عند  $h_1$ ، بحيث تتساوى ثخانة الطبقات في القطاع 2 معها في القطاع 1.

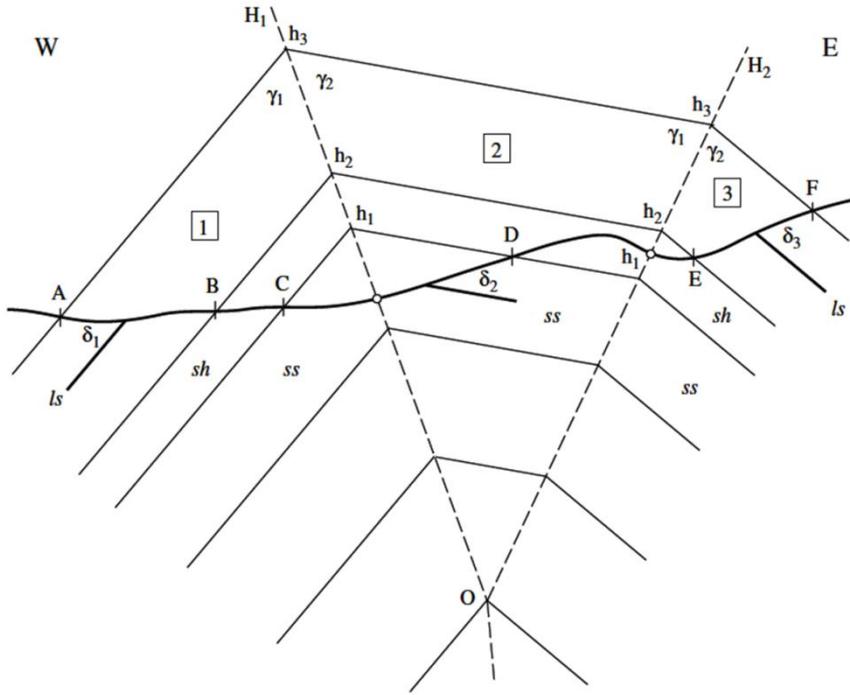
ج. في القطاع 3: ارسم الحدين E و F بشكل مواز للميل  $\delta_3$ . ويكون لطبقة الحجر الكلسي هنا ثخانتها الموجودة في القطاع 1 نفسها. ولذلك فإن طبقة الغضار التي توجد تحتها ستحافظ على ثخانتها أيضاً، ويمكن رسم حدها السفلي حتى يتقاطع مع الحد D من القطاع 2. وهذا يؤدي بدوره إلى تحديد نقطتي المفصلة  $h_1$  و  $h_2$  الواقعتين على المستوي المفصلي الثاني H2، الذي تتم إضافته للمقطع. أما زاوية الطية هنا فهي:

$$\gamma_{23} = 180^\circ - (\delta_3 + \delta_2) = 150^\circ$$

ويلاحظ هنا أيضاً أن H2 ينصف هذه الزاوية.

ح. يمكن إضافة الحدود الأخرى في القطاعات الثلاث.

خ. يتقاطع المستويان المفصليان H1 و H2 عند نقطة O التي تمثل بدورها نقطة مفصلة الطية الزاوية في نواة الطية الصندوقية.



شكل (23 - 6): الطية الزاوية ذات الثخانة الثابتة للوحدات الصخرية في جناحيها (Ragan, 2009).

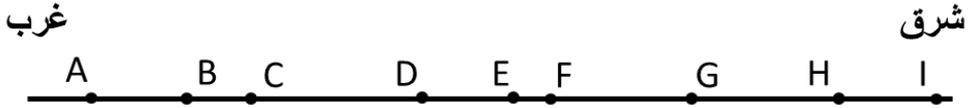
### 2.4.23. التمارين:

#### 1.2.4.23. التمرين الأول:

تم إجراء قياسات الميل التالية (اللوحة 23 - 5) على طول المقطع التالي ذي الاتجاه شرق - غرب، والمتعامد مع اتجاه التطبيق (شكل 23 - 7). ارسم الطية الموجودة على طول هذا المقطع باستخدام طريقة بسك ثم بطريقة الانعطاف، مع الأخذ بالحسبان أن أول سطح طبقي يتكشف عند النقطة A، وأن ثخانة الطبقات المطوية تساوي 5 م. مقياس الرسم: 1سم: 10 م.

اللوحة (23 - 5): المعطيات المستخدمة في حل التمرين الأول.

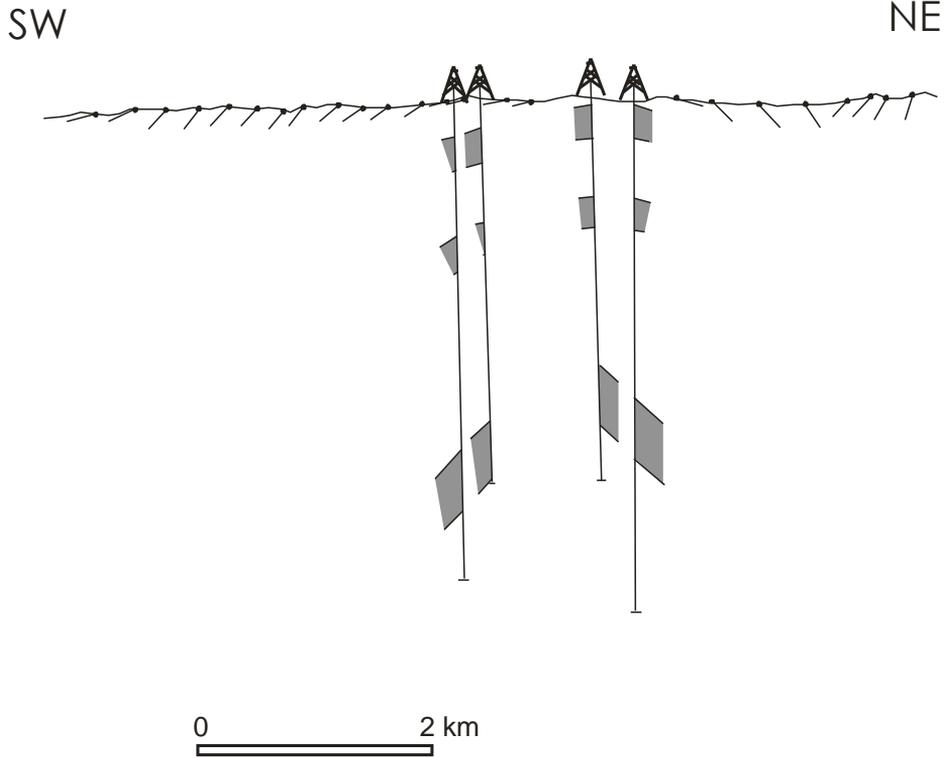
الموقع	الميل
A	20° E
B	12° W
C	46° W
D	18° W
E	3° E
F	22° E
G	75° E
H	50° E
I	أفقي



شكل (23-7): خط المقطع المستخدم في حل التمرين الأول.

#### 2.2.4.23. التمرين الثاني:

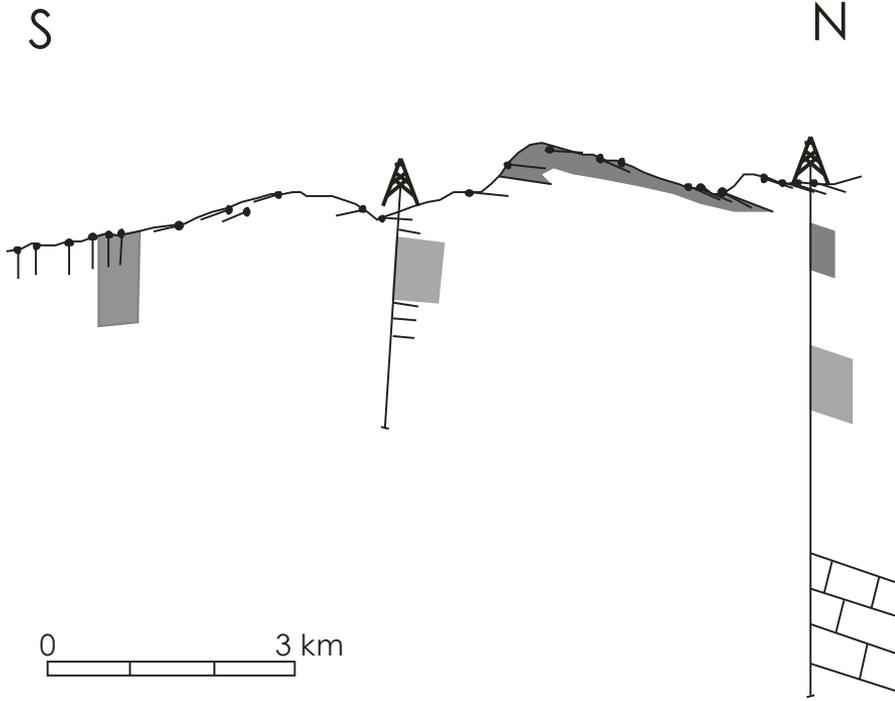
أجريت قياسات للميل على طول المقطع التالي ذي الاتجاه NE - SW والمتعامد مع اتجاه التطبيق ومحاور الطيات (شكل 23 - 8). كما أخذت معطيات بئرية دلت على وضعية بعض الطبقات وثنائاتها في هذه آبار محفورة في هذه المنطقة. أكمل رسم هذا المقطع باستخدام طريقة الانعطاف وبالاستناد إلى المعطيات المتوفرة.



شكل (23-8): المقطع المستخدم في حل التمرين الثاني، مضافاً إليه بعض المعطيات البئرية التي توضح الوضعية الفراغية لبعض الطبقات.

### 3.2.4.23. التمرين الثالث

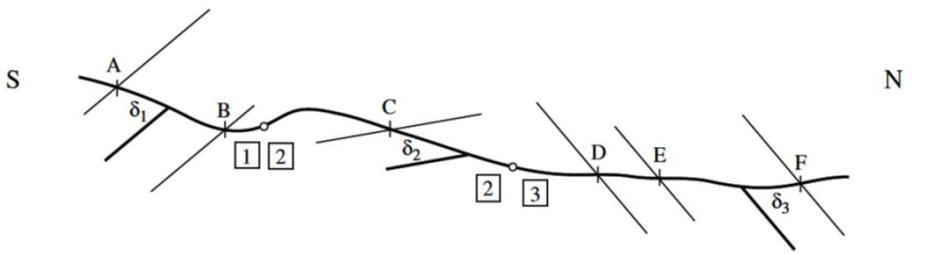
يمثل الشكل التالي مقطعاً جيولوجياً غير مكتمل (شكل 23 - 9). توفرت لهذا المقطع معطيات سطحية لتكشف بعض الطبقات ولميلها، كما توفرت بعض المعطيات عن الوضعية الفراغية لبعض الطبقات وعن ثخاناتها في بئرين حفرتا على طول هذا المقطع. أكمل رسم هذا المقطع بطريقة الانعطاف آخذاً بالحسبان المعطيات المتوفرة.



شكل (23-9): المعطيات السطحية وتحت السطحية المتوفرة على طول المقطع المستخدم لحل التمرين الثالث.

#### 4.2.4.23. التمرين الرابع

أكمل المقطع العرضي التالي (شكل 23 - 10) الذي يتضمن طبقات زاوية.



الحدود الصخرية (الليثولوجية) : A B C D E F : قطاعات الميل [1] [2] [3] :  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  : الميول

شكل (23 - 10): المقطع العرضي المستخدم لحل التمرين الرابع (Ragan, 2009).

## الباب الثامن - الفصل الرابع والعشرون

### المقاطع العرضية المتوازنة في مناطق الطي والتصدع التراكمي

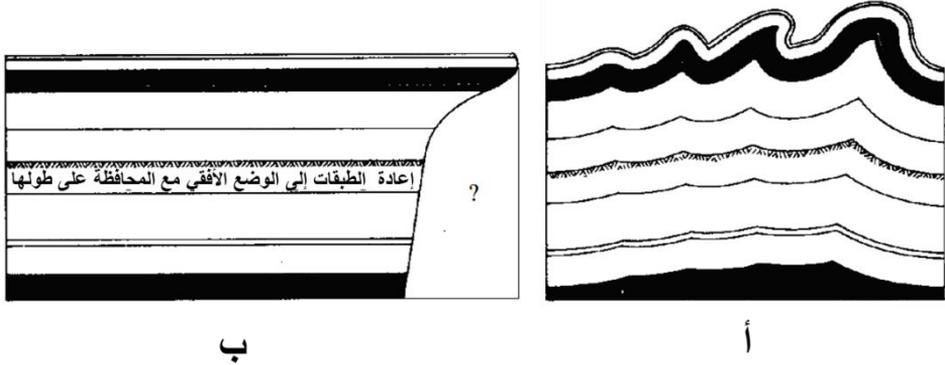
#### Balanced Cross Section in Fold and Thrust Belts

##### 1.24. المقاطع العرضية المتوازنة

المقاطع العرضية المتوازنة هي مقاطع عرضية بنيوية لمتتاليات رسوبية إقليمية مشوهة، ويمكن إعادتها إلى حالتها غير المشوهة، حيث يجب أن تكون الأطوال المسترجعة لكل الآفاق (الطبقات) المقيسة متساوية، ومساوية للطول الأصلي. وبمعنى آخر يمكن إعادة الطبقات إلى هندستها المسطحة الأصلية دون الحاجة إلى إضافة صخور أو فقدانها. ولقد تم تطبيق طريقة المقاطع المتوازنة بنجاح لتحسين التفسير البنيوي في مناطق الطي والتراكب.

بناء على ماسبق لنختبر طريقة بسك التي طبقناها سابقاً في إنشاء المقاطع العرضية في المناطق المطوية. تعطي هذه الطريقة نتائج مقبولة في عديد من الحالات، وهذا ما تم إثباته من خلال ملاحظة التكتشفات على سطح الأرض. ورغم ذلك فإن لها حدوداً يجب أخذها بالحسبان. وفي أحسن الحالات فإن الأقواس الدائرية المتراززة تقارب شكل منحنيات طبيعية، وذلك في حالة الطيات المتوازنة المدورة فقط. وبالتالي كلما كانت كمية معطيات ميول الطبقات أكبر، فإن هذا التقارب يكون أكثر واقعية. غير أننا لاحظنا أن كل جزء قوسي يعتمد بوجوده على زاويتي ميل فقط وهنا يكمن جزء من المشكلة.

ومن ناحية أخرى، فإن ظهور الانعطافات الزاوية الحادة في نوى الطيات، كما مر معنا لدى دراستنا لهذه الطريقة، يعني أن هناك خطأ ما في هذه الطريقة. أي أن طريقة بسك لا يمكن تطبيقها على الأجزاء العميقة من الطيات، ما يعني أنها غير قابلة للتطبيق في نوى الطيات. ومن الأمور المهمة التي يجب الانتباه إليها عند تطبيق طريقة بسك، ما يمكن أن يحدث عند محاولة ترجيع الطبقات إلى وضعيتها التي كانت عليها قبل الطي. فلو قمنا بقياس طول كل طبقة مطوية لتقدير طولها الأصلي (شكل 24-1 أ)، ورجعناها إلى وضعيتها غير المطوية (شكل 24-1 ب) لوجدنا فقداناً معتبراً للمادة، وهذا غير واقعي.



شكل (24-1): تقصير غير متساو. أ: بنية طيات أنشئت بطريقة بسك، ب: ترجيع البنية المطوية إلى الوضع الأفقي مع المحافظة على أطوال الطبقات. لاحظ فقدان المادة الحاصل (Carey, 1962).

إن المحدودية المذكورة أعلاه لطريقة بسك، تدعونا لاختبار عملية إنشاء المقاطع العرضية بشكل عام، وبغض النظر عن طريقة إنشائها (طريقة بسك أو طريقة الانعطاف أو غيرها..)، وذلك بهدف وضع مقاطع عرضية مقبولة بالمنطق الجيولوجي. ويعد شرط التوازن من أهم الشروط التي يجب أن تتمتع بها المقاطع العرضية.

#### 2.24. طرائق موازنة المقاطع العرضية:

تتم موازنة المقاطع العرضية من خلال مقاربتين:

- مقارنة الإنشاء Construction approach التي تتضمن استخدام نماذج متوازنة هندسياً وحركياً عند القيام بالإنشاء الأولي للمقطع العرضي.
- مقارنة الترجيع (إعادة البناء) Restoration approach التي تتضمن إعادة مقطع عرضي إلى وضعه غير المشوه بخطوات صحيحة حركياً.

وفي الحالة النموذجية فإنه يجب استخدام كلتا المقاربتين لإعطاء تفسير بنيوي متوازن للمقطع. وللوصول إلى هذا الهدف نفترض ما يأتي (Ragan, 2009):

- أ- تحصل التشوهات التي أدت إلى الطي بشكل ثنائي البعد، بمعنى أن كل التغيرات الحاصلة تمت في مستوي المقطع.
- ب- تمت المحافظة على مساحة مستوي المقطع في أثناء حصول التشوهات.
- ت- تتميز الطبقات المطوية في أصلها (أي قبل الطي) بثخانة حقيقية ثابتة.
- ث- تتميز الطيات بهندسية متوازية في كل أجزائها.

وهكذا فإذا كانت المساحة محفوظة، والثخانة ثابتة، فإن ذلك يعني أن طول أي طبقة يجب أن يبقى ثابتاً، أو شبه ثابت. وبسبب هذا الثبات في طول الطبقة، فإن ذلك يعني أيضاً أن طول آثار كل السطوح المطوية يجب أن يتساوى من طبقة لأخرى. يقود ذلك إلى اختبار بسيط للتوافق يُجرى على شكل الطيات المتوازية التي تم إنشاؤها.

#### مراحل الاختبار:

- أ- يتم تحديد خطين مرجعيين عند نهائي المقطع في مناطق يعتقد أنها لم تتعرض للانزلاق الطبقي Interbed slip. وهذه يمكن أن توجد عند مفاصل المحدثات أو المقعرات الرئيسية، أو في مناطق بعيدة عن حزام الطي.
- ب- تقاس أطوال آثار سطوح طبقية مختارة فيما بين الخطين المرجعيين، وهذا ما يمكن أن يجرى باستخدام مقياس المنحنيات Curvimeter، أو بكل بساطة باستخدام خيط نمده على طول الأثر المطلوب، حيث يجب أن تكون هذه الخطوط بالطول نفسه.
- ت- في حال كانت الأطوال غير متساوية، يجب البحث عن سبب هذا الاختلاف ضمن المقطع نفسه.

إذا كانت أطوال آثار السطوح الطبكية متساوية، يعد هذا المقطع متوازناً. إن الميزة المهمة لمثل هذه المقاطع أن قيمة التقصير التي تمثلها الطيات يمكن تحديدها من خلال مقارنة الأطوال الأصلية مع الأطوال المشوهة لآثار السطوح الطبكية المطوية. وهنا يجب الانتباه إلى أن التوازن شرط ضروري، إنما غير كاف لأن نعد أن المقطع صحيح. بمعنى أنه لو كان المقطع غير

متوازن فإنه لا يمكن أن يكون صحيحاً، أما إذا كان متوازناً فيمكن له أن لا يكون دقيقاً بشكل كامل.

إذا طبقنا هذا الاختبار على الطيات المتوازنة المنشأة بطريقة بسك، فإننا سنجد أن أطوال الطبقات ليست متنسقة مع بعضها بعضاً لدى ترجيعها إلى الشكل الأصلي السابق للتشوه (شكل 24-1). وإن سبب عدم الاتساق هذا يعزى بشكل رئيس إلى المفاصل زاوية الشكل التي تتكون في نوى المحدثات. ولا يمكن لهذه الأشكال أن تمثل الهندسية الحقيقية في النطاقات العميقة ولا حتى بشكل تقريبي. وهذا يعني أن آلية الطي المتوازي لن تعمل في الأعماق، وأن هناك آليات أخرى تصبح أكثر فعالية هناك. وهكذا فإن هندسية البنيات الأعمق لا يمكن التنبؤ بها من خلال المعطيات السطحية لوحدها.

إن من المميزات المهمة لطريقة الانعطاف في رسم الطيات الزاوية، أنه بالإمكان تحديد طول الطبقة ومساحتها في المقطع بسهولة. غير أنه وعند محاولة ترجيع الهندسية السابقة للطّي بالاعتماد على هذه المعلومات، سنجد أن هناك نقصاً للكتلة في نوى الطيات، كما حصل معنا آنفاً لدى تطبيقنا لطريقة بسك في حالة الطيات ذات الشكل المدور (الطيات المتوازنة المتراكزة)، وهذا يتطلب إضافة بعض التعديلات البنيوية، حيث يمكن عموماً استخدام العلاقات بين الطي والتصدع لشرح معظم الأشكال الهندسية في أحزمة الطي والتراكب.

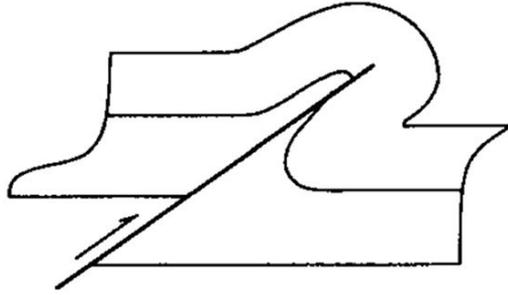
### 3.24. الصدوع في نوى الطيات

إن إجراء التعديلات البنيوية الضرورية لوضع مقاطع عرضية متوازنة يتطلب تضمين صدع مقلوب (تراكبي) أو أكثر في نواة الطية، وذلك لاستيعاب التقصير والمحافظة على الطول الكلي للطبقات. أي أن هناك تبادلاً في الفعالية ما بين الانزلاق الصدعي والتقصير بالطي (شكل 24-2). وبذلك فإن حل مشاكل النقص أو الفراغ آنفة الذكر يوصلنا إلى أحد النماذج الثلاث التالية:

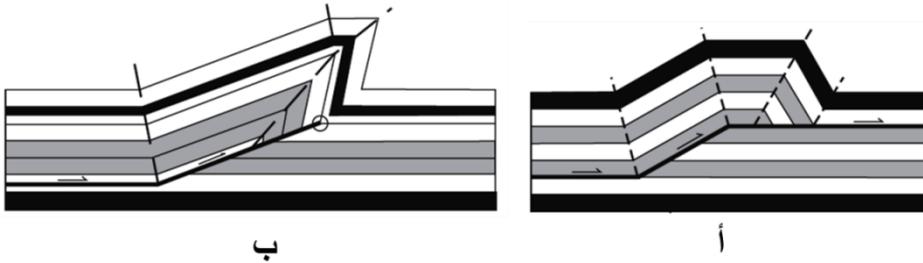
أ. طيات انحناء الصدع Fault-bend folds (شكل 24-3-أ).

ب. طيات انتشار الصدع Fault propagation folds (شكل 24-3-ب).

ت. طيات الانفصال Detachment folds (شكل 24-4).



شكل (24-2): صدوع تراكيبية في نوى الطيات، حيث يتم التقصير من خلال الطي والتصدع (Dhalstorm, 1969).



شكل (24-3): الطيات الزاوية والصدوع (Suppe, 1985; McClay, 1992). أ: طيات انحناء الصدع، ب: طيات انتشار الصدع.

#### - طيات انحناء الصدع:

يتبع العديد من الصدوع التراكيبية مساراً سَلْمِيّاً (درجياً، شكل 24-5-أ)، حيث يكون الصدع موازياً للتطبيق في مجال الطبقات الطيبة (مسطح Flat)، ثم يصعد عبر الوحدات الصخرية العسية مشكلاً مايسمى المنحدر الصدعي Ramp. تتشكل طيات انحناء الصدع بحركة الكتلة المترابكة فوق هذه المنحدرات الصدعية (شكل 24-5-ب). ويتصف الشكل المميز لطية انحناء صدع وحيدة الدرجة بوجود ميل جبهي Front dip شديد نسبياً وميل خلفي أقل منه، غير أنه مساوٍ لقيمة زاوية ميل الصدع في قطاعه (شكل 24-6).

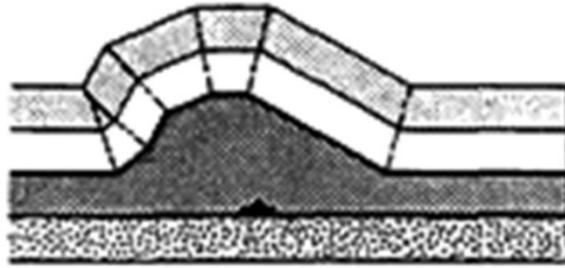
### - طيات انتشار الصدع:

يعود تكونها إلى عملية انتشار الصدع، حيث أن الصدع التراكبي المنتشر يفقد عملية الانزياح وينتهي في الجزء الأعلى من المقطع، ما يؤدي إلى تطور طية عند نهايته (شكل 24-3-ب).

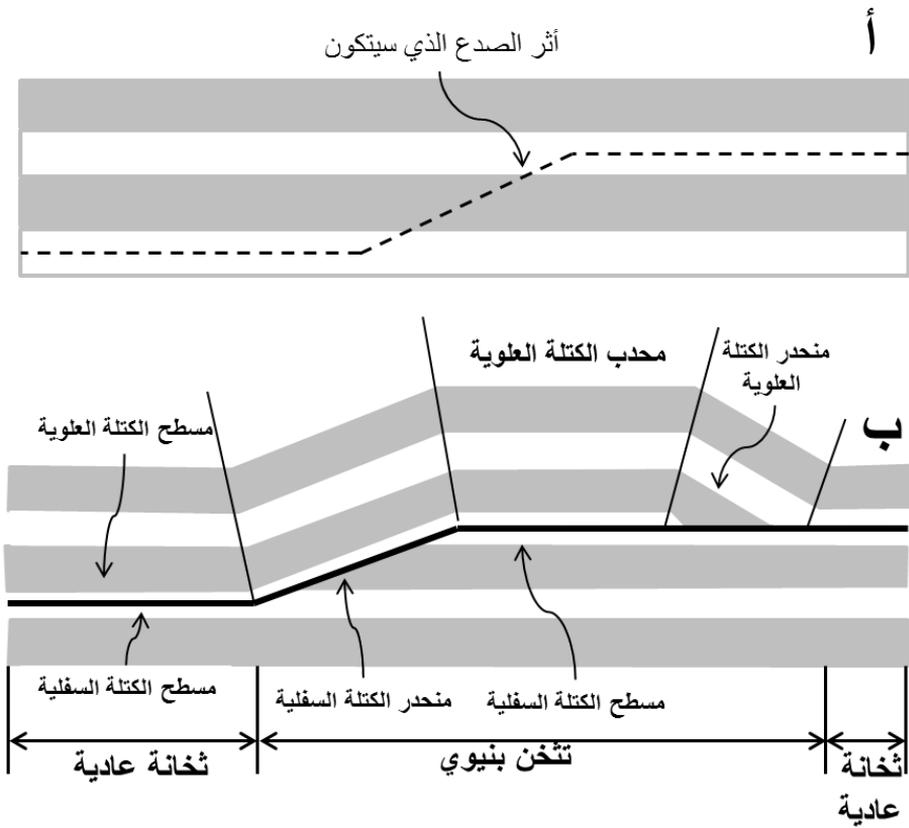
### - طيات الانفصال اللامتوافقة Disharmonic detachment fold:

يكون للطيات من هذا النمط هندسية متوازية Parallel geometry عند قوسها الخارجي وهندسيات لامتوازية ولامتوافقة في نوى المكدبات. يؤدي إسقاط الطية المتركرة نحو العمق إلى مشكلة مكانية، ما يؤدي إلى تطور طيات لامتوازية ولامتوافقة فوق سطح انفصال قاعدي Basal detachment (شكل 24-4). وذلك من خلال ما يسمى الطيات اللامتوافقة Disharmonic folds. والسؤال المباشر هنا: كيف يمكن أن ترسم الطبقة التالية السفلى؟ وهذا يمكن أن يقود إلى عملية القص أو الانفصال Decollement.

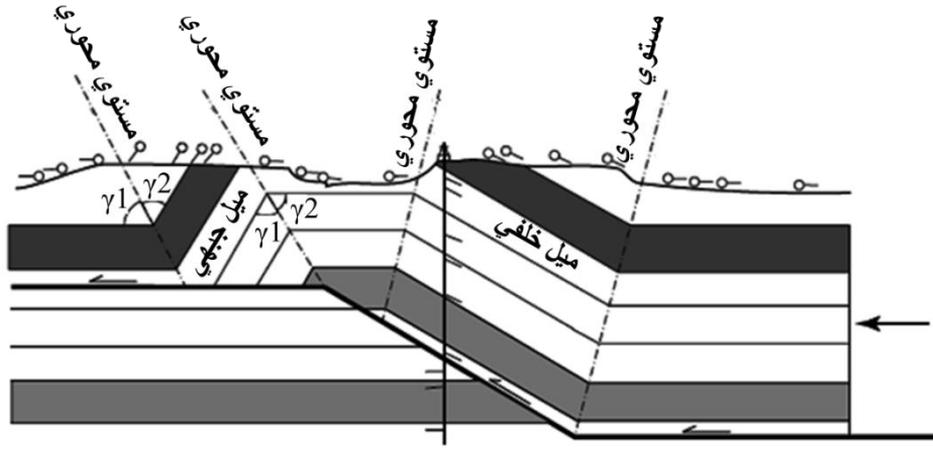
وبشكل عام، يحصل التصدع التراكبي ولاتوافق الطيات معاً. ومن المقاطع المشهورة هو مقطع جبال الجورا، حيث وضع مفهوم الانفصال (شكل 24-7). وحيثما يوجد هذا الانفصال يمكن أن نحسب عمقه (انظر الفقرة التالية).



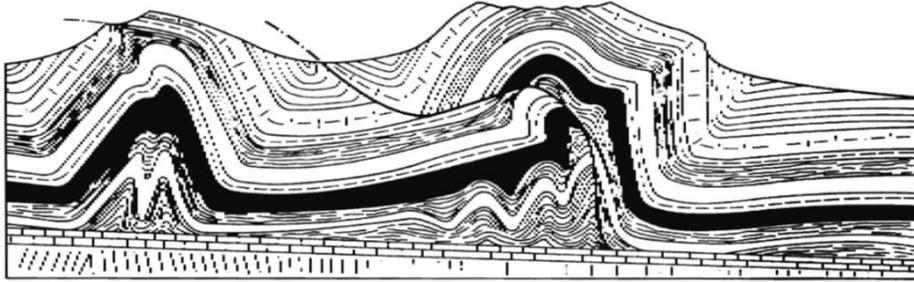
شكل (24 - 4): طيات الانفصال (McClay, 1992).



شكل (24-5): المواصفات الهندسية لطيات انحاء الصدع. أ: الشكل الدَّرَجِي لأثر الصدع، ب- طية انحاء الصدع والعلاقة بين الأجزاء المسطحة والأجزاء الصدعية المنحدرة في الكتلتين العلوية والسفلية للصدع.



شكل (24-6): محذب مؤلف من أربعة انعطافات. ومن الواضح أن المحذب تكوّن هنا نتيجة الإزاحة على المنحدر الصدعي الذي يوجد تحته (Suppe, 1985).



شكل (24-7): مقطع جيولوجي عبر جزء من جبال الجورا (Buxtorf, 1919).

#### 4.24. عمق الطي

يوجد الانفصال القاعدي Basal detachment عادة في مستوى المتتالية الرسوبية المؤلفة من طبقات ضعيفة، كالغضار أو الجص أو عند سطح التماس ما بين الصخور الرسوبية والركيزة الصلبة الواقعة تحتها. وتعتمد سلوكية الجزء الأسفل من المتتالية المطوية على الخصائص الميكانيكية للصخور المؤلفة لها. وبدلاً من الطيات المجعدة بشكل ضيق في نوى المحدبات، يمكن لصدع تراكمي أن يتشكل، بحيث يكون جذره ممتداً في نطاق الانفصال. ويمكن لمثل هذه

الصدوع أن تصل أو لاتصل إلى سطح الأرض، وإذا تشكلت في مراحل مبكرة من الطي فيمكن لها أن تتشوه هي نفسها بالطي المستمر أو بالتصدع اللاحق. يؤدي الطي إلى جعل كتلة من الصخر أكثر ثخانة وأقصر طولاً. وإذا كان حجم الكتلة محفوظاً، فإن كمية المواد التي تنهض يجب أن تساوي النقص الحاصل جراء التقصير. وبما أن قيمة التثخن والتقصير ممكنة القياس في المقاطع، فإنه بالإمكان تحديد العمق حتى سطح الانفصال.

### كيفية الحساب (شكل 24 - 8):

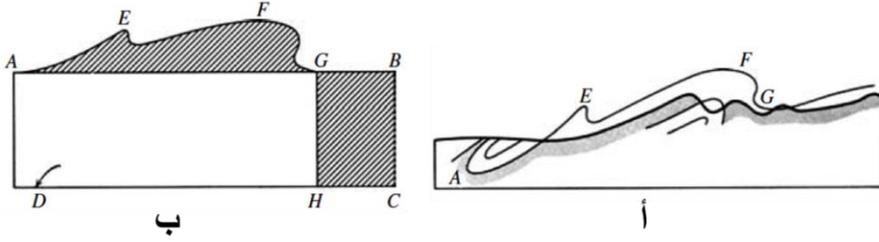
أ- يتم تحديد التقصير الجانبي لطبقة مرجعية، وذلك بين نقاط لم يحدث عندها انزلاق طبقي، حيث تتم المقارنة ما بين طول هذه الطبقة الذي قيس بوساطة مقياس المنحنيات والمسافة الجانبية التي تحتلها هذه الطبقة ضمن الكتلة المطوية. وفي المثال الموضح في الشكل (24 - 8 - أ) يلاحظ أن المسافة التي قيست عند السطح العلوي لمجموعة ميسيسيبيان رندل Mississippian Rundle تتمثل بالطول  $AB = AEFG$ . وتمثل المسافة GB التقصير الفعلي.

ب- تقاس قيمة المساحة الزائدة للكتلة المتثخنة بين نقطتين مرجعيتين لم يحدث عندهما انزلاق طبقي بوساطة مقياس مساحات Planimeter. وكما يلاحظ في الشكل (24 - 8 - ب) فإن هذه المساحة محددة ما بين الخط المستقيم AG وأثر السطح المرجعي المطوي AEFG. ومن الواضح هنا أن هذه المساحة تساوي مساحة المستطيل GBCH.

ت- ويمكن حساب العمق AD للطّي من العلاقة التالية:

$$\text{العمق} = \text{مساحة المنطقة الناهضة} \div \text{التقصير}$$

ث- إذا كان عمق السطح الصدعي التراكمي معروفاً بشكل مستقل، فإنه يمكن حساب قيمة التقصير باستخدام العلاقة السابقة نفسها.



شكل (24-8): حساب عمق الطي (عمق سطح الانفصال) (Dahlstorm, 1969).

#### 5.24. إرشادات من أجل إنشاء مقاطع عرضية متوازنة:

- أ- يتم اختيار خط المقطع بحيث يكون موازياً لاتجاه النقل التكتوني Direction of tectonic transport، أي متعامداً مع أثر الصدع التراكبي في الخارطة ومع الأثر المحوري Axial trace للطيات الإقليمية.
- ب- يتم تحديد ثخانة كل الوحدات الطباقية (الستراتغرافية) وتغيراتها. ويعد هنا أن ثخانة الوحدات الطباقية في المناطق المشوهة من المقطع مساوية لها في المناطق غير المشوهة منه. ونفترض لذلك عدم حدوث خسارة حجمية أثناء عملية التشوه، وعدم حدوث تطاول أو تقلص في الاتجاه المتعامد مع اتجاه النقل التكتوني.
- ت- يتم تقدير عمق صدع التراكب القاعي Floor thrust أو سطح الانفصال Decolment بالاستناد إلى المعلومات الجيوفيزيائية (السايزمية) والمعلومات الجيولوجية الإقليمية ومعلومات الآبار.
- ث- يتم تحديد مواقع التماسات الصدعية Fault contacts وتماسات التشكيلات Formation contacts (حدود التشكيلات) ومعلومات الميل الخاصة بالطبقات والصدوع على امتداد المقطع العرضي.
- ج- يمكن في حالة طيات انحناء الصدع تمييز "مسطح" الصدع التراكبي Flat ومنحدره Ramp وذلك باستخدام هندسية بنية الكتلة العلوية، مايعني أن الطبقات تتحني حيثما يتغير ميل الصدع. وتؤدي هندسية مسطح - منحدر - مسطح flat - ramp - flat

البيسة إلى تكوين أربع طيات (أربعة انعطافات، شكل 24 - 5 و شكل 24 - 6)، حيث أن مواقع مستوياتها المحورية تساعد في تحديد أماكن انحناء الصدع التراكمي. وبالتالي فإن الفواصل ما بين لوحات الميول Dip panels (قطاعات الميل) في صخور الكتلة العلوية تتطابق عموماً مع طول مسطحات ومنحدرات الصدع على الكتلة السفلية. وهكذا يجب تمديد المستويات المحورية للطية نحو الأسفل لتحديد منحدرات ومسطحات الكتلة العلوية أو الكتلة السفلية Footwall or Hanging wall ramps and flats (شكل 24 - 6).

ح- يجب التأكد من أن قيمة الانزلاق في كل أجزاء الصدع التراكمي ثابتة.

#### 6.24. ترجيع المقاطع العرضية Restoration of cross sections (التشوه الراجع (Retro-deformation):

يوجد سببان أساسيان لعملية الترجيع:

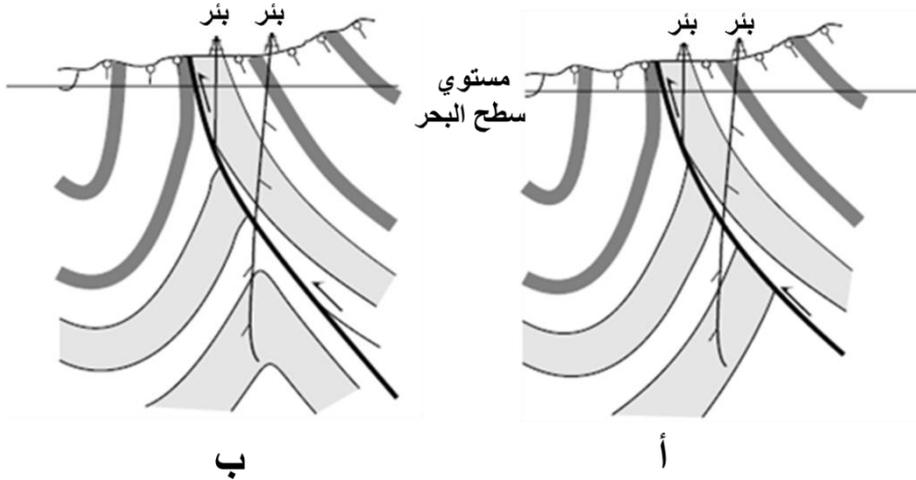
- لاختبار ما إذا كان المقطع متوازناً
  - تحديد الطول الأصلي غير المشوه للمقطع وحساب التقصير الكلي.
- يتضمن التشوه الراجع التخطيطي للمقاطع العرضية عمليتين بشكل أساسي:
- أ- بسط Unfolding الطيات، أي إجراء إعادة تخطيطية للطبقات المطوية إلى وضعيتها غير المطوية الأصلية التي كانت عليها قبل حدوث الطي.
- ب- إلغاء انزلاق unslipping الصدوع، أي إجراء إعادة تخطيطية للكتل الصخرية المزاحة إلى وضعيتها غير المزاحة الأصلية التي كانت عليها قبل حدوث التصدع .

#### 1.6.24. ترجيع طول الخط Line length restoration:

تعد عملية "ترجيع طول الخط" (موازنة طول الخط Line length balancing أو حفظ طول الطبقة Conservation of bed length) الطريقة الأكثر شيوعاً للاستخدام في ترجيع المقاطع العرضية (Mitra, 1992). ويمكن اختبار صحة المقطع العرضي من خلال ترجيع أطوال كل

الخطوط إلى حالتها الأصلية غير المطوية وغير المتصدعة. وإذا كان المقطع متوازناً، فإن المقطع الطبقي الناتج يتميز بأطوال ثابتة لطبقات كافة الوحدات كما يتميز بهندسية معقولة لكل الصدوع (شكل 24-9).

تتضمن الخطوة الأولى تحديد خطوط مرجعية Reference lines (خطوط الوتد Pin lines) تثبت عادة في الصخور غير المشوهة في منطقة مقدمة اليابسة (في المقاطع الإقليمية) أو في المناطق المميزة بعدم حدوث انزلاق بين- طبقي (طبقات أفقية أو المستويات المحورية للطيات الرئيسية أو مقعرات مسطحة أو محدبات ذات قمم مسطحة). يتم بعد ذلك قياس أطوال كل الوحدات في كل شريحة تراكيبية وترجييعها الواحدة تلو الأخرى. وفي حال المقاطع الإقليمية المؤلفة من عدد من الشرائح التراكيبية، يتم ترجيع التراكبات على التتالي بدءاً من مقدمة اليابسة foreland باتجاه مؤخرة اليابسة hinterland. ويبين المقطع المرجع طول الخط التراكمي لكل أجزاء وحدة طبقية ما، أو الطول المرجع للوحدات الطباقية في كل كتلة صدعية. وإذا كانت أطوال الطبقات غير متساوية، فذلك يعني أن المقطع غير صحيح.



شكل (24-9): تفسيرين للجيولوجيا السطحية ومعطيات الآبار لمحدب متصدع في غرب تايوان. إن التفسير (أ) غير قابل للترجيح، بينما نجد أن التفسير (ب) قابل للترجيح (Suppe, 1985).

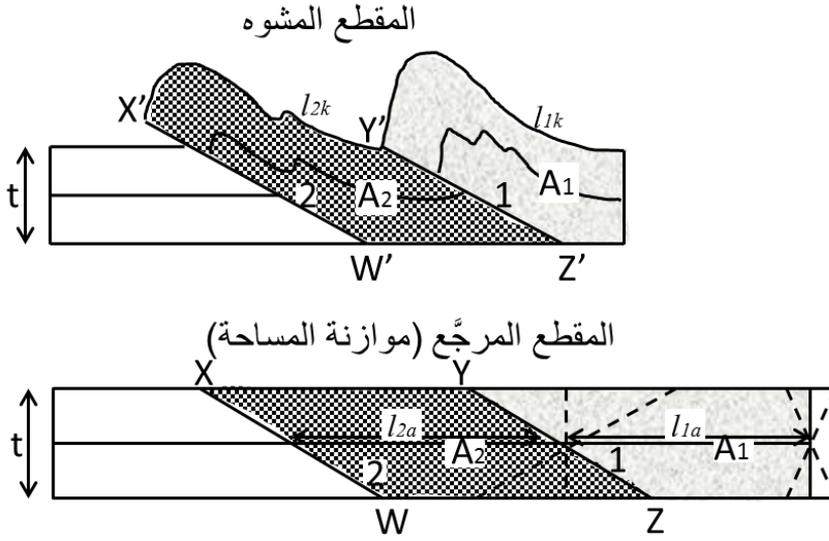
### طريقة عملية للقيام بالتشوه الراجع:

- أ- ارسم السطوح المحورية للطيات على المقطع العرضي.
- ب- استخدم المقص لتجزئة المقطع إلى قطع عبر كل سطح صدعي وكل سطح محوري. ضع القطع على سطح مستوي.
- ت- قم بإعادة المتتالية إلى وضعها غير المشوه، وذلك بإعادة ترتيب القطع بحيث تصبح الطبقات مرتبة بشكل صحيح وتصيح الثخانات متسقة. ويمكن لبعض الشغرات أن تنشأ عند الانعطافات وقد يحدث انزلاق مواز للطبقات أو أي تشوه داخلي آخر.

### 2.6.24. ترجيع المساحة Area restoration:

تعتمد عملية ترجيع المساحة على أن مساحة كل وحدة طبقية لم تتغير خلال حدوث التشوه التكتوني. وهكذا فإن المقاطع التي تتصف بحدوث تغيير مهم في ثخانة إحدى التشكيلات الصخرية أو في ثخانة عدد من هذه التشكيلات تحتاج إلى الموازنة بطريقة ترجيع المساحة (Mitra, 1992). وتتضمن عملية الترجيع بطريقة موازنة المساحة (شكل 24-10) حساب المساحة ( $A_x$ ) للشريحة التراكمية ( $W'X'Y'Z'$ ) وثخانة الوحدة ( $t$ ). ويحسب طول الطبقة المتوسط المرجح ( $l$ ) كمايلي:

$$l = A_x / t$$



شكل (24 - 10): ترجيع المساحة للمقاطع العرضية (Mitra, 1992).

### 3.6.24. الترجيع المشترك لطول الخط والمساحة:

يمكن تطبيق طريقتي ترجيع طول الخط والمساحة بأن معاً، بخاصة في حالة طيات الانفصال اللامتوافقة. وتتطلب موازنة البنية في هذه الحالة ترجيع طول الخط بالنسبة للوحدات الخارجية وترجيع المساحة بالنسبة للوحدات الموجودة في نواة الطية (شكل 24 - 11).

#### تقدير قيمة التقصير:

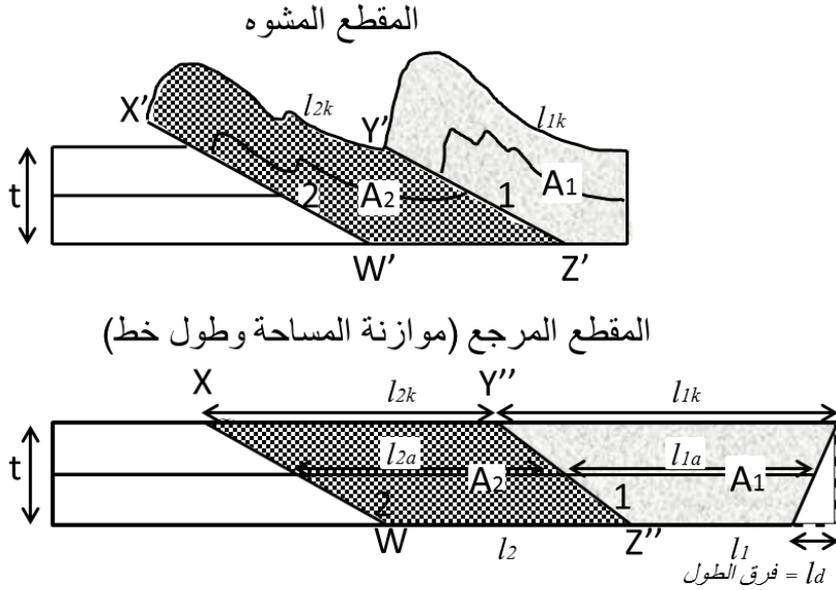
يمكن حساب قيمة التقصير بالاعتماد على المقطع العرضي المتوازن:

$$S = l_f / l_0$$

حيث أن  $l_0$ : الطول الأصلي وأن  $l_f$ : الطول النهائي.

و تحسب قيمة التقصير المئوية كما يلي:

$$(S - 1) \times 100$$



شكل (24 - 11): الترجيع باستخدام موازنة المساحة وطول الخط (Mitra, 1992).

## 7.24. التمارين

### 1.7.24. التمرين الأول

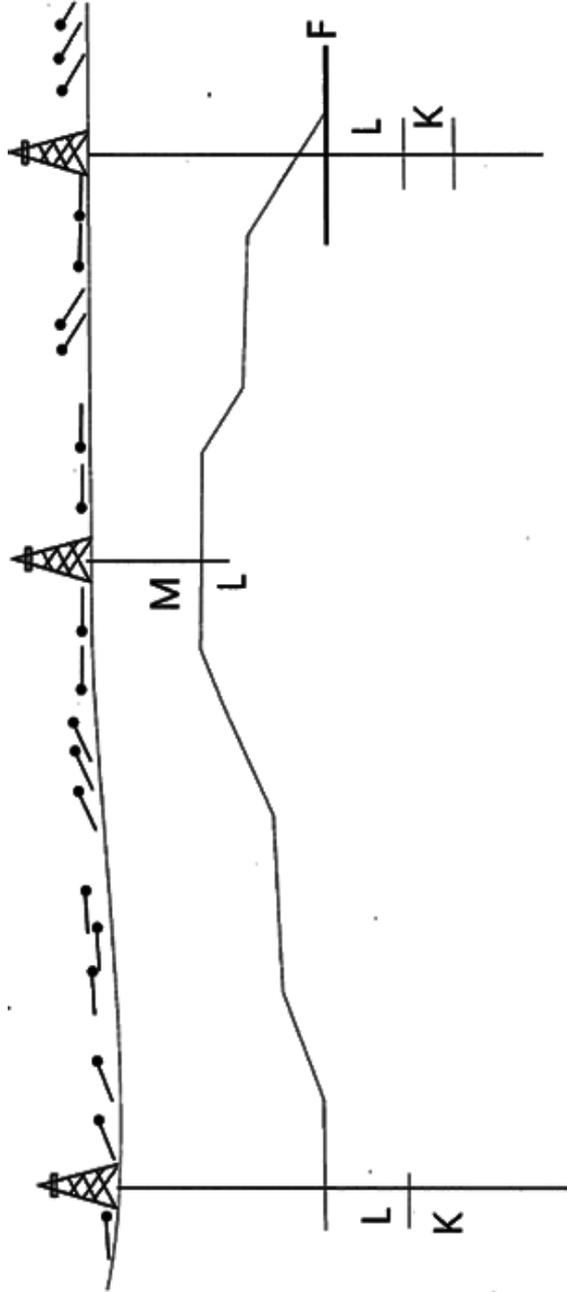
تم رسم المقطع التالي (شكل 24 - 12)، غير المكتمل، بناءً على معطيات سطحية وتحت سطحية. يتبين في هذا المقطع وجود ثلاث تشكيلات رسوبية: K و L و M بالإضافة إلى سطح صدعي F. والمطلوب إنشاء مقطع عرضي متوازن باستخدام المعطيات المتاحة، وبيان اتجاه النقل التكتوني.

### 2.7.24. التمرين الثاني

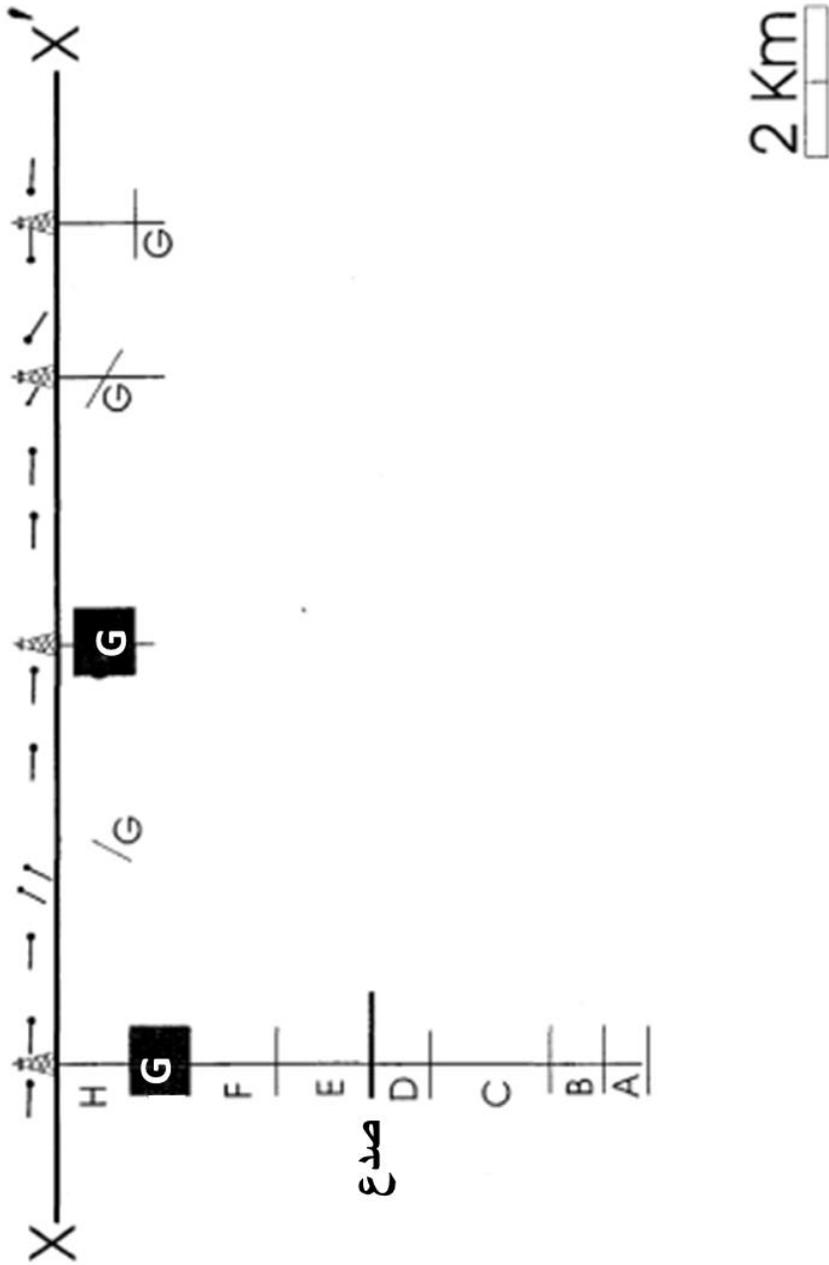
يبين المخطط التالي (شكل 24 - 13) الوضعية الطباقية (الستراتغرافية) الإقليمية والميول لتشكيلات على طول مقطع عرضي X X' في منطقة الدراسة. وقد جمعت هذه المعلومات من خلال تحريات جيولوجية سطحية وتحت سطحية. والمطلوب إنشاء مقطع عرضي متوازن على اعتبار أن البنية المدروسة هنا تمثل طية انحناء الصدع. بيّن اتجاه النقل التكتوني.

### 3.7.24. التمرين الثالث

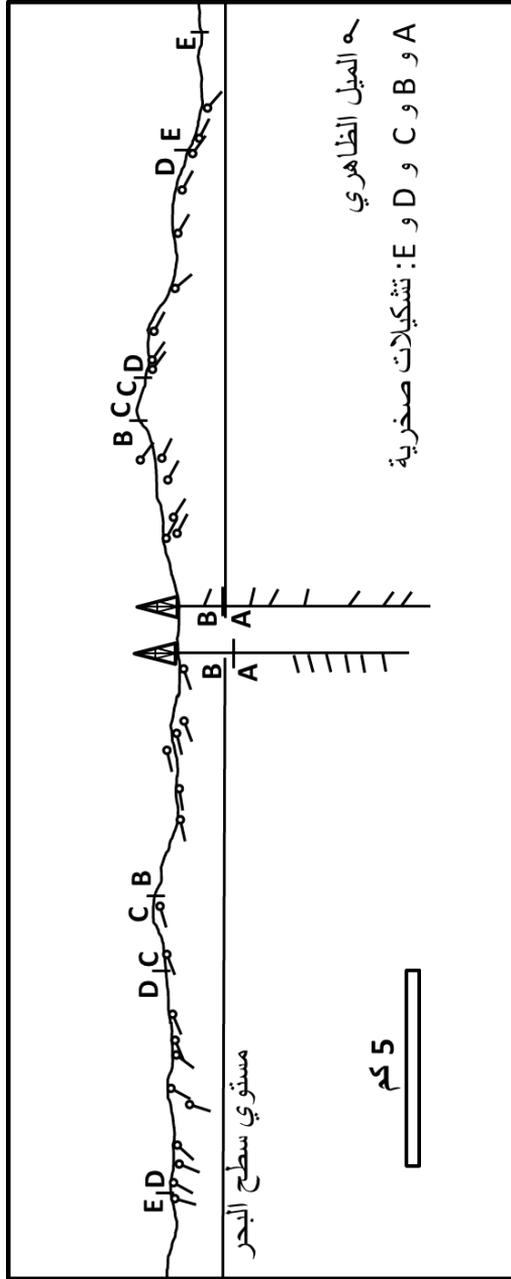
أكمل المقطع التالي (شكل 24 - 14) الذي يمثل محذب Shantzechiao في تايوان.



شكل (24-12): المقطع غير المكتمل للاستخدام في التمرين الأول.



شكل (24-13): المقطع المستخدم في التمرين الثاني.



شكل (24-14): معطيات مقطع محذب Shantzechiao في تايوان للاستخدام في التمرين الثالث (Suppe, 1985).

#### 4.7.24. التمرين الرابع

عد إلى التمرين 1 و 2 ورَجِّع المقطعين إلى حالتها غير المشوهة (غير المطوية وغير المتصدعة). اختبر فيما إذا كان هذين المقطعين متوازنين واحسب قيمة التقصير.

#### 5.7.24. التمرين الخامس

يبين المقطع التالي (شكل 24-15) منطقة مشوهة بالطي والتراكب. أنشئ مقطعاً جديداً يوضح الوضعية الطبقيّة غير المشوهة واحسب قيمة التقصير.

#### 6.7.24. التمرين السادس

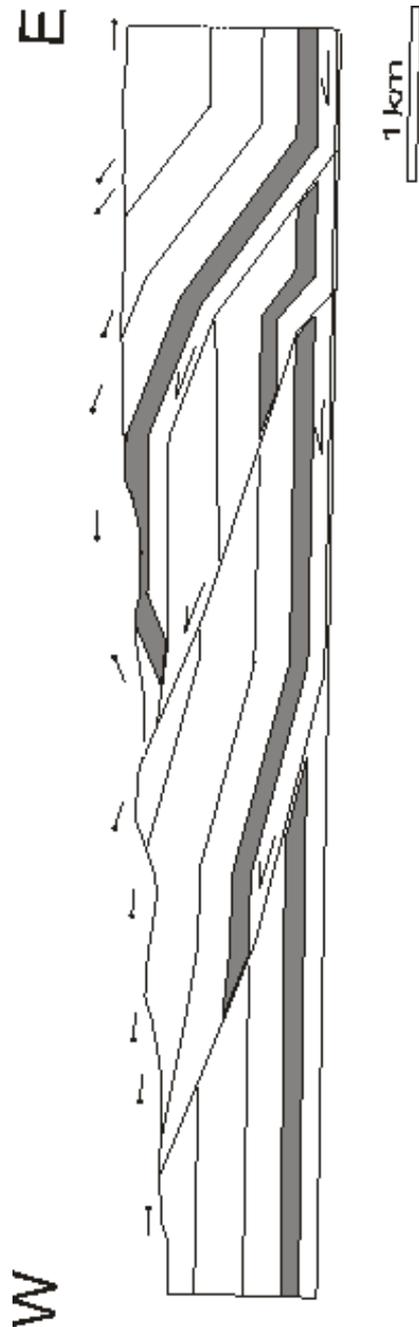
يبين المخطط التالي (شكل 24-16) تكشفاً باتجاه NE-SW لحجر كلس Viséan (في شمال فرنسا). ويتوضح في هذا المخطط أن الطبقات منزلقة على طول صدوع تراكبية (خطوط منقطعة ومنقطة). وقد تم تثبيت خط الوتد في الجزء الشمالي الشرقي من المقطع (لماذا؟).  
المطلوب:

أ- أنشئ المقطع المُرجَّع

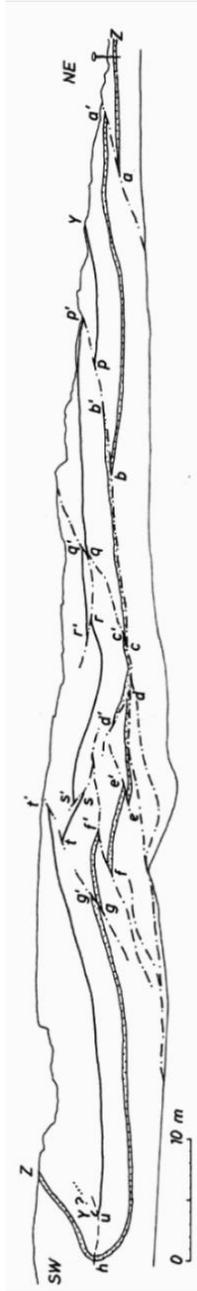
ب- قس أطوال الطبقات في كل وحدة متصدعة، معتبراً أن آفاق المعلم هي Y و Z، أي قس الأطوال من خط الوتد إلى a ثم a' إلى b، b' إلى c وهكذا....

ت- قم بإعادة تجميع للوحدات المتصدعة بشكل مقطع غير مشوه.

ث- احسب قيمة التقصير الحاصل في هذا المقطع ونسبته المئوية.



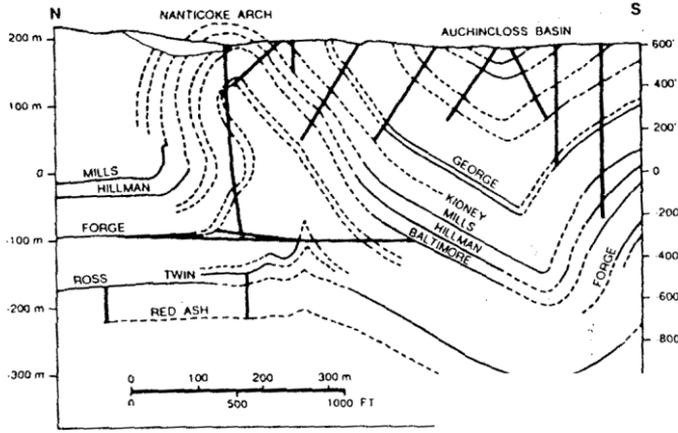
شكل (24 - 15): المقطع المستخدم في التمرين الخامس.



شكل (24-16): مقطع لتكشيف حجر كلس Visean (في شمال فرنسا)، للاستخدام في التمرين السادس (Ramsay and Huber, 1987).

#### 7.7.24. التمرين السابع

يمثل المقطع التالي (شكل 24-17) طية انفصال لامتوافقة من حوض أنثراسايت Anthracite Basin في بنسلفانيا، وقد تم رسمه بالاعتماد على معطيات سطحية ومعطيات آبار وأنفاق. حدد الأفاق الطبقيّة المتميزة بهندسية الطية المتوازية وتلك المتميزة بهندسية لامتوافقة، وحدد أيضاً الأفق الذي يحدث عنده الانفصال الرئيس. قم بإنشاء المقطع ذي الوضعية الطبقيّة غير المشوهة. ماهي الطرائق التي اتبعتها لترجيح المقطع إلى الحالة غير المشوهة. احسب قيمة التقصير.



شكل (24-17): طية انفصال لامتوافقة من حوض أنثراسايت في بنسلفانيا (Darton, 1940)، للاستخدام في التمرين السابع.

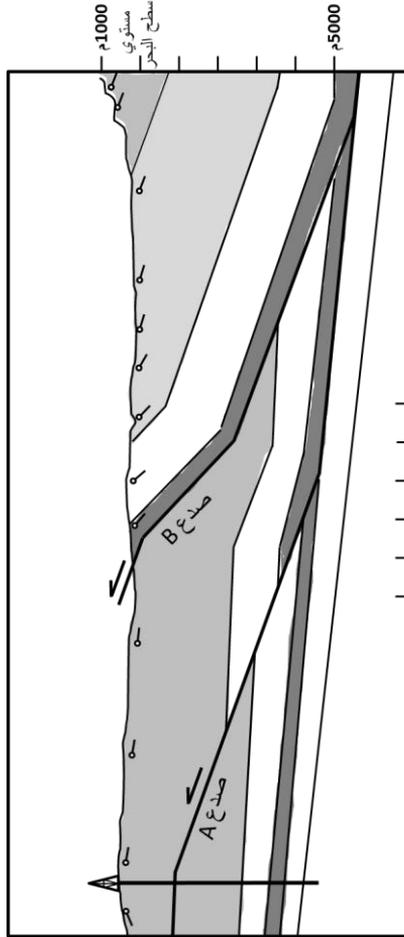
#### 8.7.24. التمرين الثامن

يبين الشكل التالي (شكل 24-18) مقطوعاً عرضياً متوازناً لجزء من حزام طي وتراكب تاياون. تحقق من أن هذا التفسير للجيولوجيا السطحية ومعطيات الآبار قابلة للتشوه الرجوع. أجب بعد ذلك عن الأسئلة الآتية:

- أ- ماهي قيمة الانزلاق على طول الصدع A؟ للحصول على مسافة الانزلاق على طول سطح الصدع، تذكر أنه لا يوجد مبالغة شاقولية في هذا المقطع.
- ب- ماهي قيمة الانزلاق الأصغري التي حدثت على طول الصدع B.

ت- لم كان جواب السؤال السابق بكلمة "قيمة انزلاق أصغرية"؟ (أي ماذا حدث للجزء من الطبقة الموجودة مباشرة فوق الصدع في المكان الذي كتبت فيه كلمة "صدع B").

ث- احسب القيمة الأصغرية للتقصير القشري Crustal shortening عبر هذا المقطع الذي حدث نتيجة التصدع والطي.



شكل (24- 18): مقطع عرضي متوازن لجزء من حزام طي وتراكب تايوان، للاستخدام في التمرين الثامن (Suppe, 1985).



## الباب التاسع - الفصل الخامس والعشرون

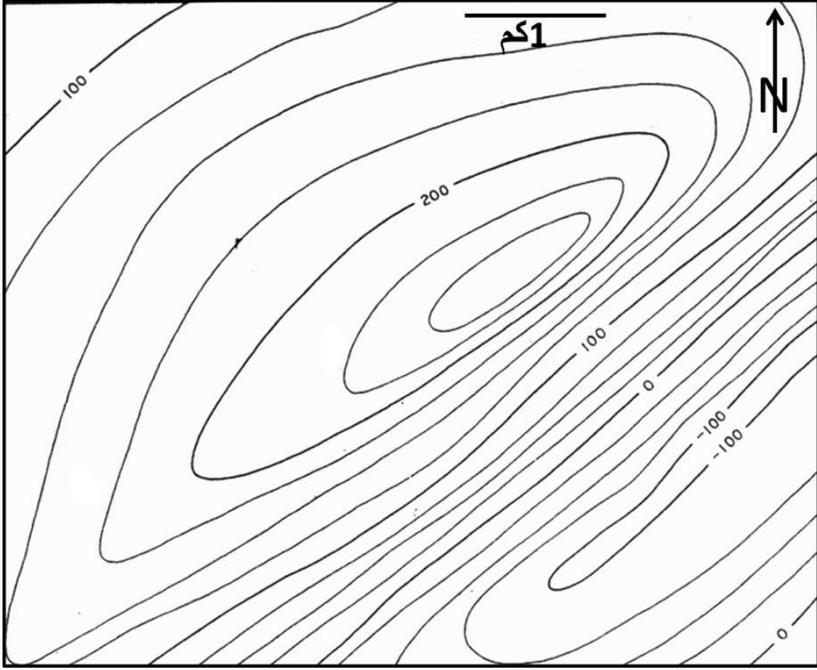
### الخرائط البنيوية Structural maps

#### 1.25. خطوط التسوية البنيوية

خطوط التسوية البنيوية Structure Contours هي خطوط وهمية تصل بين النقاط متساوية الارتفاع (أو العمق) عن مستوي مرجعي معين (سطح البحر على الأغلب)، وتقع على سطح محدد غير مستو، وتمس كل نقطة من نقاط هذا السطح، ما يعطيها الشكل غير المستقيم. وترسم هذه الخطوط غالباً من أجل السطوح العلوية للطبقات أو التشكيلات الرسوبية، وقد ترسم أيضاً من أجل سطوح أخرى كالصدوع و سطوح اللاتوافق والركيزة البلورية. تتشابه خطوط التسوية البنيوية إلى حد ما مع خطوط التسوية التضاريسية، وتنبع القواعد نفسها تقريباً في إنشاء تلك الخطوط، ومع ذلك فإن خرائط خطوط التسوية البنيوية (الخرائط البنيوية) تتمتع بصفات خاصة. فهي تُظهر الشكل الذي يأخذه سطح طبقة أو تشكيلة مثلاً، وهذه قد تكون مصابة بصدع. بينما تُظهر خرائط خطوط التسوية التضاريسية (الخرائط التضاريسية) شكل تضاريس سطح الأرض. تساعد خطوط التسوية البنيوية على تحديد ميل السطح الممثل بدقة. وكما هو الحال في الخرائط التضاريسية، كلما تقاربت الخطوط (التي تكون الفواصل الشاقولية بينها ثابتة) كان ميل السطح شديداً. هذا وإن لخرائط خطوط التسوية البنيوية أهمية خاصة في المناطق التي تكون ميول السطح فيها خفيفة أو لإظهار البنات المنتشرة على مساحات واسعة.

مثال:

تمثل الخريطة البنيوية المبينة في الشكل (25-1) محدباً غير متناظر متغرقاً باتجاهين، يحده من الجهة الجنوبية الشرقية مقعر متغرق نحو الشمال الشرقي. ويلاحظ أن الجناح الجنوبي الشرقي للمحدب (حيث تتقارب منحنيات التسوية) أشد ميلاً من الجناح الشمالي الغربي، كما أن تغريق المحدب باتجاه الشمال الشرقي أكبر من تغريقه باتجاه الجنوب الغربي. ويمكن تحديد زاوية الميل في أي مكان من الخريطة وذلك من خلال معرفة المقياس.



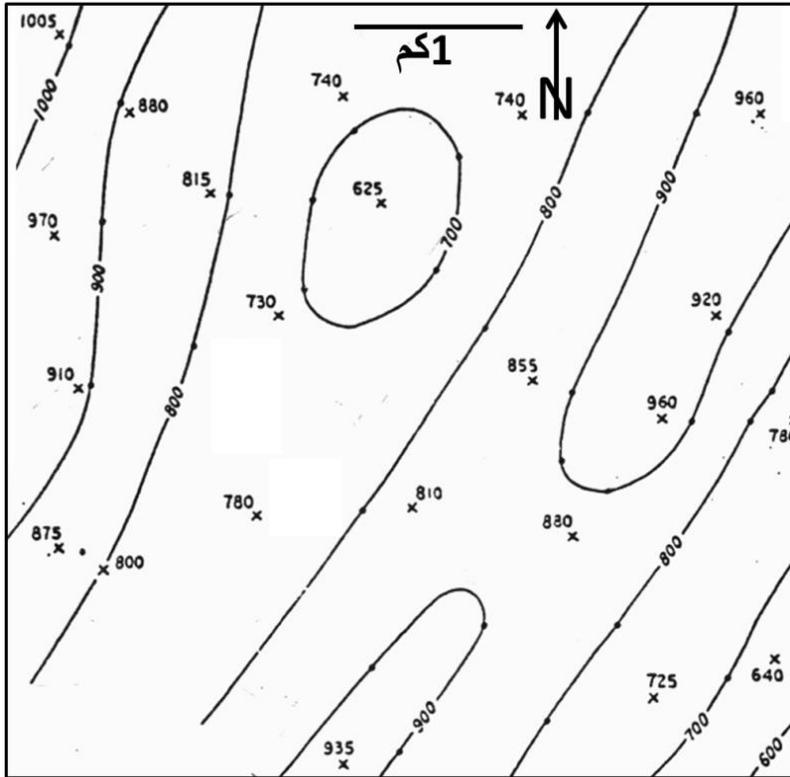
شكل (25-1): خريطة بنيوية تمثل محدباً ومقعراً (انظر النص).

### 1.1.25. طريقة إنشاء خرائط خطوط التسوية البنيوية

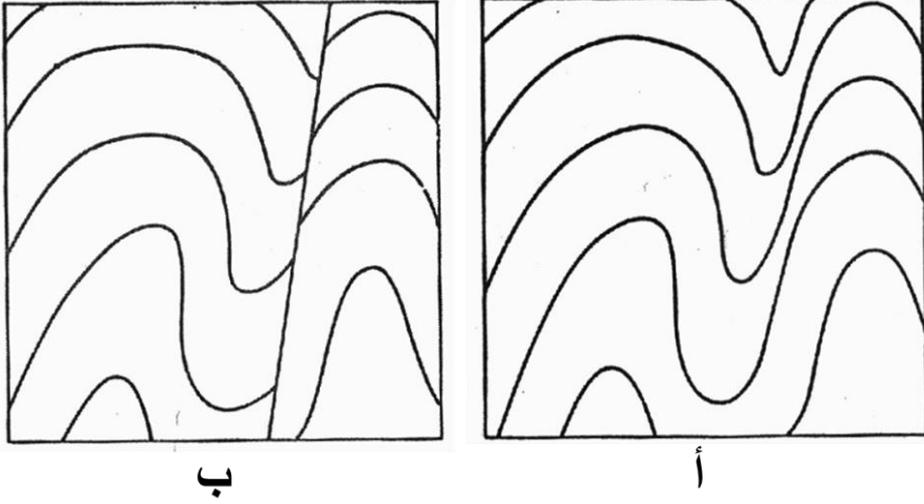
يمكن شرح هذه الطريقة من خلال الخريطة المبينة في الشكل (25-2)، حيث حددت مواقع عدد من النقاط معروفة الارتفاع وتقع على السطح العلوي لطبقة كلسية، والمطلوب رسم خطوط التسوية البنيوية لهذا السطح بفواصل شاقولية مقدارها 100 م.

يلاحظ على هذه الخريطة أن هناك نقطة واقعة عند الزاوية الجنوبية الغربية يبلغ ارتفاعها 800 م. إن الخط ذو الارتفاع 800 م سيمر من هذه النقطة. وكذلك يجب استنتاج مواقع مرور الخطوط بين كل زوج من النقاط المعطاة في هذه الخريطة، حيث نلاحظ مثلاً عند الزاوية الشمالية الشرقية نقطتين واقعتين على سطح الطبقة يبلغ ارتفاعهما 740 م و 960 م، ولهذا فإن خط 800 م وخط 900 م سيمران بين هاتين النقطتين، بحيث أن بُعد خط 800 م عن النقطة 740 سيأخذ نسبة  $6/22$  من المسافة الكلية المحصورة بين هاتين النقطتين. أما خط 900 م فيمر على بعد يعادل  $16/22$  من المسافة الكلية المحصورة بينهما. ويمكن بالطريقة نفسها إيجاد

مواقع خطوط التسوية في المناطق الأخرى من الخريطة. كما يجب تعديل مسارات الخطوط المرسومة بهذه الطريقة بحيث تتحول المنعطفات الحادة إلى منعطفات لطيفة أقل حدة. تعطي خرائط خطوط التسوية البنيوية الموضوعية بهذا الشكل تقديراً أولياً للصورة البنيوية الحقيقية. ويمكن إدخال تحسينات عليها من خلال معطيات إضافية ومن خلال خبرة الجيولوجي الذي قام بتنفيذها. ومن الطبيعي أن تزداد الخريطة دقة كلما كانت كثافة النقاط المعطاة أكبر، وكلما كانت المعطيات الإضافية أكثر. كما أن خطوط التسوية البنيوية للسطح المدروس نفسه قد تأخذ شكلين مختلفين. يوضح الشكل (25-3 أ) أن أحد جناحي الطية ذو ميل شديد شاذ نتيجة الرسم المباشر للخطوط. ولكن إذا أخذنا بالحسبان أن رسم الخطوط يجب أن يتم بمسافات أفقية متعادلة تقريباً وأن تغير الاتجاه تدريجي وليس فجائياً، فستظهر لدينا بنية متصدعة (شكل 25-3 ب).



شكل (25-2): طريقة إنشاء خطوط التسوية البنيوية.



شكل (25-3): تدقيق الخريطة (انظر النص).

### 2.1.25. خطوط التسوية البنيوية والصدوع

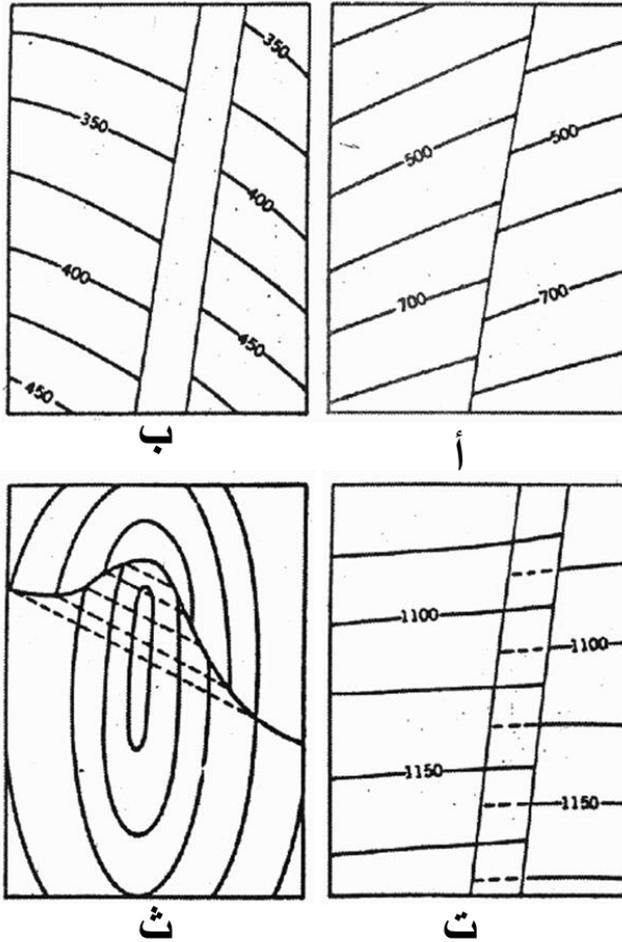
يؤدي وجود الصدوع إلى فصل السطح البنيوي المدروس إلى جزأين أو أكثر على خلاف السطح التضاريسي. وهذا ما يسبب انقطاعات في خطوط التسوية البنيوية، حيث نميز فيها ثلاث حالات رئيسة هي (شكل 25-4):

أ. حالة الصدوع الشاقولية: تسبب هذه الحالة انزياحاً لخطوط التسوية البنيوية (شكل 25-4-أ).

ب. حالة الصدوع العادية: تسبب وجود ثغرة على امتداد الخطوط (شكل 25-4-ب).

ت. حالة الصدوع المقلوبة أو التراكمية: تسبب تراكباً للخطوط، حيث يرمز عادة للخطوط المغطاة بخطوط متقطعة (شكل 25-4-ت).

ويمكن أيضاً تمثيل سطوح الصدوع بخطوط تسوية خاصة تساعد في التحديد الهندسي للصدوع (شكل 25-4-ث).



شكل (25- 4): خطوط تسوية بنيوية عائدة لسطوح متصدعة. أ: صدع شاقولي، ب: صدع عادي، ت: صدع مقلوب، ث: طية متصدعة (Krausse et al., 1978).

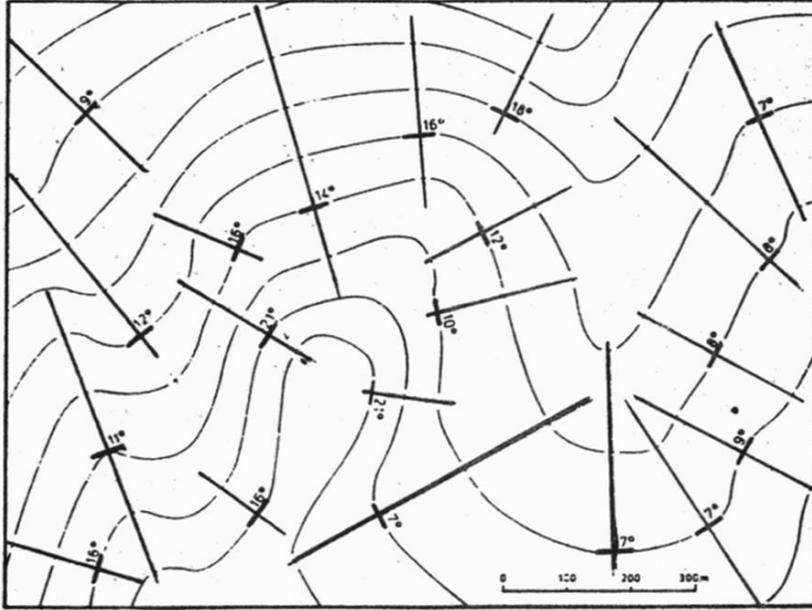
## 2.25. خرائط خطوط التسوية الشكلية Form line Contours

يُنشأ هذا النوع من الخرائط في المناطق التي يتعذر فيها تمييز سطح مَعْلَم لنقص في التكتشفات، أو لأن الطبقات كتلية ثخينة يصعب تحديد سطحها العلوي والسفلي. وإن الشرط الأساسي لإنشاء مثل هذه الخرائط هو وجود عدد كافٍ من قياسات الاتجاه والميل، وأن لا تكون الطبقات

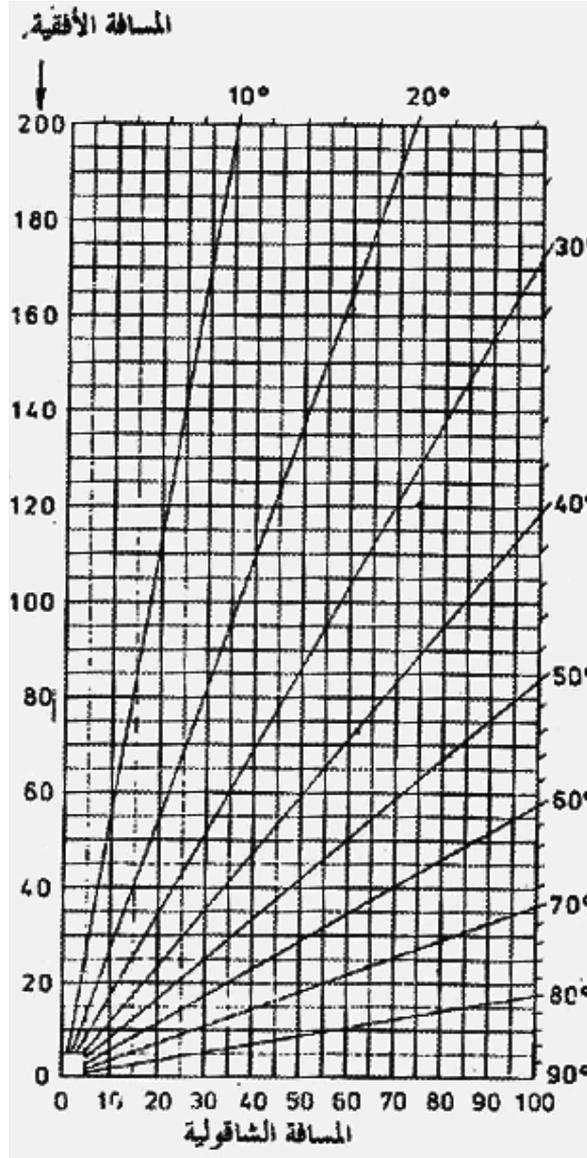
شديدة التشوه إلى حد بعيد. تمكّن هذه الطريقة من وضع خرائط تقريبية لشكل البنية السائدة في المنطقة. ولإنشاء مثل هذه الخرائط، توقع المعلومات المتعلقة بالاتجاه والميل على مخطط المنطقة المدروسة. ويمدد الخط المعبر عن اتجاه الميل نحو الجانبين (25-5). ثم يقسم هذا الخط إلى أجزاء بقدر المسافات الأفقية الفاصلة بين خطوط التسوية الشكلية (وذلك بعد اختيار المسافات الشاقولية بينها بما يتناسب ووضع البنية المدروسة). وتحدد قيمة المسافات الأفقية على كل خط من خلال العلاقة:

$$\text{المسافة الأفقية} = \text{المسافة الشاقولية} \times \text{تظل زاوية الميل}$$

أو من خلال المخطط البياني الموضح في الشكل (25-6). ويتم بعد ذلك رسم هذه الخطوط بحيث يراعى أن يكون مسارها متعامداً مع اتجاه الميل. ويجب التنويه مرة أخرى إلى أن الخريطة التي نحصل عليها بهذه الطريقة تقريبية للبنية المدروسة. كما وأنه ويسبب غياب سطح معلّم فإنه من غير الممكن إعطاء قيم ارتفاعات الخطوط المرسومة.



شكل (25-5): إنشاء خريطة خطوط التسوية الشكلية (Krausse et al., 1978).



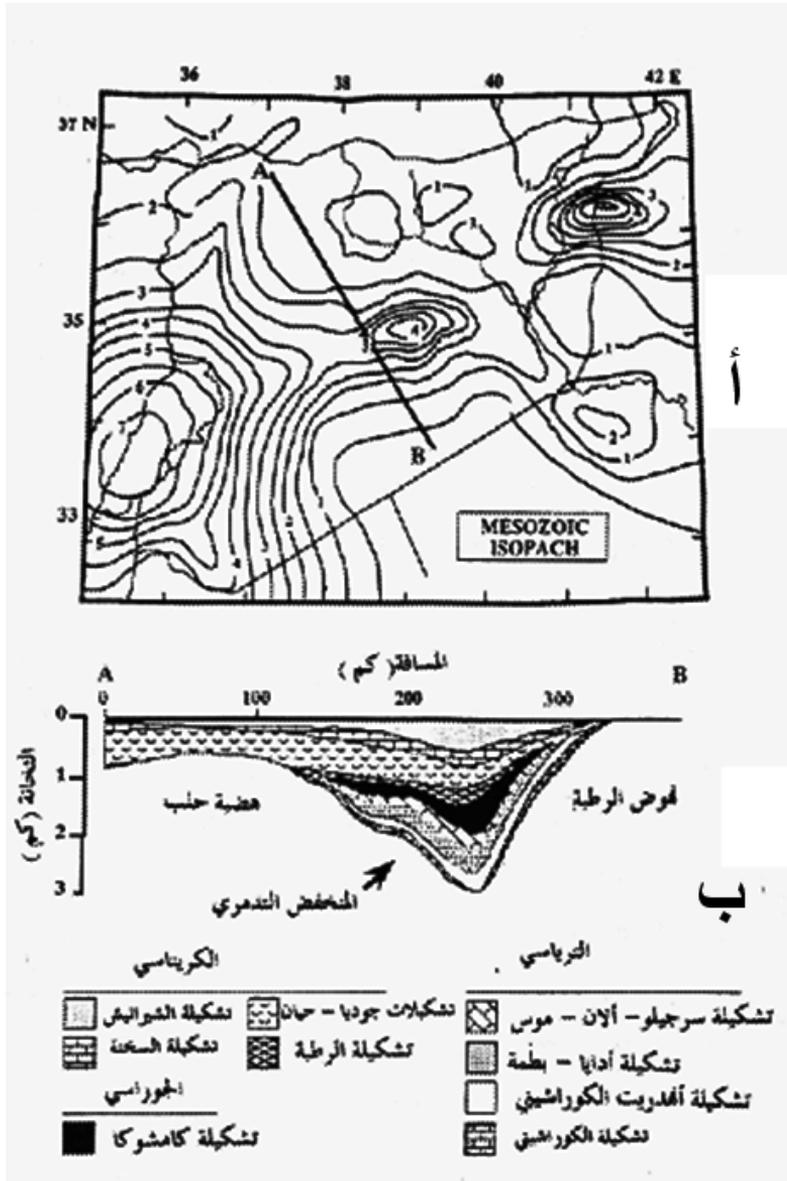
شكل (25-6): مخطط بياني لتحديد المسافة الأفقية الكائنة بين خطوط التسوية عند إنشاء خرائط خطوط التسوية البنوية أو الخرائط الجيولوجية أو التضاريسية. مثال: إذا كانت المسافة الشاقولية 50 م وزاوية الميل 40° تكون المسافة الأفقية 60 م (Krausse et al., 1978).

### 3.25. خرائط تساوي الثخانة

تعتمد خرائط تساوي الثخانة Isopach maps على قيم الثخانة الحقيقية للطبقة أو للتشكيلة الصخرية المدروسة. وتعتبر المنحنيات في هذه الخرائط عن تساوي الثخانة في النقاط التي تمر بها، حيث يتم جمع المعلومات عن ثخانات التشكيلات الصخرية من خلال أعمال المسح الجيولوجي والأعمال المنجمية وحفر الآبار الاستكشافية والدراسات الجيوفيزيائية المختلفة. ولهذه الخرائط أهمية خاصة في دراسة الثخانة الإقليمية وتغيراتها للوحدات الرسوبية، ما يساعد في فهم النواحي الباليوجغرافية خلال زمن الترسيب.

يوجد نوع آخر من هذه الخرائط يعتمد على قيم الثخانة الشاقولية بدلاً من الحقيقية، وتسمى خرائط تساوي الثخانة الشاقولية Isochore maps. وتتضمن هذه الخرائط خطوطاً تمر من النقاط التي تتساوى فيها المسافة الشاقولية بين السطح العلوي والسفلي للطبقة أو للتشكيلة الصخرية (الثخانة الشاقولية). وتتبع أهمية هذه الخرائط من أنها تبين الوضع الحالي للطبقات أكثر من تعبيرها عن الثخانة الحقيقية الناتجة بشكل أساسي من شروط الطبقة الأولية. وإذا وجدت خريطة خطوط تسوية بنيوية للسطح العلوي لطبقة ما وخريطة الثخانة الشاقولية لها، فإنه يمكن من خلالهما وضع خريطة ثالثة تعبر عن السطح السفلي لهذه الطبقة (أو السطح العلوي للطبقة التي توجد تحتها)، وذلك من خلال إجراء عملية طرح بسيطة. وفي حال كون الطبقات ضعيفة الميل، فإن خرائط تساوي الثخانة تتشابه إلى حد كبير مع خرائط تساوي الثخانة الشاقولية، أو أنها متكافئة من الناحية العملية. وتشابه طريقة رسم هذه الخرائط بشكل عام طريقة رسم خرائط خطوط التسوية الأخرى (البنيوية والتضاريسية وغيرها...).

**مثال:** يبين الشكل (25-7-أ) خريطة تساوي تشكيلات الحقب الثاني (الميزوزوي) في سورية. لاحظ المنخفض الضيق المتميز بازدياد ثخانة هذه التشكيلات في وسط سورية (الحوض التدمري). وكذلك الحوض الترسبي الميزوزوي الرئيس في مناطق غرب سورية ولبنان وشرق المتوسط. أما الشكل (25-7-ب) فيبين المقطع AB الظاهر على الخريطة، ويوضح الثخانات والصفات الليثولوجية لتشكيلات الحقب الثاني.



شكل (25-7): أ: خريطة تساوي ثخانة تشكيلات الحقب الثاني في سورية. الفواصل بين خطوط التسوية تعادل 500 م. ب: المقطع AB المبين في الخريطة، ويوضح الشخانات والصفات الليثولوجية لتشكيلات الحقب الثاني (بحسب Best et al. 1993).

## 4.25. التمارين

### 1.4.25. التمرين الأول

يبين الشكل (25- 8) ست خرائط بنيوية. لو افترضنا أن هذه الخرائط تُعبر عن سطح المَعْلَم نفسه ، وأن سطح الأرض مستو يبلغ ارتفاعه 1500 م فوق سطح البحر. المطلوب:

أ- تفسير البنيات التي تعبر عنها كل خريطة مستعيناً برسم المقاطع البنيوية الموضحة في كل خريطة (المقياس الشاقولي 1:10000).

ب- ماهو ميل سطح المعلم في الخريطة (أ)، وذلك بين النقطتين 1 و 2؟ وكذلك بين 2 و 3؟

ت- ماهو ميل سطح المعلم في الخريطة (ب)، وذلك بين النقطتين 4 و 5؟

ث- ماهو عمق سطح المعلم في الخريطة (ت)، وذلك عند النقطة 6 اعتباراً من سطح الأرض؟

ج- ماهو عمق سطح المعلم في الخريطة (ث)، وذلك في النقطة 7 اعتباراً من سطح الأرض؟

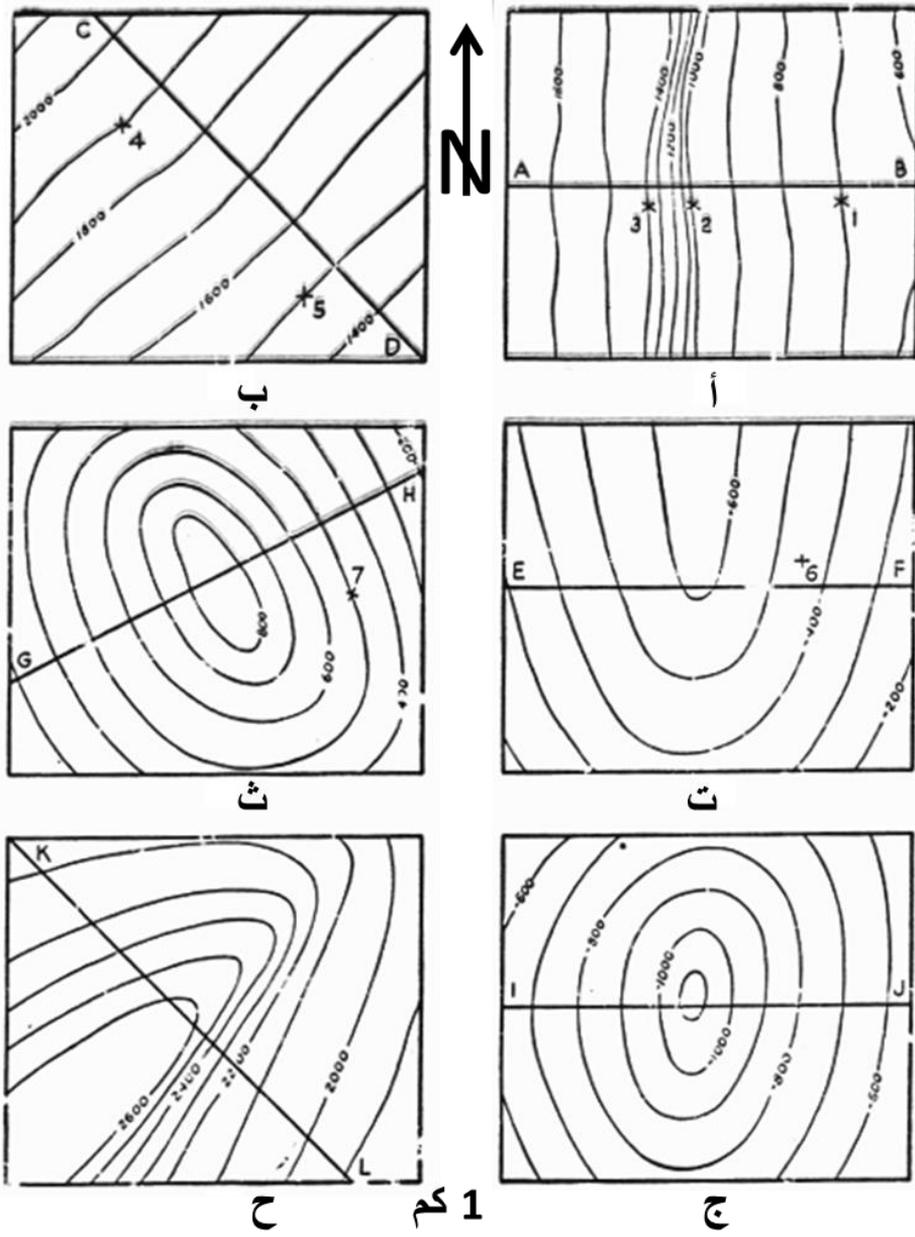
### 2.4.25. التمرين الثاني

يبين الشكل (25- 9) عدداً من الخرائط البنيوية. وكما هو الحال في التمرين السابق، لو افترضنا أن كل هذه الخرائط تعبر عن سطح المعلم نفسه، وأن سطح الأرض مستو يبلغ ارتفاعه 1500 م عن سطح البحر (لاحظ أن بعض أرقام منحنيات التسوية سالبة في بعض الحالات).  
المطلوب:

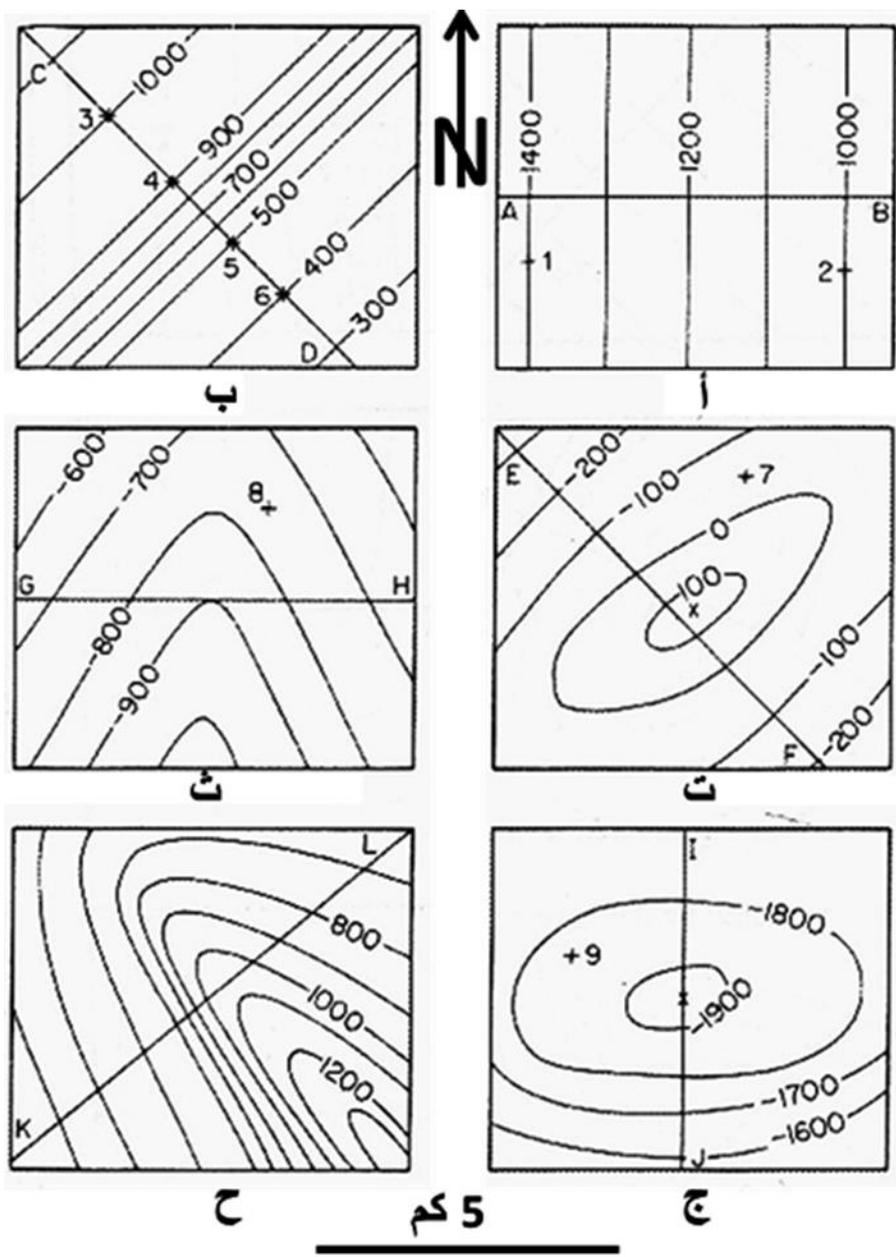
أ- فسر البنية الظاهرة في كل خريطة، وارسم المقاطع الموضحة فيها (من الضروري إجراء مبالغة شاقولية بقيمة 10).

ب- ما هو ميل سطح المعلم بين النقطتين 1 و 2 وبين 3 و 4 وبين 4 و 5 وبين 5 و 6؟

ت- ماهو عمق سطح المعلم عند النقاط 7 و 8 و 9، وذلك اعتباراً من سطح الأرض؟



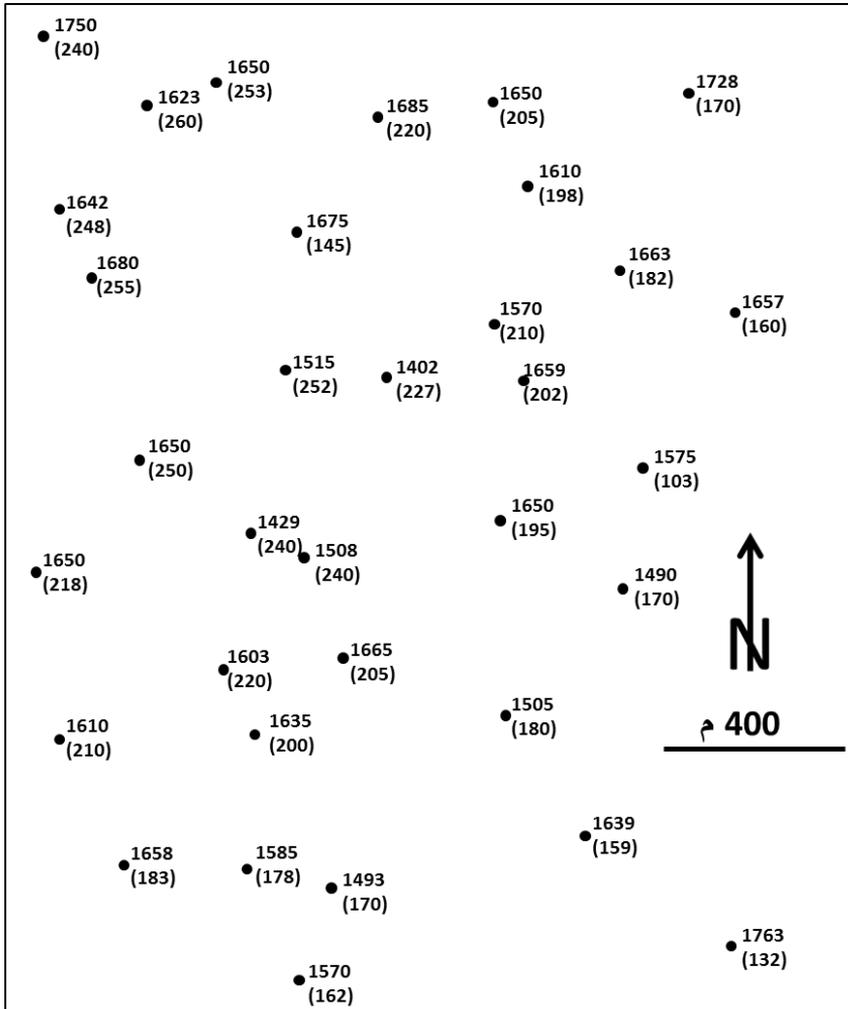
شكل (25 - 8): الخرائط المستخدمة لحل التمرين الأول (Billings, 1972).



شكل (25 - 9): الخرائط المستخدمة لحل التمرين الثاني (Billings, 1972).

### 3.4.25. التمرين الثالث

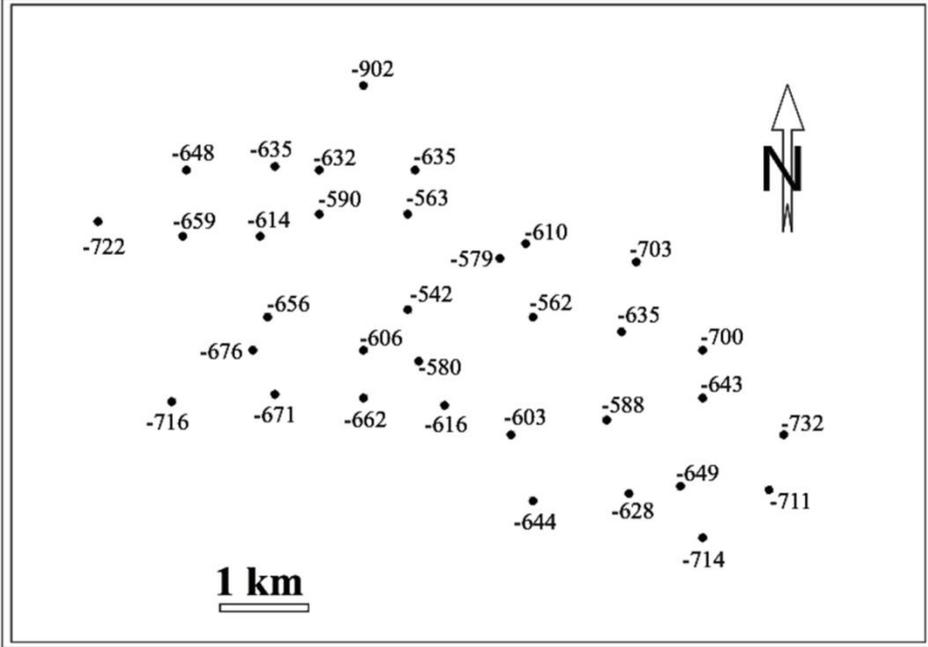
يبين الشكل (25 - 10) نقاط معطيات تحت سطحية تتضمن ارتفاع سطح تشكيلية صخرية في كل نقطة والثخانة الشاقولية لهذه التشكيلية (الرقم الموجود بين قوسين)، والمطلوب: رسم خريطة خطوط تسوية بنيوية للسطح العلوي للتشكيلية، ثم رسم خريطة تساوي الثخانة الشاقولية. وبعد ذلك رسم خريطة خطوط تسوية بنيوية للسطح السفلي للتشكيلية.



شكل (25 - 10): الخريطة المستخدمة في التمرين الثالث.

#### 4.4.25. التمرين الرابع

يوضح الشكل (25- 11) خريطة معطيات تحت سطحية، حيث يتبين ارتفاع السطح العلوي لتشكلية محددة في كل نقطة. ارسم خريطة منحنيات تسوية بنيوية لسطح هذه التشكيلة (فاصل المنحنيات 50 م)، ثم ارسم مقطعين بنيويين عبر هذه التشكيلة.

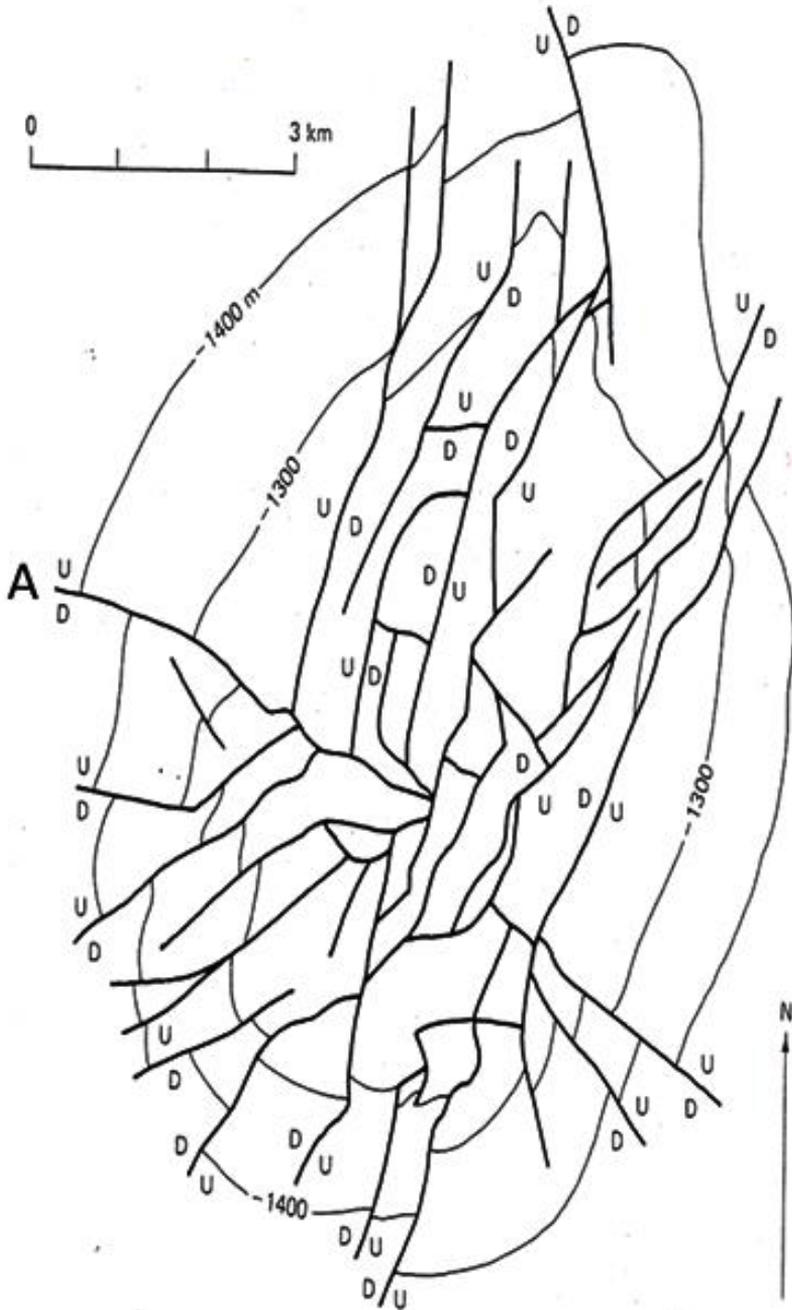


شكل (25- 11): خريطة المعطيات تحت السطحية للاستخدام في التمرين الرابع.

#### 5.4.25. التمرين الخامس

ادرس الخريطة البنيوية الموضحة في الشكل (25- 12) التي تمثل السطح العلوي لإحدى التشكيلات الصخرية (تم اختيار بعض منحنيات التسوية فقط بهدف التبسيط). والمطلوب:

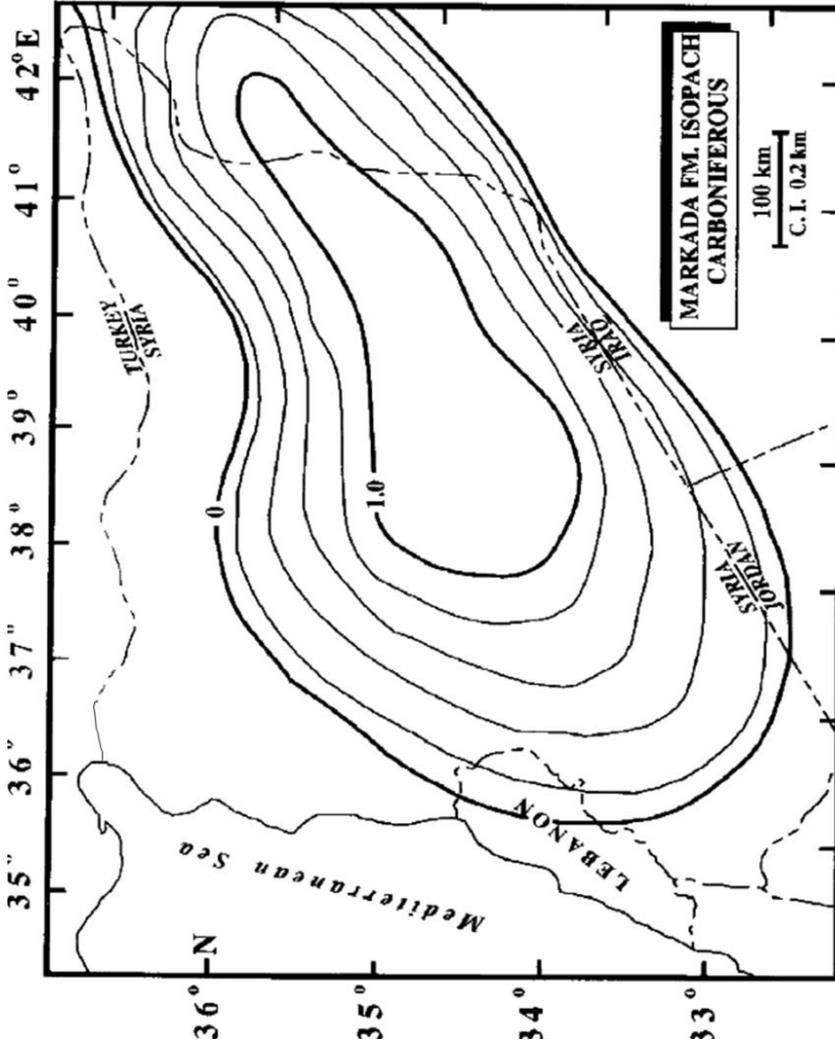
- أ- صف البنية التي تمثلها هذه الخريطة.
- ب- احسب مقدار الإزاحة الشاقولية للصدع A.
- ت- لو أن الصدع A يميل نحو الشمال، ماهو نوعه؟



شكل (25-12): الخريطة البنيوية المستخدمة في التمرين الخامس.

#### 6.4.25. التمرين السادس

تبين الخريطة الموضحة في الشكل (25-13) تغيرات ثخانة تشكيلة مرقدة (الكربوني) في سورية. فسر هذه الخريطة وارسم مقطعين بنويين مناسبين لتوضيح هذه التغيرات.



شكل (25-13): تغيرات ثخانة تشكيلة مرقدة (كربوني) في سورية (Best et al. 1993)، للاستخدام في التمرين السادس.

## الباب العاشر - الفصل السادس والعشرون

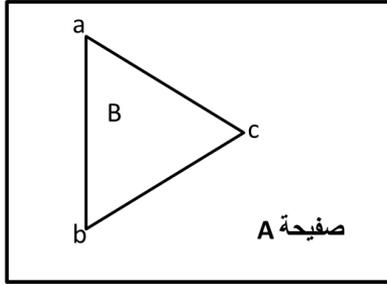
### هندسية الصفیحة Plate Geometry

#### 1.26. مدخل

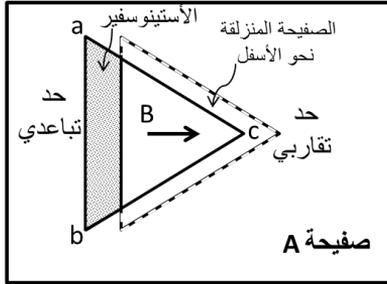
تعتمد نظرية تكتونية الصفائح على أن الغلاف الصخري مجزأ إلى عدد من الصفائح التي تتحرك بالنسبة لبعضها بعضاً باتجاهات وسرعات نسبية مختلفة. ومن هنا تأتي أهمية الدراسة الهندسية لهذه الصفائح من حيث حركاتها وطبيعة حدودها (Mattauer, 1980; Cox and Hart, 1986; Van der Pluijm and Marshak, 2004; Grotinger and Jordan, 2007; Karey et al., 2009; Schettino, 2015).

سنفترض في هذه المرحلة من دراستنا لهندسية الصفیحة أن سطح الأرض مستو. و ذلك لسببين: أولاً، إن هندسية السطح المستوي أكثر بساطة من السطح الكروي. وثانياً، إن منطقة محلية من سطح الأرض (الكروي) تعد، لأسباب عملية، مساحة مستوية. وبعد أن نتعرف على بعض من عناصر تكتونية الصفائح ثنائية البعد، سنتعلم كيف يمكن إجراء مثل هذه الدراسة على سطح كروي. وللوصول إلى هذا الهدف سنقوم بإجراء تجارب بسيطة تتضمن استخدام قصاصات ورقية وتحريكها بطريقة تجعل فهم هندسية الحركات الصفیحية وعلاقتها بالحدود بين الصفائح أمراً أكثر سهولة.

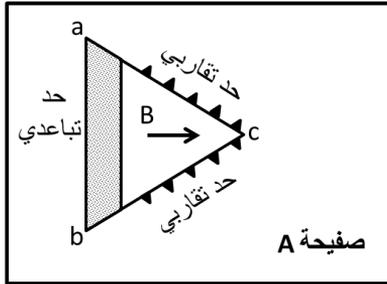
تمثل الصفیحة الموجودة في الشكل (26-1-أ) صفیحة صخرية تبلغ ثخانتها 80 كم. قم بقص قطعة مثلثية الشكل من هذه الورقة وسمها B ، وبذلك تحصل على صفيحتين A و B (شكل 26-1-ب). حرّك الصفیحة B نحو اليمين بحركة مستقيمة، لتجد أن كسراً تشكل على الجانب الأيسر من المثلث، ما يؤدي إلى كشف طبقة الغلاف الضعيف (الاستينوسفير) الموجودة تحت الغلاف الصخري (الليثوسفير). يصنف هذا الجزء من الحدود على أنه "حد تباعدي". أما على الحافتين الأماميتين bc و ca فيتشكل "حد تقاربي"، حيث يمكن للصفیحة A أن تنزلق تحت B أو العكس.



أ



ب

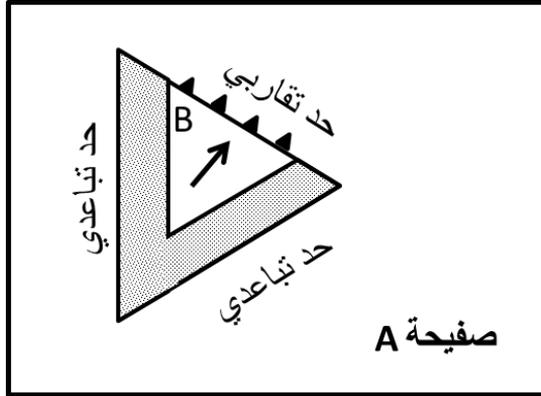


ت

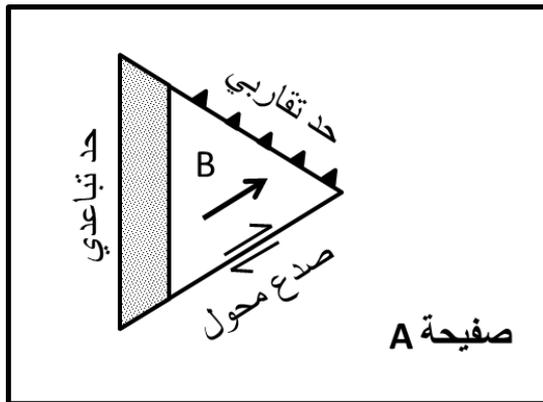
شكل (26- 1): تجربة تحريك الصفحة وأنماط الحدود الناتجة. أ: الوضع الأصلي قبل التحريك، ب: الوضع بعد التحريك، ت: طريقة تمثيل الحدود التقريبية على الخرائط (Cox and Hart, 1986).

قم الآن بتحريك المثلث (الصفحة B) باتجاه متعاقد مع الحد ac (شكل 26- 2) ستجد أن حدين تباعديين وحد تقاربي قد تشكل. أما لو حركت المثلث باتجاه مواز لأحد الأضلاع (شكل 26- 3)، ستجد أن الصفيحتين لن تتقاربا ولن تتباعدتا على امتداد هذا الضلع (الحد)، بل إن نمطاً ثالثاً من الحدود سوف يتشكل وهو نمط الحدود المحافظة (الصدوع المحولة). وبذلك نجد

أن هناك ثلاثة أنماط للحدود بين الصفائح: الحدود الصفيفية التباعدية Divergent plate boundaries، والحدود الصفيفية التقاربية Convergent plate boundaries، والحدود الصفيفية المحافظة Conservative plate boundaries. وتمثل حدود الصفيفة الموضحة في الشكل (26-3) هذه الأنماط الثلاث.



شكل (26-2): تشكل حدين تباعديين وحد تقاربي بتغيير حركة الصفيفة.



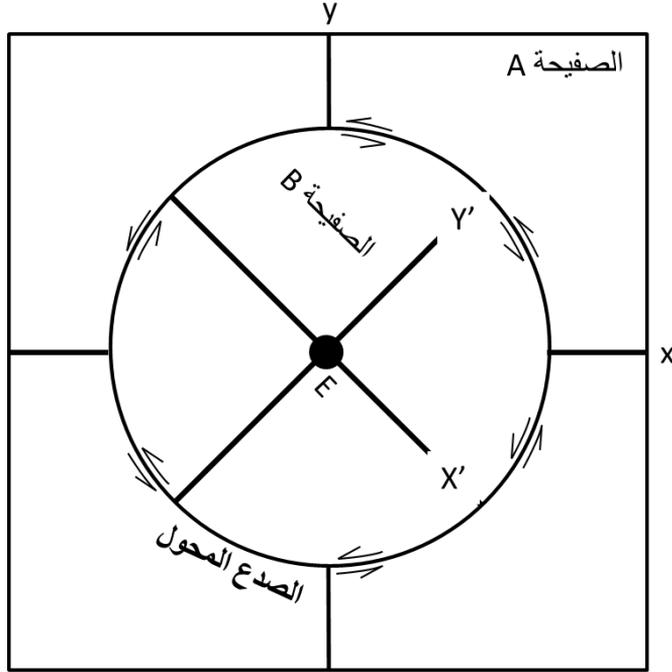
شكل (26-3): حركة الصفيفة B بشكل مواز لحد صفيفي، تشكل على امتداده صدع محول (Cox and Hart, 1986).

يكون العديد من الصدوع المحولة نشيطاً لفترات زمنية طويلة، وبخاصة منها تلك التي تشكل حدوداً لصفائح كبيرة. وبما أن الصفة الأساسية للصدوع المحولة أن الصفائح تتحرك بشكل مواز لها، فإن ذلك يعني أن الصفائح الكبيرة تبقى متحركة في الاتجاه نفسه لفترات زمنية طويلة.

## 2.26. أقطاب أولر Euler poles

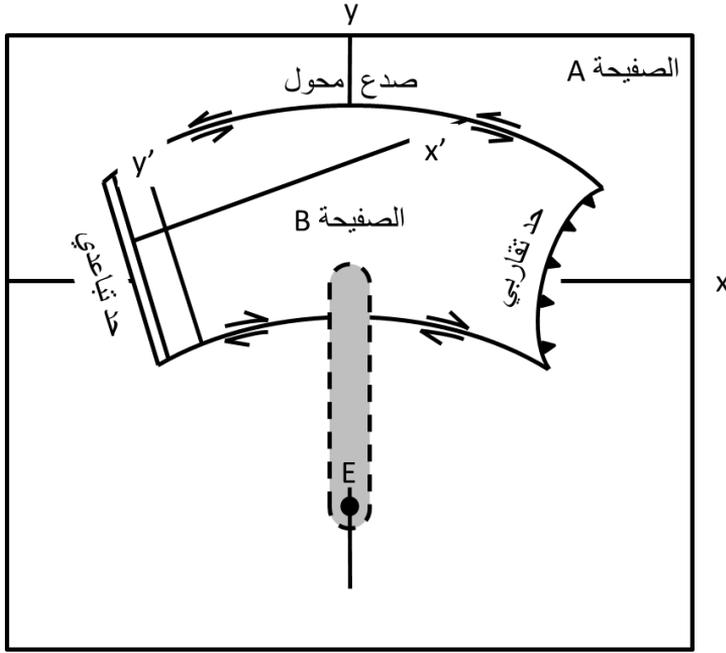
### 1.2.26. تعريف أقطاب أولر

يلعب مفهوم قطب أولر دوراً أساسياً في تكتونية الصفائح (Cox and Hart, 1986; Karey et al., 2009; Schettino, 2015). ولنبدأ بتعريفه بشكل مبسط من خلال صفيحة يتمثل حدها بشكل كامل بصدع محول، وبذلك ستكون الصفيحة ذات شكل دائري (شكل 26-4). قم بقص قطعة الورق بشكل الصفيحة B ودورها حول النقطة E باتجاه عقارب الساعة، مع تثبيت الصفيحة A. لاحظ أن طبيعة الحركة على امتداد الحد الصفيحي (محيط الدائرة) يسارية. أعد التجربة إنما بتدوير الصفيحة A هذه المرة بعكس جهة عقارب الساعة، وتثبيت الصفيحة B. لاحظ أن الحركة على امتداد الحد الصفيحي يسارية أيضاً. إن هاتين العمليتين الدورانيتين متكافئتان من وجهة نظر تكتونية الصفائح. وبذلك فإن قطب أولر يمثل قطب دوران الصفيحتين بالنسبة لبعضهما. وهو يمثل النقطة الوحيدة التي تبقى ثابتة بالنسبة لكلا الصفيحتين.



شكل (26- 4): صفيحة دائرية الشكل يتمثل حدها (محيطها) بصدع محول (Cox and Hart, 1986). لاحظ أنه عندما تدور الصفيحة B حول مركزها E باتجاه عقارب الساعة، فإن كامل محيطها يتمثل بصدع محول يساري الحركة. لاحظ أيضاً أن قطب أولر E هو النقطة الوحيدة التي تحتفظ بإحداثياتها بالنسبة لكلا الجملتين الإحداثيتين.  $x$  ،  $y$ : الجملة الإحداثية للصفيحة A،  $x'$  ،  $y'$ : الجملة الإحداثية للصفيحة B.

يستخدم قطب أولر لوصف حركات الصفائح ذات الشكل غير الدائري. يمثل الشكل (26- 5) قطب أولر لصفيحة يحيط بها الأنماط الثلاثة للحدود الصفيحية. ويتوضح في هذا الشكل أيضاً أن الصدوع المحولة تمثل أجزاء من دوائر يتمثل قطب أولر مركزها. ونجد في هذا المثال أن قطب أولر يقع خارج حدود الصفيحة B وهو يمثل في الوقت نفسه قطب الدوران لكلا الصفيحتين. وكما هو الحال دائماً فإن قطب أولر E يمثل النقطة الوحيدة التي تبقى ثابتة بالنسبة لكلا الصفيحتين. وبشكل عام فإن أقطاب أولر تلعب دوراً أساسياً لوصف الحركات الصفيحية.

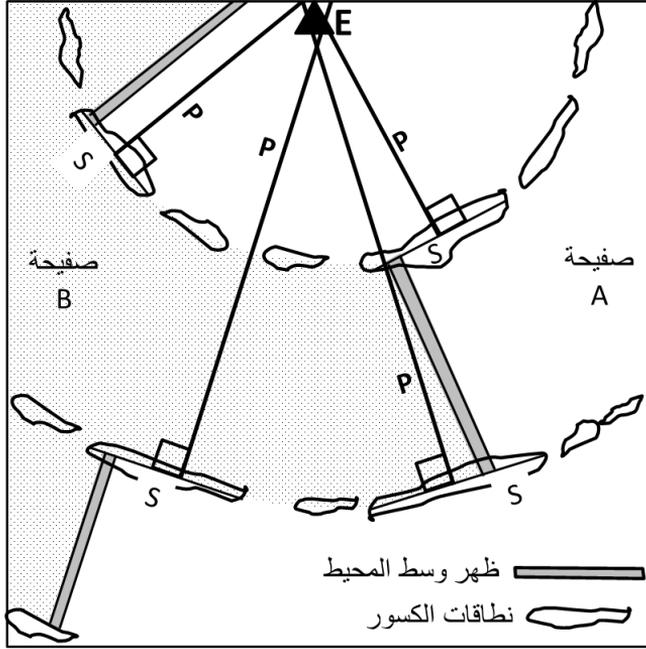


شكل (26-5): تحديد قطب أولر بالنسبة للصفیحة B. لاحظ أنه لو غرنا مسماراً في النقطة E ودورنا الصفیحة B باتجاه عقارب الساعة، لتشكلت الأنماط الثلاثة للحدود الصفیحية. لاحظ أيضاً أنه برغم دوران الصفیحة B فإن إحداثيات E تبقى ثابتة بالنسبة لإحداثيات كلا الصفیحتين A و B (Cox and Hart, 1986).

### 2.2.26. تحديد أقطاب أولر

لاحظ الباحثون الأوائل وجود سلاسل جبلية ضيقة وطويلة تتميز بأن قاع المحيط يهبط عبرها فجأة من عمق قليل نسبياً إلى عمق أكبر. وقد سميت هذه المظاهر "نطاقات الكسور" Fracture zones. تبدو هذه المظاهر مستقيمة على صعيد محلي، غير أنها تمثل أجزاء من دوائر فيما لو لوحظت على مسافات كبيرة. وبعد تأسيس نظرية تكتونية الصفائح تبين أنها تمثل آثاراً لصدوع محولة حالية أو قديمة. وبذلك فإن إيجاد مثل هذه النطاقات الكسرية يساعد في تحديد قطب أولر المتوافق معها. يبين الشكل (26-6) كيفية إيجاد القطب من خلال رسم

أعمدة على أقواس الدوائر التي تتحدد من خلال هذه الصدوع المحولة، ويلاحظ أن هذه الأعمدة تتقاطع عند مركز هذه الدوائر تقريباً، حيث تمثل نقطة التقاطع هذه قطب أولر المطلوب.



شكل (26-6): تحديد قطب أولر بالاعتماد على نطاقات الكسور. يتم ذلك بتحديد المظاهر التضاريسية المحلية أولاً، ثم برسم خط مستقيم (S) عبر كل مظهر محلي، ورسم أعمدة (P) على هذه المستقيمات. ليصار بعد ذلك إلى تحديد المكان التقريبي لموقع النقطة E الممثلة لقطب أولر (المثلث الأسود) (Cox and Hart, 1986).

### 3.26. متساويات العمر Isochrons والسرعات Velocities

#### 1.3.26. الأشرطة المغنطيسية Magnetic stripes

يمكن تعريف "متساوي العمر" بأنه سطح أو خط يحدد موقع مادة تكونت في زمن محدد من الماضي. وبحسب نظرية تكونية الصفائح فإن المقياس الزمني لتحديد متساويات العمر ينتج من الحقل المغنطيسي للأرض. ويتميز المقياس الزمني المغنطيسي بحالتين: أولاًهما هي الحالة

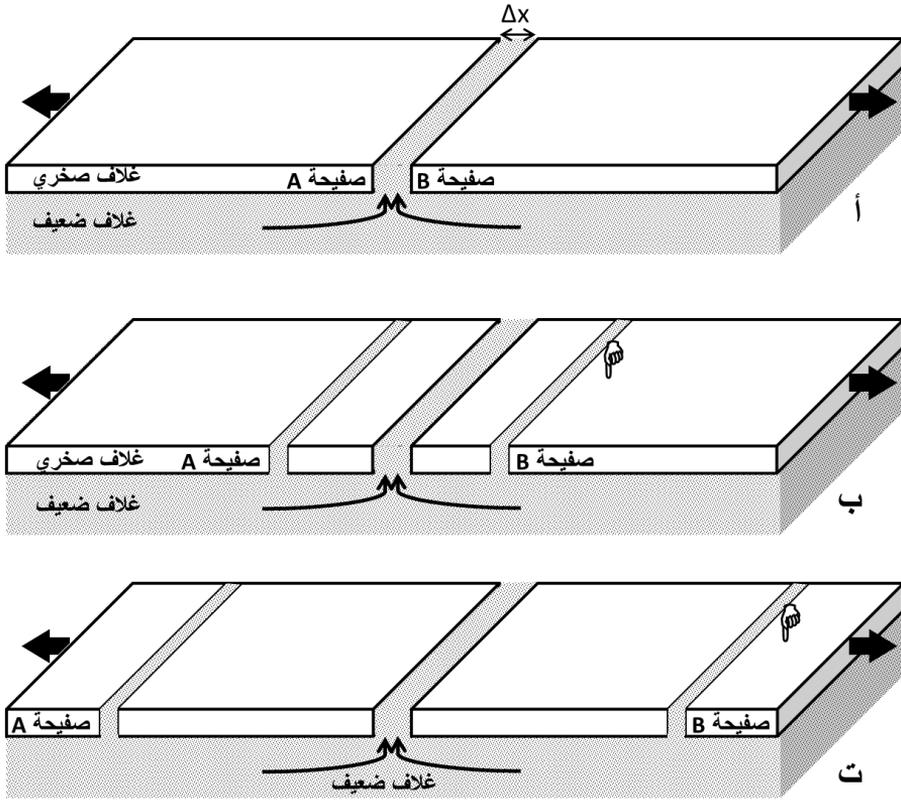
العادية حيث يتجه الحقل المغنطيسي الأرضي نحو الشمال، وثانيهما هي الحالة المعكوسة، حيث يتجه الحقل نحو الجنوب. وقد حصل انعكاس متوال لهذا الحقل ما بين هاتين الحالتين، خلال الملياري عام الأخيرين من تاريخ الأرض، وذلك بفواصل زمنية غير منتظمة تتراوح ما بين 20 ألف عام وعدة عشرات من ملايين الأعوام. وبذلك فإن الحقل المغنطيسي الأرضي يؤدي إلى ارتصاف القطاعات الحديدية المغنطيسية في صخور قاع المحيط لدى تبردها عند ظهر المحيط. وبالتالي يمكن قراءة "الذاكرة" المغنطيسية لصخور قاع المحيط (Cox and Hart, 1986; Karey et al., 2009; Schettino, 2015).

لقد وجد أن قاع المحيط متمغنط بشكل أشرطة متبدلة القطبية، وتكون هذه الأشرطة (متساويات العمر) ذوات عرض وعمر مختلفين، حيث يمكن تحديدها من خلال مقارنتها مع نمط نموذجي معروف العمر ومحدد بطريقة التأريخ النظائري. وتكون متساويات العمر هذه متوازية مع الظهر المحيطي وذات تناظر مرآتي على جانبيه (شكل 26-7).

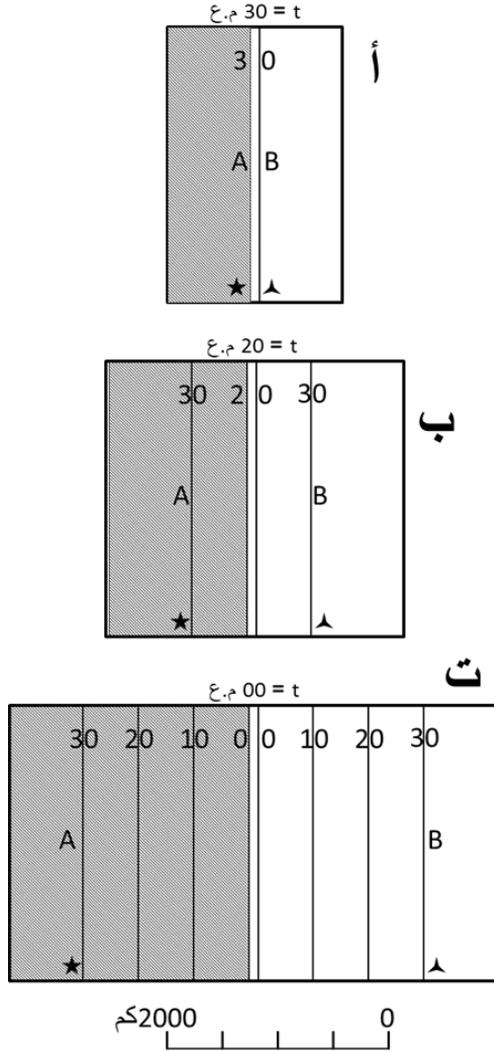
### 2.3.26. معدل (سرعة) الانتشار Rate of spreading

لنفترض أنه تم تحديد موقع ظهر وسط المحيط ونمط متساويات الأعمار كما في الشكل (26-8 ت)، فهل بالإمكان حساب سرعة انتشار قاع المحيط؟ يلاحظ أن متساويات الأعمار 10 م.ع تبعد 1000 كم عن بعضها. وهذا يعني أن متساويات الأعمار هذه كانت قبل 10 ملايين عام مجتمعة مع بعضها عند ظهر المحيط، وأن قشرة محيطية جديدة تشكلت خلال فترة  $\Delta t = 10$  م.ع بعرض كلي يساوي  $\Delta x = 1000$  كم، وذلك نتيجة تباعد الصفيحتين عن بعضهما. وبالتالي فإن السرعة  $v_B$  للصفيحة B بالنسبة للصفيحة A تحسب كما يلي:

$$v_B = \frac{\Delta x}{\Delta t} = 100 \text{ km/my} = 100 \text{ mm/yr}$$



شكل (26-7): التشكل المتناظر للظهر المحيطي. أ: تباعد الصفيحتين A و B عن بعضهما  $(\Delta x)$  وصعود المهل لسد الثغرة الناتجة من ذلك، ب: بمرور الزمن  $\Delta t$  تتباعد الصفيحتان عن بعضهما لمسافة  $\Delta x$  أخرى ويفتح كسر جديد في وسط الثغرة السابقة لتصعد مهل جديدة من الغلاف الضعيف وتملأ الثغرة الجديدة، ت: تستمر العملية لبناء الصفيحتين (Cox and Hart, 1986).



شكل (26-8): النمو المتناظر للصفحتين A و B عند ظهر المحيط. تمثل  $t$  زمن إعادة بناء الصفحة، حيث  $t_0$  هي 30 م.ع وهو الزمن الذي بدأت عنده الصفحتان بالتباعد، بينما تمثل  $t = 0$  الزمن الحاضر. يلاحظ أن كلاً من الصفحتين تعرضت لنمو بعرض كلي يساوي 1500 كم. أ: بدء عملية التباعد قبل 30 م.ع، ب: التباعد الذي حصل بعد ذلك بعشرة ملايين عام (500 كم)، ت: الوضع الحالي بعد حصول نمو لكل من الصفحتين بعرض 1500 كم. (Cox and Hart, 1986).

وبالإضافة لحساب سرعة الانتشار فإن متساويات العمر تساعد أيضاً في استرجاع عملية انتشار قاع المحيط، وذلك بهدف معرفة مكان وجود الصفائح في أزمنة مختلفة من الماضي (شكل 26-8). فمثلاً استطاع الباحثون تحديد الموقع القديم لأمريكا الشمالية بجانب أوروبا من خلال مقارنة متساويات العمر المتوافقة مع بعضها بعضاً.

تعد السرعات المحسوبة من خلال متساويات العمر بهذه الطريقة سرعات حقيقية بين الصفائح إذا كانت جهة الانتشار متعامدة مع الظهر فقط. أما إذا كان الانتشار يصنع زاوية أخرى، فإن السرعة الحقيقية ستكون أكبر. يبين الشكل (26-9) أن متساويات العمر من أجل الصفيحتين A و B تتباعد عن بعضها بمسافات متساوية مع المسافات الكائنة فيما بين متساويات العمر العائدة للصفيحتين C و D. ونلاحظ أن متساويات العمر 5 م.ع تتباعد عن بعضها بمسافة 400 كم، وبالتالي فإن السرعة تعطى كما يلي:

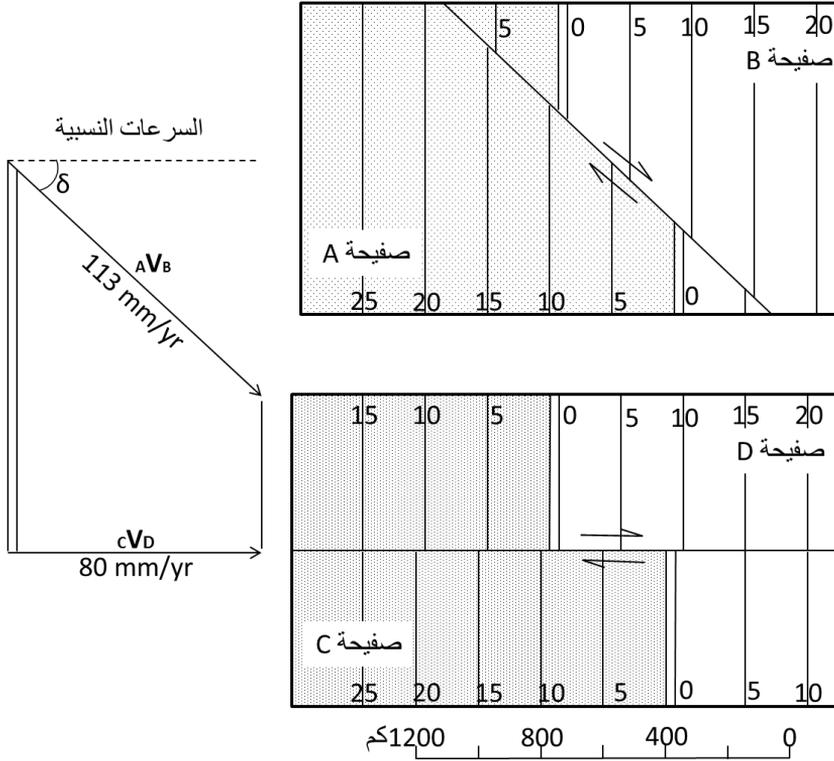
$$CVD = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

$$= 400 \text{ km}/5\text{my} = 80 \text{ km}/\text{my} = 80 \text{ mm}/\text{yr}$$

وهذه هي السرعة النسبية الحقيقية من أجل الصفيحتين C و D. ورغم ذلك فإن السرعة الحقيقية من أجل الصفيحتين A و B أكبر منها وتعطى كما يلي:

$$AVB = \frac{V}{\cos \delta}$$

حيث أن  $\delta$  تمثل الزاوية ما بين العمود على متساويات العمر وبين اتجاه الصدع المحول (شكل 26-9). أي أن متساويات العمر تعطي السرعة باتجاه متعامد مع الظهر. وتمثل هذه السرعة الظاهرية السرعة الحقيقية للصفيحة في حال كان الظهر متعامداً مع الصدع المحول فقط.



شكل (26-9): متساويات عمر ذات مسافة متساوية فيما بينها ناتجة من سرعات صفحية نسبية مختلفة. يلاحظ في كلتا الحالتين أن مركبات السرعة المتعامدة مع متساويات العمر متساوية (Cox and Hart, 1986).

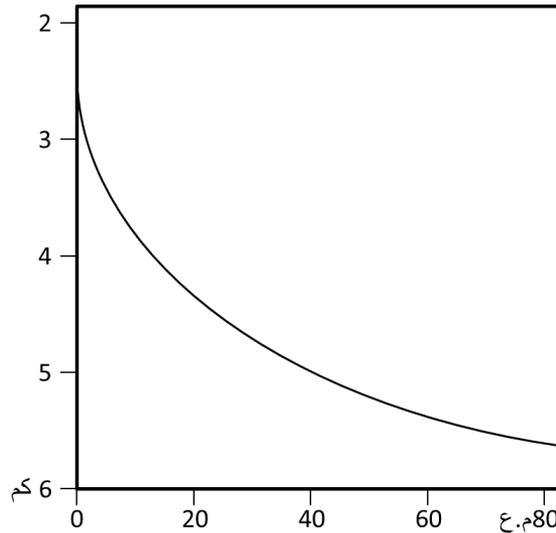
### 3.3.26. ماهو سبب النهوض التضاريسي في مجال الظهور المحيطية؟

تبين دراسات الحقل الثقالي فوق الظهور المحيطية أن هذه "السلاسل الجبلية تحت البحرية" تشابه السلاسل الجبلية القارية من حيث كونها معوضة من الناحية التوازنية Isostatically compensated. ويعود ذلك إلى وجود صخور قليلة الكثافة تحت السلاسل الجبلية. وهكذا فإن عمق السطح العلوي للغلاف الصخري (الليثوسفير) تحت سطح البحر يختلف مع اختلاف كثافة هذا الغلاف. فعند قمة الظهر المحيطي يكون الغلاف الصخري حاراً وخفيفاً ولذلك نجده يطفو نحو الأعلى. وعندما يتحرك الغلاف الصخري مبتعداً عن الظهر فإنه يبرد ويصبح أكثر ثخانة

وكثافة، ما يؤدي إلى هبوطه (Cox and Hart, 1986, Karey et al., 2009). ويعبر عن هبوط قاع المحيط نتيجة تبرده عندما يبتعد عن ظهر المحيط بالمعادلة التالية:

$$Z = C\sqrt{T}$$

حيث  $Z$  قيمة الهبوط بالمتر، و  $T$  العمر بوحدة م.ع، أما قيمة الثابت  $C$  فهي 300. وهكذا فإذا عُرف عمق قاع المحيط فيمكن استخدام هذه المعادلة لتحديد عمر قاع المحيط (شكل 26-10). فمثلاً لو أن قمة الظهر النشط يساوي 3 كم، فإن عمق قاع المحيط ذو العمر 100 م.ع يساوي 6 كم. نلاحظ هنا أن عمق قاع المحيط يتعلق بالعمر وليس ببعده عن الظهر. وعند مسافة محددة من الظهر فإن قاع المحيط سيكون أكثر عمقاً في حال ظهر ذي سرعة انتشار بطيئة بالمقارنة مع ظهر ذي سرعة انتشار أكبر. وبالتالي فإن قاع المحيط سيكون أقل انحداراً في حال الظهور سريعة الانتشار بالمقارنة مع انحداره في حال الظهور بطيئة الانتشار. ومن ناحية أخرى فإن الغلاف الصخري الأقدم من 100 م.ع تبرد ووصل إلى حال تعادل عند عمق يقارب الستة كيلومترات، ولن يستمر بالهبوط.

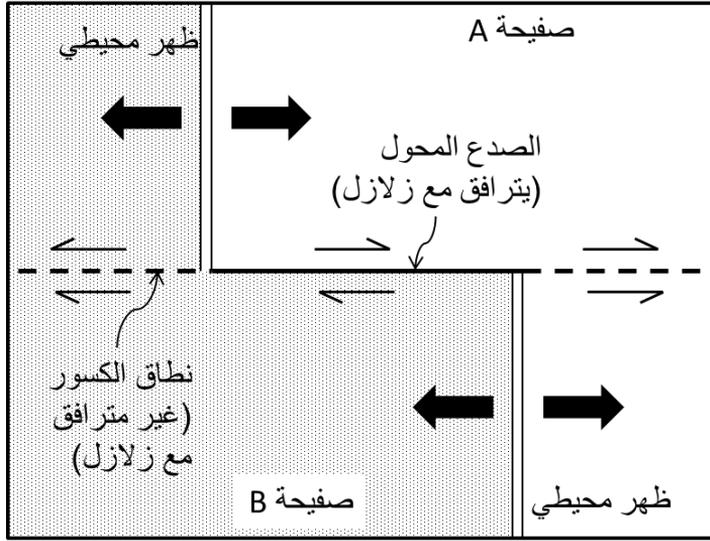


شكل (26-10): العمق المتوسط لقاع المحيط بالعلاقة مع عمره (Cox and Hart, 1986).

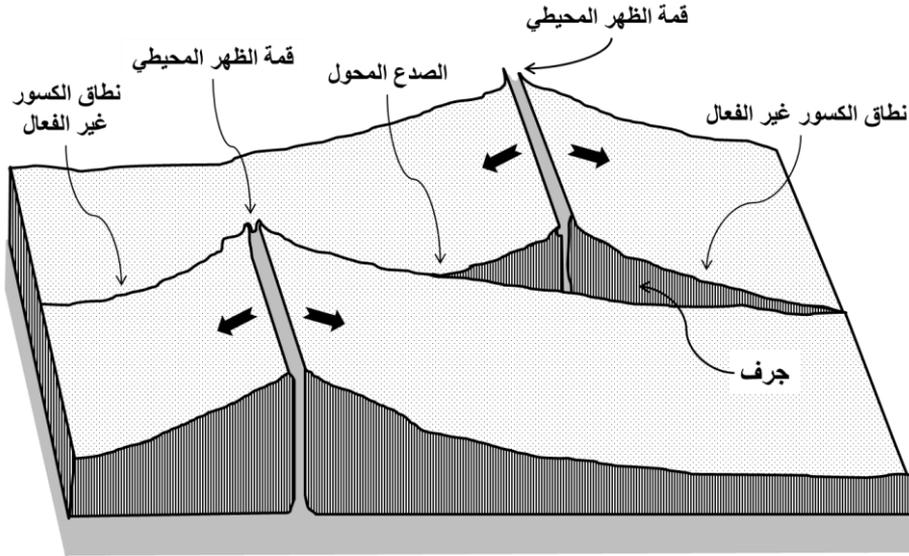
#### 4.26. الصدوع المحولة

تبدو امتدادات هذه الصدوع على الخرائط بشكل مظاهر طويلة مقوسة، حيث يمتد بعضها مثلاً على كامل عرض المحيط الأطلنطي. وتمثل العلاقة ما بين قمم الظهور المزاحة والصدوع المحولة مفتاحاً لفهم هذه الصدوع. وعند النظر إلى خرائط الظهور المحيطية والصدوع المحولة يعتقد للوهلة الأولى أن الظهر المحيطي تكوّن أولاً بشكل مستمر ومستقيم ثم تعرض لاحقاً للإزاحة من خلال الصدع المحول. غير أن نظرية تكتونية الصفائح فسرت هذه البنية بخلاف ذلك، فالحدّ بين الصفيحتين تكوّن منذ البداية بشكل درجي تعامد فيه اتجاه الظهر مع اتجاه الصدوع المحولة. أي أن التكون الأولي للظهور أعطاها المظهر المزاح، ولم تأخذ هذه الظهور شكلاً مستمراً أو مستقيماً أبداً، كما أن مقدار الإزاحة الحالي يساوي مقدار الإزاحة الذي ظهر في أثناء التشكل (Cox and Hart, 1986, Grotinger and Jordan, 2007, )  
(Karey et al., 2009; Schettino, 2015).

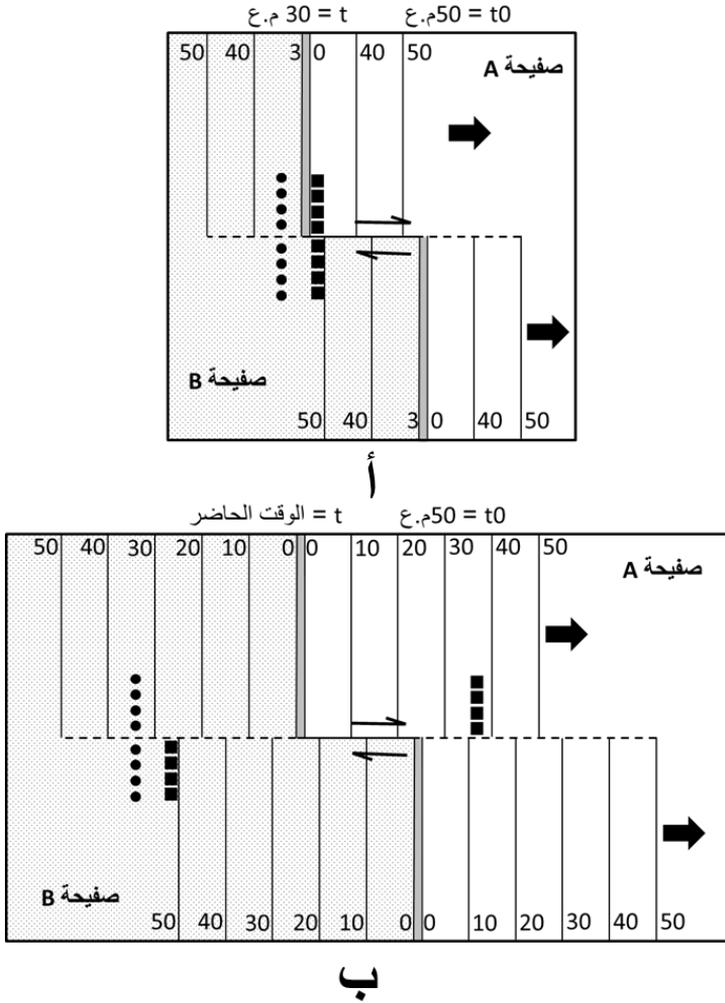
تتحرك الصخور على جانبي الصدع المحول فيما بين قمتي الظهرين المتجاورين بسرعات تصل إلى 100 ملتر في العام بالنسبة لبعضها. ويسمى هذا الجزء النشط من النطاق التكتوري "صدعاً محولاً"، حيث أن عملية القص تتم على امتداد هذا الجزء فقط (شكل 26-11)، وعند قمة الظهر تتحول عملية القص إلى عملية انتشار. وفيما وراء هذا الجزء الواقع ما بين القمتين، فإن الصخور على جانبي نطاق الكسور تتحرك مع بعضها بعضاً كجزء من الصفيحة نفسها. يتغير عمق قاع المحيط على جانبي نطاق الصدع المحول (شكل 26-12). ويمكن شرح ذلك من خلال تغير عمر الصخور على جانبي الصدع، ما يؤدي بطبيعة الحال إلى اختلاف قيم هبوطها. وكلما كبرت المسافة الفاصلة بين ظهري وسط المحيط على طول الصدع المحول، ازداد الفرق بين عمر الصخور على جانبيه، ما يؤدي إلى ازدياد الفرق بين عمقي قاع المحيط على جانبي هذا الصدع. يبين الشكل (26-13) عملية تكون الصدع المحول ونطاق الكسور من أجل صفيحتين متباعدتين (A و B). لاحظ أن الصدع المحول نشيط فيما بين جزأي الظهر المحيطي فقط.



شكل (26-11): خارطة تبين هندسية الصدوع المحولة ونطاقات الكسور وطبيعة الحركات النسبية على امتدادها.



شكل (26-12): شكل ثلاثي البعد للصدوع المحولة ونطاقات الكسور. لاحظ تباين التضاريس على جانبي الصدع المحول نتيجة اختلاف عمر الليثوسفير (Cox and Hart, 1986, Kary et al., 2009).



شكل (26-13): تجربة تخطيطية للتمييز ما بين الصدع المحول ونطاق الكسور غير الفعال. أ: وضعية الصفحتين A و B المتباعدتين ونشوء الصدع المحول فيما بين جزأي الظهر المحيطي، ويمثل هذا الشكل الوضعية قبل 30 م.ع ( $t = 30$  م.ع)، علماً أن عملية الانتشار بدأت قبل 50 م.ع ( $t = 50$  م.ع)، ب: الوضع الحالي. لاحظ طبيعة الحركة النسبية من خلال الخطين المؤلفين من مربعات ودوائر صغيرة والمرسومين على جانبي الصدع المحول ونطاق الكسور (Cox and Hart, 1986).

## 5.26. حقول السرعة Velocity fields

إن ربط هندسية الصفيحة بالسرعات المستنتجة من خلال متساويات العمر أدى إلى وضع خرائط خاصة تتضمن مجموعات من الأسهم (تسمى حقول السرعة) تبين سرعة نقطة على سطح كل صفيحة (Cox and Hart, 1986).

ولشرح هذه الفكرة نبدأ بالمثل المبسط التالي: لننتصور قطاراً للنقل يسير فوق سكة مستقيمة. فإذا كان القطار غير قابل للتشوه، فإن سرعة عربة القيادة بالنسبة للأرض تساوي سرعة العربة الأخيرة في هذا القطار، أي أن كل أجزاء القطار تتحرك بالسرعة نفسها. وإذا اعتبرنا الأرض تمثل الصفيحة A وأن القطار يمثل الصفيحة B، فإن كل نقاط القطار (b) تسير بالسرعة نفسها Avb بالنسبة للصفيحة A. ونعد بالتالي أن حقل السرعة عبر الصفيحة B متسق Uniform. وبشكل مشابه، فإن صفيحتين مفصولتين بصدوع محولة مستقيمة تتميزان بحقول سرعة متسقة، حيث تكون متجهات السرعة متوازية ولها الطول نفسه.

ورغم ذلك فإن حقول السرعة لن تكون متسقة إذا كان هناك عنصر دوران في الحركة النسبية لصفيحتين. يبين الشكل (26-14) طريقة لفهم ذلك. فلو حركنا الصفيحة B (ذات الشكل الإسفيني) بسرعة زاوية  $\omega_{OB}$  بالنسبة للصفيحة A (شكل 26-14-ب). فإنه يمكن لسرعة زاوية نموذجية أن تحدث بها الحركة وذلك بقيمة  $10^{-8}$  راديان/أسنة (الراديان هو قطاع من دائرة طول قوسه يساوي نصف قطر الدائرة أي أن الراديان يساوي  $57.3^\circ$ ). والآن ماهي السرعة الخطية اللحظية Avb للنقطة b الموجودة على الصفيحة B بالنسبة للصفيحة A (شكل 26-14-أ)، حيث أن b تقع على بعد r من نقطة أولر E؟ إن النقطة b تتحرك على طول دائرة مركزها في E. وفي أية لحظة تكون سرعتها موجهة بشكل مماسي بالنسبة لهذه الدائرة، كما أن قدر هذه السرعة يعطى بالعلاقة:

$$Avb = r \times \omega_{OB} \text{ (radian)} = r \times \omega_{OB} \text{ (degrees/57.3)}$$

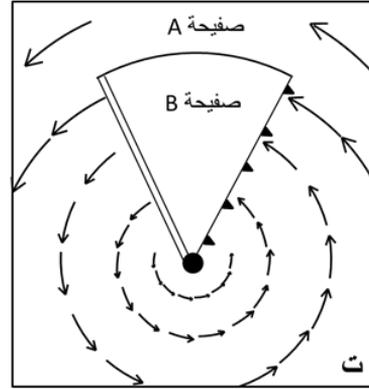
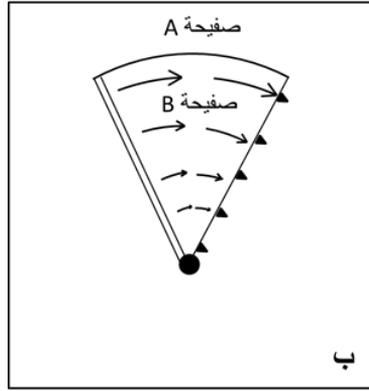
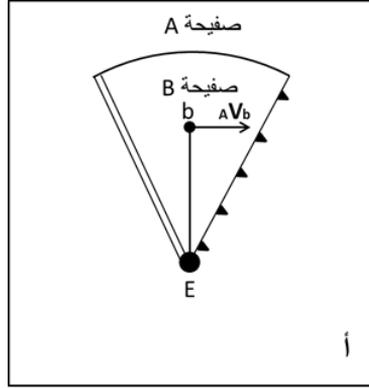
فمثلاً، إن السرعة اللحظية لنقطة b الواقعة على بعد 1000 كم =  $10^9$  مم تساوي 10 مم/ع، ويوضح الشكل (26-14-ب) حقل السرعة للصفيحة ذات الشكل المثلثي. وبما أن الحركات المدروسة هي حركات نسبية، فإن الحركة النسبية للصفيحتين يمكن أن تفسر كما هو موضح في

الشكل (26-14 ت)، حيث تتحرك الصفحة A في الوقت الذي تعتبر فيه الصفحة B هي  
الثابتة، أي أن:

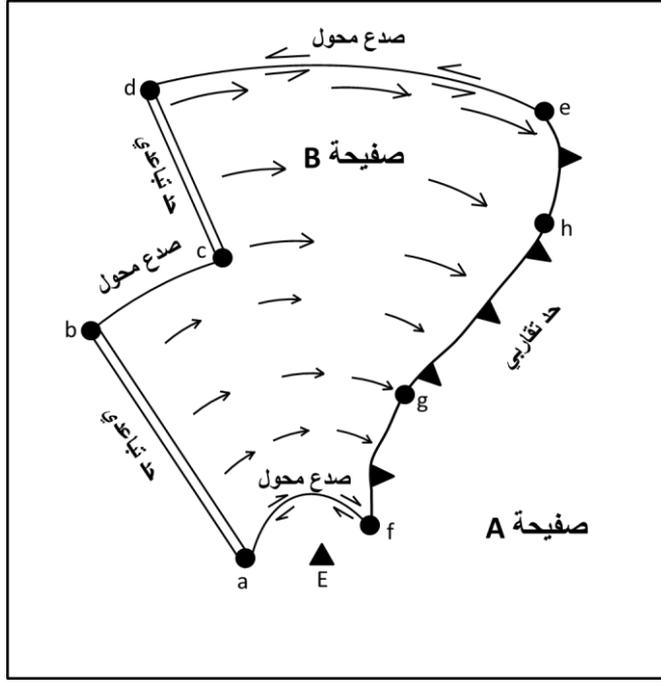
$$B \omega_A = - A \omega_B$$

أي أننا سنلاحظ في كلتا الحالتين نفس المظاهر الجيولوجية: الحد التباعدي نفسه، والحد التقاربي  
نفسه، والصدع المحول نفسه.

يبين الشكل (26-15) حالة أخرى تكون فيها الصفحة A ذات سرعة تساوي الصفر. ويلاحظ  
هنا أن الأجزاء af و bc و de من الحدود الصفيحية تمثل صدوعاً محولة وترسم أقواساً تتمركز  
حول القطب E، وتوازي حقل السرعة  $A \omega_B$ . وإذا لم تكن الحالة كذلك، فإن هذا النموذج لن يكون  
متوافقاً مع بدهيات نظرية تكتونية الصفائح، التي تنص على أن حركات الصفائح توازي الصدوع  
المحولة. يمكن أيضاً ملاحظة أن متجهات السرعة المجاورة للحد التقاربي تصنع زوايا مختلفة مع  
مسار الحد التقاربي ذي الشكل المنحني، التي قد تكون متعامدة معه أحياناً أو منحرفة عنه أحياناً  
أخرى. أما الحدود التباعدية فهي أقرب لأن تكون متعامدة مع حقول السرعة، غير أن حركة  
الصفحة يمكن أن تتحرف أحياناً عن التعامد معها بزواوية قد تصل إلى 15°. وبذلك فإن استخدام  
اتجاه الصدوع المحولة يساعد في تحديد اتجاه الحركة النسبية بين صفيحتين، بشكل أفضل من  
استخدام اتجاه الظهر المحيطي.



شكل (26-14): حقول السرعة في حال صحيفة بسيطة. أ: السرعة اللحظية للنقطة  $b$ ،  
 ب و ت: إن حقول السرعة في كلا هذين الشكلين متوافقة مع الحركة النسبية المفترضة بين  
 الصفيحتين A و B حول قطب أولر E (Cox and Hart, 1986).



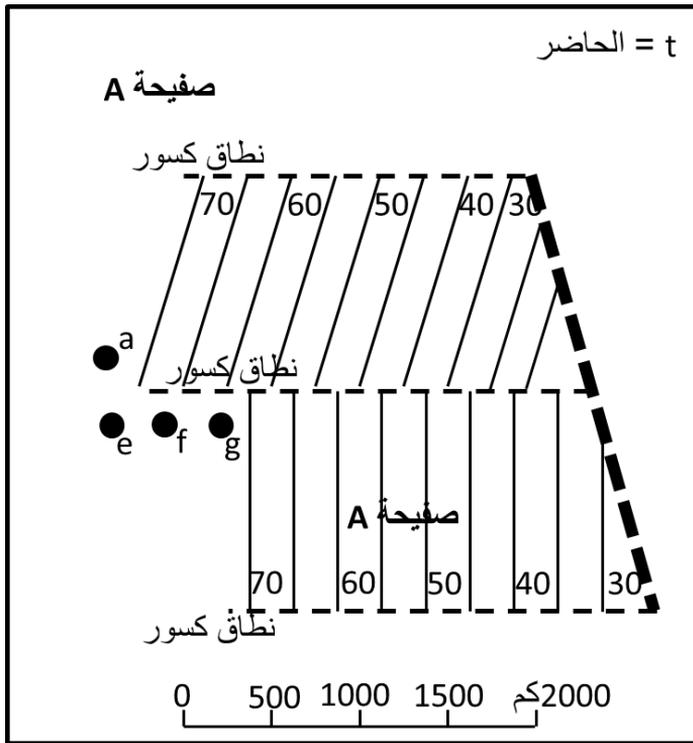
شكل (26-15): حقل السرعة لصفحة متحركة حول قطب E (Cox and Hart, 1986).

### 6.27. كيف تعمل نظرية تكتونية الصفائح؟

لنفترض أنه تم جمع معطيات الخريطة الموضحة في الشكل (26-16). يتألف هذا النمط التكتوني من ثلاثة نطاقات كسرية ذات اتجاه شرق - غرب، بالإضافة لمجموعة من متساويات الأعمار. تقع كل هذه المظاهر على صفيحة واحدة (صفيحة A). ومن الواضح أن هناك صفيحة أخرى أو أكثر خارج هذا الشكل كانت موجودة عندما نشأت هذه المظاهر الموضحة في هذا الشكل. والمطلوب هنا معرفة الصورة التي كانت عليها الصفائح في مرحلتها الأولى، وعدد من الصور التالية لتلك المرحلة. وللوصول إلى هذا الهدف يمكن أن نأخذ بالحسبان مايلي:

- إن اتجاه النطاقات الكسرية تشير إلى أن اتجاه الصدوع المحولة السابقة هي شرق - غرب، وهو اتجاه الحركة الصفيفية النسبية.
- تصبح متساويات الأعمار (التي تمثل جزءاً من الصفيحة A) أحدث باتجاه الشرق، أي أنها تشكلت من خلال ظهر محيطي هاجر نحو الشرق بالنسبة للصفحة A.

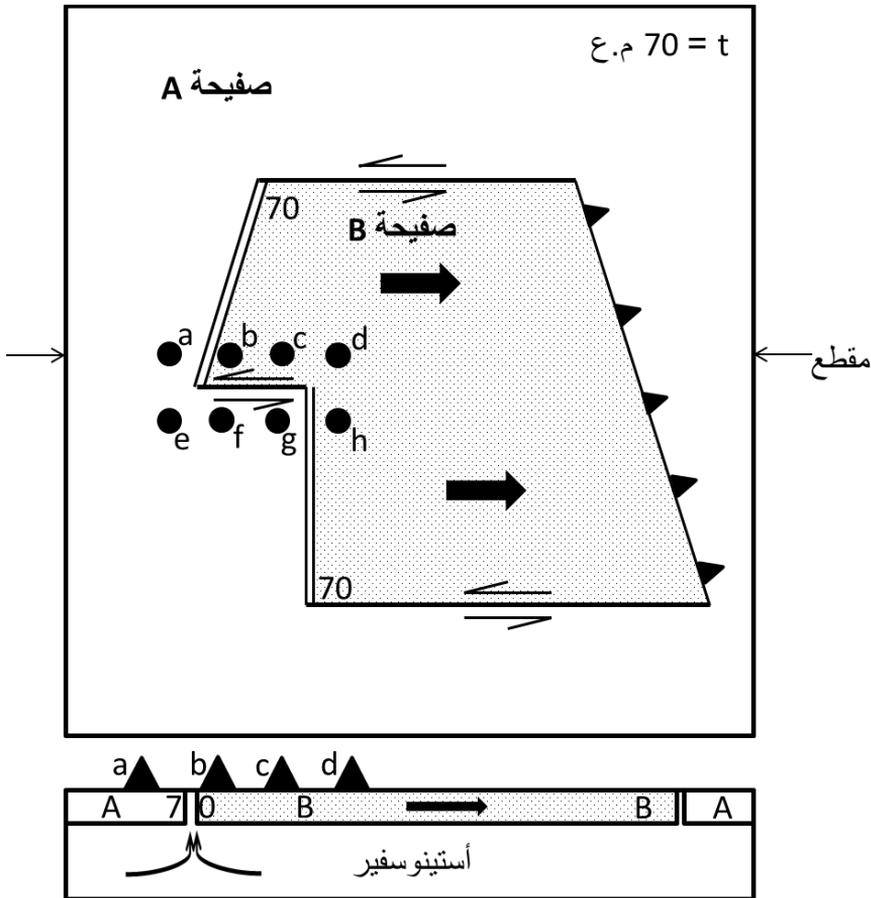
- يمكن حساب سرعة الانتشار بمعرفة المسافة بين متساويات الأعمار والفاصل الزمني بينها، وبالحساب نجد أن السرعة تبلغ 50 مم/ع. لاحظ أن هذه تمثل نصف سرعة الانتشار AVR، أي أنها السرعة التي نمت خلالها الصفيحة A نحو الشرق (ترمز R إلى ظهر محيطي).
- يشير الانتهاء المفاجئ للنطاقات الكسرية ولمتساويات الأعمار في الشرق إلى أن الصفيحة A انتهت هنا، أي أنها قطعت من خلال أخدود (حد تقاربي) كان في زمن ما سابق موجوداً في هذا الجزء من قاع المحيط الذي يعد هادئاً في الوقت الحالي.



شكل (26-16): نمط يتألف من متساويات عمر (الخط المتصل) ونطاقات كسور غير فعالة (خط متقطع) وبراكين تحت بحرية (دوائر سوداء صغيرة) على قاع البحر. أما الخط المتقطع النخين فيمثل منخفضاً (Cox and Hart, 1986).

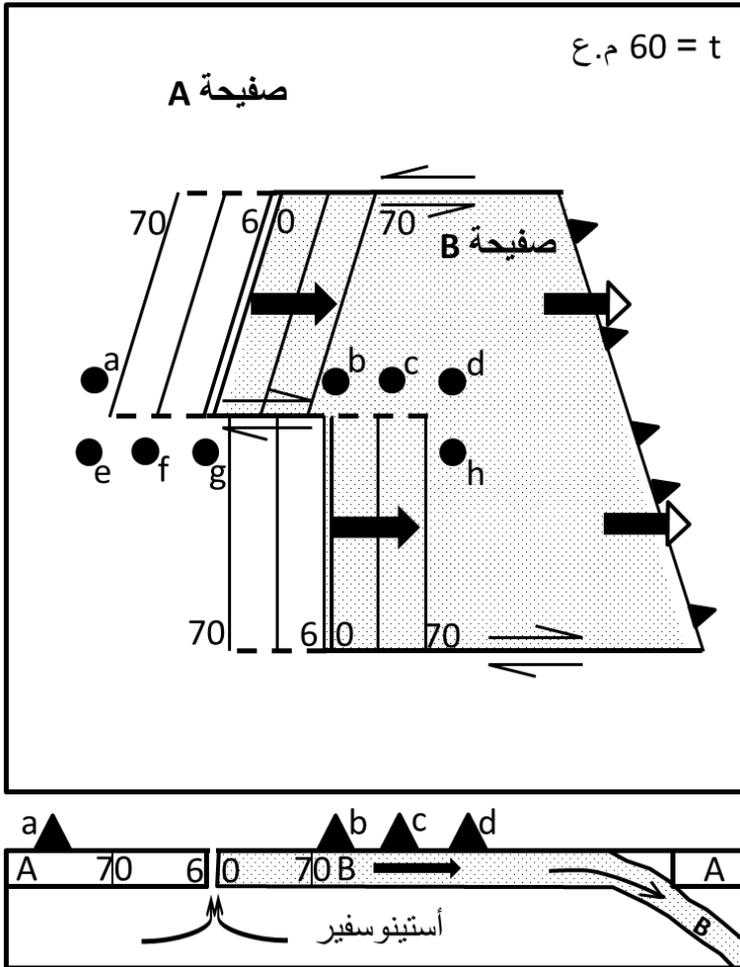
والآن لو أخذت هذه المعلومات بالحسبان يمكن البدء باسترجاع تاريخ تطور هذه الصفيحة خلال السبعين مليون عام الماضية (زمن تكوّن أقدم متساوي عمر):

أ- قبل 70 م.ع (شكل 26-17): تكونت صفيحة اسمها " صفيحة B" وبدأت بالتحرك نحو الشرق. لاحظ وجود صفيحتين من البراكين (a حتى h)، وسيستخدم هذان الصفتان من البراكين لمتابعة الحركات الصفيحية. وبما أن قطبية الحركة نحو الشرق فإنه من الواضح أن الصفيحة B ستؤول إلى الزوال.



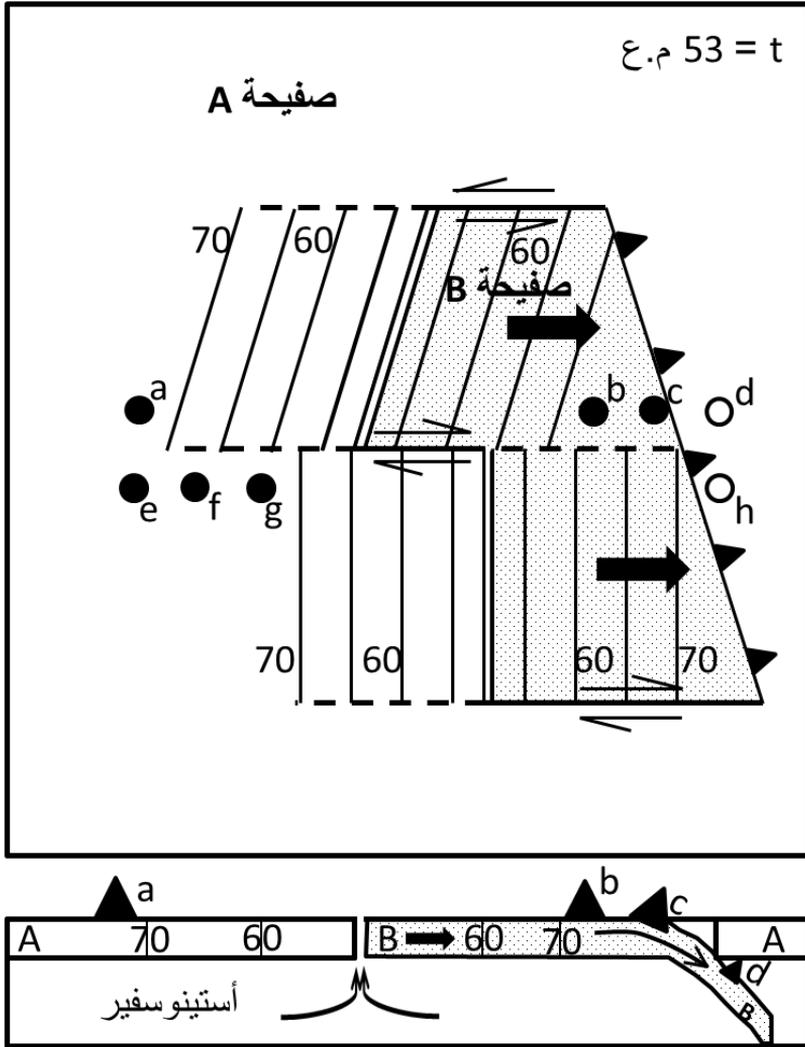
شكل (26-17): الوضع التكتوني الصفيحي قبل 70 م.ع. اقرأ النص.

ب- قبل 60 م.ع (شكل 26-18): هاجر الظهر المحيطي لمسافة 500 كم تقريباً نحو الشرق بالنسبة للصفحة A، كما أن هذه الصفحة (A) نمت بالقيمة نفسها تقريباً. أما الصفحة B فقد تحركت مسافة 1000 كم إلى الشرق بالنسبة للصفحة A، كما أن حوالي 1000 كم من الصفحة B انغرز في الخندق. وفي جزئها الغربي نمت الصفحة B بقيمة 500 كم تقريباً، أي بشكل مشابه للصفحة A، وبالتالي فإن الطول الصافي للصفحة تناقص بقيمة 500 كم.



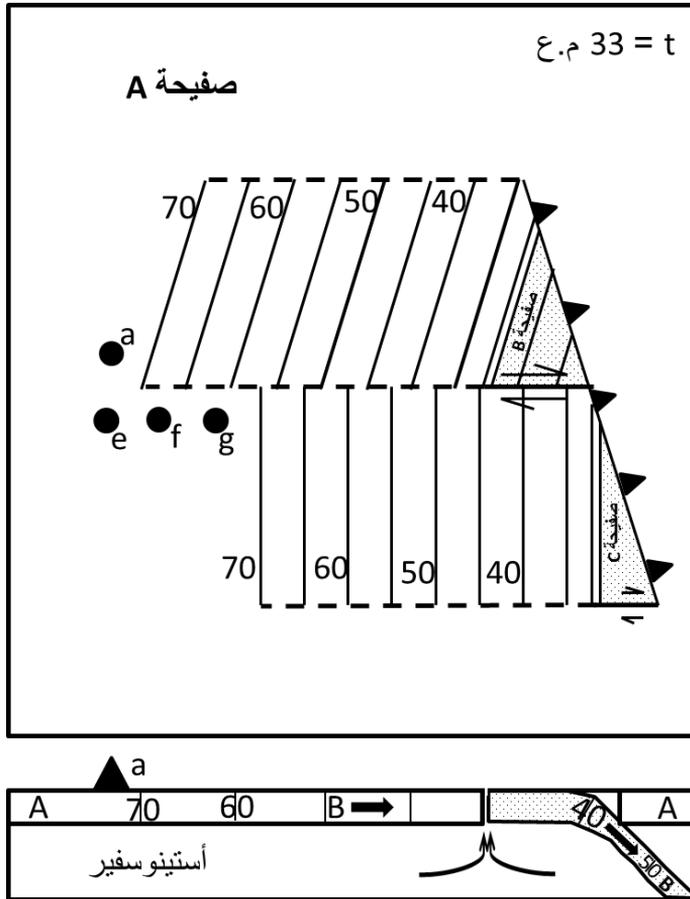
شكل (26-18): الوضع التكتوني الصفحي قبل 60 م.ع. اقرأ النص.

ت- قبل حوالي 53 م.ع (شكل 26-19): انغرز معظم الغلاف الصخري الأصلي للصفحة B (70 < t م.ع) عند الحد التقاربي (الأخدود Trench)، كما أن جزءاً من الغلاف الصخري الأحدث (70 > t م.ع) بدأ بالانغراز في الجزء الشمالي الشرقي.

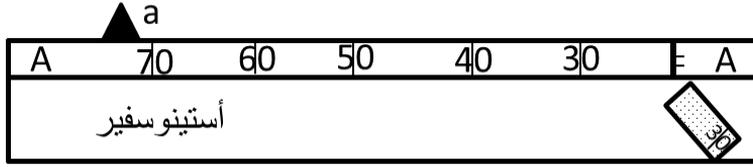


شكل (26-19): الوضع التكتوني الصفحي قبل 53 م.ع. اقرأ النص.

ث- قبل حوالي 33 م.ع (شكل 26-20): بما أن الظهر مفصول عبر الصدع المحول، وأن الظهر وصل إلى الأخدود فإن الصفيحة B انفصلت إلى صفيحتين (B و C)، حيث أن الصفيحة C سوف تذهب نحو الأعماق عند العمر 26 م.ع، ويتوقف الانغراز عند الجزء الجنوبي من الأخدود. أما القطعة الأخيرة من الصفيحة B فستذهب نحو الأعماق عند العمر 19 م.ع. وبذلك تكون الصفيحة B قد دمرت، وتوقف الانغراز بكامله، ولا يبقى سوى الصفيحة A (عند العمر 19 م.ع، شكل 26-21).



شكل (26-20): الوضع التكتوني الصفيحي قبل 33 م.ع. اقرأ النص.



شكل (26-21): مقطع يوضح الوضع التكتوني الصفحي في الوقت الحاضر (قارن مع الشكل 26-16). اقرأ النص.

### 7.26. التمارين:

#### 1.7.26. التمرين الأول:

يبين الشكل (26-22) مخططاً لصفحتين (A و B)، نفترض أن إحداهما ثابتة (الصفحة A)، أما السرعة الخطية AVB للصفحة B فتعطى بدلالة السهم، وبوحدة ملم/ع = كم.ع . كما أن الصفحة B هي النازلة تحت A، والمطلوب:

أ. أشر إلى الحدود الصفحية (ظهر محيطي، أخدود، صدع محول) بالرمز المناسب، وذلك في المخطط "أ".

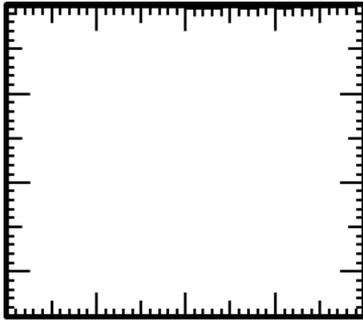
ب. أكمل المخطط "ب" لإظهار الشكل الذي تبدو عليه الصفائح في الوقت الحاضر ( $t = 0$ )، وذلك فيما لو كانت قد انفصلت عن بعضها قبل عشرة ملايين عام ( $t_0 = 10$  م.ع). ارسم متساويات أعمار بفواصل 4 م.ع، وقم بتلوين الصفحة B أو أعطاها رمزاً مناسباً لتمييزها عن الصفحة A. لاحظ أن رمز النجمة (الثلاثية والرابعة والخماسية) مثبت على الجزء الذي يعبر عن قاع البحر، وذلك بهدف متابعة الحركة.

ت. أكمل المخطط "ت" لإظهار الشكل الذي تبدو عليه الصفائح في الوقت الحاضر، وذلك فيما لو كانت قد انفصلت عن بعضها قبل عشرين مليون عام ( $t_0 = 20$  م.ع).

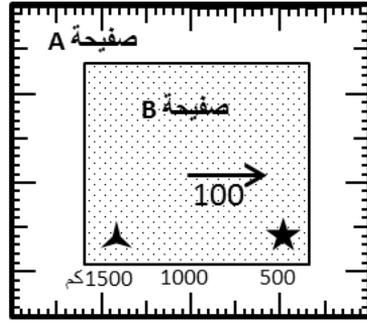
بعد أن تحل هذا التمرين اختبر نتيجة الحل بالمقارنة مع الشكل (26-23). ثم قم بعد ذلك بحل التمارين (25 حتى 36) بالطريقة نفسها (Cox and Hart, 1986). مفترضاً أيضاً أن الصفحة B هي النازلة تحت A، إلا عندما يشار إلى القطبية بالحرفين "U" أو "D". تكون السرعة في الشكلين الأخيرين (26-35 و 26-36) لاخطية، حيث يكون للصفحة B سرعة زاوية تبلغ  $5^\circ$  حول قطب أولر E.

**ملاحظة:**

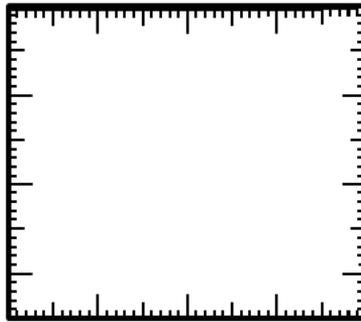
استخدم الشكل (26-24) لتنفيذ الحل بالطريقة التي حُلَّ بها تمرين الحالة الأولى (شكل 26-23)، حيث بإمكانك تصوير هذا الشكل لاستخدامه في حل التمارين الأخرى. ويهدف التسهيل يمكنك استخدام المقص لقص الشكل وتحريك الصفائح بالشكل المناسب.



ب:  $t = 0$  و  $t_0 = 10$  م.ع

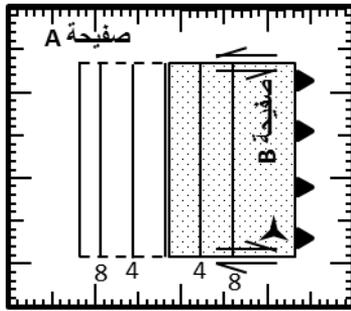


أ:  $t = t_0$

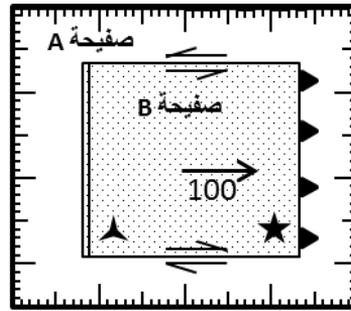


ت:  $t = 0$  و  $t_0 = 20$  م.ع

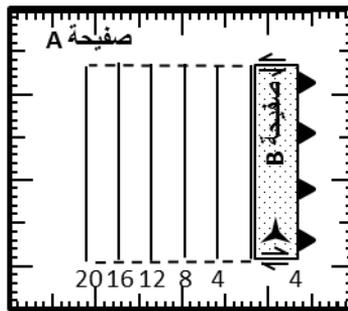
شكل (26-22): الحالة الأولى في التمرين الأول.



ب:  $t = 0$  و  $t_0 = 10$  م.ع



أ:  $t_0 = t$

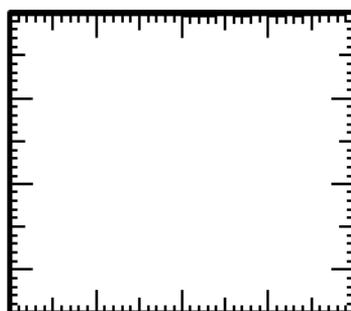


ت:  $t = 0$  و  $t_0 = 20$  م.ع

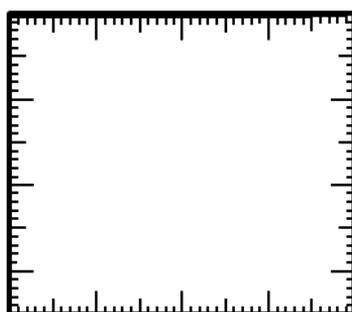
شكل (26-23): حل الحالة الأولى من التمرين الأول (Cox and Hart, 1986).



ب:  $t = 0$  و  $t_0 = 10$  م.ع

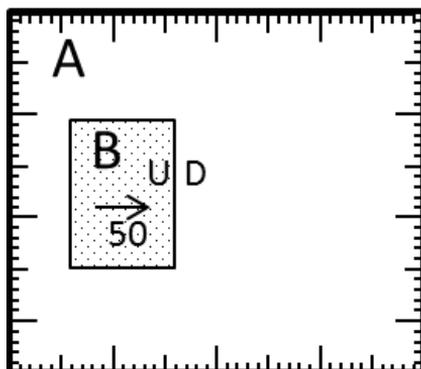


أ:  $t = t_0$

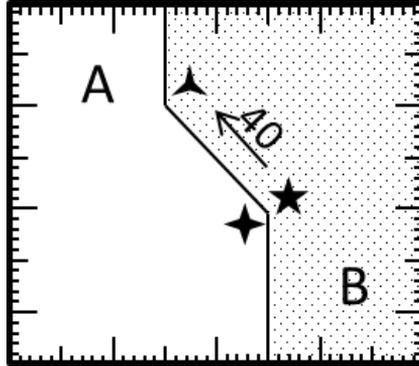


ت:  $t = 0$  و  $t_0 = 20$  م.ع

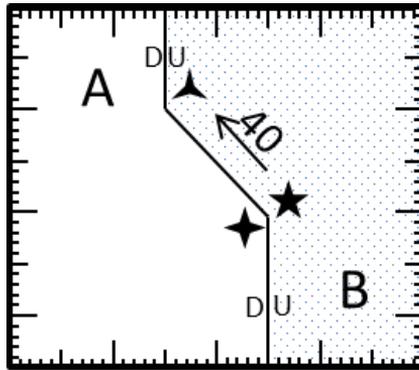
شكل (24 - 26): الخرائط أ و ب و ت المستخدمة لحل التمارين الموضحة في الأشكال (24 - 26) حتى (26 - 36).



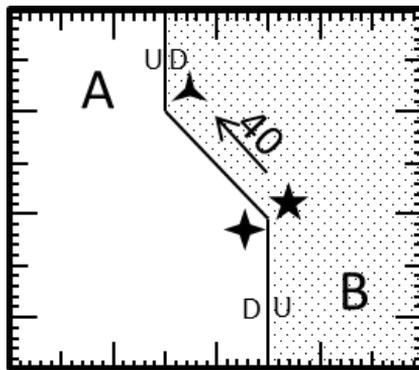
شكل (25 - 26): الحالة الثانية في التمرين الأول.



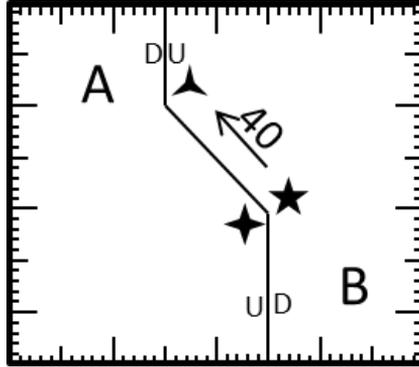
شكل (26 - 26): الحالة الثالثة في التمرين الأول.



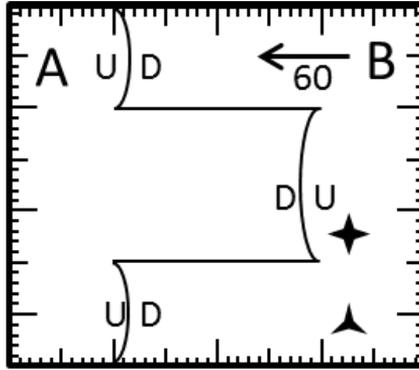
شكل (27 - 26): الحالة الرابعة في التمرين الأول.



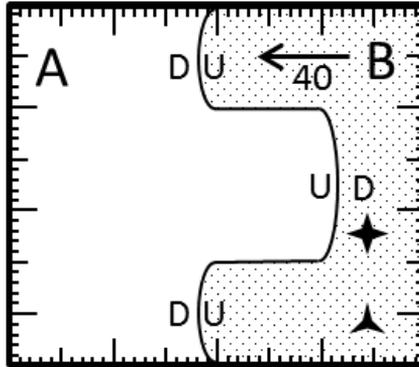
شكل (28 - 26): الحالة الخامسة في التمرين الأول.



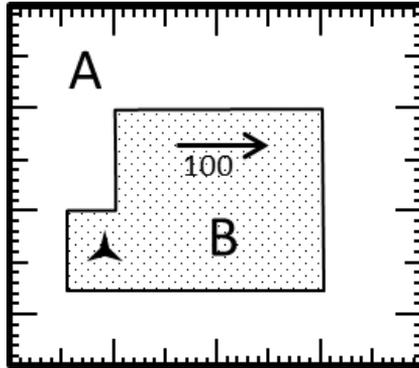
شكل (26- 29): الحالة السادسة في التمرين الأول.



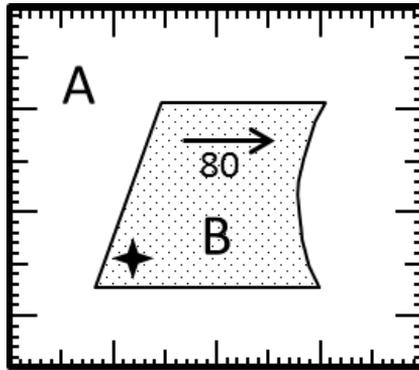
شكل (26- 30): الحالة السابعة في التمرين الأول.



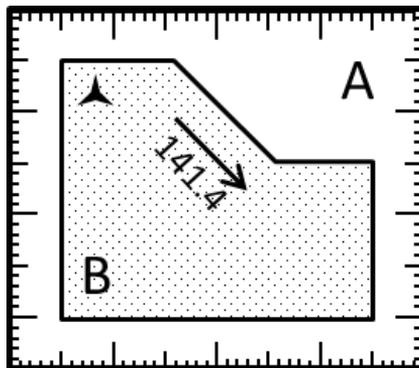
شكل (26- 31): الحالة الثامنة في التمرين الأول.



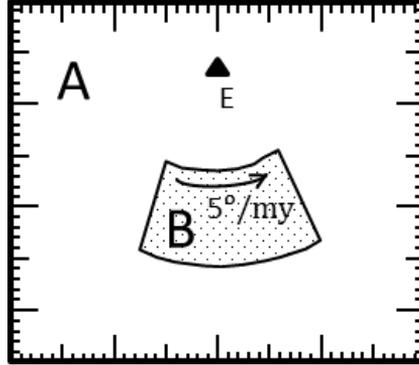
شكل (26 - 32): الحالة التاسعة في التمرين الأول.



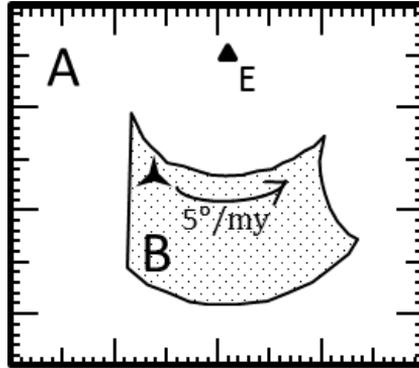
شكل (26 - 33): الحالة العاشرة في التمرين الأول.



شكل (26 - 34): الحالة الحادية عشرة في التمرين الأول.



شكل (26-35): الحالة الثانية عشرة في التمرين الأول.



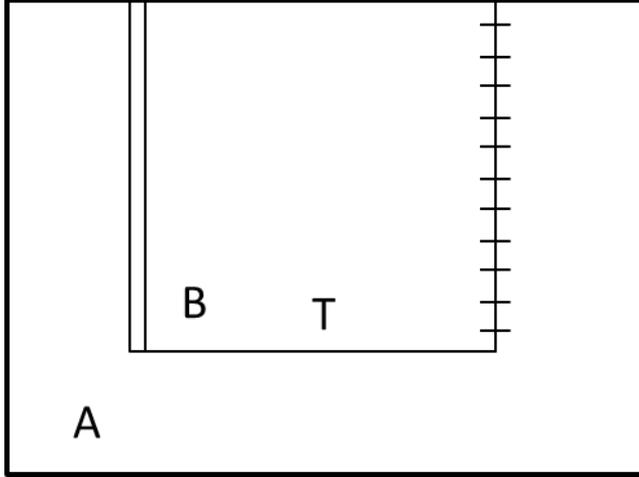
شكل (26-36): الحالة الثالثة عشرة في التمرين الأول.

### 2.7.26. التمرين الثاني:

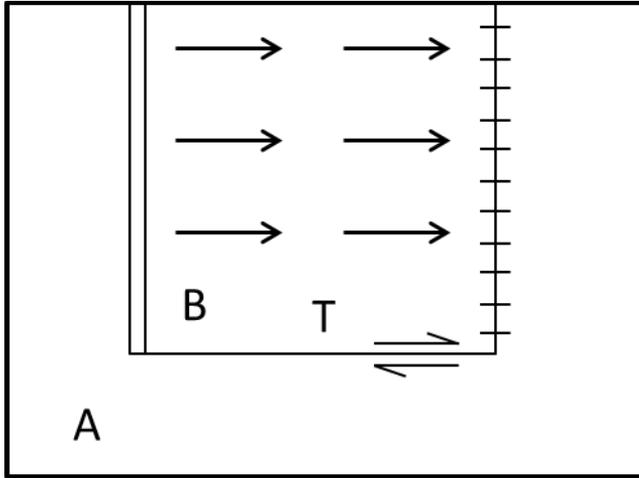
تبين الأشكال (26-37 حتى 26-47) مخططات لوضعيات الصفائح بحالات مختلفة (إحدى عشرة حالة، Cox and Hart, 1986)، وقد أُشير إلى الحدود برموزها المختلفة (ظهر محيطي أو أهدود أو صدع محول، واستخدمت الإشارات العرضانية في هذا التمرين للدلالة على الحدود التقاربية)، دون الإشارة إلى أسهم السرعة. وكذلك رُسمت الصدوع المحولة بشكل خطوط مستقيمة مع حرف "T"، ولم يوضع سهمين متعاكسين لتوضيح الحركة النسبية على امتداد هذه الصدوع. وتكون بعض أزواج الصفائح غير ممكنة بمعنى أنه لا يوجد حقل سرعة متناسب مع حدودها. والمطلوب:

أ- حاول أن تحدد حقل السرعة المتناسب مع كل الحدود. اعتبر أن الصفحة A ثابتة، ثم ارسم حقل السرعة للصفحة (أو الصفائح الأخرى). الحالة الأولى محلولة كمثال (شكل 26-37).

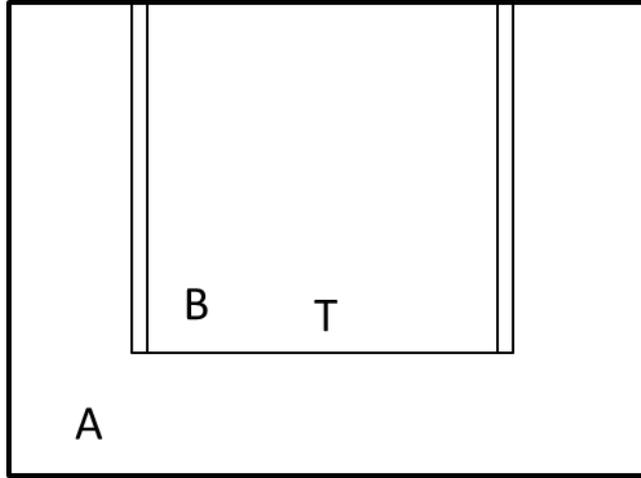
ب- إذا لم تستطع تحديد حقل سرعة مناسب، اكتب على المخطط "غير ممكن".



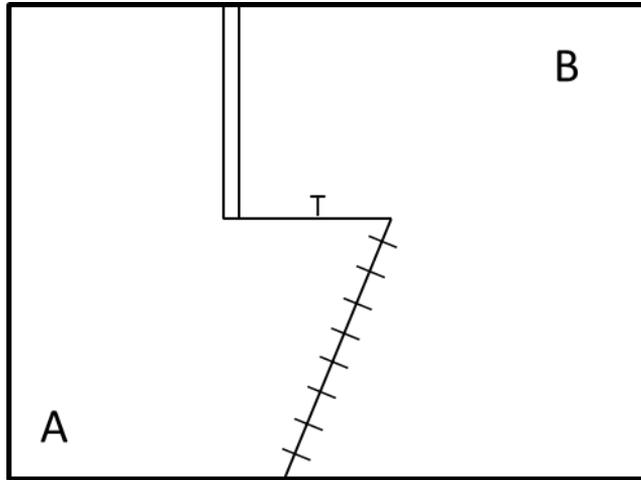
شكل (26-37 أ): الحالة الأولى في التمرين الثاني.



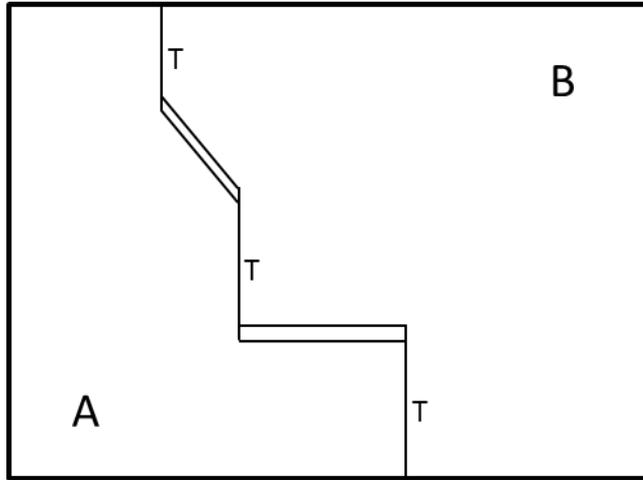
شكل (26-37 ب): حل الحالة الأولى في التمرين الثاني.



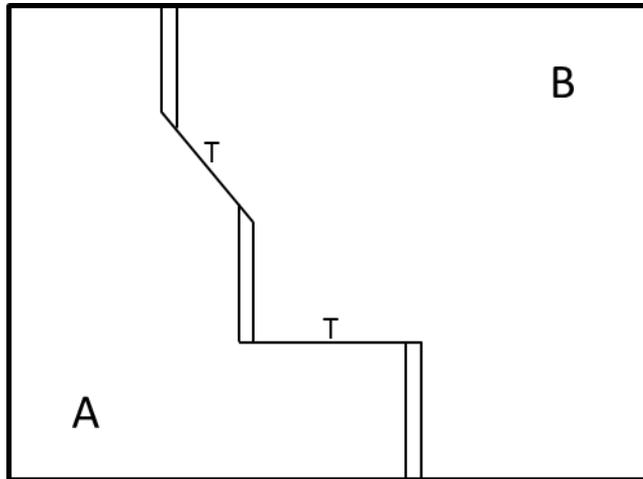
شكل (26-38): الحالة الثانية في التمرين الثاني.



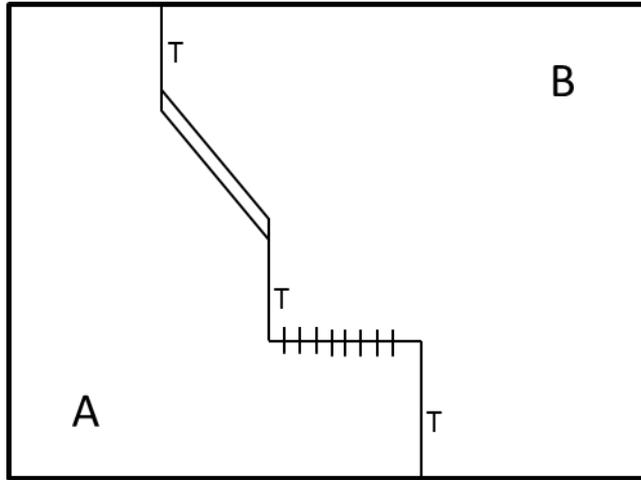
شكل (26-39): الحالة الثالثة في التمرين الثاني.



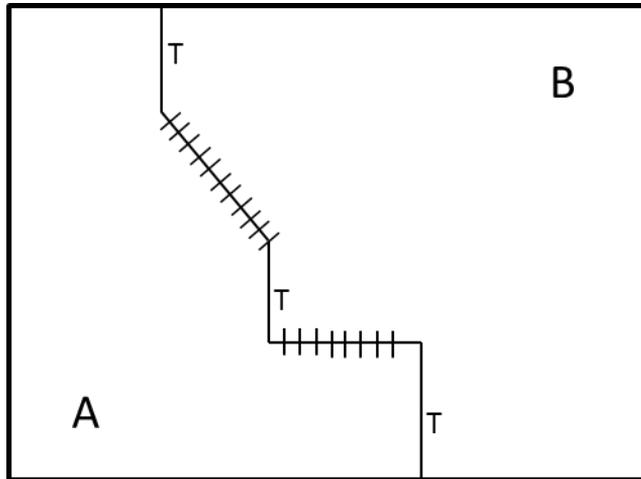
شكل (26-40): الحالة الرابعة في التمرين الثاني.



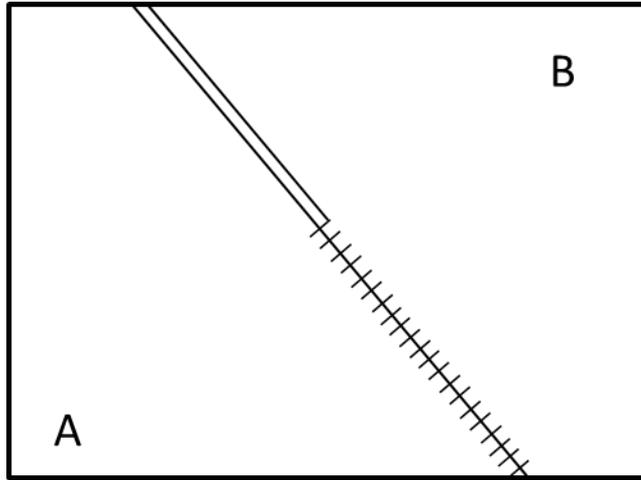
شكل (26-41): الحالة الخامسة في التمرين الثاني.



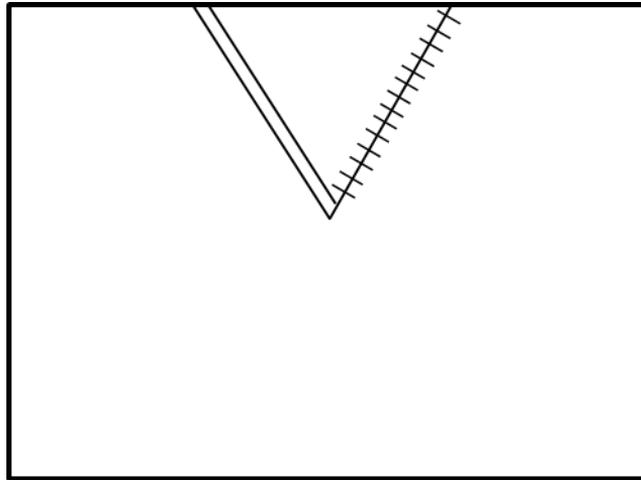
شكل (26 - 42): الحالة السادسة في التمرين الثاني.



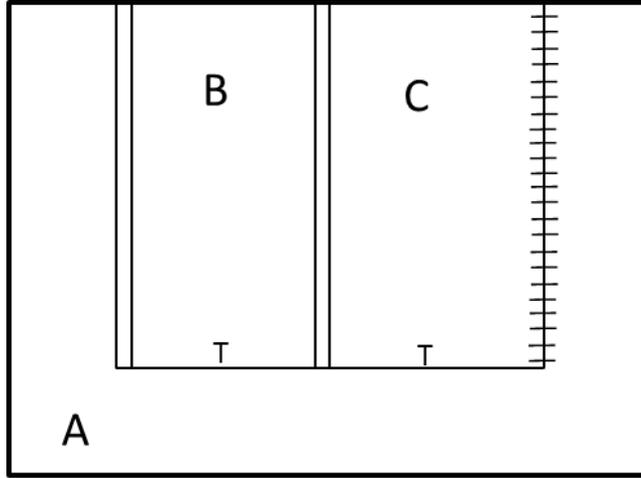
شكل (26 - 43): الحالة السابعة في التمرين الثاني.



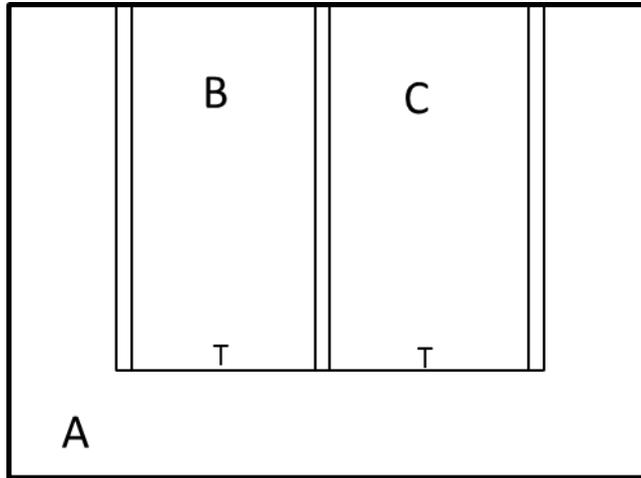
شكل (26-44): الحالة الثامنة في التمرين الثاني.



شكل (26-45): الحالة التاسعة في التمرين الثاني.



شكل (26 - 46): الحالة العاشرة في التمرين الثاني.



شكل (26 - 47): الحالة الحادية عشرة في التمرين الثاني.

### 3.7.26. التمرين الثالث:

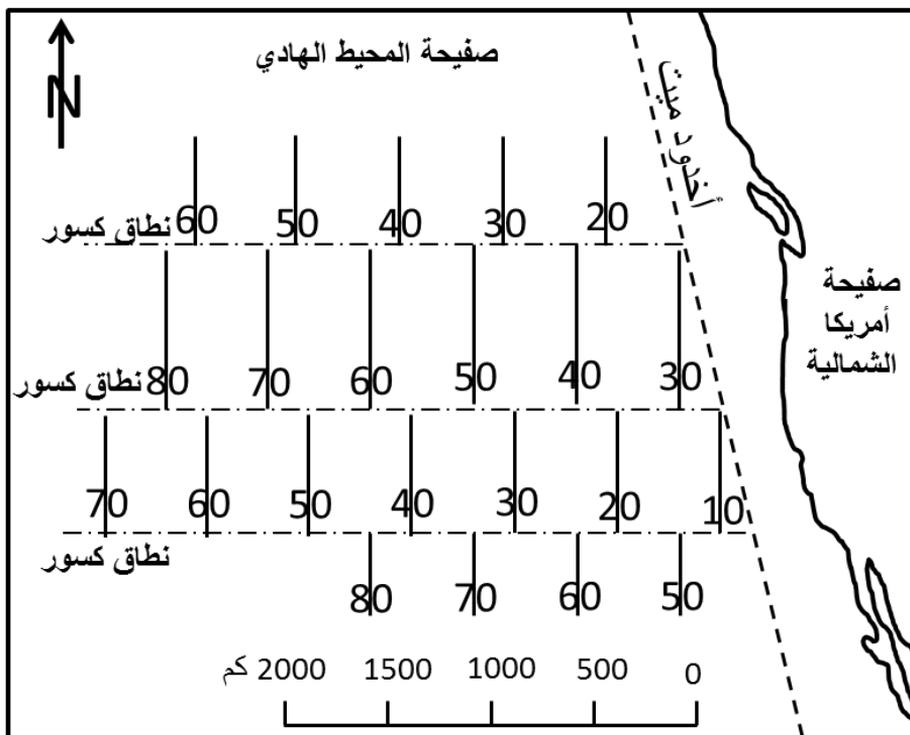
يبين الشكل (26- 48) نموذج الخطوطية المغنطيسية Magnetic lineation في الجزء المجاور لساحل كاليفورنيا وأوريغون وواشنطن من المحيط الهادي. ومن الواضح في هذا الشكل أن متساويات الأعمار تأخذ الاتجاه N-S وأنها مفصولة بنطاقات كسرية ذات اتجاه شرق - غرب. غير أن الملاحظ في هذا الشكل أيضاً أن متساويات الأعمار تصبح أحدث باتجاه الساحل الحالي لأمريكا الشمالية. وهذا يختلف عن نموذج المحيط الأطلنطي، حيث تكون متساويات الأعمار أحدث عند المركز وتصبح أقدم باتجاه السواحل. ولقد تم تفسير هذه الظاهرة من خلال وجود أخدود قديم غير نشيط حالياً في الموقع الموضح في الشكل. حاول أن تضع تاريخاً مناسباً للتطور التكتوني الصفيحي تشرح من خلاله هذا النموذج الخاص. ويهدف تسهيل الوصول إلى حل لهذه المسألة، افترض أن صفيحة المحيط الهادي وصفيحة أمريكا الشمالية لم تتحركا بالنسبة لبعضهما (وهذا الافتراض خاطئ طبعاً). افترض أيضاً أن قشرة جديدة تشكلت بشكل متناظر على جانبي ظهر محيطي.

أ- ارسم سلسلة من الخرائط توضح نموذج الصفائح عند  $t = 10$  م.ع و  $20$  م.ع و  $30$  م.ع و  $50$  م.ع.

ب- وضح كل من الظهور المحيطية والصدوع المحولة النشيطة ونطاقات الكسور غير النشيطة من خلال الرموز المناسبة.

ت- لون كل صفيحة بشكل منفصل.

ث- ضع جدولاً يبين معدلات (سرعات) الحركات النسبية فيما بين كل الصفائح وكذلك فيما بين الظهور والصفائح.



شكل (26-48): الخطوط المغنطيسية في الجزء المجاور لساحل أمريكا الشمالية من المحيط الهادي (Cox and Hart, 1986).



## الباب العاشر – الفصل السابع والعشرون

### الصفائح في فضاء السرعة Plates in Velocity Space

#### 1.27. خط السرعة The velocity line

إن تحديد سرعة حركة الصفائح يعدُّ من الأسس الرئيسية التي تركز عليها نظرية تكتونية الصفائح (Cox and Hart, 1986, Grottinger and Jordan, 2007, Karey et al., 2009; ) (Schettino, 2015). والمقصود بالسرعة هنا هي السرعة النسبية للصفائح بالنسبة لبعضها، حيث يمكن من خلال متساويات الأعمار على جانبي الظهر المحيطي والصدع المحول الذي يفصلها تحديد سرعة صفيحتين بالنسبة لبعضهما، غير أنها لا تعطي أية معلومات عن السرعة المطلقة للصفائح بالنسبة لجملة مرجعية قد تكون مثبتة مثلاً في الأجزاء العميقة للأرض تحت الغلاف الضعيف.

يمكن تمثيل السرعات لعدة أجسام من خلال توقيعها بشكل نقطة على "خط السرعة"، بحيث أن كل رقم يمثل سرعة أحد هذه الأجسام (Cox and Hart, 1986). ويهدف هذا الخط للتعبير عن السرعات النسبية بين هذه الأجسام، حيث نفترض أن سرعة أحد هذه الأجسام مساوية للصفر، وننسب سرعات بقية الأجسام إلى هذا الجسم.

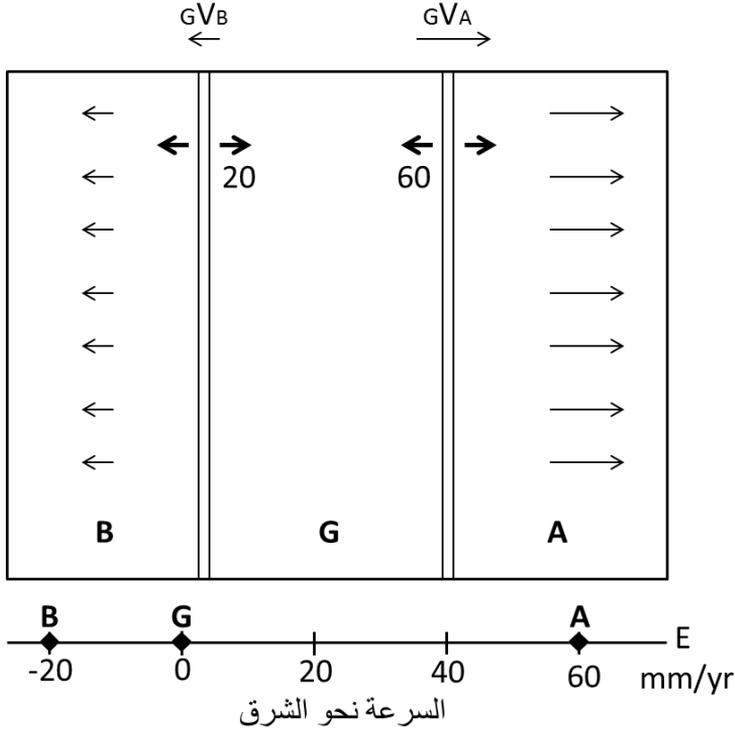
لنأخذ المثال الموضح في الشكل (27-1). نلاحظ هنا وجود ثلاث صفائح A و B و G تتحرك شرقاً أو غرباً بالنسبة لبعضها. لو اعتبرنا أن الصفيحة G ثابتة، وأن الصفيحة A تتحرك نحو الشرق، بينما تتحرك الصفيحة B نحو الغرب، فإننا سنجد أن الحدين الصفيحيين BG و GA يتمثلان بظهيرين محيطيين، وتكون سرعة الانتشار على امتدادهما كما يلي:

$$GVB = -20 \text{ mm/yr}$$

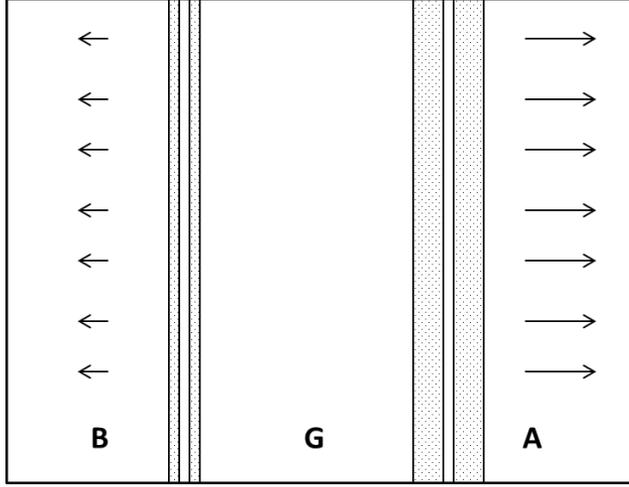
$$GVA = 60 \text{ mm/yr}$$

وهنا يأتي السؤال، هل يمكن أن يتكون ظهران محيطيان على جانبي صفيحة كالصفيحة G؟ للإجابة عن هذا السؤال، يجب أن نعلم أنه عندما تلتحم قشرة جديدة بالصفيحة G فإنها تتحرك جانبياً مبتعدة عن الظهر، ويمكن أن نتصور أن ذلك سيؤدي إلى انضغاط الصفيحة G وإلى تحديدها. ولكن ذلك يتناقض مع أسس نظرية تكتونية الصفائح، التي تتضمن أن الصفائح صلبة

ولن تتعرض للتشوه. ولحل هذه المشكلة يجب أن نتصور أن الظهرين المجاورين للصفحة G ليسا ثابتين، بل يتحركان مبتعدين عن الصفحة. ومثال ذلك ما يحدث بالنسبة للصفحة الإفريقية التي تحدها الظهور المحيطية بالدرجة الأولى. وبذلك نجد أن الصفحة G لن تتعرض للتقصير بالضغط، بل تنمو بالتحام مواد قشرية جديدة بها (شكل 27-2).

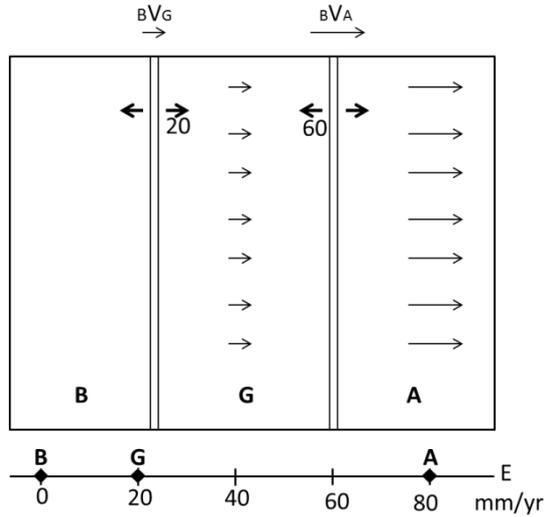


شكل (27-1): سرعات الصفائح A و B و G بالنسبة لبعضها. اقرأ النص.

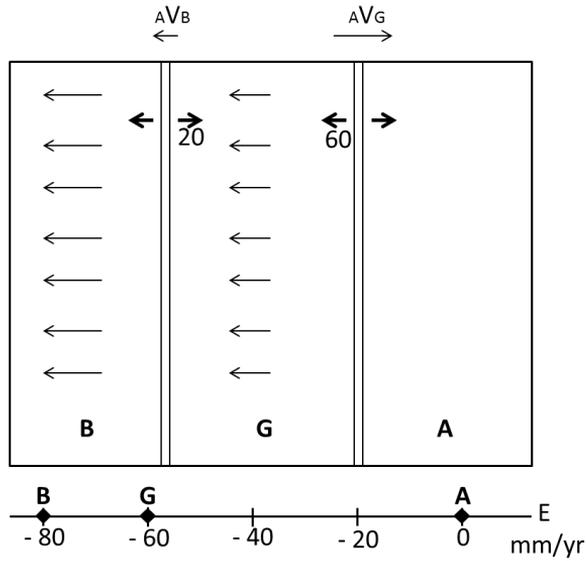


شكل (27-2): نمو الصفحة G التي يجاورها ظهران محيطيان. يتحرك الظهران مبتعدين عن الصفحة G بنصف سرعة الصفحتين A و B. اقرأ النص.

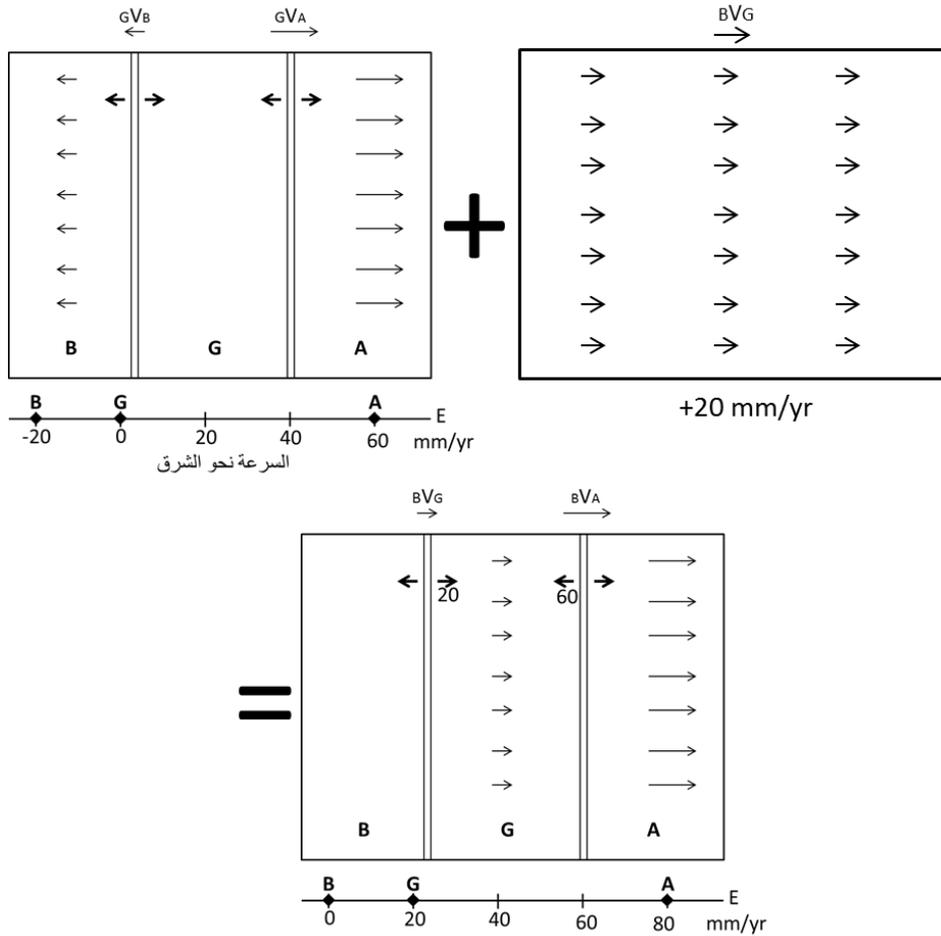
والآن، نفترض أن الصفحة B هي الثابتة، أي أن سرعتها تساوي الصفر (شكل 27-3). يمكن تشبيه هذه الحالة بجعل الصفحة الأمريكية الجنوبية مرجعاً ثابتاً للحركة. فلو سافرنا باتجاه الشرق، سنجد أن السرعة نحو الشرق تزداد بخطوة في كل مرة نعبّر فيها واحداً من الظهر المحيطية. وكذلك يحصل وضع مشابه لو أعطينا الصفحة A سرعة الصفر (شكل 27-4). وهكذا لو أن أيّاً من الصفائح أعطيت سرعة الصفر، فإن السرعات النسبية للصفائح وسرعات الانتشار عند الظهر المحيطية تبقى نفسها. وإن تغيير موقع الصفر على خط السرعة يكافئ ببساطة إضافة حقل السرعة الموحد نفسه إلى كل الصفائح (شكل 27-5). وهذا ما يمكن أن نفعله في كل مرة نريد فيها رؤية المسألة من وجهة نظر مختلفة.



شكل (27-3): السرعات النسبية الموضحة نفسها في الشكل (28-2)، غير أن الصفر أُزِيح على مستقيم السرعة.



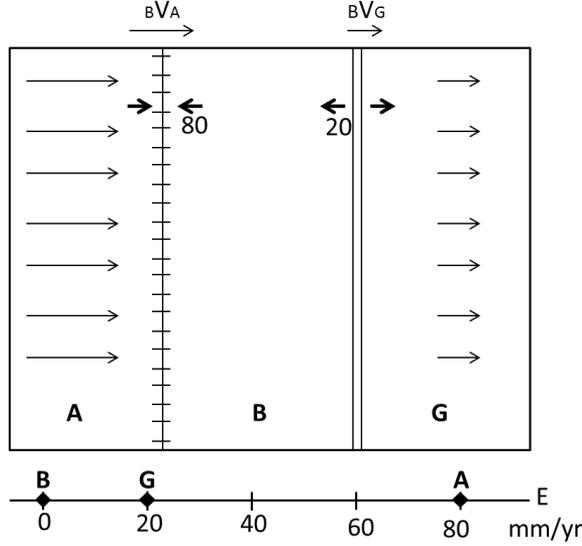
شكل (27-4): السرعات النسبية الموضحة نفسها في الشكل (27-2)، غير أن الصفر أُزِيح على مستقيم السرعة.



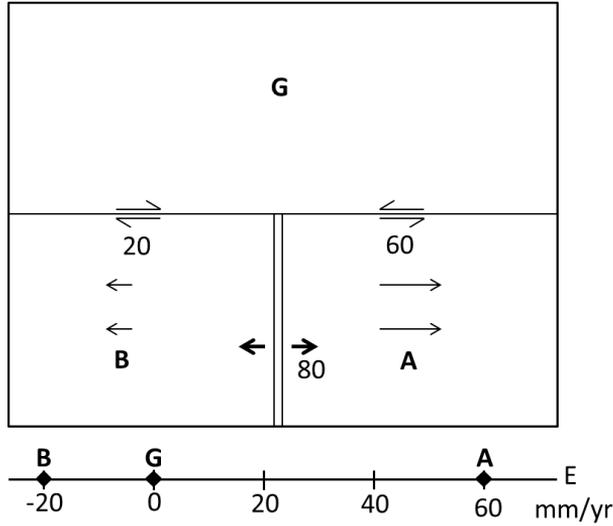
شكل (27-5): إزاحة مركز خط السرعة يكافئ إضافة حقل سرعة ثابت لكل الصفائح.

لو أعدنا ترتيب الصفائح مع المحافظة على سرعاتها كما في السابق. سنجد أن الحدين الصفيحيين لن يعودا بشكل ظهريين محيطيين بل سيصبحان إما أخدودين أو أن أحدهما أخدود والآخر ظهر محيطي. ويتطابق المثال الموضح في الشكل (27-6) بشكل تقريبي مع حال صفيحة نازكا Nazca plate (A) والصفيحة الأمريكية الجنوبية (B) والصفيحة الإفريقية (G). وكذلك لو أجرينا أية تغييرات أخرى في ترتيب الصفائح (مع المحافظة على السرعات الأصلية) فإن ذلك سيؤدي إلى تغير في طبيعة الحدود بينها. فمثلاً سيتكون صدع محول من خلال جعل

بعض الحدود الصفيفية باتجاه شرق - غرب. ونلاحظ في الشكل (27- 7) أن الصفيحة G محاطة بصدعين محولين أحدهما يساري والآخر يميني. فلو افترضنا الصفيحة G ثابتة فإن الصفيحة B تتحرك نحو الغرب بسرعة 20 ملم/عام، أما الصفيحة A فتتحرك نحو الشرق بسرعة 60 ملم/عام . بينما يتحرك الظهر المحيطي الواقع فيما بينهما نحو الشرق بسرعة 20 ملم/عام بالنسبة للصفيحة G وبسرعة 40 ملم/عام بالنسبة للصفيحة B. إن مخططات السرعة للصفائح على الأرض الحقيقية أكثر تعقيداً مما وصفناه آنفاً، وذلك لعدة أسباب. يتمثل أحدها في أن عدد الصفائح الكلي كبير جداً، كما أن حركات الصفائح ليست مقتصرة على اتجاه واحد.



شكل (27- 6): أدى تغيير ترتيب الصفائح إلى تغيير نمط الظهور والأحادي، رغم بقاء السرعات النسبية نفسها.



شكل (27-7): السرعات نفسها إنما بهندسية صفيحية مختلفة. أدى ذلك إلى تكون صدع محول على امتداد حد صفيحي باتجاه شرق - غرب.

## 2.27. مستوى السرعة The velocity plane

إن التعامل مع الصفائح التي تتحرك على مستوي يتطلب توسيع التحليل السابق من كونه أحادي البعد إلى ثنائي البعد. وللتعبير عن السرعة النسبية لصفحتين F و B تتحركان على مستوي، فإن هناك حاجة لمتجهة سرعة Velocity vector (Cox and Hart, 1986). وهذه تتمثل عادة بسهم سرعة يتميز بطول واتجاه محددين. سنصطلح هنا على التعبير عن طول المتجهة بالرمز المائل  $BVF$  وهو رقم بسيط، أما التعبير عن كامل المتجهة فسنستخدم الرمز الثخين  $BVF$  (أي سرعة F بالنسبة إلى B).

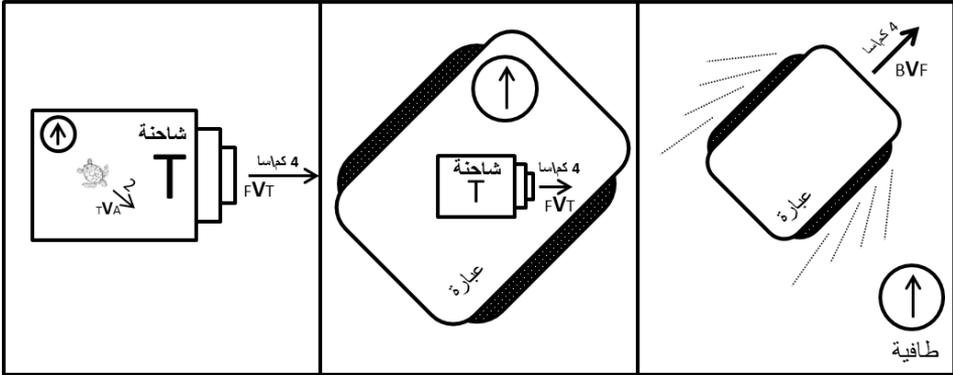
يعطي الشكل (27-8) مثلاً عن هذه المتجهات. لو أن عبارة (F) تتحرك نحو الشمال الشرقي بالنسبة لطافية B بسرعة  $BVF = 4$  كم/سا، نلاحظ مايلي:

- سرعة العبارة بالنسبة للطافية  $BVF$ : تبدو العبارة F متحركة نحو الشمال الشرقي بسرعة 4 كم/سا.
- سرعة الشاحنة بالنسبة للعبارة FVT: تساوي 4 كم/سا نحو الشرق.

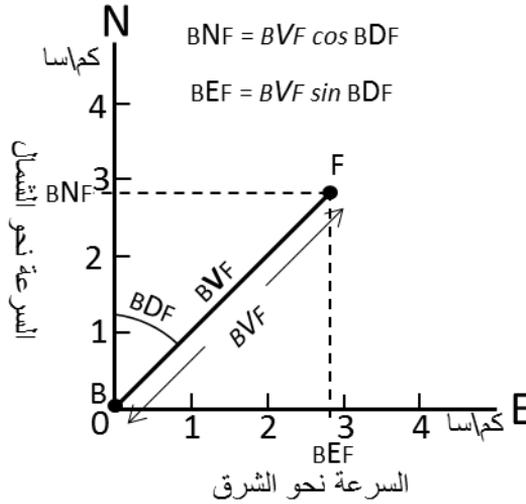
- سرعة السلحفاة بالنسبة للشاحنة TVA: تساوي 2 كم/سا نحو الجنوب الشرقي.

يمكننا إظهار متجهة السرعة  $BVF$  على مستوي السرعة الذي يمثل محوره الشاقولي السرعة نحو الشمال، بينما يمثل محوره الأفقي السرعة نحو الشرق (شكل 27-9)، وبالتالي يمكننا حساب مركبتي هذه المتجهة، التي يكون لها مركبتان في هذه الحالة: مركبة شمالية  $BNF = 2.82$  كم/سا ومركبة شرقية  $BEF = 2.82$  كم/سا. وبالإضافة لذلك يمكن من خلال مستوي السرعة جمع متجهات السرعات المختلفة، حيث يبين الشكل (27-10) مثلاً عن كيفية جمع متجهتي السرعة العائدتين للعبارة وللشاحنة T للحصول على متجهة السرعة للشاحنة بالنسبة للطافية، وهذا ما تعبر عنه المعادلة التالية:

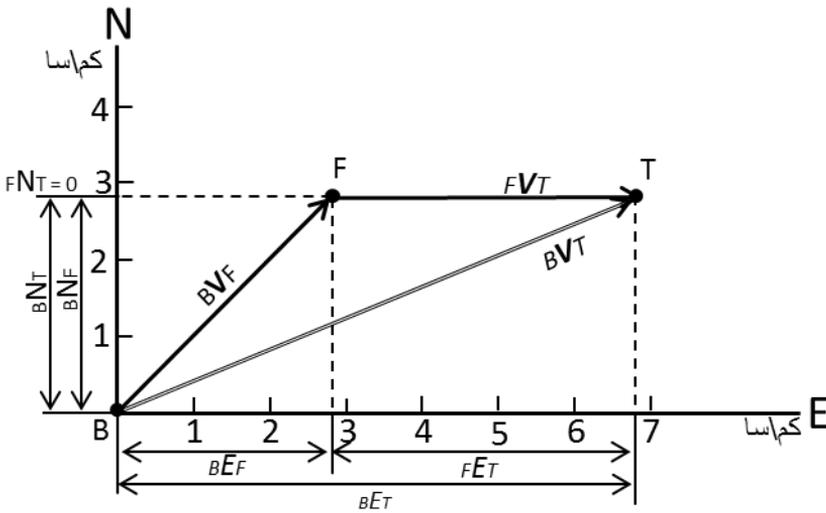
$$BVT = BVF + FVT$$



شكل (27-8): مجموعة متجهات السرعة النسبية.



شكل (27-9): متجهات السرعة النسبية ثنائية البعد (إحداثيات قطبية). يصف طول المتجهة  $BVF$  سرعة العبارة بالنسبة للطافية (NE) أما  $BDF$  فيصف جهة حركة العبارة بالنسبة للطافية (NE) أي أن  $BDF = 45^\circ$ .

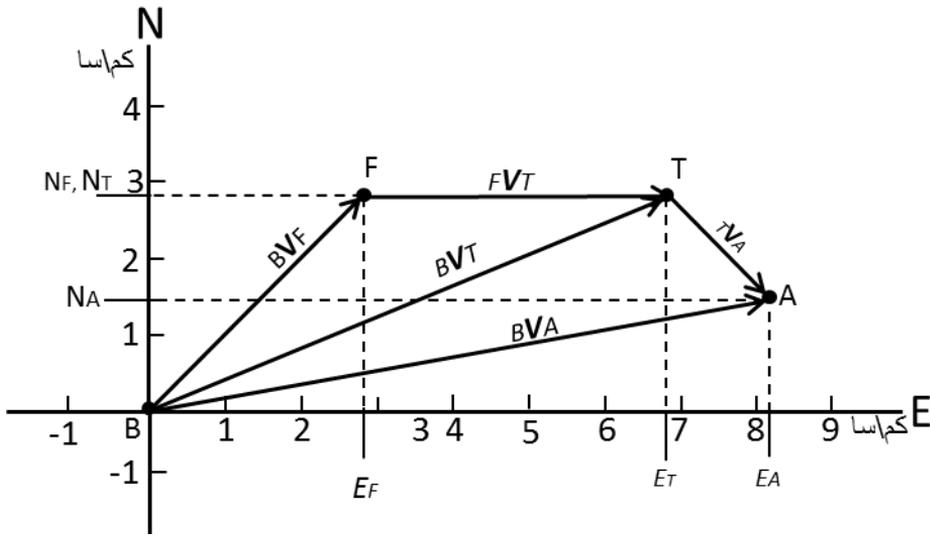


شكل (27-10): جمع المتجهات: جمع متجهتي السرعة العائدين للعبارة F وللشاحنة T.

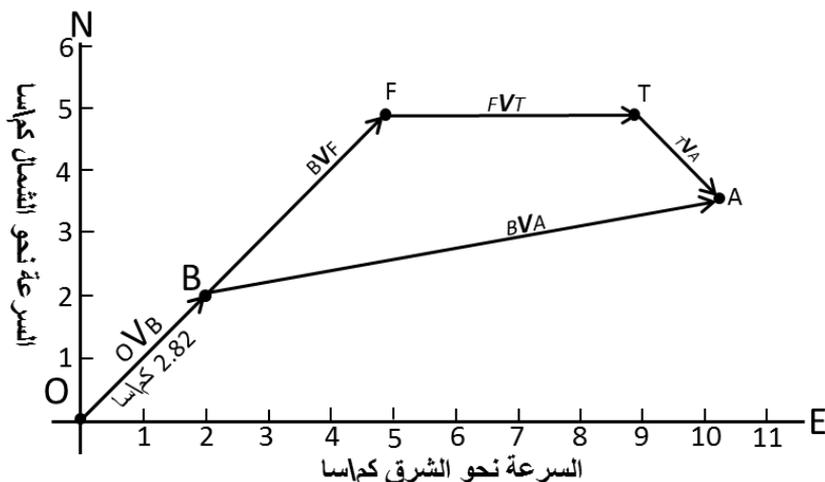
وهكذا يمكن وصف السرعات النسبية لكل من السلحفاة والشاحنة والعبارة والطافية من خلال توقييعها على فضاء سرعة ثنائي البعد Two dimensional velocity space وهو ما يسمى "مستوي السرعة" (شكل 27-11)، حيث يلاحظ أن سرعة السلحفاة بالنسبة للطافية تعطى بالعلاقة:

$$BVA = BVF + FVT + TVA$$

تفترض الحالة السابقة أن سرعة الطافية تساوي الصفر. ولنفترض الآن أن الطافية تتحرك بسبب التيارات البحرية بسرعة 2.82 كم/سا نحو الشمال الشرقي، وذلك بالنسبة لقاع البحر (شكل 27-12). لنجد أن سرعة قاع البحر O ستقع عند مركز الإحداثيات في مستوي السرعة. وهذا يعني أن مجمل المخطط الذي لاحظناه في الشكل (27-11) سيزاح بقيمة 2.82 كم/سا، مع المحافظة على أطوال واتجاهات كل المتجهات الأخرى كما كانت من قبل.



شكل (27-11): مستوي السرعة لكل من السلحفاة والشاحنة والعبارة والطافية.



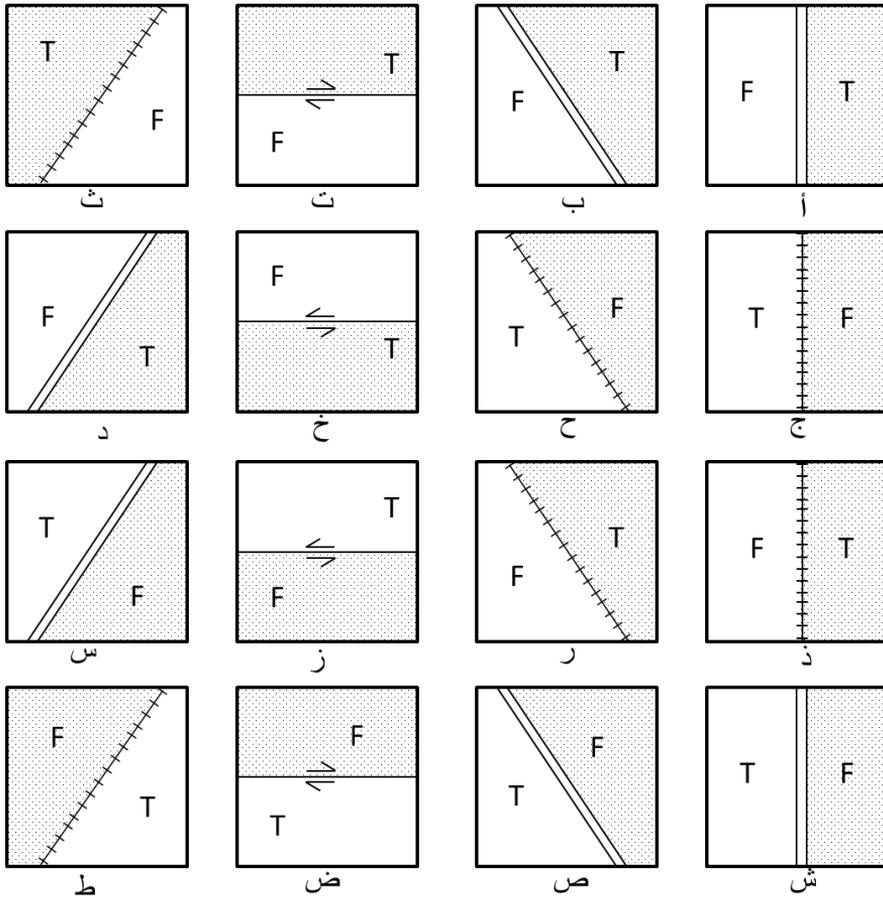
شكل (27-12): تتحرك الطافية نحو الشمال الشرقي. نلاحظ أن النقاط F و T و A أزيحت كلها بشكل مواز لـ B، بحيث أن اتجاهات وأطوال متجهات السرعات النسبية لم تتغير.

### 3.27. الصفائح في فضاء السرعة Plates in Velocity Space

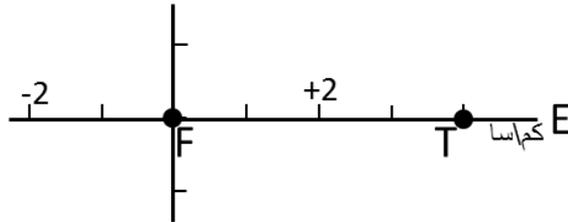
لنقم بقص ورقة إلى ثلاث قطع F و T و A. ولنحركها بحركات متوافقة مع السرعات النسبية الموضحة في الشكل (28-12). ونبدأ بافتراض أن إحدى هذه القطع (الصفائح)، لنقل الصفحة F، ذات سرعة بقيمة الصفر. ثم نحرك الصفحة T مثلاً بالسرعة الموضحة في الشكل (27-12). نلاحظ أنه ليس هناك من مشكلة بالقيام بهذه الخطوات. غير أن الجديد الآن يتمثل بتحديد طبيعة الحد فيما بين الصفيحتين F و T.

#### 1.3.27. التمرين الأول:

ادرس المخططات (أ - ط) الموضحة في الشكل (27-13) والتي تمثل الصفيحتين F و T. ثم بيّن أيضاً أنها يتوافق مع مخطط فضاء السرعة الموضح في الشكل (27-14) وأياً منها غير متوافق (Cox and Hart, 1986).



شكل (27-13): مخططات توزيع الصفائح والحدود فيما بينها والمستخدمه لحل التمرين الأول (تشير الإشارات العرضانية إلى الحدود التقريبية).

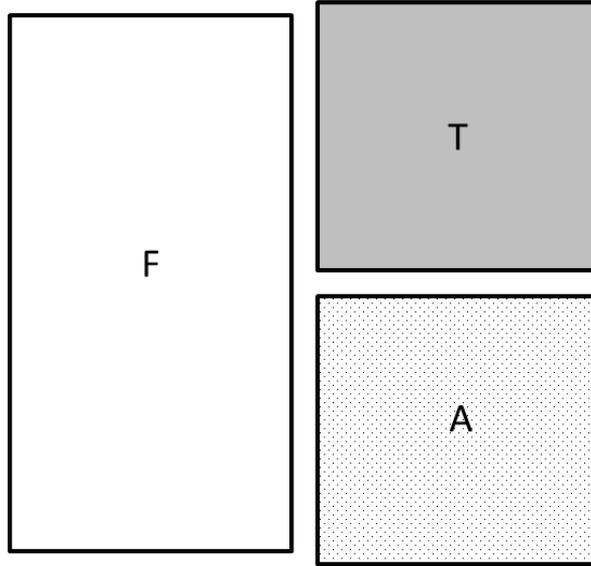


شكل (27-14): مخطط فضاء السرعة المستخدم لحل التمرين الأول. لاحظ أن الصفيحة T تتحرك نحو الشرق بالنسبة للصفيحة F.

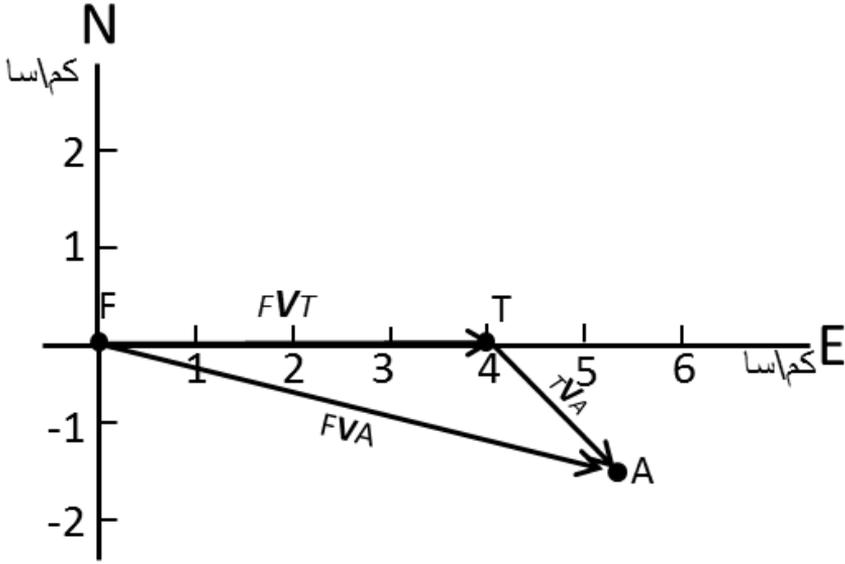
### 2.3.27. التمرين الثاني:

يوضح الشكل (28-15) ثلاث صفائح A و F و T. لنفترض أن حركات هذه الصفائح الثلاث متوافقة مع مخطط فضاء السرعة (شكل 27-16)، وذلك بحيث تكون الصفيحة F هي الثابتة دوماً، وتكون الصفيحتان الأخريان متحركتين. حدد ما إذا كانت الحدود الصفيحية تباعدية (ظهر محيطي) أم تقاربية (أخدود) أم محافظة (صدع محول). كرر هذه المسألة بعد تدوير كل الصفائح بزاوية 90° بجهة دوران عقارب الساعة، ثم كرر التدوير حتى تعود الصفائح إلى وضعها الأصلي.

يقوم الجيولوجيون بهذا العمل عادة بطريقة أخرى. وذلك لأن مواقع الحدود بين الصفائح (ثلاث صفائح مثلاً) تكون معروفة من خلال الملاحظات الجيولوجية، كما أن سرعة بعض منها تكون معروفة أيضاً. و يمكن بالتالي استخدام هذه المعطيات لإنشاء مثلث يمثل فضاء السرعة، وذلك بهدف تحديد السرعات غير المعروفة واختبار التوافق الداخلي للملاحظات الجيولوجية. وبذلك تعد مخططات فضاء السرعة من أهم الأدوات التي يمكن الاعتماد عليها في حل مسائل تتعلق بالحركات النسبية فيما بين الصفائح.



شكل (27-15): الصفائح الثلاث المستخدمة في حل التمرين الثاني.



شكل (27-16): مخطط فضاء السرعة لحل التمرين الثاني.

### 3.3.27. التمرين الثالث:

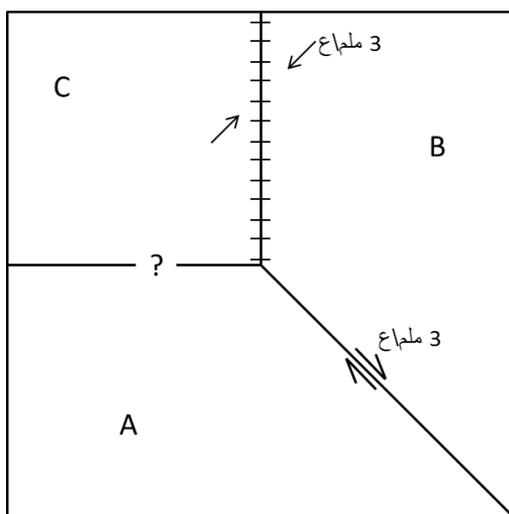
يمثل الشكل (27-17) كيفية توزع الصفائح A و B و C، ويتبين في هذا الشكل أن الحد AB صدع محول يميني بسرعة 3 ملم/ع. أما الحد BC فيتمثل بأخدود تتقارب على جانبيه الصفيحتان B و C بشكل منحرف بزاوية 45° إلى الشرق من الشمال. والمطلوب:

أ- قم بتوقيع حركات الصفائح الثلاث على مخطط فضاء السرعة (شكل 27-18).

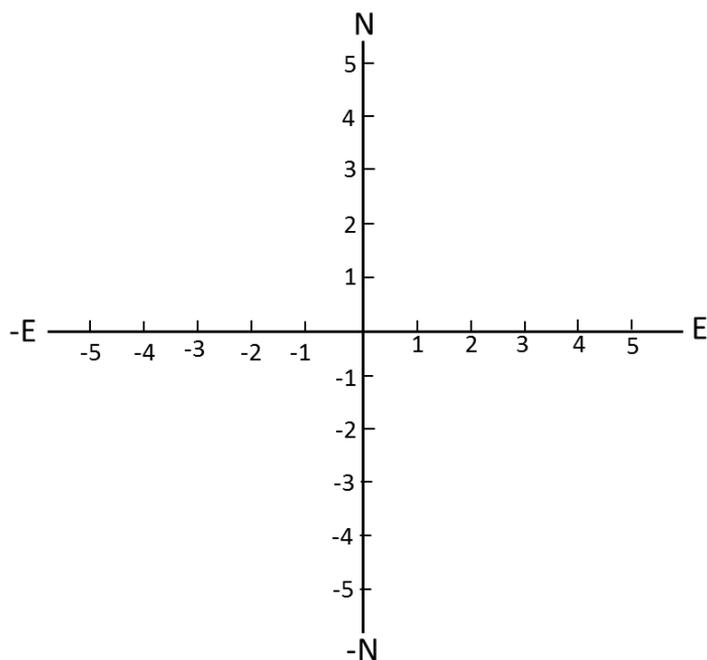
ب- افترض أن الصفيحة A ثابتة وقم بتوقيع متجهتي حركتي الصفيحتين B و C موضعاً سرعة كل منهما بالنسبة للصفيحة A.

ت- ماهي طبيعة الحد فيما بين الصفيحتين A و C.

ث- أوجد AVC.



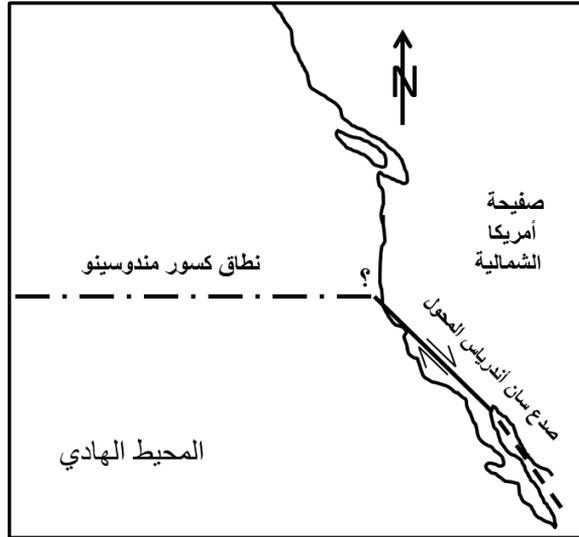
شكل (27- 17): توزيع الصفائح وحركاتها النسبية للاستخدام في التمرين الثالث (استخدمت الإشارات العرضانية للدلالة على الحد التقاربي).



شكل (27- 18): مخطط فضاء السرعة للاستخدام في حل التمرين الثالث.

## مثال:

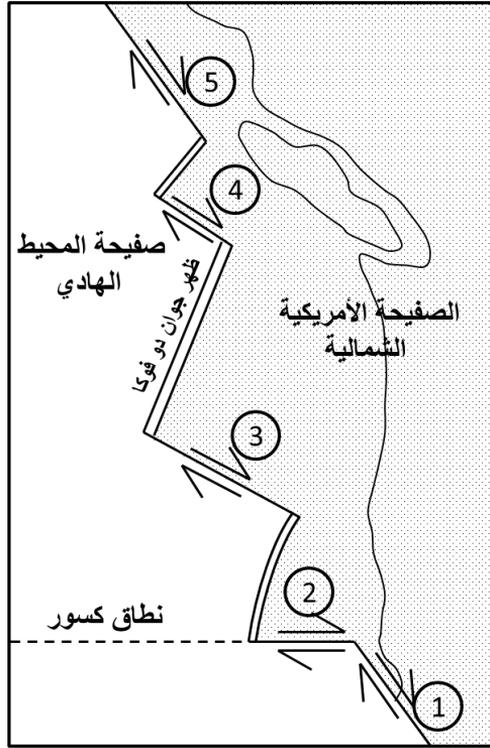
إن ما يمكن استنتاجه من التمارين السابقة أن طبيعة الحدود فيما بين الصفائح تعتمد على الهندسية الأولية للصفائح. يبين المثال التالي أهمية تحليل الحركات الصفيفية في فضاء السرعة (Cox and Hart, 1986). يتميز صدع سان أندرياس بزلزل قوية جداً وبانزياحات جانبية يمينية كبيرة للتشكيلات الجيولوجية على طولها حتى خط عرض 40° شمالاً. وأما امتداده نحو الشمال بعد ذلك إلى المنطقة البحرية لم يكن واضحاً. وكان مفاجئاً أن نطاق كسور مندوسينو Mendocino fracture zone ينتهي تماماً في هذا الموقع عند ساحل كاليفورنيا. وعلاوة على ذلك فإن كثيراً من الزلازل تحدث عند هذه النهاية الشرقية لنطاق كسور مندوسينو. تؤدي هذه الحقائق للاعتقاد بإمكانية تغيير صدع سان أندرياس لاتجاهه عند 40° شمالاً من NW-SE إلى E-W (شكل 27-19). وهذا ما يتطلب تشوهاً هائلاً للقشرة الأرضية عند نقطة انعطاف الصدع. وهذا ما يصعب تصوره. ولذلك حاول الجيولوجيون إيجاد طريقة أخرى لشرح هذه البنية.



شكل (27-19): هل يمثل نطاق كسور مندوسينو امتداداً لصدع سان أندرياس المحول؟

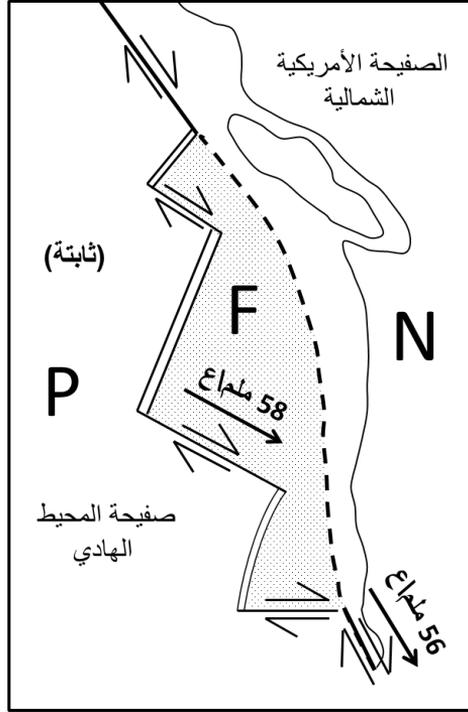
حدث الاختراق الأول عندما وجد الجيوفيزيائيون أن انتشار قاع المحيط حدث على بعد عدة مئات من الكيلومترات إلى الغرب من ساحل أوريغون وواشنطن على امتداد ظهر جوان دو فوكا

Juan de Fuca Ridge، الذي اعتُبر أنه الحد فيما بين صفيحة المحيط الهادي والصفيحة الأمريكية الشمالية (شكل 27-20). ورغم ذلك فقد برزت مشاكل عديدة في هذا النموذج، حيث تبين أن بعضاً من الصدوع المحولة على امتداد هذا الحد غير متوازية. ونحن نعلم حالياً أن نطاق كسور مندوسينو (الجزء 2 من الصدوع المحولة، شكل 27-20) لا يوازي الجزء 3 لأن الغلاف الصخري فيما بين هذين الصدعين المحولين مجزأً إلى صفائح صغيرة Microplates معقدة. ورغم ذلك، وحتى لو أهملنا الجزء 2، فإننا سنجد أن الجزأين 3 و 4 متوازيان، وكذلك الجزأين 1 و 5، إلا أن هذين الأخيرين لا يوازيان الجزأين 3 و 4. ولذلك يبدو وكأن اكتشاف ظهر جوان دو فوكا لن يحل المشكلة.

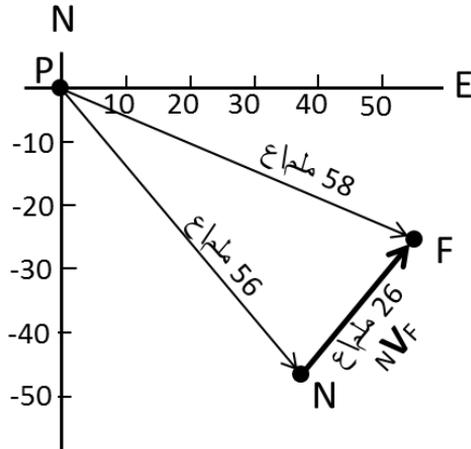


شكل (27-20): ظهر جوان دو فوكا وبعض الصدوع المحولة (2 و 3 و 4) التي تصل صدع سان أندرياس (1) بصدع محول رئيس إلى الغرب من كندا. لاحظ أن هذه الصدوع المحولة غير متوازية كلها فيما بينها.

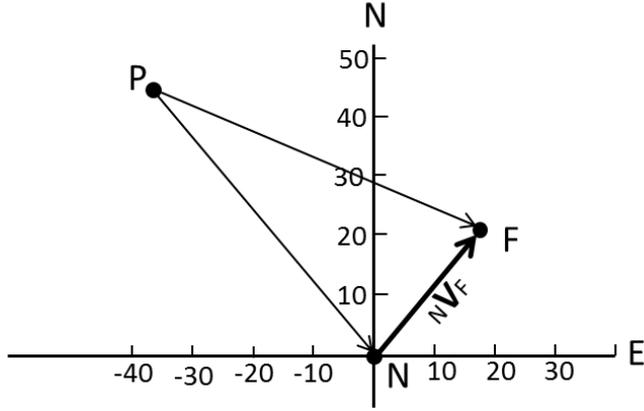
حدث الاختراق الثاني حينما وضع الجيوفيزيائيون السؤال التالي: هل من الممكن أن ذلك الجزء من قاع المحيط والمحصور فيما بين ظهر جوان دو فوكا وساحل أمريكا الشمالية يمثل صفيحة منفصلة؟ (صفيحة F في الشكل 27-21). وهكذا لو رسم الحد فيما بين الصفيحة F والصفيحة الأمريكية الشمالية كما هو موضح في الشكل (27-21) فإن كل الصدوع المحولة ستكون متوافقة فيما عدا الجزء 2 (الموضح في الشكل 27-20). وهكذا يبدو أن الجزأين 1 و 5 موازيان للحركة بين صفيحة أمريكا الشمالية وصفيحة المحيط الهادي، أما الجزأين 3 و 4 فيوازنان الحركة بين F وصفيحة المحيط الهادي. ولكن كان على الباحثين الإجابة عن سؤال مهم: ماهي طبيعة الحد بين الصفيحتين F و N، ظهر أم أخدود أم صدع محول؟ ولحل هذه المشكلة استخدم الباحثون مستوي السرعة مفترضين أن صفيحة المحيط الهادي ثابتة. وقد استخدموا المعطيات الجيوديزية على امتداد صدع سان أندرياس (56 ملماع) لمعرفة متجهة السرعة النسبية فيما بين N و P، ومعطيات متساويات الأعمار المغنطيسية واتجاه الصدوع المحولة 3 و 4 لمعرفة متجهة السرعة فيما بين F و P (58 ملماع). ووضعوا بناء على ذلك مخطط مستوي السرعة الموضح في الشكل (27-22). وبناء على ذلك تبين أن سرعة F بالنسبة لـ N تساوي 26 ملماع باتجاه NE. وبعد ذلك كان بالإمكان تحديد طبيعة الحد فيما بين N و F. فلو افترضنا N ثابتة وذلك بإزاحة N إلى مركز إحداثيات مخطط السرعة (شكل 27-23) فإنه بالإمكان قراءة متجهتي السرعة لنسبية لـ P و F بالنسبة لـ N بسهولة. وبذلك نرى أن F تقترب باتجاه الحد مع N، وبالتالي فإن الحد بين الصفيحة الأمريكية الشمالية وصفيحة جوان دو فوكا يتمثل بأخدود (شكل 27-24).



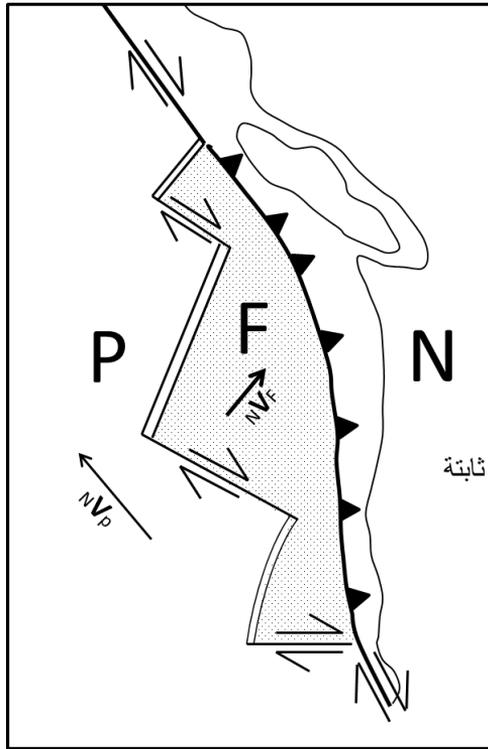
شكل (21- 27): إن وجود الصفحة F يحل جزءاً كبيراً من مشكلة عدم التوافق في اتجاهات الصدوع المحولة.



شكل (22- 27): مخطط السرعة لحركة كل من F و N بالنسبة إلى P، واستنتاج حركة F بالنسبة إلى N ( $NV_F = 26$  ملم/ع نحو الشمال الشرقي، انظر الشكل التالي).



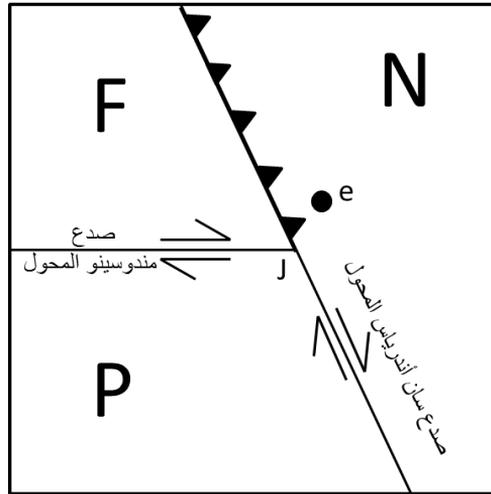
شكل (23 - 27): حركة F بالنسبة إلى N .



شكل (24 - 27): إن افتراض ثبات الصفيحة الأمريكية الشمالية يؤدي إلى أن الحركة النسبية لصفيحة جوان دو فوكا تحدث باتجاه الشمال الشرقي، ولذلك فإن الحد بينهما يتمثل بأخدود.

#### 4.27. الروابط الثلاثية Triple Junctions

هي نقاط تلتقي عندها ثلاث صفائح (Cox and Hart, 1986, Grottinger and Jordan, ) مثلها تلك النقطة (J) التي تلتقي عندها صفيحة المحيط الهادي والصفيحة الأمريكية الشمالية وصفيحة جوان دو فوكا (شكل 25-27). وإذا تحركت J نحو الشمال على طول الساحل ستتحول بيئة النقطة e إلى بيئة صدع محول بالمقارنة مع بيئتها الحالية (انغراز). أما إذا بقيت J ثابتة أو تحركت نحو الجنوب، فإن e ستبقى في بيئة أخذود. وما نهدف إليه الآن يتمثل بكيفية حساب السرعات للروابط الثلاثية.

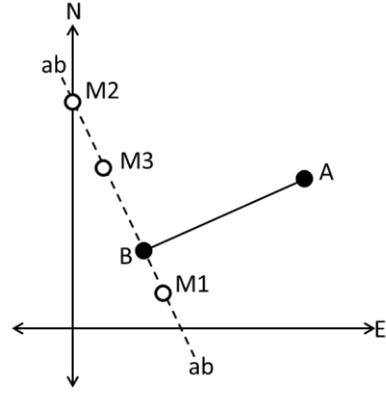
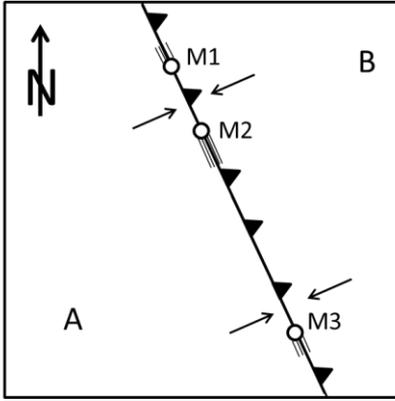


شكل (25-27): الرابطة الثلاثية بين صفيحة المحيط الهادي (P) والصفيحة الأمريكية الشمالية (N) وصفيحة جوان دو فوكا (F)، حيث يلتقي صدعان محولان وأخذود. ويلاحظ أنه إذا تحركت الرابطة الثلاثية نحو الشمال الغربي فإن البيئة التكتونية عند e ستتغير من صفة انغراز إلى صفة صدع محول (Cox and Hart, 1986).

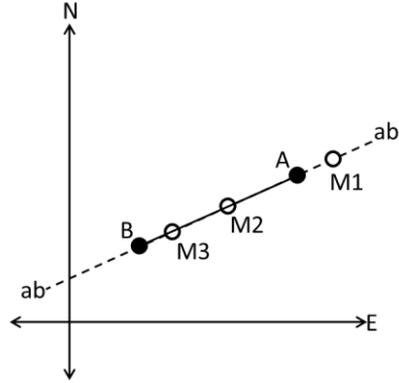
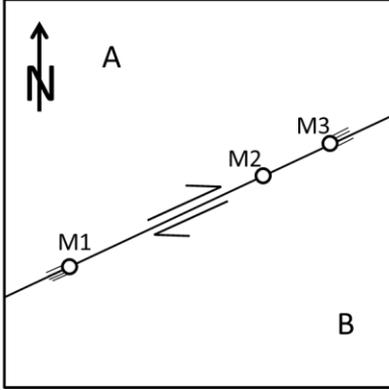
يبلغ العدد الأقصى للصفائح التي تلتقي عند الرابطة ثلاثاً، ولم يلاحظ على سطح الأرض أن هناك نقطة التقى عندها أربعة صفائح أو أكثر. ولفهم سبب ذلك لنجر تجربة بسيطة: لو رسمنا خطين متعامدين (على أنهما يمثلان حدوداً صفيحية) لوجدنا أن أربع صفائح ستلتقي عند نقطة تقاطعهما، أي أن هذه النقطة تمثل رابطة رباعية Quadruple junction. لنفترض الآن أن

أحد هذين الخطين يمثل صدعاً محولاً، ونقص الورقة على طوله إلى جزأين (صفيحتين)، ونزوح هذين الجزأين جانبياً بالنسبة لبعضهما. فما هي النتيجة؟ سنجد أن كل الروابط الرباعية على طول هذا الخط ستتحول إلى ثلاثية.

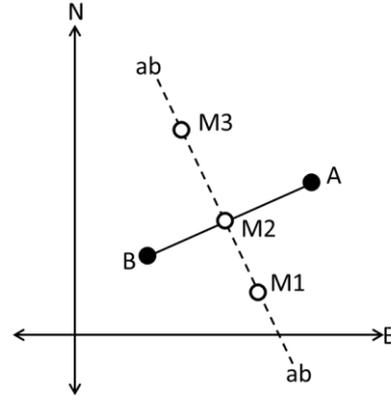
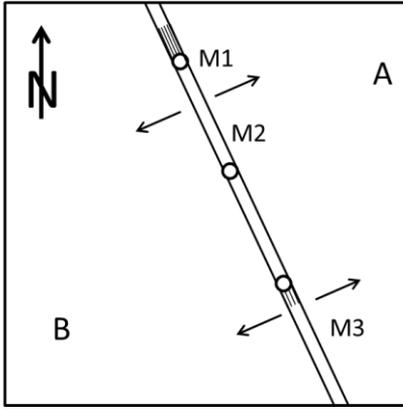
تتميز الروابط الثلاثية بأنها تهاجر على طول الحدود الصفيحية (كما لو أنها كرات تتدحرج بشكل مواز للحد). وبما أن لها سرعات، فإنه يمكن معرفة الكثير من صفاتها من خلال توقع حركاتها على مخطط فضاء السرعة. ولفهم مميزات الروابط الثلاثية، لننتصر كرات زجاجية تتدحرج على طول الحد بين صفيحتين وبسرعات مختلفة. ويتوقع هذه السرعات في مخطط فضاء السرعة، يتبين أنها توجد على خطوط مستقيمة (خطوط السرعة، شكل 27-26 و 27-27 و 28-27). وتبقى الكرة (الرابعة الثلاثية) على الحد الصفيحي إذا كانت سرعتها متطابقة مع أية نقطة من خط السرعة (الخط المتقطع ab). وتعتمد علاقة "خطوط السرعة" بسرعة الصفيحتين على طبيعة الحد بين الصفيحتين، إذا كان أخدوداً أم صدعاً محولاً أم ظهراً محيطياً. فالكرات التي تتدحرج على طول الأخاديد تتموقع في فضاء السرعة على خط يمر عبر سرعة الصفيحة العلوية ويكون منحاهم باتجاه الأخدود نفسه (شكل 27-26). أما الكرات التي تتدحرج على طول صدع محول فإنها تتموقع في فضاء السرعة على خط يمر عبر سرعتي كلتا الصفيحتين ويتجه باتجاه الصدع المحول نفسه (شكل 27-27). وفي حال كون الكرات تتدحرج على طول ظهر محيطي بين صفيحتين متباعدين فإنها تتموقع في فضاء السرعة على العمود المنصف لمتجهة السرعة بين الصفيحتين (شكل 27-28، بافتراض أن الانتشار متناظر ومتعامد مع الظهر).



شكل (26-27): سرعات الكرات الزجاجية التي تتدحرج على طول الحدود. يكون خط السرعة الخاص بالآخدود موازياً للآخدود، وبما أن الآخدود يتحرك مع الصفيحة الراكبة، فإنه يمر عبر النقطة (النقطة B) التي تمثل الصفيحة الراكبة في فضاء السرعة. ولا تتطلب هذه العلاقة أن يكون اتجاه التقارب متعامداً مع الآخدود (Cox and Hart, 1986).

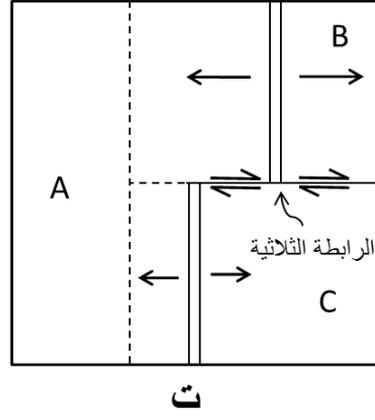
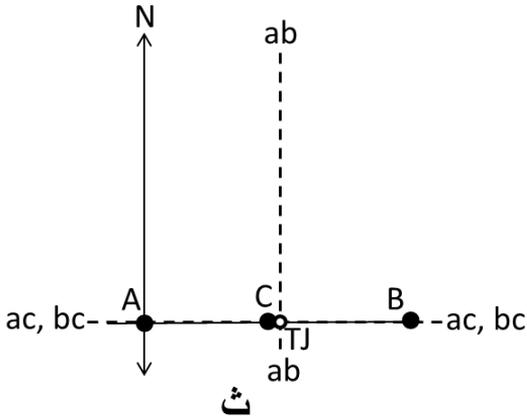
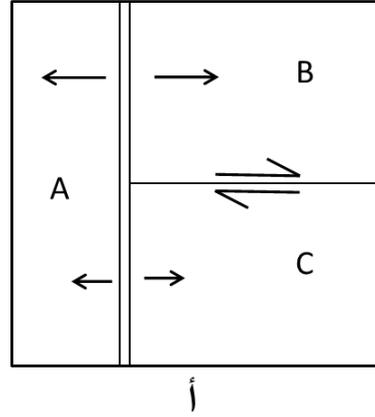
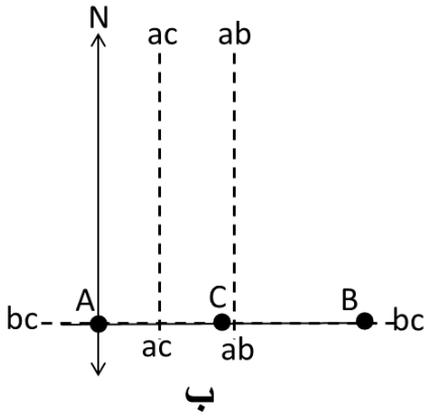


شكل (27-27): يكون خط السرعة الخاص بالصدع المحول موازياً للصدع المحول، وبما أن الصدع المحول لا يتحرك بالنسبة لأي من الصفيحتين، فإنه يقع على الخط الذي يمر من A و B، اللتين تعبران عن السرعة النسبية للصفيحتين A و B (Cox and Hart, 1986).



شكل (27- 28): يكون خط السرعة  $ab$  الخاص بالظهر المحيطي موازياً للظهر المحيطي. وإذا كان الانتشار متناظراً ومتعامداً مع اتجاه الظهر (كما هو موضح في هذا الشكل) فإن  $ab$  يتمثل بالمنصف المتعامد مع الجزء  $AB$  الذي يوضح السرعة النسبية للصفحتين  $A$  و  $B$  (Cox and Hart, 1986).

ومن المهم عند تحديد سرعة الرابطة الثلاثية في فضاء السرعة، ملاحظة أن الرابطة تبقى على كل الحدود الثلاثة التي تنطلق منها، وكأنها كرة تتدحرج في الوقت نفسه على الحدود الثلاثة. لذا فإن الرابطة الثلاثية تقع عند تقاطع ثلاثة خطوط سرعة في فضاء السرعة، حيث أن كل خط يصف سرعة كرة تتدحرج على حد واحد. وبالإضافة لذلك فإن مخططات فضاء السرعة تبين ما إذا كانت الرابطة الثلاثية مستقرة. فلو كانت خطوط السرعة الثلاثة لا تتقاطع فإن موقع الرابطة الثلاثية غير معرف في فضاء السرعة، وتكون الرابطة الثلاثية غير مستقرة. فإذا تم إسقاط الهندسية الصفحية لرابطة ثلاثية غير مستقرة بشكل متتابع مع الزمن، فسوف نجد أن هذه الرابطة ستتطور إلى هندسية صفحية جديدة. ويبين الشكل (27- 29) مثلاً على رابطة ثلاثية غير مستقرة، ويلاحظ في هذا الشكل الترتيب الأولي في الزمن  $t_0$ ، حيث تكون هندسية الرابطة الثلاثية من نمط ظهر - صدع محول - ظهر Ridge-Transform-Ridge. ويبين التحليل في فضاء السرعة أنها غير مستقرة. وبعد زمن قصير  $\Delta t$ ، ستتطور رابطة ثلاثية جديدة بهندسية صدع محول - ظهر - صدع محول Transform - Ridge - Transform. ويبين التحليل (شكل 27- 28 وشكل 27- 29) والحدس أن هذه الرابطة مستقرة ديناميكياً.

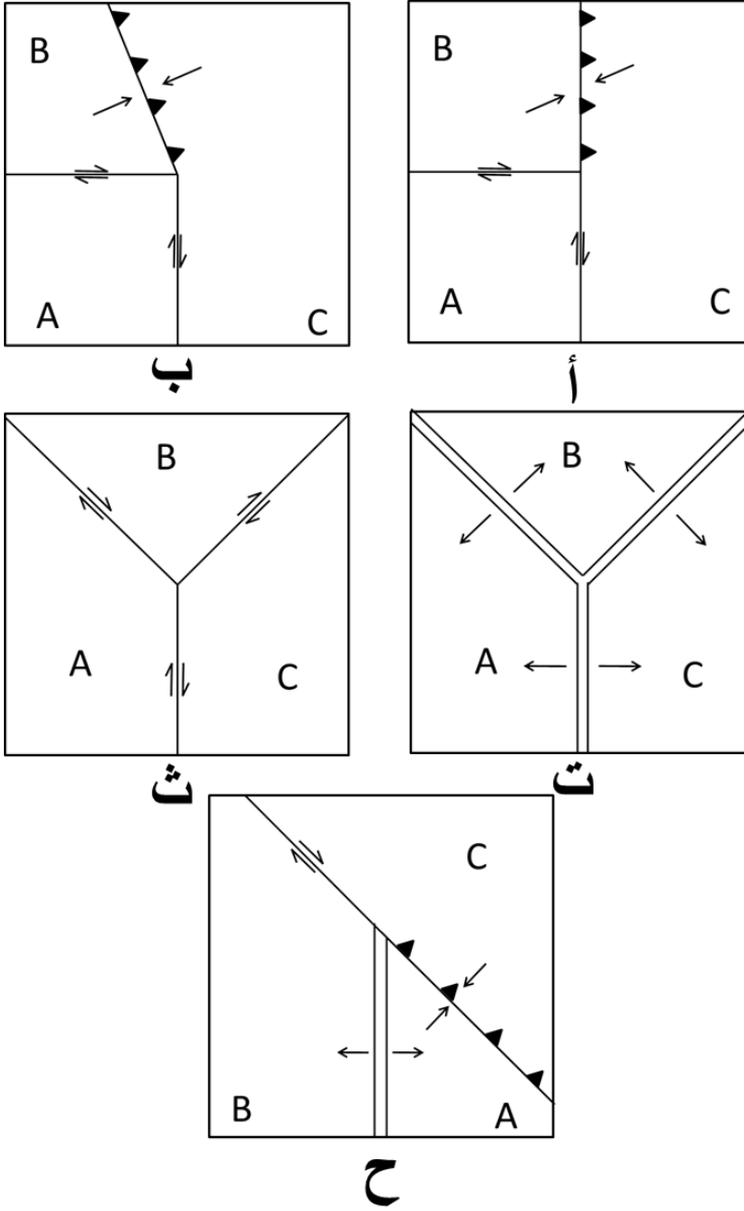


شكل (27 - 29): الرابطه الثلاثية في الزمن  $t_0$  (أ)، حيث يتبين في تحليل السرعة (ب) أنها غير مستقره، لأن خطي السرعة  $ac$  و  $ab$  غير متقاطعين. أما في الزمن  $t_0 + \Delta t$  (ت) فإن الرابطه الثلاثية TJ تطورت من هندسية "ظهر - محول - ظهر" غير مستقره إلى هندسية "محول - ظهر - محول" مستقره، حيث يلاحظ من خلال تحليل السرعة (ث) أن خطوط السرعة  $ac$  و  $bc$  و  $ab$  تتقاطع كلها عند T.J.

#### 1.4.27. التمرين الأول

تبين معنا أن الرابطة الثلاثية هي نقطة التقاء ثلاث صفائح، ونقطة تقاطع ثلاثة حدود صفيحية يفصل كل منها فيما بين كل زوج من هذه الصفائح الثلاث. وتبين أيضاً أن سرعة أية نقطة تتحرك على طول أحد هذه الحدود ستقع على خط في فضاء السرعة (الأشكال 27-26 و 27-27 و 27-28). وإن ثلاثة من مثل هذه الخطوط ( $ab$  و  $bc$  و  $ac$ ) تصف سرعات كرات زجاجية تتحرك بكل السرعات الممكنة على طول الحدود الثلاثة المتقاطعة عند الرابطة الثلاثية. وبما أن الرابطة الثلاثية تشبه كرة زجاجية واحدة تتدحرج في الوقت نفسه على طول الحدود الثلاثة، فإنها تقع عند تقاطع  $ab$  و  $bc$  و  $ac$ . وهكذا فإذا تقاطعت هذه الخطوط في نقطة واحدة، تكون الرابطة الثلاثية مستقرة، وهذا يعني أنه مع تقدم الزمن فإن الحدود (ظهر ومحول وأخدود) ستبقى نفسها ولن تتغير الزاوية فيما بينها. أما إذا كانت الخطوط  $ab$  و  $bc$  و  $ac$  غير متقاطعة في نقطة واحدة، فإن الرابطة الثلاثية غير مستقرة وستكون موجودة لفترة زمنية محدودة فقط، ليحصل بعدها تطور لهندسية صفيحية مختلفة (شكل 27-29).

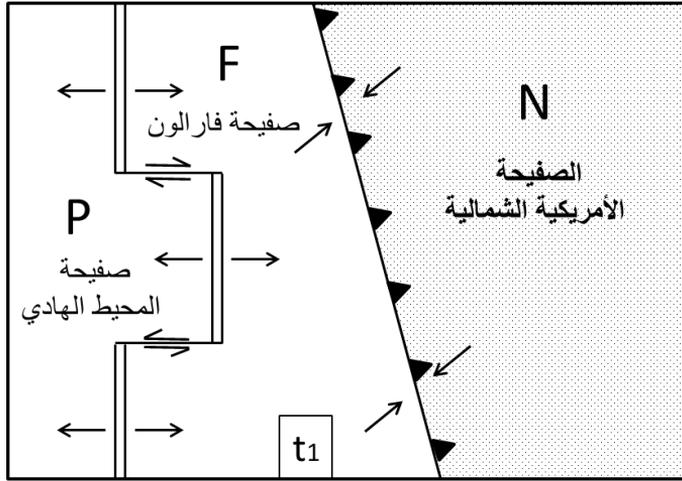
ادرس الهندسية الصفيحية في المخططات أ حتى ح (شكل 27-30) وأجر تحليلاً للسرعة لكل منها، لمعرفة إذا كانت الرابطة مستقرة أم لا.



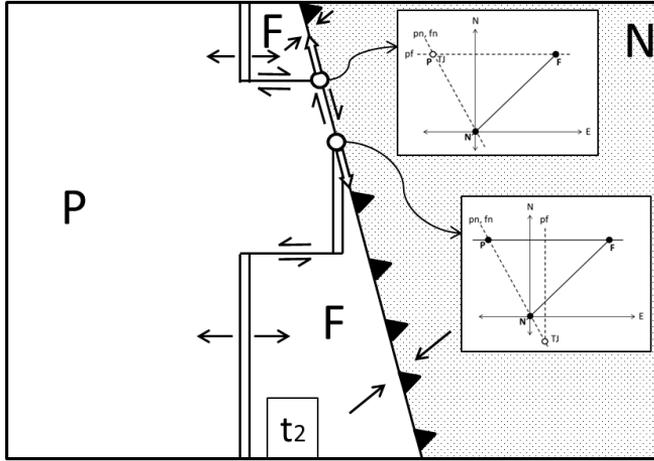
شكل (27-30): المخططات المستخدمة لحل التمرين الأول (Cox and Hart, 1986).

### مثال: صدع سان أندرياس San Andreas Fault

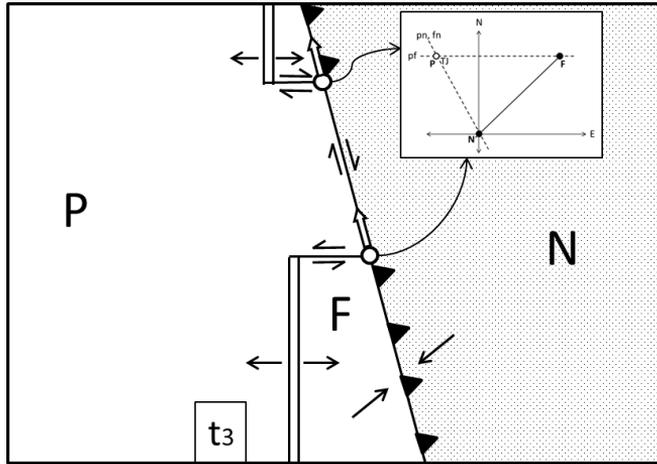
إن نمو صدع سان أندرياس على ساحل كاليفورنيا يبين أهمية الدور الذي تقوم به الروابط الثلاثية في الحركات الصفيفية (Cox and Hart, 1986). فقد كانت صفيحة فارالون Farallon plate توجد بادئ الأمر بين صفيحة المحيط الهادي (P) والصفيحة الأمريكية الشمالية (N)، في وقت لم يكن فيه صدع سان أندرياس موجوداً بعد (الزمن t1، شكل 27-31 أ). وقد تشكل صدع سان أندرياس بعد 25 م/ع (الزمن t2، شكل 27-31 ب)، وكان محدوداً عند نهايتيه الشمالية والجنوبية برابطتين ثلاثيتين. وكانت هندسية الرابطة الشمالية عبارة عن "محول - محول - أخدود"، أما الجنوبية فكانت "ظهر - محول - أخدود". وبسبب هذه الهندسية هاجرت الرابطة الشمالية باتجاه الشمال الغربي على طول حافة القارة، بينما هاجرت الجنوبية نحو الجنوب الشرقي. وكان نمو صدع سان أندرياس نتيجة مباشرة لهجرة هاتين الرابطتين. وأخيراً، في الزمن t3 (شكل 27-31 ت)، تغيرت هندسية الرابطة الجنوبية إلى "محول - محول - أخدود" وبدأت الرابطة بالتحرك نحو الشمال. ورغم أن الصورة المقدمة في هذا النموذج تختلف شيئاً ما عن الواقع التاريخي لصدع سان أندرياس، فإنها توضح أهمية الروابط الثلاثية في العمليات التكتونية.



شكل (27-31 أ): الهندسية الصفيفية على ساحل كاليفورنيا قبل بدء تكون صدع سان أندرياس.



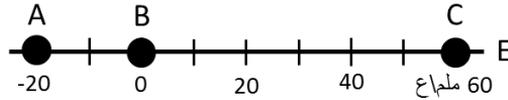
شكل (27-31 ب): بدأ نمو صدع سان أندرياس بعد حصول التماس فيما بين صفيحة المحيط الهادي (P) والصفيحة الأمريكية الشمالية (N). إن الرابطة الثلاثية (الدائرة المفتوحة) الموجودة عند النهاية الشمالية للصدع تهاجر نحو الشمال الغربي بالنسبة لأمريكا الشمالية (السهم الأبيض)، بينما تهاجر الرابطة الجنوبية نحو الجنوب الشرقي.



شكل (27-31 ت): أدى تغير هندسية الرابطة الجنوبية (الزمن t3) إلى بدء هجرة الرابطة الجنوبية نحو الشمال الغربي.

### 2.4.27. التمرين الثاني

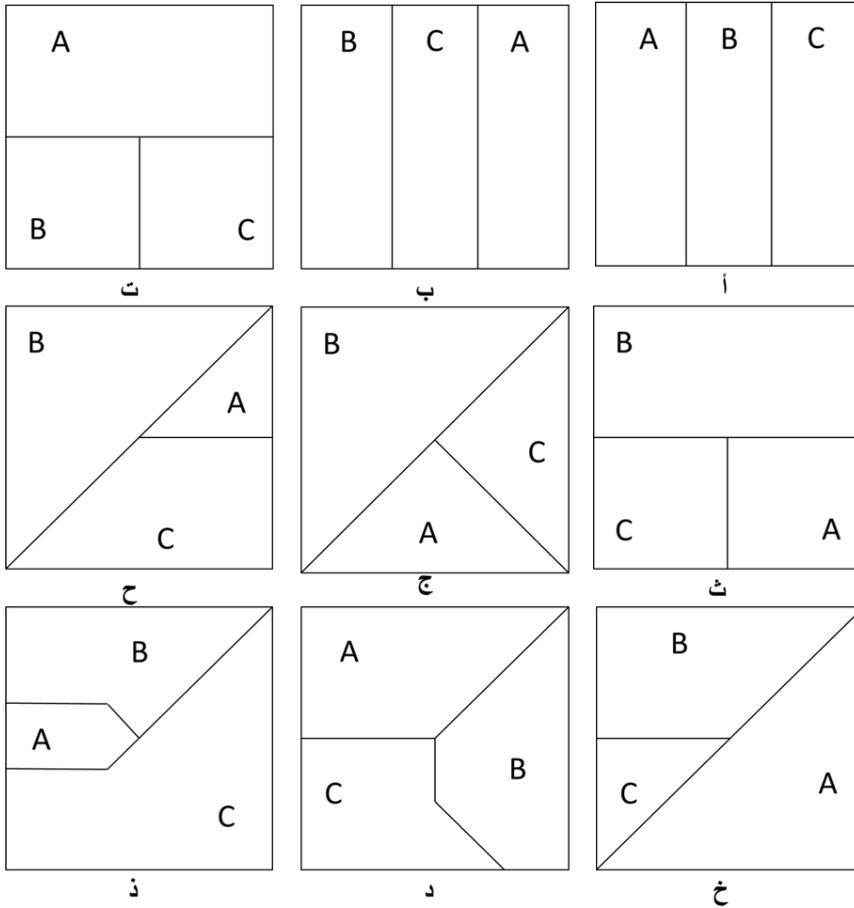
ادرس مخطط السرعة الموضح في الشكل (27- 32). ثم لاحظ المثال المحلول في الشكل (27- 33). وقم بعد ذلك بقص ورقة إلى ثلاث قطع A و B و C بطرائق مختلفة كما هو موضح في الشكل (27- 34- أ حتى د)، وذلك لتمثيل صفائح الغلاف الصخري في كل حالة. وفي جميع الحالات فإن حركة الصفائح (الورقية) تتم وفق مخطط السرعة المعطى. إن كل الزوايا الموضحة في هذا الشكل من مضاعفات الزاوية 45°. والمطلوب: بيان طبيعة الحدود الصفيفية (ظهور أو أخاديد أو صدوع محولة)، ورسم زوج من الأسهم على جانبي كل حد لتوضيح الحركة النسبية (لاحظ أنه ليس من الضروري أن تكون هذه الأسهم متعامدة مع الظهر أو الأخدود). ماهي قيمة السرعة النسبية عند كل حد (معطاة بالملم/ع)؟  
ملاحظة: إذا وجدت صعوبة في تصور الحركة، ثبت الصفحة B وارسم حقول السرعة فوق الصفحتين A و C.



شكل (27- 32): مخطط سرعة الصفائح A و B و C العائدة للتمرين الثاني.

الحل	مثال
<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 5px;"> <p style="text-align: center; font-weight: bold;">B</p> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center; gap: 20px;"> <div style="text-align: center;"> <p>→</p> <p>←</p> <p>20 ملم/ع</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>←</p> <p>→</p> <p>60 ملم/ع</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center; gap: 20px; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;"> <p>←</p> <p>→</p> <p>ملم/ع</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>←</p> <p>→</p> <p>80</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <span style="font-weight: bold;">A</span> <span style="font-weight: bold;">C</span> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-bottom: 5px;"> <p style="text-align: center; font-weight: bold;">B</p> </div> <div style="border: 1px solid black; height: 100px; width: 100%;"></div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <span style="font-weight: bold;">A</span> <span style="font-weight: bold;">C</span> </div>

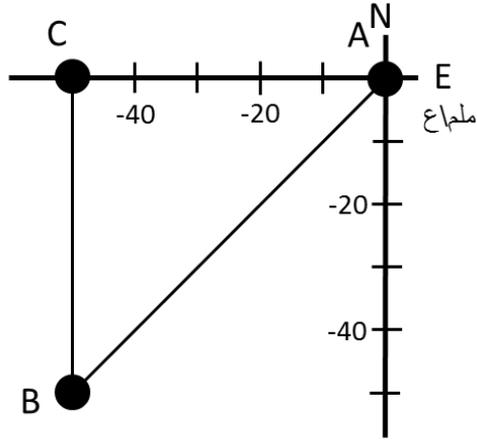
شكل (27- 33): المثال المحلول في التمرين الثاني.



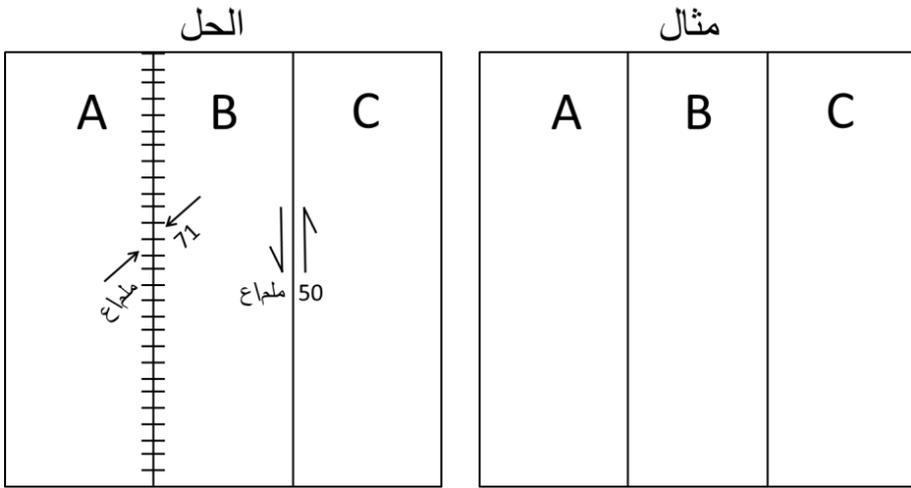
شكل (27- 34): حالات مختلفة للهندسية الصفيحية للاستخدام في التمرين الثاني (Cox and Hart, 1986).

### 3.4.27. التمرين الثالث

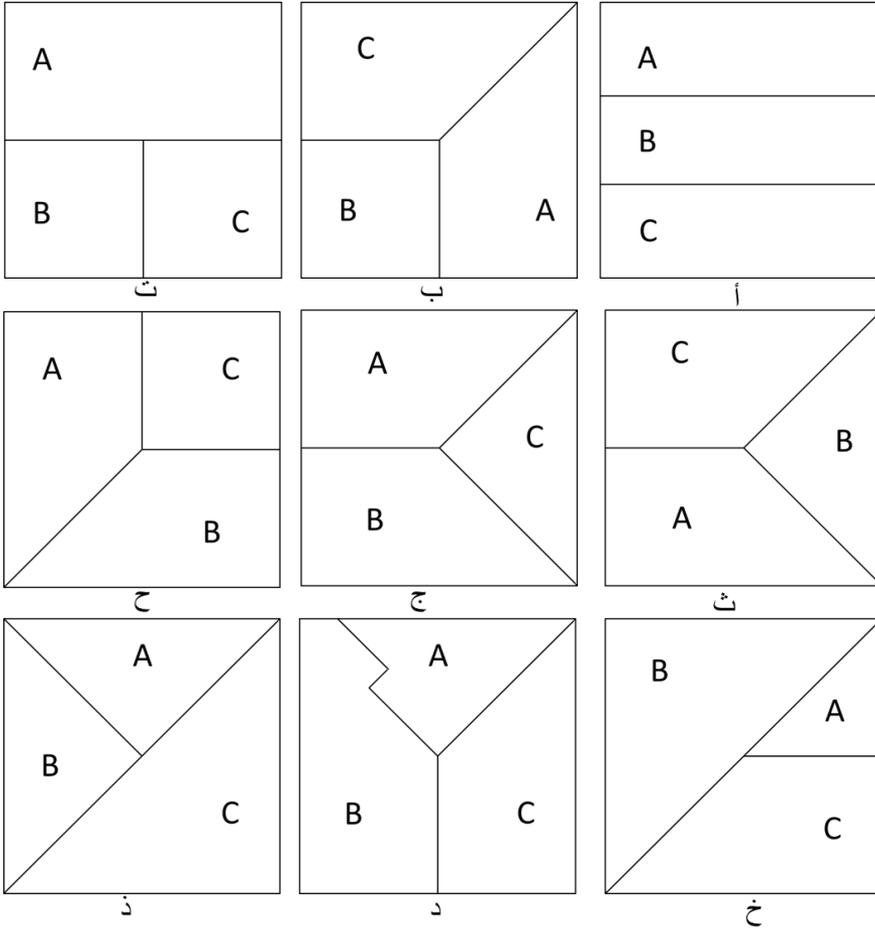
يشابه هذا التمرين في خطوات العمل ماقتت به في التمرين السابق (الثاني) ، قم أولاً بدراسة مخطط السرعة الجديد (شكل 27- 35) والمثال المحلول (شكل 27- 36)، ثم حل التمرين الموضح في الشكل (27- 37- أ حتى ذ). وبهدف التبسيط، استخدم إشارات عرضانية للتعبير عن الحدود التقريبية في هذا التمرين كما هو موضح في الشكل (27 - 36).



شكل (27-35): مخطط سرعة الصفائح A و B و C العائدة للتمرين الثالث.



شكل (27-36): المثال المحلول في التمرين الثالث.



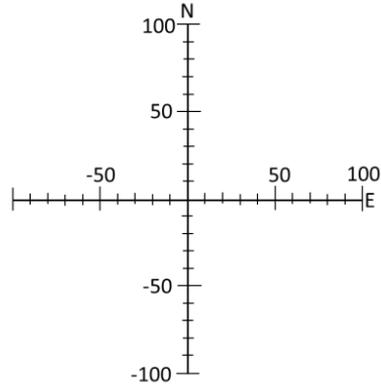
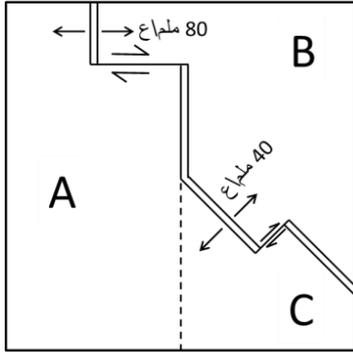
شكل (27- 37): حالات مختلفة للهندسية الصفيحية للاستخدام في التمرين الثالث (Cox and Hart, 1986).

#### 4.4.27. التمرين الرابع

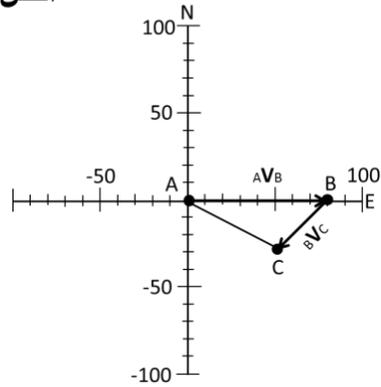
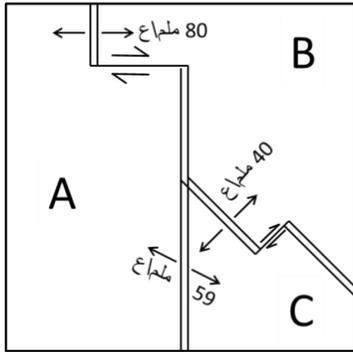
ادرس المثال الموضح في الشكل (27- 38)، ثم ارسم مخطط السرعة لكل مجموعة من الصفائح موضحة في الشكل (27- 39- أ حتى خ، Cox and Hart, 1986)، حدد ما إذا كان الخط المنقطع يعبر عن ظهر محيطي أو أخدود أو صدع محول. قم بعد ذلك بتحديد السرعة النسبية على طول هذا الحد الصفيحي مبيناً اتجاهها (سهم) وقيمتها (ملم/ع). لاحظ في

الشكلين (27-39 ح و 27-39 خ) أنه تم استخدام أسهم برأسين لتوضيح أن هذا الحد يمثل صدعاً محولاً، وترك الخيار لك في تحديد ما إذا كانت الحركة النسبية يمينية أم يسارية.

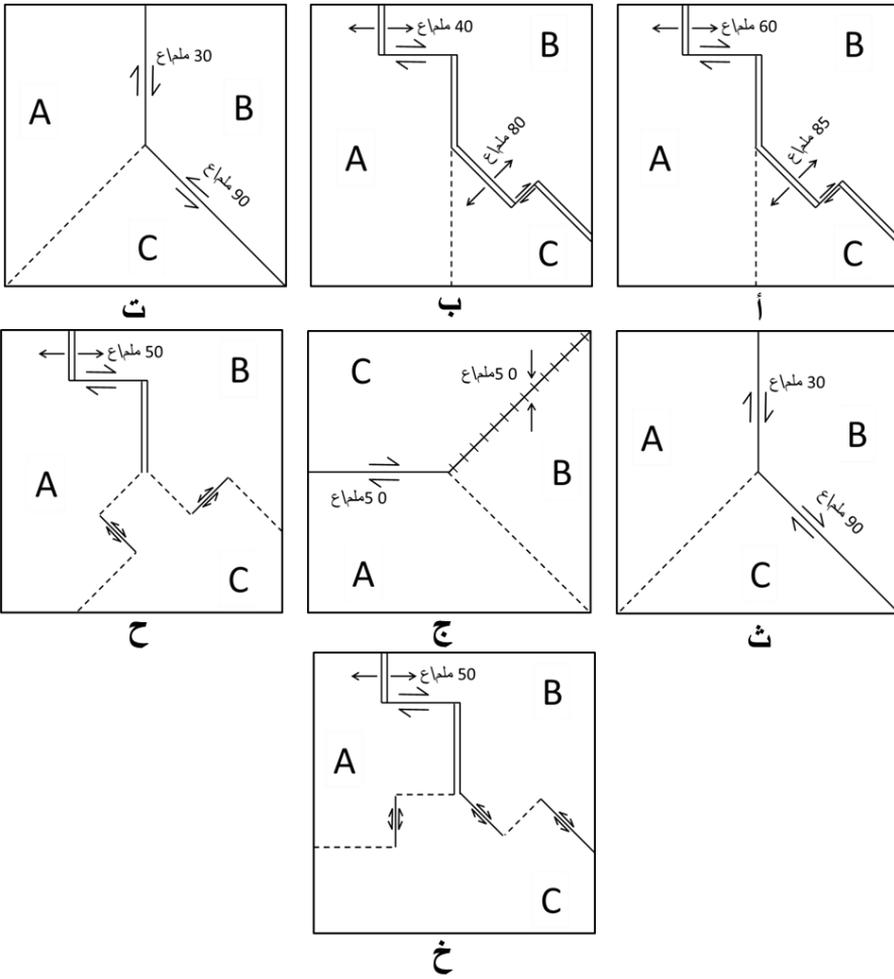
### مثال



### الحل



شكل (27-38): المثال الموضح لما هو مطلوب في التمرين الرابع.



شكل (27-39): مخططات الهندسية الصفيحية لحل التمرين الرابع.



## الباب العاشر – الفصل الثامن والعشرون

### تكتونية الصفائح على سطح كرة

#### 1.28 .مقدمة

عرفنا حتى الآن قدرأً لأبأس به من المعلومات عن هندسية الصفائح وعن الحركات الصفيفية النسبية عند الأنماط المختلفة من الحدود الصفيفية. غير أن تمثيل تلك المعلومات حصل على سطح مستو. ولكن، بما أن الغلاف الصخري الذي تتركب الصفائح منه، يمثل الغلاف الخارجي للكرة لأرضية، فإن ذلك يدعو لأن نتعامل مع تلك المعلومات على أنها تتعلق بسطح كروي وليس بسطح مستو.

لننظر أولاً كيف يمكن تشبيه كل من قطب أولر والصدع المحول على سطح كرة. تتمثل الصدوع المحولة على مستو بخط مستقيم وبالتالي فإن قطب أولر يقع في اللانهاية بعيداً عن هذا الخط. أما على سطح كرة فإن قطب أولر يوجد على بعد 90° من الصدع المحول الموافق والذي يقع في هذه الحالة على مسار دائرة كبيرة، بينما تقع بقية الصدوع المحولة (التي تقع على مسافة زاوية أقل من 90° من القطب) على مسارات دوائر صغيرة (Cox and Hart, 1986, ) (Grotinger and Jordan, 2007; Karey et al., 2009; Schettino, 2015).

تمثل الصدوع المحولة من الناحية التضاريسية أطول المظاهر الخطية على سطح الأرض، حيث نعني بكلمة "خطي" هنا تلك المظاهر التي تمتد على طول دوائر صغيرة. وهكذا فإن كون الصدوع المحولة تمتد هندسياً على طول دوائر صغيرة تعني أن حركة الصفائح على سطح كرة لاتحدث عشوائياً، أي أن الصفائح تتحرك لفترات زمنية طويلة باتجاه ثابت. ورغم أهمية قطب أولر في دراسة حركات الصفائح، فإننا يجب أن نتذكر أن أقطاب أولر لا تتمثل بمظاهر جيولوجية حقيقية على سطح الأرض كما هو حال الصدوع المحولة أو الظهور أو الأخاديد، بل هي نتاج إنشاء هندسي يهدف لدراسة حركة الصفائح.

تستخدم عادة ثلاثة أنماط من المعطيات لتحديد موقع قطب أولر. يتمثل أولها بمعرفة منحى الصدوع المحولة، أما ثانيها فيتمثل بتحديد اتجاه انزلاق إحدى كتلتي صدع بالنسبة للأخرى في أثناء حدوث زلزال على حد صدعي، وذلك باستخدام حل مستوي الصدع





اللوحة (28- 1): مناحي صدوع محولة على طول ظهر وسط الأطلنطي. DT منحى صدع محول،  $P < T, E >$  قطب الدائرة الكبيرة الممتدة مابين الصدع المحول وقطب أولر المتوقع (Cox and Hart, 1986).

P <T,E>		DT	الموقع T	
$\phi$	$\lambda$		$\phi$	$\lambda$
°235.0	°6.7	°308	°2.5	°79.0
°238.2	°7.9	°295	°352.0	°71.0
°242.7	°3.2	°278	°340.0	°66.5
°232.5	°3.0	°275	°326.5	°52.5

### 3.28. متجهات الانزلاق Slip vectors

هل يمكن لمتجهات الانزلاق أن تساعد في تحديد موقع قطب أولر من أجل الصفيحتين الأمريكيتين الشمالية والأوراسية بشكل أكثر دقة؟ يمكن إيجاد متجهات الانزلاق من خلال نمط انتشار الموجات الزلزالية من الزلازل الحاصلة على الصدوع المحولة. وهي تصف الحركة النسبية للصفائح على جانبي الصدوع المحولة. وفي حالتها المثالية تكون هذه المتجهات مماسة للدوائر الصغيرة المتراززة حول قطب أولر. ولذلك فهي تعطي نوعية المعلومات نفسها التي يتم الحصول عليها من مناحي الصدوع المحولة. ويمكن تحليلها بالطريقة نفسها التي استخدمت من أجل الصدوع.

### 1.3.28. تمرين

تبين اللوحة (28- 2) سموت متجهات الانزلاق عند ظهر وسط الأطلنطي. كما أعطيت مواقع أقطاب الدوائر الكبيرة لقطب أولر والمتعامدة مع متجهات الانزلاق هذه. ارسم هذه الدوائر الكبيرة. ولاحظ هندستها وطريقة تقاطعها. وبيّن ما إذا كان من الممكن تحديد موقع محدد لقطب أولر من خلالها. ماذا ترى؟

اللوحة (28-2): متجهات انزلاق على طول ظهر وسط الأطلنطي. AS: منحى متجهة انزلاق،  $P \langle s, E \rangle$ : قطب الدائرة الكبيرة الممتدة ما بين نقطة الملاحظة وقطب أولر المتوقع (Cox and Hart, 1986).

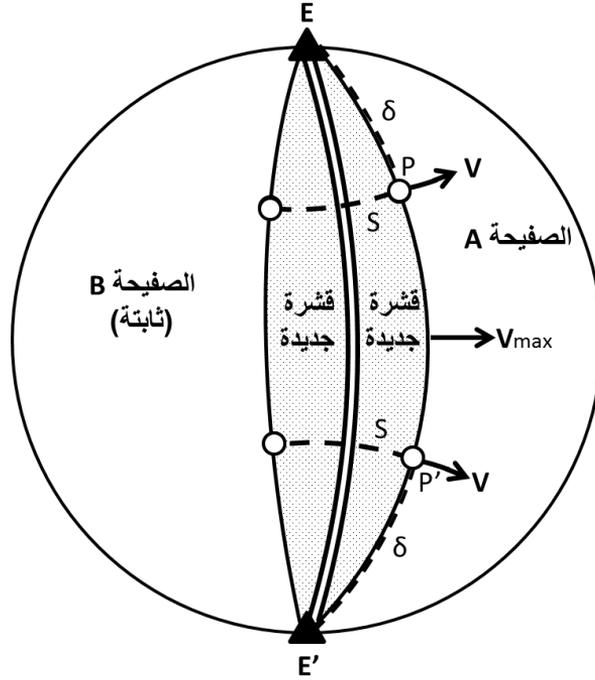
P $\langle s, E \rangle$		As	الموقع S	
$\phi$	$\lambda$		$\phi$	$\lambda$
°226.1	°7.4	°317	°2.6	°79.8
°231.4	°6.0	°309	°353.0	°80.2
°238.6	°7.9	°295	°352.4	°70.9
°228.6	°9.6	°295	°341.8	°66.7
°234.6	°6.7	°287	°340.2	°66.3
°231.9	°3.0	°275	°325.2	°52.8

#### 4.28. السرعات الناتجة من الدوران حول قطب أولر

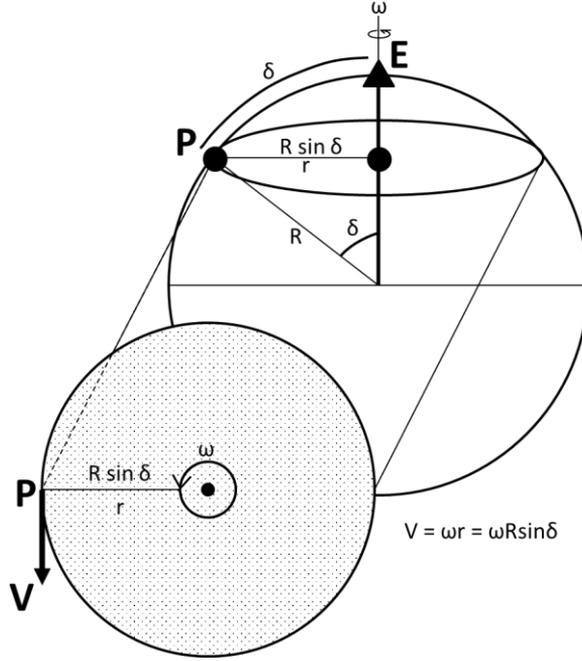
نفترض في الشكل (28-3) أن الصفيحة B ثابتة وأن الصفيحة A تدور بالنسبة للصفيحة B حول قطب أولر E ذي القطب المعاكس Antipole E' الذي يقع على بعد 180° منه على الناحية المقابلة من الكرة. تمثل  $\omega$  معدل (سرعة) الدوران الزاوي للصفيحة A بالنسبة للصفيحة B بوحدة الدرجة في العام (°ع) أو راديان في العام (رادع) أو درجة في المليون عام (°ام.ع) أو راديان في المليون عام (رادام.ع). سنفترض بهدف التبسيط أن الحد ما بين الصفيحتين A و B يتمثل بظهر محيطي يمتد على طول نصف دائرة كبيرة تمتد بدورها بين E و E'. فلو تصورنا وجود زوج من متساويات العمر تتشكل على طول الظهر في الزمن t، فإن متساويي العمر هذين سيشكلان دائرتين كبيرتين في الوقت الحالي تتلاقيان عند E و E'، كما أن الانفصال الأعظمي بينهما سيكون عند خط الاستواء الذي يبعد 90° عن E و E'. وإن المسافة الزاوية الأعظمية بين متساويي العمر ستكون مساوية لـ  $\omega t$ ، حيث أن t تمثل عمر متساويات العمر. وإذا كانت  $\omega$  مأخوذة بالراديان فإن المسافة الأعظمية بالكيلومتر تساوي  $\omega t R$ ، حيث أن R تساوي نصف قطر الأرض بالكيلومتر (شكل 28-4). وبحسب هذه المعادلة لو أن دولاباً بنصف قطر R دار بزاوية  $\omega t$  (بالراديان)، فإن نقطة موجودة على حافته ستتحرك مسافة  $\omega t R$ . وإذا اقتربنا من

قطب أولر فإن المسافة بين متساويي العمر تساوي  $\omega t R \sin \delta$ ، حيث أن  $\delta$  تمثل المسافة بين نقطة الملاحظة وقطب أولر. وإن عبارة " $R \sin \delta$ " تعني أنه كلما اقتربنا من قطب أولر، دارت نقطة على امتداد دائرة ذات نصف قطر أصغر ومساو للقيمة  $R \sin \delta$  (في الشكل 28-4). وهكذا فإن سرعة نقطة P واقعة على بعد  $\delta$  من E تعطى بالعلاقة (شكل 28-4):

$$V = \omega R \sin \delta$$



شكل (28-3): تمثل النقطتان E و E' قطبي أولر من أجل حركة الصفحة A بالنسبة للصفحة B. تمثل المنطقة المنقطة قشرة جديدة أضيفت خلال الزمن t، أما S فتمثل المسافة فيما بين متساويي العمر اللذين تتشكلًا في الزمن t. تعطى سرعة الصفحة A بالنسبة للصفحة B بالعلاقة  $V = S/t$  (Cox and Hart, 1986).



شكل (28-4): تتغير السرعة مع المسافة  $\delta$  بين نقطة الملاحظة P وقطب أولر E  
(Cox and Hart, 1986).

إن إجراء المسوحات الجيوفيزيائية البحرية لايعطي قياساً للسرعة الزاوية للصفائح مباشرة، غير أن هذه السرعة تحسب بمعرفة المسافة المقيسة فيما بين متساويات العمر المغنطيسية. فإذا كانت المسافة بين متساويي عمر تساوي S كم في نقطة محددة على الظهر، فإن السرعة الخطية V تساوي S/t. وهكذا إذا أخذنا بالحسبان أن سرعة V بقيمة 10 ملم/ع تساوي سرعة 10 كم/ع، وأن درجة واحدة من المسافة الزاوية تساوي 111 كم من المسافة الخطية على طول دائرة كبيرة، وأن نصف قطر الأرض R يساوي  $6.38 \times 10^3$  كم أو  $6.38 \times 10^9$  ملم، فإننا سنجد أن:

$$\begin{aligned} V \text{ (mm/yr)} &= V \text{ (km/my)} = \sin \delta R \text{ (mm)} \omega \text{ (rad/yr)} \\ &= \sin \delta 6.38 \times 10^9 \omega \text{ (rad/yr)} \\ &= \sin \delta 6.38 \times 10^3 \omega \text{ (rad/my)} \end{aligned}$$

$$= \sin \delta \ 1.11 \times 10^8 \ \omega \ (\text{°/yr})$$

$$= \sin \delta \ 111 \ \omega \ (\text{°/my})$$

$$= \sin \delta \ V_{\max}$$

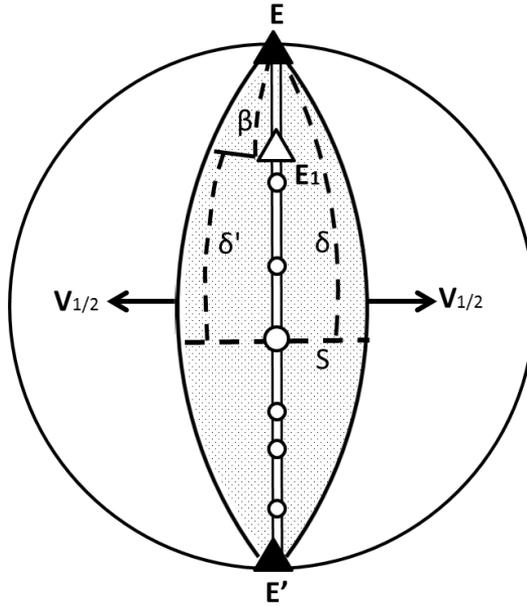
حيث أن  $V_{\max} \ (\text{mm/yr}) = 111 \ \omega \ (\text{°/my})$  تمثل سرعة الانتشار الأعظمية وتحدث على مسافة 90° من قطب الدوران. وتدعى  $V$  أحياناً "سرعة الانتشار التامة" Full spreading velocity للصفحة A بالنسبة للصفحة B. وبشكل أكثر شيوعاً تستخدم "سرعة الانتشار النصفية"  $V_{1/2}$  Half spreading velocity، حيث:

$$V_{1/2} = 1/2 \ V$$

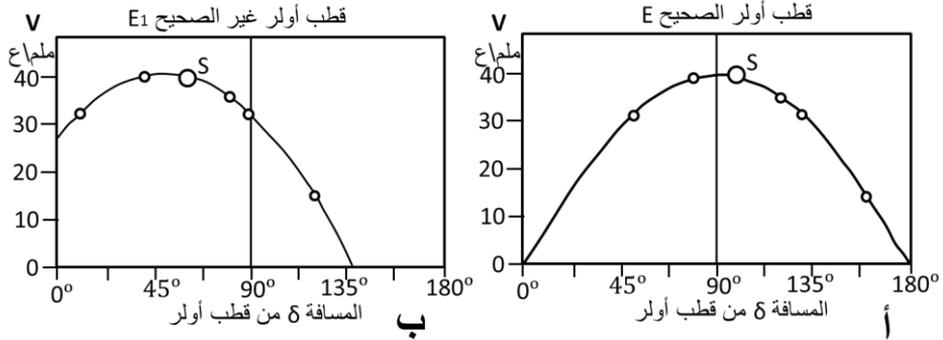
وهي سرعة أي من الصفيحتين بالنسبة للظهر، على افتراض أن الانتشار كان متناظراً. لنفترض الآن أننا حددنا سرعة الانتشار  $V$  في عدد من النقاط على امتداد ظهر محيطي، وذلك من خلال قياس المسافة فيما بين متساويات عمر متوافقة على جانبي الظهر المحيطي (شكل 28-5). ولنفترض أيضاً أننا لانملك أية معلومات عن نطاقات كسرية (صدوع محولة) أو متجهات انزلاق في هذه المنطقة. فهل بإمكاننا إيجاد موقع قطب أولر ومعدل (سرعة) الدوران

$$V \ (\text{km/my}) = \sin \delta \ \omega \ (\text{°/my}) \ 111 \ (\text{km/°})$$

الزاوي؟ ولنتذكر هنا أن  $V \ (\text{km/my}) = \sin \delta \ \omega \ (\text{°/my}) \ 111 \ (\text{km/°})$  تعني هذه المعادلة أنه إذا تم توقيع السرعة كتابع للمسافة  $\delta$  من قطب أولر، فإن نقاط المعطيات ستنتظم على منحنى جيبي يمر عبر مركز الإحداثيات. وبما أننا لانعرف مكان قطب أولر، وكما نحدد المسافة، يجب أن نبدأ بقطب تجريبي  $E$  ثم إيجاد المسافة فيما بين  $E$  وكل موقع. ونحتاج أيضاً لاختيار قيمة تجريبية لـ  $\omega$ . فإذا كان القطب التجريبي صحيحاً، فإن منحنى العلاقة فيما بين  $V$  و  $\delta$  سيكون متطابقاً مع المنحنى النظري (شكل 28-6 أ). أما إذا كان القطب التجريبي خاطئاً ( $E1$  في الشكل 28-5) فإن نقاط الملاحظة لن تتطابق مع ذلك المنحنى الصحيح (شكل 28-6 ب). وبذلك يجب إعادة المحاولة بقطب أولر آخر وبقية أخرى لـ  $\omega$ .



شكل (28-5): إزاحة الطور  $\beta$  لقطب أولر غير صحيح E1.



شكل (28-6): أ: إذا قيست  $\delta$  من قطب أولر الحقيقي E، فإن القيم الملاحظة للسرعة  $V$  ستقع على منحنى جيبى يمر من مركز الإحداثيات، وذلك على جملة إحداثية لعلاقة  $V$  مع  $\delta$ . ب: عند استخدام قطب أولر غير صحيح (مثل E1) فإن نقاط المعطيات لن تقع على منحنى جيبى يمر من مركز الإحداثيات (Cox and Hart, 1986).

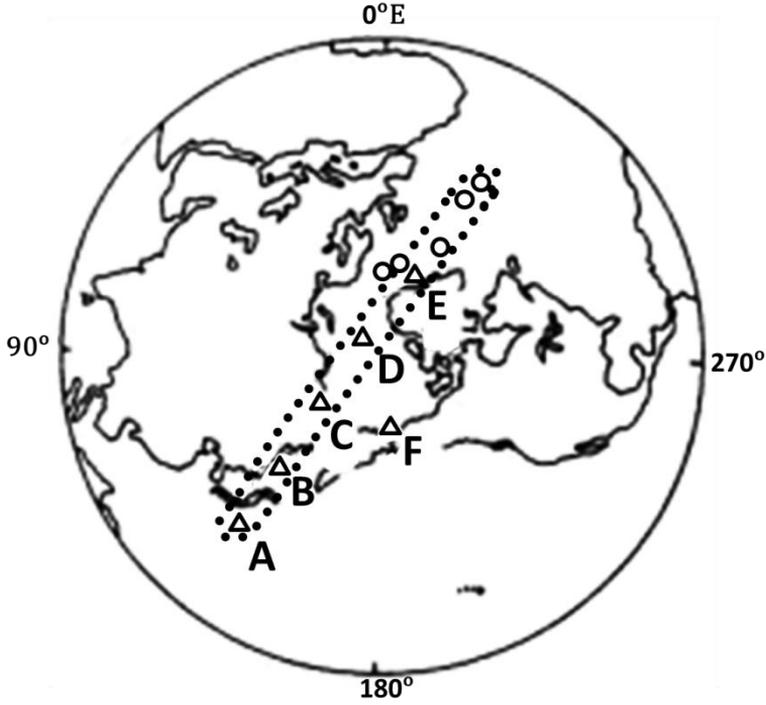
#### 1.4.28. تمرين محلول: سرعات الانتشار عند ظهر وسط الأطلنطي

يمكننا الآن اختبار ما إذا كانت تغيرات سرعات الانتشار على طول ظهر وسط الأطلنطي تساعد في تحديد موقع أفضل لقطب أولر الذي يصف الحركة بين الصفيحتين الأمريكية الشمالية والأوراسية. يبين الخط المنقط في الشكل (28-7) المنطقة التي تتوزع فيها الأقطاب التي حددت سابقاً في التمرينين 1 و 2 من خلال دراسة مناحي الصدوع المحولة ومتجهات الانزلاق. وقد حددت مجموعة من الأقطاب التجريبية A و B و C و D و E على طول الخط المتوسط في هذه المنطقة. والمطلوب تحديد أي من هذه الأقطاب يتطابق بشكل أفضل مع السرعات الملاحظة لانتشار قاع المحيط والتي حددت من خلال الدراسات الجيوفيزيائية البحرية. وتبين اللوحة (28-3، Cox and Hart, 1986) ملخصاً لهذه السرعات، بالإضافة إلى قائمة المسافات المحسوبة بين أقطاب أولر التجريبية ومواقع الملاحظة. وقد تم توقيع السرعات كتابع للمسافة المحسوبة  $\delta$  في الشكل (28-8)، وذلك من أجل كل من الأقطاب التجريبية، وكذلك رُسمت منحنيات  $\sin \delta$  النظرية التي ضُبِطت بحيث تمر من السرعة الملاحظة (28 مم/ع) من أجل الموقع 5، الموقع الأبعد عن كل الأقطاب التجريبية، بحيث:

$$\omega \text{ (°/my)} = v \text{ (mm/yr)} / 111 \sin \delta = 28 \text{ (mm/yr)} / 111 \sin \delta$$

يلاحظ في المخطط الخاص بالقطب التجريبي A (شكل 28-8) أن معظم السرعات المحسوبة أكبر من السرعات الملاحظة، ما يشير إلى أن القطب التجريبي بعيد جداً عن مواقع الملاحظة. أما في حالة القطب التجريبي D فالعكس هو الصحيح، ما يشير إلى أن القطب التجريبي قريب جداً. ويلاحظ بوضوح أن القطب التجريبي E غير ممكن، وذلك بسبب وجوده بين المواقع، ما يقتضي حدوث تقارب في بعض المواقع، بينما تشير الملاحظات أن الانتشار (التمدد) هو الحاصل في كل المواقع. وقد وُجد أن التتابع الأفضل يحدث عند القطب التجريبي C أو بالقرب منه. يلاحظ أيضاً أن القطب التجريبي F القريب من C (والموجود على أحد جانبي القوس المعبر عن أماكن وجود الأقطاب التجريبية A و B و C و D و E) يعطي تطابقاً جيداً مع المعطيات كما هو الحال بالنسبة للقطب C. وإن ذلك يعبر عن فرق هام بين الطرائق التي تعتمد نطاقات الكسور وسرعات الانتشار في تحديد موقع أقطاب أولر. فقد وجد أن الطريقة المعتمدة على نطاقات الكسور ومتجهات الانزلاق تحدد القطب في منطقة متطاولة تأخذ اتجاه الدوائر الكبيرة لقطب أولر، وذلك بين القطب ومواقع الملاحظة. أما الطريقة المعتمدة على السرعات

فتحدد قطب أولر في منطقة متطاولة باتجاه متعامد مع الدوائر الكبيرة لقطب أولر (شكل 28-9). وتتمثل الطريقة الأفضل بمعاملة معطيات هاتين الطريقتين لكونهما تحددان معاً موقع قطب أولر بدقة أكبر مما لو استخدمت كل منهما منفردة.



شكل (28-7): أقطاب أولر التجريبية المستخدمة لإيجاد العلاقة بين  $\delta$  و  $V$  (انظر الشكل 28-8 التالي). الدائرة الصغيرة: مواقع الملاحظة، المثلث الصغير: أقطاب أولر التجريبية (A و B و C و D و E)، الخط المنقط: منطقة أقطاب أولر المقبولة كما حددت من خلال الصدوع المحولة (Cox and Hart, 1986).

اللوحة (28-3-أ): السرعات الملاحظة على طول ظهر وسط الأطلسي.

السرعة الملاحظة Vobs	موقع الملاحظة		
	$\phi$	$\lambda$	الموقع
16 ملماع	°1.0	°72.1	1
18 ملماع	°345.0	°70.0	2
20 ملماع	°330.6	°60.0	3
27 ملماع	°332.5	°46.0	4
28 ملماع	°330.0	°40.0	5

اللوحة (28-3-ب): أقطاب أولر التجريبية.

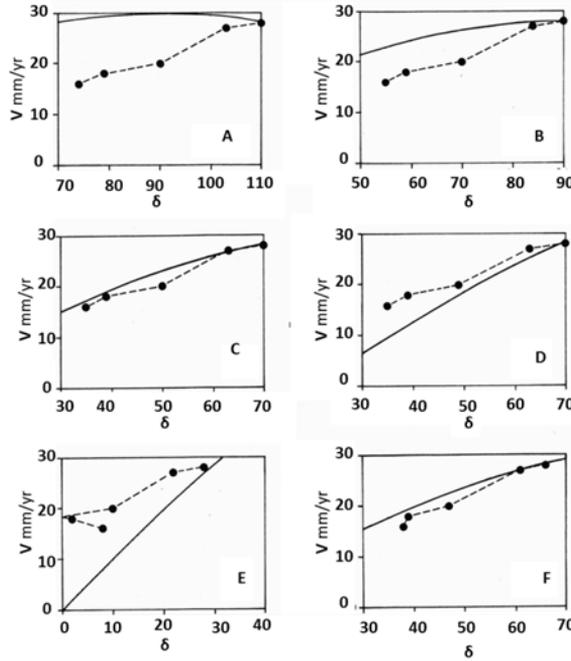
السرعة الأعظمية Vmax	قطب أولر التجريبي		
	$\phi$	$\lambda$	القطب
30 ملماع	°142	°30	A
28 ملماع	°142	°50	B
30 ملماع	°135	°70	C
37 ملماع	°52	°85	D
57 ملماع	°339	°69	E
31 ملماع	°191	°70	F

اللوحة (28-3-ت): المسافة من أقطاب أولر التجريبية.

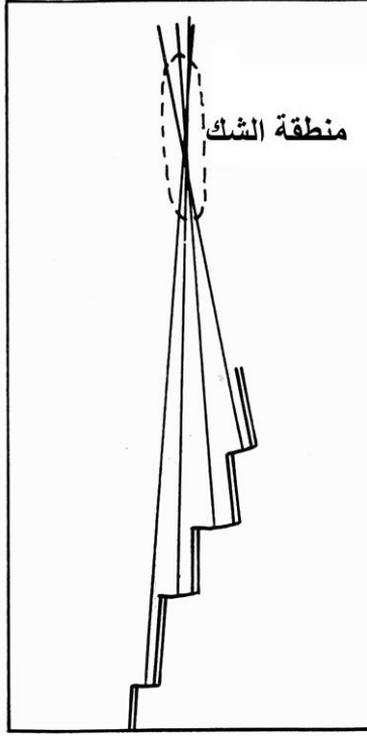
قطب أولر التجريبي						الموقع
F	E	D	C	B	A	
°38	°8	°15	°35	°55	°74	1
°39	°2	°19	°39	°59	°79	2
°47	°10	°29	°50	°70	°90	3
°61	°23	°43	°63	°84	°103	4
°66	°29	°50	°70	°90	°110	5

اللوحة (28-3-ث): السرعات المتوقعة ومجموع الأخطاء المربعة.

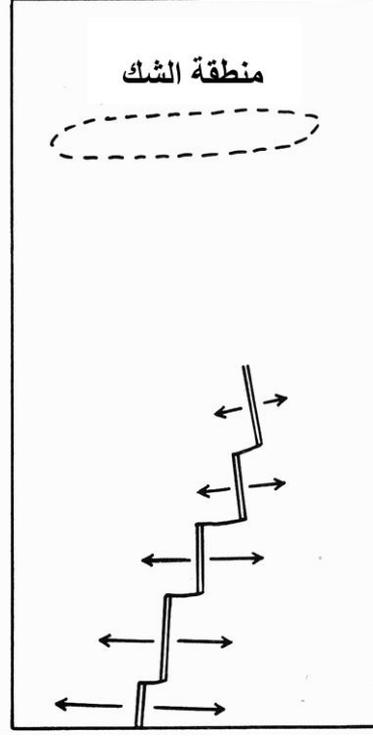
قطب أولر التجريبي							
F	E	D	C	B	A	V <sub>obs</sub>	الموقع
19	8	10	17	23	29	16	1
20	2	12	19	24	29	18	2
23	10	18	23	26	30	20	3
27	22	25	27	28	29	27	4
28	28	28	28	28	28	28	5
22	445	80	11	142	394	$\Sigma (V_{ex} - V_{obs})^2$	



شكل (28-8): العلاقة بين السرعة الملاحظة  $V$  مع  $\delta$  كما حددت من أجل كل من الأقطاب التجريبية الموضحة في الشكل (28-7). يعبر المنحني المستمر عن علاقة السرعة المحسوبة  $V_{ex}$  مع  $\delta$ . ومن الواضح أن القطب C يمثل التطابق الأفضل (Cox and Hart, 1986).



الصدوع المحولة



السرعات

شكل (28-9): تحديد أقطاب أولر من خلال الصدوع المحولة ومن خلال السرعات. يلاحظ أن هذا التحديد يعطي مناطق شك تكون متطاولة إما بشكل مواز (في حال الصدوع المحولة) أو متعامدة (في حال السرعات) مع منحنى الدوائر الكبيرة لقطب أولر.

## المصطلحات

A			
Active arm	ذراع نشيط	Area restoration	ترجيع المساحة
Angle of plunge	زاوية التغريق	Asymmetry of folds	عدم التناظر في الطيات
Angular Shear	قص زاوي	Attitude	وضعية فراغية
Anticlockwise	معاكس لدوران عقارب الساعة	Axial plane	مستوي محوري
Antiform	شكل محدب	Axial surface	سطح محوري
Antipole	قطب معاكس	Axial trace	أثر محوري
Apical angle	زاوية المخروط	Axial trend	منحى محوري
Apparent attenuation effect	تأثير الترقق الظاهري	Auxiliary plane	مستوي مساعد
Apparent dip	ميل ظاهري	Azimuth	سمت
Arc Method	طريقة القوس (في رسم المقاطع العرضية)		

B			
Back rotation	تدوير راجع	Borehole data	معطيات آبار
Balanced Cross Section	مقاطع عرضية متوازنة	Box fold	طية صندوقية
Basal detachment	سطح انفصال قاعدي	Boudins	بنية سجقية
Bearing	صوب	Bow and arrow rule	قاعدة "القوس والسهم"

Big one (Earthquake) الزلزال الكبير	Brittle Deformation التشوه التكسري
Bedding تطبق	Brittle rocks صخور كسورة (قصيفة)
المستحاثات ذات التناظر ثنائي الجانب Bilaterally symmetrical fossils	نطاق انتقالي كسور (قصيف)- لين Brittle-ductile transition
نظرة الطائر (نظرة من الأعلى) Bird's eye view	سلوكية كسورة (قصيفة) Brittle behavior
Body forces القوى الجسمية	طريقة "بسك" (في رسم المقاطع العرضية) Busk method

C	
Chevron-style fold طية زاوية	Continental drift انسياح القارات
Cleavage انفصال	Contraction تقلص
Clinometer مقياس الميل	Convergent متقارب
باتجاه عقارب الساعة (دوران) Clockwise	حدود صفيحية تقاربية Convergent plate boundaries
مسار التشوه متحد المحور Coaxial deformation path	معامل كولمب Coulomb Coefficient
إهليلج الانفعال الكلي متحد المحور Coaxial Total Strain Ellipse	Crest قمة
معامل الاحتكاك الداخلي Coefficient of internal friction	Crestal surface سطح قمّي
Concentric folds طيات متراكزة	Crestal trace أثر قمّي

Cone	مخروط	نظرة المقطع العرضي Cross sectional view
Cone sheet intrusions	اندساسات ذات شكل صفيحي مخروطي	تقصير قشري Crustal shortening
Conjugate faults	صدوع مزدوجة	تقوس الطيات Curvature of the folds
Conservation of bed length	حفظ طول الطبقة	مقياس منحنيات Curvimeter
Conservative plate boundaries	حدود صفيحية محافظة	خط القطع Cut-off line
Construction approach	مقاربة الإنشاء	طية أسطوانية Cylindrical fold
Contact forces	قوى التماس	أسطوانية Cylindricity

D		
Declination (magnetism)	انحراف (مغناطيسي)	نظر مباشر Direct view
Decollement	انفصال	اتجاه النقل التكتوني Direction of tectonic transport
Deep needle	إبرة الميل	انقطاع Discontinuity
Density contouring (on a stereogram)	تسوية كثافية (في الستيريوغرام)	طية انفصال لامتوافقة Disharmonic detachment fold
Density contours	منحنيات تسوية كثافية	متجهة انزياح Displacement vector
Depth	عمق	إزاحة (انزياح) Displacement
Detachment fault	صدع انفصال	تشوه شكلي Distortion

Detachment fold	طية انفصال	Divergent	متباعد
Differential stress	إجهاد فرقي	Divergent plate boundaries	حدود صفيحية تباعدية
Dip domains	قطاعات الميل	Down-dip view	نظرة أسفل الميل
Dip line	خط الميل	Down-dip direction	اتجاه أسفل الميل (نظرة)
Dip Isogons	متساويات الميل	Down-plunge view	نظرة أسفل التغيريق
Dip notation	تدوين الميل	Down-structure method	طريقة "أسفل البنية"
Dip panels	لوحات الميول	Downthrown block	كتلة متحركة نحو الأسفل
Dip slip	انزلاق ميلي	Duplex	ثنائية
Dip slip fault	صدع انزلاق ميلي	Dyke	جدار
Dip separation	انفصال ميلي		

E			
Earthquake	زلزال	Epicenter	بؤرة سطحية (زلزال)
East Pacific Rise	نهوض شرق الهادي	Equal area projection	إسقاط محافظ على المساحة
Edge view	نظرة جانبية	Equatorial net	شبكة استوائية
Effective Stress	إجهاد فعال	Euler pole	قطب أولر
Elastic Deformation	تشوه مرن	Extension	تمدد
Elastico-Plastic Deformation	تشوه مرن لدن	Elastico-Viscous Deformation	تشوه مرن لزج

<b>F</b>			
Failure Envelope	مغلف التكسر	أحزمة الطي والتصدع التراكمي	Fold and Thrust Belts
Fault	صدع	Fold domain	قطاع مطوي
Fault-bend folds	طيات انحناء الصدع	Fold-related Fractures	كسور مرتبطة بالطية
Fault block	كتلة متصدعة (كتلة الصدع)	Folding line	خط طي
Fault contact	تماس صدعي	Fold orientation	توجه الطية
Fault plane solution	حل مستوي الصدع	Fold profile	مقطع الطية (المتعامد مع محورها)
Fault propagation folds	طيات انتشار الصدع	Fold tightness	تضييق (تضام) الطية
Fault rock	صخر الصدع	Foreland	مقدمة اليابسة
Fault trace	أثر الصدع	Form line Contours	خطوط التسوية الشكلية
Finite strain ellipse	إهليلج الانفعال النهائي	Formation contacts	تماسات التشكيلات
Flat	مسطح، منبسط (صدعي)	Foreshortened map	خريطة مقصّرة
Floor thrust	صدع تراكم قاعي	Fracture	كسر
Fracture Strength	متانة التكسر	Fracture zone	نطاق كسور
Fold	طية	Front dip	ميل جبهي

<b>G</b>			
General compression	ضغط عام	Geometric lines	خطوط هندسية

General tension	شد عام	فعالية حرارية أرضية
		Geothermal activity
Geographical coordinates	إحداثيات جغرافية	مناطق الحرارة الأرضية
		Geothermal areas
Geological compass	بوصلة جيولوجية	طرائق تخطيطية
		Graphic Methods
Geometric analysis	تحليل هندسي	دائرة كبيرة
		Great circle
Geometric axes	محاور هندسية	

H		
Heave	رمية أفقية	مخطط الأعمدة
		Histogram
Hinge fault	صدع مفصلي	انفعال متجانس
		Homogeneous Strain
Hinge line	خط المفصلة	أجسام هوك
		Hookean bodies
Hinge point	نقطة المفصلة (طيات)	تكسر هيدروليكي
		Hydraulic fracturing
Hinterland	مؤخرة اليابسة	

I		
Imbricate structure	بنية حشفية	إهليلج الانفعال اللحظي
		Instantaneous strain ellipse
Inclination	ميل	انزلاق طبقي (انزلاق بين طبقي)
		Interbed slip
Inclined fold	طية مائلة	زاوية الطية (بين الجناحين)
		Inter-limb angle
Incremental Strain Ellipse	إهليلج الانفعال الترايدي	خرائط تساوي الشحنة الشاقولية
		Isochore maps
Infinitesimal strain ellipse	إهليلج الانفعال اللانهائي	متساوي العمر
		Isochron

نقطة الانعطاف Inflection (inflexion) point	خرائط تساوي الشحانة Isopach maps
In situ في المكان	تعويض توازني Isostatic compensation

J	
Joint شق	

K	
شبكة عداد كالسبيك Kalsbeek counting net	المتبقيات Klippe
طريقة الانعطاف (في رسم المقاطع العرضية) Kink Method	

L	
خط عرض Latitude	بنية خطية Linear structure
طبقة Layer	صدع مجرفي Listric fault
موازنة طول الخط Line length balancing	صدع تراكبي مجرفي Listric thrust
ترجيع طول الخط Line length restoration	خطوط السحنات الصخرية Lithofacies lines
خط الانعطاف Line of inflection	إجهاد ليثوستاتي Lithostatic stress
خط نظر line of sight	انفعال طولاني Longitudinal Strain
مظهر خطي Lineament	بنية خطية Linear structure

<b>M</b>		
Magnetic dip	ميل مغنطيسي	الخطأ الأعظمي للاتجاه Maximum strike error
Magnetic field	حقل مغنطيسي	Mean Direction
Magnetic lineation	خطوطية مغنطيسية	Median surface
Magnetic Reversals	انعكاسات مغنطيسية	تعديلات تحويلية Metamorphic modification
Magnetic stripes	أشرطة مغنطيسية	قارة صغيرة Microcontinent
Magnetometer	جهاز قياس المغنطيسية	توجهات أساسية Modal orientations
Main basal thrust	صدع تراكبي رئيس قاعدي	انقطاعات أساسية Modal discontinuities
Map	خريطة	مخطط مور Mohr Diagram
Map view	نظرة خريطة	مغلف مور للتكسر Mohr envelop of failure
Marker plane	سطح معلّم	معدل (سرعة) حركة Movement rate
Material lines	خطوط مادية	

<b>N</b>		
Net slip	رمية حقيقية	طية غير أسطوانية Non-cylindrical fold
Neutral folds	طية حيادية	لامتغزق Non-plunging
Newtonian fluids	سوائل (أو موائع) نيوتن	الإجهاد العمودي Normal Stress
Noncoaxial Strain	انفعال لامتحد المحور	ترابط صفري Null combination

طية غير أسطوانية	Non-cylindrical fold
------------------	----------------------

O			
Oblique separation	انفصال منحرف	Open Joint	شق مفتوح
Oblique slip	انزلاق المنحرف	Open fold	طية مفتوحة
Oblique slip fault	صدع انزلاق منحرف	إنشاء تخطيطي متعامد (إنشاء أورثوغرافي)	Orthographic construction
Offset	انتقال	Overthrusts	صدوع الدثر
Oolite	بنية بيوضية	Outcrop pattern	نمط تكشف

P			
Paleocurrents	تيارات قديمة	Plastic deformation	التشوه اللدن
Paleomagnetism	مغناطيسية قديمة	Plate	صفحة
Paleomagnetic Time Scale	سلم زمني مغناطيسي قديم	Plate boundaries	حدود صفحية
Paleostress	إجهاد قديم	Plate margins	هوامش صفحية
Parallel fold	طية متوازية	Plate Geometry	هندسية الصفحة
Parallel geometry	هندسية متوازية	Plate growth	نمو صفحي
Permeability	نفاذية	Plotting	توقيع
Pervasive	خاللي (متغلغل في كامل البنية)	Plunge	تغريق
Piercing points	نقاط اختراق	Plunging	متغرق
Pin line	خط الودد	Primitive circle	دائرة أولية
Pinch-out lines	خطوط الترقق	المستويات الرئيسية للإجهاد	Principal planes of stress

Pitch	زاوية انحدار خط	Principal Stresses	إجهادات رئيسة
Pivotal fault	صدع محوري الدوران	Profile of the fold	مقطع الطية المتعامد مع محورها
Planar fault	صدع مستوي	Profile view (of folds)	نظرة مقاطع الطيات المتعامدة مع محاورها
Planar structure	بنية مستوية	Polarity reversals	انعكاسات قطبية
Plane failure	انهيار مستوي	Pole of the plane (Pole to plane)	قطب (ناظم) المستوي
Plane of projection	مستوي إسقاط	Pore Pressure	ضغط مسامي
Plane Strain	انفعال مستوي	Ptygmatic fold	طية جبالية
Planes of weakness	سطوح الضعف	Pure shear	قص صرف
Planimeter	مقياس مساحات	pygidium	جزء خلفي (لمستحاثات)
Plan view	مستوي رؤية أفقية		

### Q

Quadruple junction	رابطة رباعية		
--------------------	--------------	--	--

### R

Ramp	منحدر (صدعي)	Rift valleys	أودية غورية ضخمة (أودية انهدامية)
Rate of spreading	معدل (سرعة) الانتشار	Right dihedral method	طريقة ثنائي الوجوه القائم (دراسة الإجهاد)
Reclined fold	طية متكئة	Right hand rule	قاعدة اليد اليمنى
Recumbent fold	طية مستلقية	Rigid	صلب
Reference line	خط مرجعي	Rock	صخر

Restoration	ترجييع (استعادة)	Rock's fabric	نسيج صخري
Restoration approach	مقاربة الترجيع (إعادة البناء)	Roof thrust	صدع تراكب سقفي
Restoration of cross sections	ترجييع المقاطع العرضية	Rose Diagram	مخطط الوردة
Retro-deformation	تشوه راجع	Rotation	دوران
Rheological Models	النماذج الانسيابية (الريولوجية)	Rotational fault	صدع دوران
Rheology	علم الانسياب أو "الريولوجيا"	Rule of Vs	"قاعدة V"
Ridge	ظُهر		

<b>S</b>			
Sea floor spreading	انتشار قاع البحر (المحيط)	Stereographic Projection	إسقاط ستيريوغرافي (إسقاط مجسم)
Sense of rotation	جهة الدوران	Stereographic net	شبكة ستيريوغرافية
Sense of separation	طبيعة الانفصال	Strain Measurement	قياس الانفعال
Sense of slip	طبيعة الانزلاق	Strain Ellipse	إهليلج الانفعال
Separation	انفصال	Strain Ellipsoid	إهليلج مجسم للانفعال
Set	مجموعة	Strain rate	معدل الانفعال
Shear Strain	انفعال القص	Stratigraphic throw	رمية طبقية (رمية ستراتغرافية)
Shear strength	متانة القص	Stratigraphic separation	انفصال طبقي (انفصال ستراتغرافي)

Shear stress	إجهاد القص	Stress	الإجهاد
Sheet intrusions	اندساسات صفيحية	Stress Ellipsoid	إهليلج مجسم للإجهاد
Sill	اندساس أفقي	Strike line	خط الاتجاه
Similar fold	طية متشابهة	Strike notation	تدوين الاتجاه
Simple Shear	قص بسيط	Strike separation	انفصال اتجاهي
Slip	انزلاق، رمية	Strike slip	رمية اتجاه
Slip vector	متجهة الانزلاق	Strike slip fault	صدع انزلاق اتجاهي
Slaty cleavage	انفصال أردوازي	Structural bearing	صوب بنيوي
Small circle	دائرة صغيرة	Structural Elements	عناصر بنيوية
Spherical projection	مسقط كروي	Structural maps	خرائط بنيوية
Spreading	انتشار	خطوط التسوية البنيوية	
		Structure Contours	
Station	محطة	Synform	شكل محدب
	مخططات بيانية إحصائية	System	جملة (منظومة)
Statistical diagrams			
	مخطط مجسم (ستيريوغرام)	Systematic errors	أخطاء نظامية
Stereogram			

T			
Tertiary	ثالثي	Translational fault	صدع انتقال
Thickness	ثخانة	Transmitted forces	القوى المنقولة
Throw	رمية شاقولية	Trench	أخدود
Thrust duplex	ثنائية تراكيبية	Trend	منحى
Thrust sheet	شريحة تراكب	Trend of plunge	منحى التغيريق
Tilt of bed	إمالة طبقة	Triple Junction	رابطة ثلاثية

إهليلج الانفعال الكلي Total Strain Ellipse	Trough منخفض
Trajectories مسارات	Trough surface سطح المنخفض
Translation انتقال	Trough trace أثر المنخفض
Transform fault صدع محول	True dip ميل حقيقي
منحى الصدوع المحولة Transform trend	

<b>U</b>	
Unconformity لاتوافق	إلغاء انزلاق (إعادة الطبقات المزاحة بالصدوع إلى وضعها غير المزاح) Unslipping
Uniaxial tension شد وحيد المحور	Up-plunge view نظرة "أعلى التغيريق"
Uniaxial compression ضغط وحيد المحور	Upright fold طية قائمة
Uniform متسق	كتلة متحركة نحو الأعلى Upthrown block
Unfolding بسط (إعادة الطبقات المطوية إلى وضعها السابق غير المطوي)	

<b>V</b>	
Velocity سرعة	Vertical شاقولي
Velocity field حقل السرعة	مقاطع عرضية شاقولية Vertical cross section

Velocity line	خط السرعة	المبالغة الشاقولية Vertical Exaggeration
Velocity plane	مستوي السرعة	Vein عرق
Velocity Space	فضاء السرعة	

Y			
Yield Stress	إجهاد الخضوع	Yield Strength	مقاومة الخضوع

W			
Wedge failure	انهيار إسفيني	Window	نافذة
Width of outcrop	عرض التكشف	Wulff net	شبكة وولف

Z	
Zenith	نقطة الأوج

### المراجع العربية:

- دركل، عبد الناصر، 1994: الجيولوجيا البنيوية (2)، منشورات جامعة دمشق. 303 ص.
- دركل، عبد الناصر، 1996: الشقوق في محدد قاسيون. مجلدات أسبوع العلم السادس والثلاثين، المجلس الأعلى للعلوم (سوريا)، الكتاب الثاني، الجزء الأول، ص. 169 – 202.
- بايرلي، مظهر؛ دركل، عبد الناصر، 2000: الجيولوجيا البنيوية (الجزء العملي)، منشورات جامعة تشرين. 162 ص.

### المراجع الأجنبية:

- Angelier, J., 1979 : Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. Tectonophysics, 56, pp. 17–26.
- Angelier, J., 1990: Tectonique cassante et néotectonique. Ann. Soc. Géol. Belgique. t. 112, Fasc. 2, pp. 283 – 307.
- Best, J.A., Barazangi, M., Al-Saad, D., Sawaf, T., Gebran, A., 1993: Continental Margin Evolution of the Northern Arabian Platform in Syria. The Am. Ass. of Petr. Geol. Bull. v. 2, p. 173 – 193.
- Billings, M.P., 1972: Structural Geology, Prentice–Hall.Inc. 606 p.
- Busk, H.G., 1929: Earth Flexures: Cambridge University Press, Cambridge (republished by William Trusell, New York, 1957).

- Buxtorf, A., 1916: Prognosen und Befunden beim Hauensteinbasis- und Grenchenberg-tunnel und die Bedeutung der letzteren für die Geologie des Juragebirges: *Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Basel*, v. 27, p. 184–254.
- Carey, S.W., 1962: Folding: *Journal of the Alberta Society of Petroleum Geologists*, v. 10, p. 95–144.
- Coe, A.L., 2010: *Geological Field Techniques*. Blackwell Publishing Ltd. 323 p.
- Cox, A. & Hart, R.B., 1986: *Plate Tectonics, How it works*. Blackwell Scientific Publications,.392 p.
- Dahlstrom, C.D.A., 1969: Balanced cross sections: *Canadian Journal of Earth Science*, v. 6, p. 743–757.
- Darton, N.H., 1940: Some Structural Features of the northern Coal Basin, Pennsylvania: U.S. Geological Survey Professional Paper 193D. p. 96 – 81.
- Davis, G.H. & Reynolds, S.J., 1996: *Structural Geology of rocks and regions*. John Wiley & Sons, Inc. 2<sup>nd</sup> ed., 776 p.
- De Paor, D.G., 1988: Balanced sections in thrust belts, Part 1: construction: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 72, p. 73–90.
- Duebendorfer, E. M.; Schiefelbein, I. M.; Rowland, S. M., 2007: *Structural Analysis and Synthesis: A Laboratory Course in Structural Geology*. John Wiley and Sons Ltd, UK, 304p.
- Dutch, S. 2012: *Analysis of Complex Structures. Structural Geology Techniques*, University of Wisconsin, Green Bay.  
<http://www.uwgb.edu>

- Elliott, D., 1976: Energy balance in thrusts and deformation mechanisms of thrust sheets: Proceedings of the Royal Society of London, v. A2 83, p. 289–312.
- Elliott, D., & M.R.W. Johnson, 1980: Structural evolution in the northern part of the Moine thrust belt, NW Scotland: Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, v. 71, p. 69–96.
- Elliott, D., 1983: The construction of balanced cross-sections: *Journal of Structural Geology*, v. 5, p. 101.
- Flick, H.; Quade, H., Stache, G.A., 1972: Einführung in die tektonischen arbeitsmethoden. Clausthaler Hefte, Clausthal 12, 96 p.
- Fleuty, M.J., 1987: Folds and folding: in C.K. Seyfert, editor, The Encyclopedia of Structural Geology and Plate Tectonics, Van Nostrand Reinhold Co., New York, p. 249–270.
- Grotinger, J.; Jordan, T.H.; Press, F. and Silver, R.: Understanding Earth. W.H. Freeman and Company. 5<sup>th</sup> ed. 2007, 579 p.
- Hobbs, B.E.; Means, W.D. and Williams, P.F. 1976: An outline of Structural Geology, John Wiley & Sons, Inc. 571 p.
- Johannes D., 2000: StereoNett, Version 2.46, Institut für Geologie, Ruhr Universität – Bochum, Germany.
- Kearey, Ph., Klepeis, A. Keith, and Vine, J.F. 2009: Global Tectonics. 3<sup>rd</sup> ed. Wiley–Blackwell, 482p.
- Krause, H.F., Pilger, A., 1978: Bruchhafte verförmung, Erscheinungsbild und Deutung, Clausthaler Hefte, 15, 85p.

- Lisle, R.J., & P.R. Leyshon, 2004: *Stereographic Projection Techniques for Geologists and Civil Engineers: Second Edition*, Cambridge University Press, Cambridge. 112 p.
- Leyshon, P.R. and Lisle, R.J., 1996: *Stereographic Projection Techniques in Structural Geology*. Butterworth–Heinemann Ltd. 104 p.
- Lutgens, F.K. & Tarbuck, E.J., 2003: *Essentials of Geology*. Prentice Hall, Inc. Eighth ed., 464 p.
- Maltman, A., 1998: *Geological Maps*. 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons. 260 p.
- Marshak, S., & N.B. Woodward, 1988: Introduction to cross-section balancing: in S. Marshak & G. Mitra, editors, *Basic Methods of Structural Geology*, Prentice–Hall, Englewood Cliffs, N.J., p. 303–332.
- Mattauer, M. 1980: *Les Déformation des matériaux de l'écorce terrestre*. Herman Collection 2<sup>nd</sup> ed., 93 p.
- McClay, K.R., 1992: Glossary of thrust tectonics terms: in K.R. McClay, editor, *Thrust Tectonics*: Chapman & Hall, London, p. 419–433.
- McClay, K. 1999: *The Mapping of Geological Structures*. John Wiley & Sons, 161 p.
- Mitra, S., 1992: Balanced Structural Interpretation in Fold and Thrust Belts. In: *Structural Geology of Fold and Thrust Belts*, ed. Shankar Mitra and George W. Fisher, The John Hopkins University Press. pp. 53 – 77.

- Möbus, G., 1989: Tektonik. VEB Deutscher Verlag, Leipzig, 472 p.
- Park, R.G., 2001: Foundations of Structural Geology. Nelson Thrones, 3<sup>rd</sup> ed. 202 p.
- Ponikarov, V., 1963: The Geological map of Syria, sheet I-36-XII, I-37-VII, Scale 1:200000. Syrian Arab Republic, Ministry of Industry.
- Ragan, D.M., 2009: Structural Geology, An Introduction to Geometrical Techniques. 4<sup>th</sup> ed. Cambridge University Press. 602 p.
- Ramsay, J.G. and Huber, M. I., 1983: The techniques of modern structural geology, V1: Strain Analysis. Academic Press. 307 p.
- Ramsay, J.G. and Huber, M. I., 1987: The techniques of modern structural geology, V2: Folds and Fractures. Academic Press. 700 p.
- Rickard, M.J., 1971: A classification diagram for fold orientation: Geological Magazine, v. 108, p. 23–26.
- Rowland, S.M., 1986: Structural Analysis and Synthesis: A Laboratory Course in Structural Geology. Blackwell Scientific Publications. 208 p.
- Schettino, A. 2015: Quantitative Plate Tectonics: Physics of the Earth – Plate Kinematics – Geodynamics. Springer, 403 p.
- Suppe, J., 1985: Principles of Structural Geology. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, New Jersey.

- Tapponnier, P.; Peltzer, G.; Le Dain, A.Y.; Armijo, I. and Cobbold, P. 1982: Propagating extrusion tectonics in Aisa: New insight from simple experiments with plasticene. *Geology*, v.10, 611 – 616.
- Van der Pluijm, B.A. and Marshak, S., 2004: *Earth Structure, An Introduction to Structural Geology and Tectonics*. W. W. Norton & Company, Inc., 656 p.
- Wernicke, B., & B.C. Burchfiel, 1982: Modes of extensional tectonics: *Journal of Structural Geology*, v. 4, p. 105–115.

اللجنة العلمية:

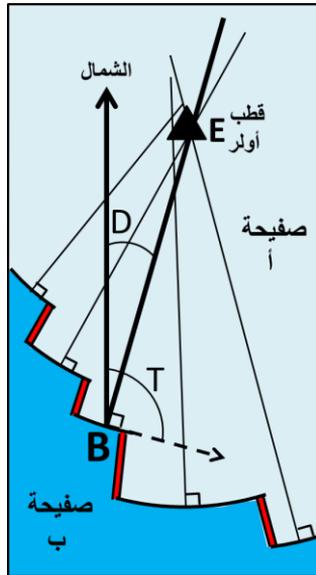
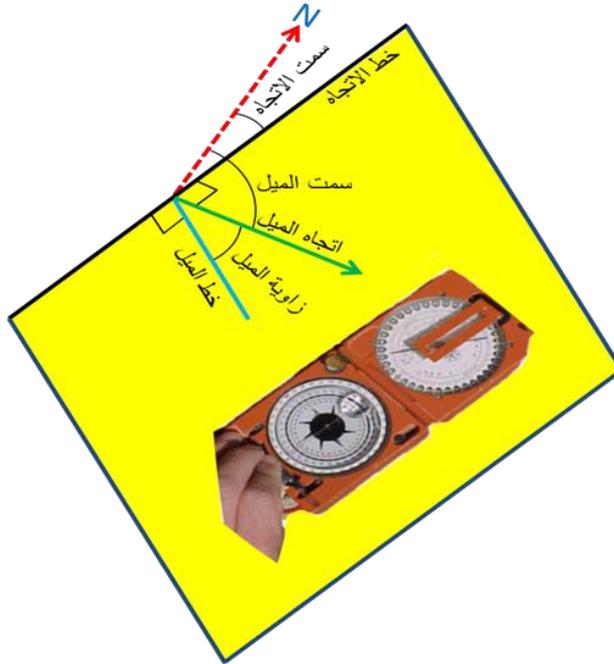
د. محمد داود

د. توفيق يونس

د. عبد الكريم عبد الله

المدقق اللغوي:

د. راتب سكر



الجيولوجيا البنيوية - الجزء العملي