الجامعة السورية الخاصة
SYRIAN PRIVATE UNIVERSITY

كلية هندسة البترول
Faculty of Petroleum Engineering

صفات الخزانات المتشققة

السنة الخامسة

المحاضرة الاولى

الدكتور نضال شقير

2019 - 2018

مقدمة عامة ومراجعة

تعريف الفوالق

الفوالق (Faults) :هي كسور قصية Shear fractures تحدث على امتداد مستوياتها حركة نسبية.

وهي قد تكون بامتدادات مجهرية أو قد تمتد لعشرات أو مئات الكيلومترات .

تتكون الفوالق عندما تكون قيمة الإجهاد التفاضلي (Differential) stress لاتساوي الصفر، أي عندما تكون قيمة الإجهاد الرئيس الأعظم ($\sigma 1$) لا تساوي قيمة الإجهاد الرئيس الأدنى ($\sigma 3$)علماً أن الإجهاد التفاضلي يمثل قيمة الفرق بين الإجهاد الرئيس الأعظم والإجهاد الرئيس الأدنى .

$$(\sigma d = \sigma 1 - \sigma 2 \neq 0)$$

عملية التفلق:

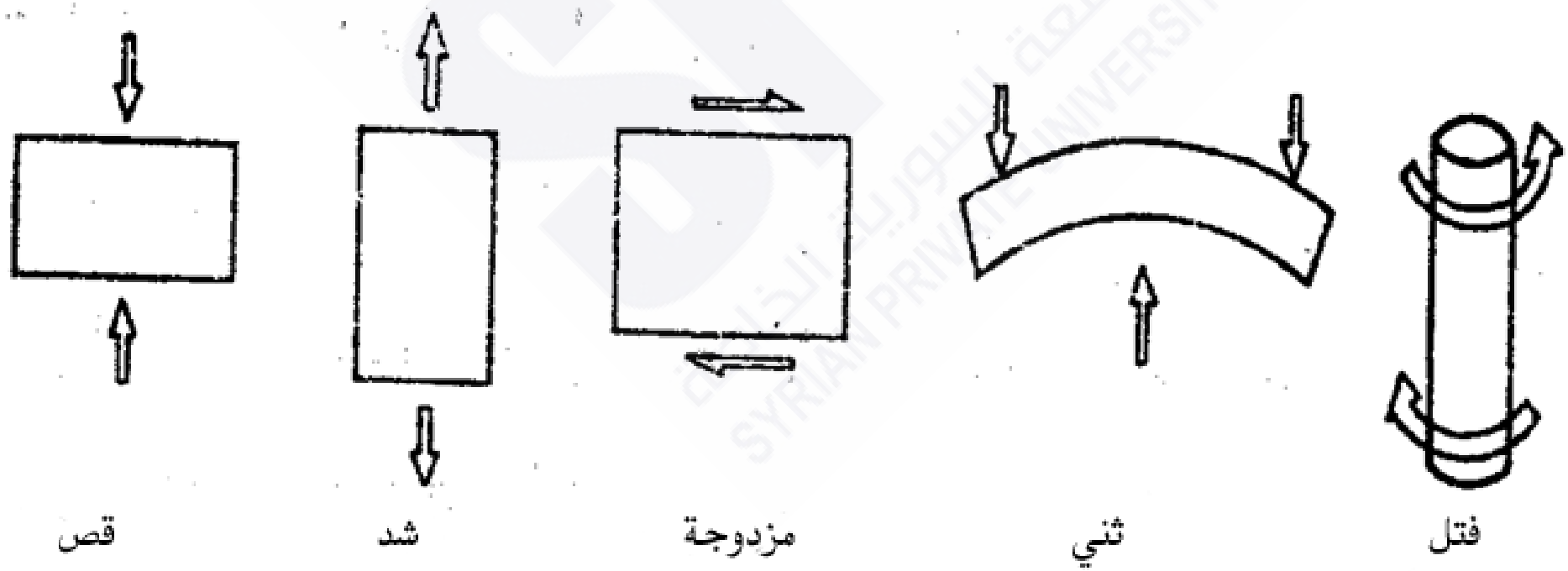
عملية التفلق(Faulting) هي الميكانيكية التي تتكون بها الفوالق(Faults).

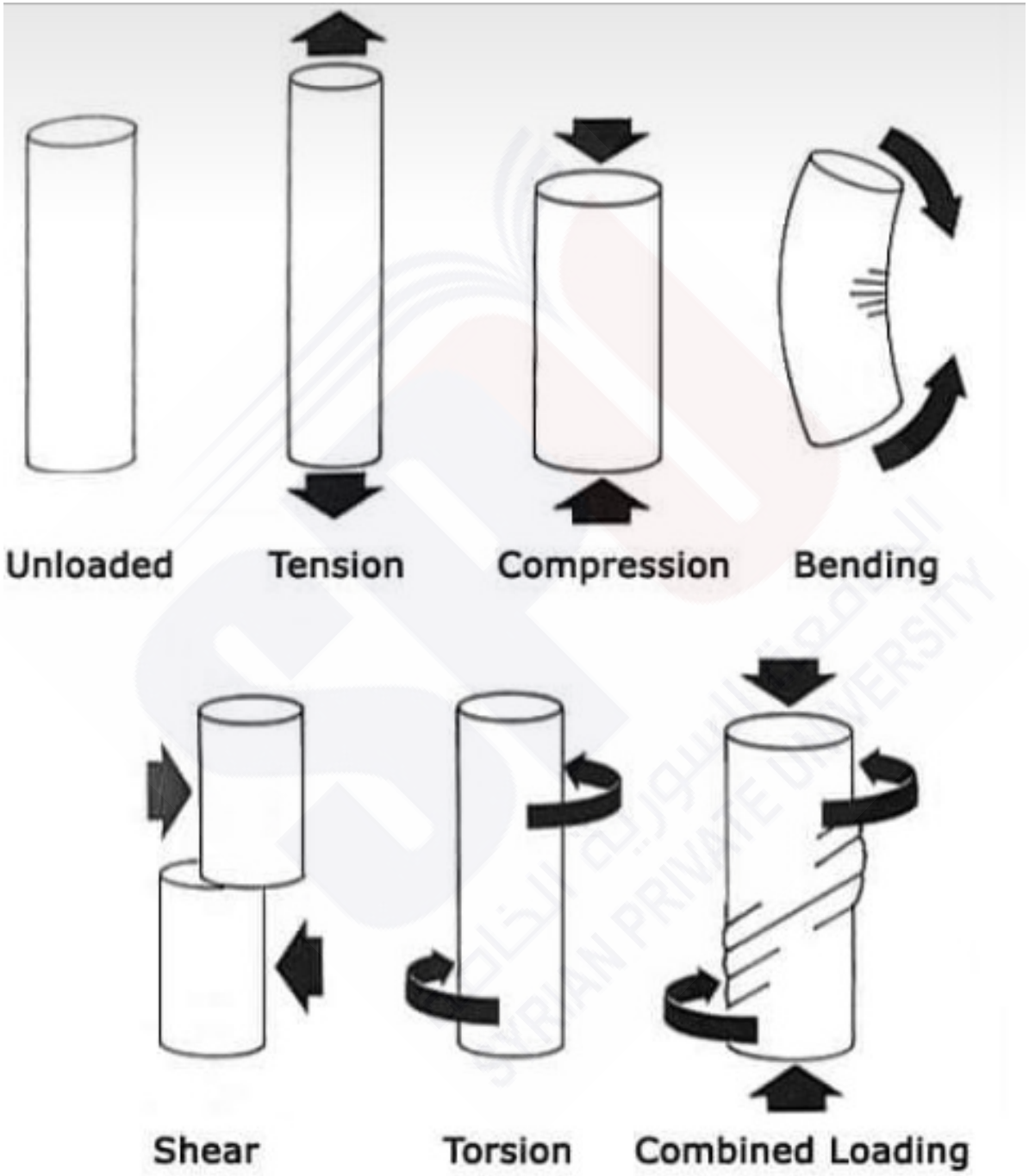
تحدث عملية التفلق أما نتيجة

لقوى الشد (Tension forces) أو

قوى الضغط (Compression Forces) أو

قوى المـزدوجة (Couple forces).




Unloaded
Tension
Compression
Bending
Shear
Torsion
Combined Loading

وهنـاك حالتين رئيستين للتفلق هما: التفلق التوسعي والانكماشي

1- التفلق التوسعي (Extensional faulting): يحدث في حالة تعرض الطبقات الصخرية إلى قوى الشد التـي ينتج عنها حدوث عملية استطالة في الطبقات الصخرية، وذلك بسبب تكون الفوالق الاعتيادية التي تتحـرك فيها كتلة الحائط المعلق نحو الأسفل وباتجاه ميل مستوي الفالق .

هذا النوع من التفلق يحدث عند حافـات الصفائح التباعدية التي تسود فيها قوى الشد والتي تؤدي إلـى تكـوين أحـواض التـشقق أو الأحـواض الانـهدامية (Rifting Basins)

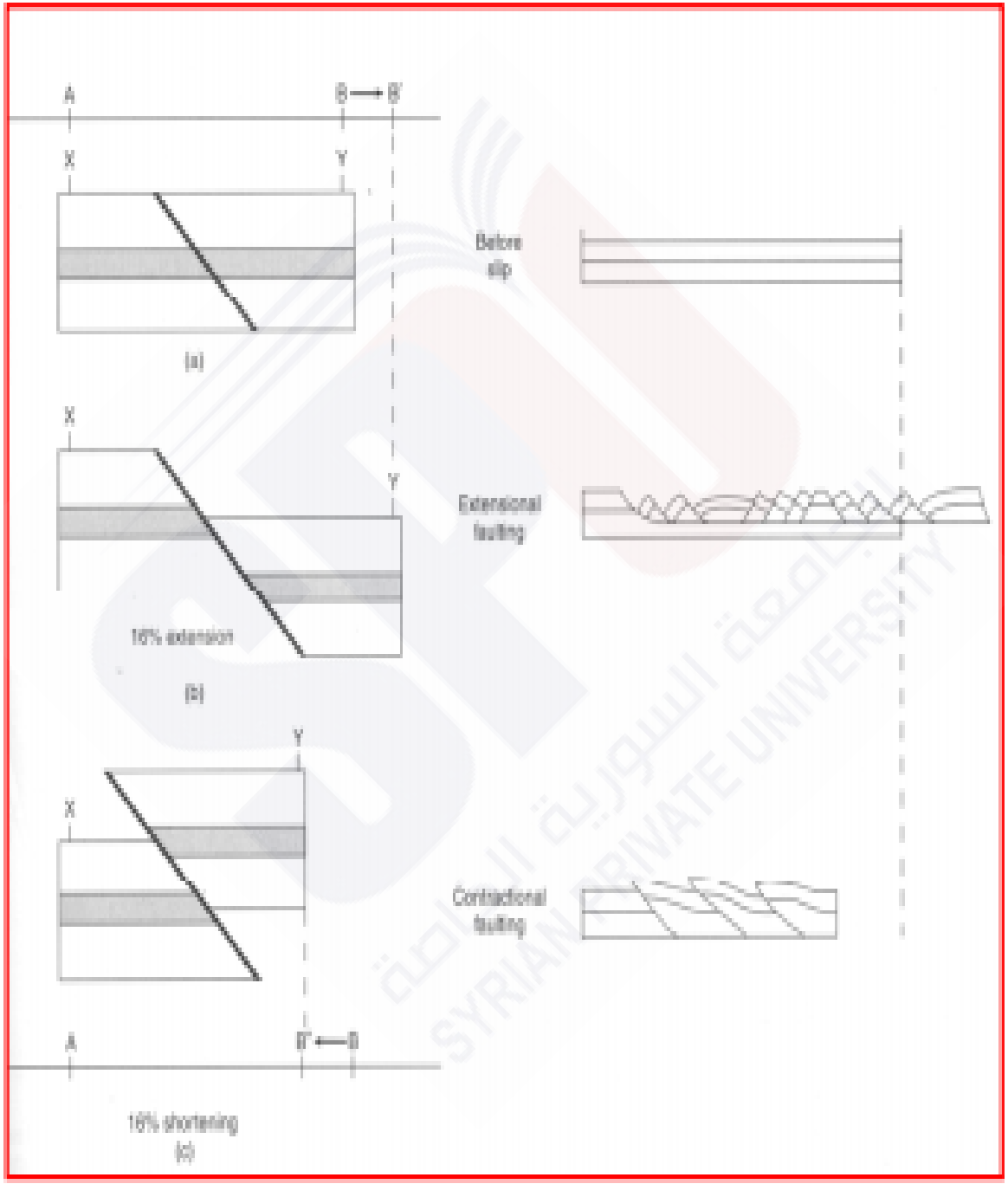
كما هو الحال في تكون البحر الأحمر (Red Sea).

2)-التفلق الانكماشي (Contractional faulting):

يحدث في حالة تعرض الطبقات الصخرية إلى قوى الضغط التي ينتج عنها حدوث عملية تقلص في الطبقات الصخرية، وذلك بسبب تكون الفوالق العكسية التي تتحرك فيها كتلة الحائط المعلق نحو الأعلى عكس اتجاه ميل مستوي الفالق.

هذا النوع من التفلق يحدث عند حافات (الأطباق) الصفائح التصادمية التي ينتج عنها تكون السلاسل الجبلية المترافقة مع الفوالق.

من الأمثلة الجيدة على ذلك نطاق التصادم في جبال الهملايا والألب وزاكروس وطوروس


A
B → B'
X
Y
Before slip
(a)
X
Y
Extensional faulting
16% extension
(b)
Y
X
Contractional faulting
A
B' ← B
16% shortening
(c)

علاقة الطيات بالفوالق Folds – Faults Relationship

عادةً ما توجد الطيات مع الفوالق في تكشف صخري واحد، ووجود هذان التركيبان معاً مثير للاهتمام،

وذلك لأن الطية تمثل نوعاً من التشويه اللدن (Ductile Deformation)

أما الفالق فيعتبر نوعٌ من تراكيب التكسر الهش (Brittle Failure).

والسؤال هو كيف يمكن للصخور أن تتكسر بالأسلوب الهش مكونةً فالق وفي نفس الوقت تتشوه بلدونة مكونةً طية؟

والتفسير الوحيد لوجود هذان التركيبان معاً هو تكوين التركيب الأول في وقت مختلف عن التركيب الثاني وتحت ظروف ضغط ودرجة حرارة مختلفة.

ويتم تصنيف الطيات حسب علاقتها مع الفوالق:

هناك العديد من التصنيفات التي وضعت لتصنيف الطيات، أغلبها تصنيفات هندسية تعتمد على الخصائص الهندسية للطية، لذلك فهي تعرف بالتصنيفات الهندسية للطيات .

أولاً :الطيات المتكونة قبل الفالق (Pre-Faulting Folds):

ثانياً :الطيات المتكونة بعد الفوالق (Post-Faulting Folds):

ثالثاً :الطيات المتزامنة مع تكوّن الفالق(Syn-Faulting Folds):

الفواصل والشقوق والعروق (Joints, Fissures, and Veins)

الكسور أو التكسرات (Fractures) هي عبارة عن مستويات ضعف في الطبقات الصخرية تفقد عندها الصخرة قابليتها على التماسك . والكسور على أربعة أصناف هي:

الفواصل (Joints)

والشقوق (Fissures) ≡ ((Fractures)) في منهاجنا

العروق (Veins)

والفوالق (Faults)

أولاً: الفواصل:

الفواصل (Joints) هي كسور مستوية أو منحنية موجودة في الصخور لا يوجد فيها حركة مرئية باتجاه موازي لمستوي الكسر .

وان أي حركة بسيطة تحصل بموازاة سطح الفاصل تحول الفاصل إلى فالق(Fault).

والفواصل أما أن تكون مغلقة وتعرف بالفواصل المغلقة (Closed Joints) أو تحدث حركة عمودية على مستوي الكسر وعندها تسمى بالفواصل المفتوحة (Open Joints).

وميزة الفواصل المفتوحة أنها تكون خالية من الرواسب .

ومن الجدير بالذكر أن عرض الفاصل المفتوح ينبغي أن لا يزيد على(1cm) لأنه إذا زاد عن ذلك يتحول إلى شق (Fissures).

وتمتد الفواصل إلى مسافات مختلفة تتراوح من بضعة سنتمترات إلى مئات الأمتار.

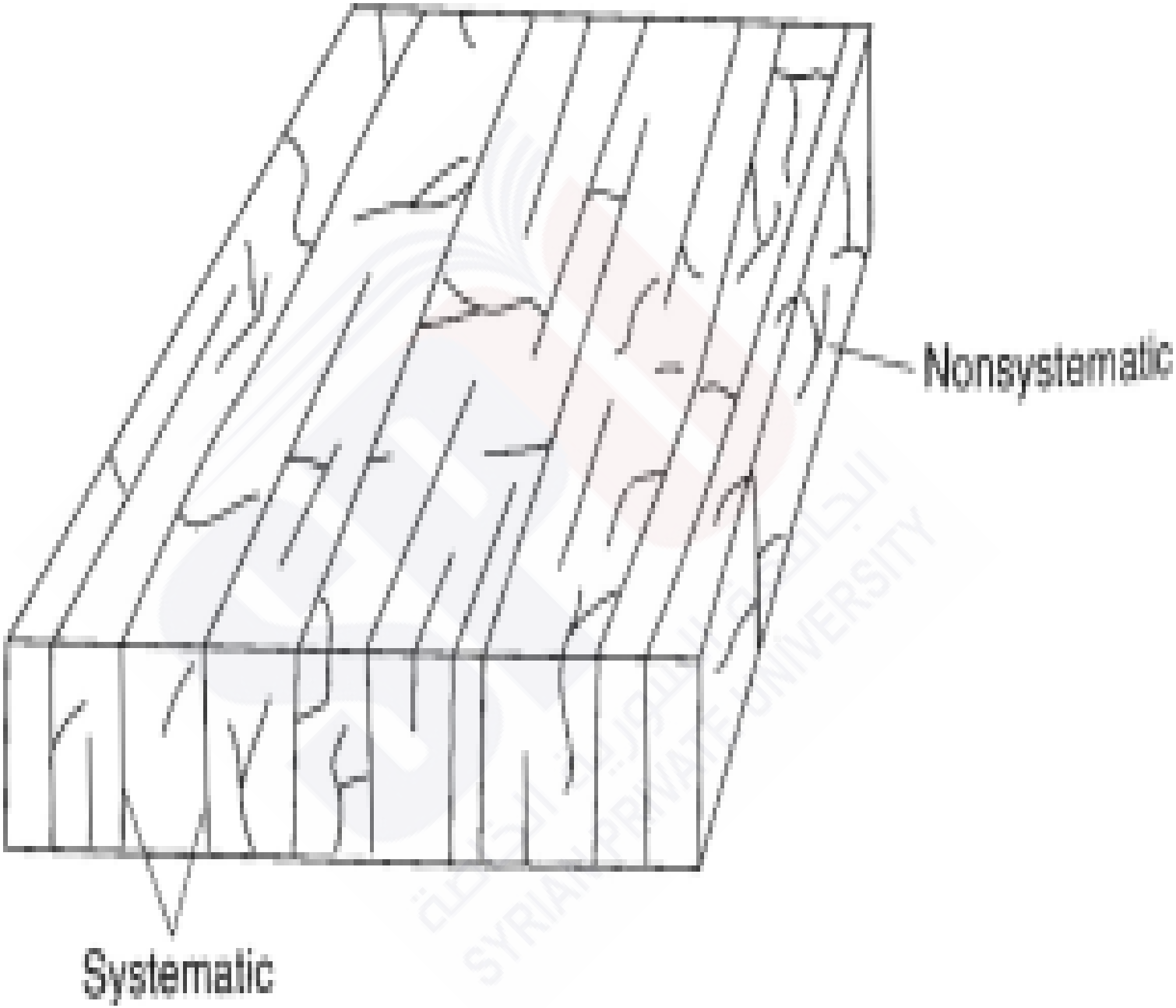
التصنيف الهندسي للفواصل:

يعتمد التصنيف الهندسي(Geometrical Classification)للفواصل على العلاقات الهندسية بين الفواصل نفسها أو بينها وبين العناصر الهندسية للطبقات الصخرية التي تحتويها أو التراكيب الأكبر التي تقع ضمنها . ولكن التصنيف الأكثر شهرة هو تصنيف الفواصل اعتماداً على العلاقات الهندسية بين وضعيات الفواصل مع بعضها (الشكل).١في هذا التصنيف تقسم الفواصل إلى صنفين هما:

١- **الفواصل غير النظامية(Non-systematic Joints):**وهي الفواصل التي لا تربطها علاقة زاوية مع بضها، ومعدل المسافات بينها غير متساوي، وتكون غير مستوية عادة، وهي لا تملك علاقة هندسية مع الإجهادات المسببة لها.

٢-**الفواصل النظامية (Systematic Joints):**وهي الفواصل التي تربطها علاقة زاوية مع بعضها **(متوازية، متعامدة، مائلة)**، ومعدل المسافات بينها يكون متساوي تقريباً، وتكون مستوية عادة وهي مهمة في إيجاد اتجاهات الإجهادات وذلك لأنها تملك علاقة هندسية ثابتة معها وهي تقسم إلى عدد من الأصناف(Arrays) منها:

الفواصل المتعامدة(Orthogonal Joints) والتي يرمز لها بعلامة الجمع (+)، والفواصل المقترنة(Conjugate Joints) والتي يرمز لها بعلامة الضرب(x).



الشكل(١):الفواصل النظامية وغير النظامية والتي يمكن أن توجد في تكشف صخري واحد.

التصنيف المنشأي للفواصل:

التصنيف المنشأي(Genetic Classification)للفواصل يقسم الفواصل إلى صنفين هما:

الفواصل الشدية (Tension Joints ،) والفواصل القصية (Shear Joints).

ولقد اعتمد الباحثون في تصنيفهم هذا للفواصل على نتائج التجارب المختبرية لميكانيك الصخور والتي تجري على نماذج صخرية في المختبر. فقد وصف عدد من الباحثين الفواصل المتكونة في نموذج صخري مكعب الشكل عند تعريضه إلى أجهاد انضغاطي باتجاه محور ما، والذي يؤدي إلى تولد اتجاهات شدية جانبية باتجاه المحورين الآخرين.

ولقد وجد الباحثون أن الفواصل المتكونة من هذه الإجهادات أما أن تكون فواصل قصية أو فواصل شدية .

الفواصل القصية تكون مائلة على اتجاه الإجهاد الانضغاطي،

أما الفواصل الشدية فتكون أما موازية أو عمودية على اتجاه الإجهادات الشدية

(الشكل ٢).

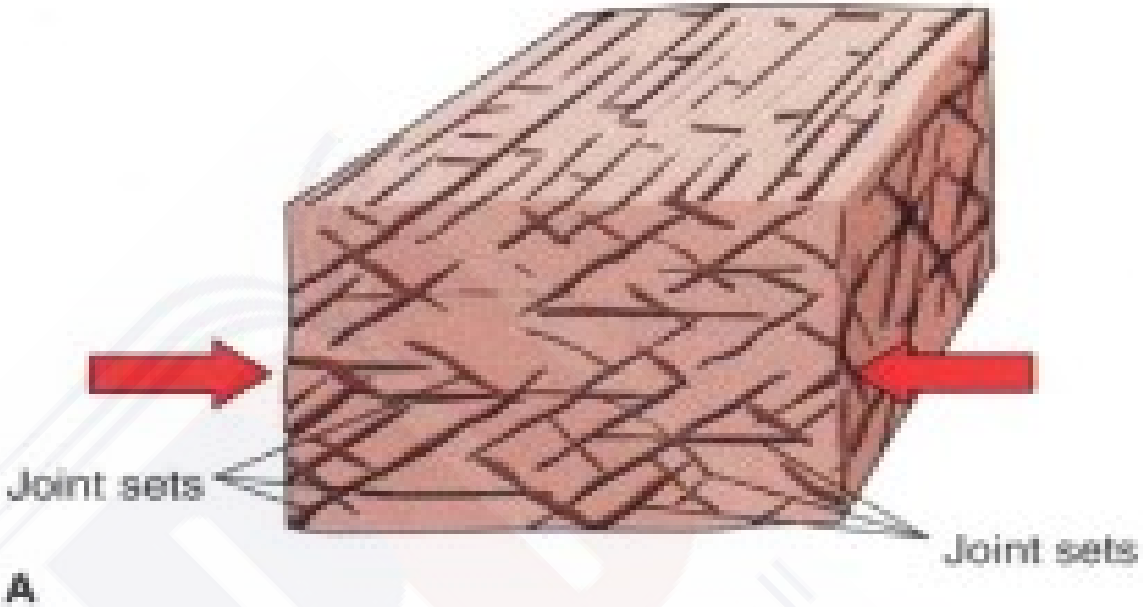
ومن الصعب بصورة عامة التمييز بين فواصل الشد وفواصل القص في الحقل، ولكن يمكن اعتماد عدد من الخواص للقيام بهذه المهمة،

إذ أن فواصل الشد تكون عادة مفتوحة وغير منتظمة الشكل، وهي فواصل مفردة عادة، وأحياناً تكون متعامدة على بعضها .

أما فواصل القص فتكون عادة مغلقة ومنتظمة الشكل، وهي أما أن تكون مفردة أو مقترنة، ولا يمكن أن تكون متعامدة على بعضها إلا في حالات نادرة

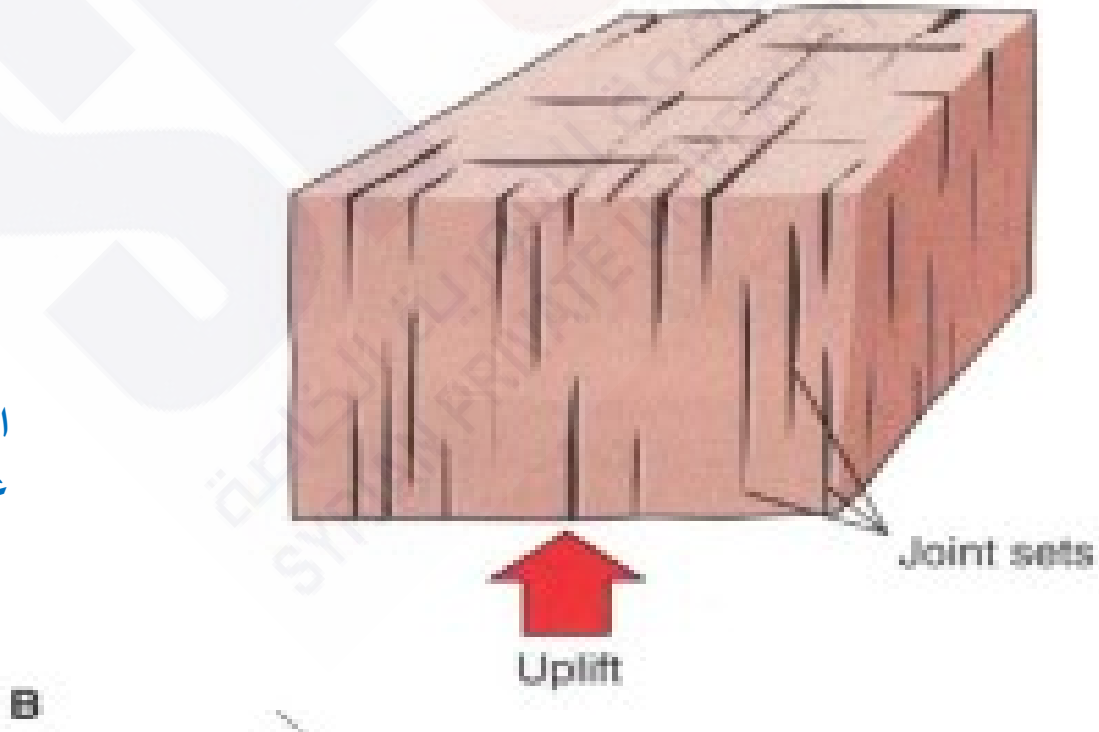
الفواصل القصية تكون مائلة على اتجاه الإجهاد الانضغاطي،

أما فواصل القص فتكون عادة مغلقة ومنتظمة الشكل، وهي أما أن تكون مفردة أو مقترنة، ولا يمكن أن تكون متعامدة على بعضها إلا في حالات نادرة



إذ أن فواصل الشد تكون عادة مفتوحة وغير منتظمة الشكل، وهي فواصل مفردة عادة، وأحياناً تكون متعامدة على بعضها .

الفواصل الشدية فتكون أما موازية أو عمودية على اتجاه الإجهادات الشدية

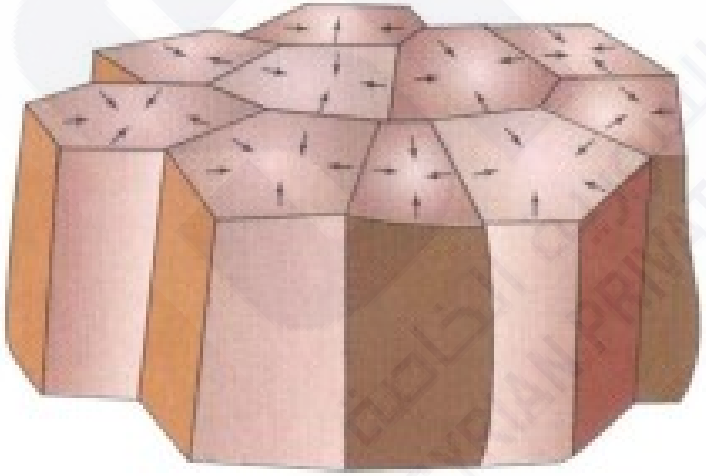


الفواصل العمدانية:

الفواصل العمدانية (Columnar Joints)أو فواصل التبريد (Cooling Joints هي فواصل سداسية أو خماسية أو رباعية الشكل في المقطع العرضي، تتكون نتيجة للتقلص الحاصل في حجم الحمم البازلتية (Basaltic Lava)عند ظهورها على سطح الأرض أو عند صعودها في العنق البركاني.

كما أن هذه الفواصل قد تتكون أيضاً نتيجة للتقلص الكبير في حجم الرواسب الطينية

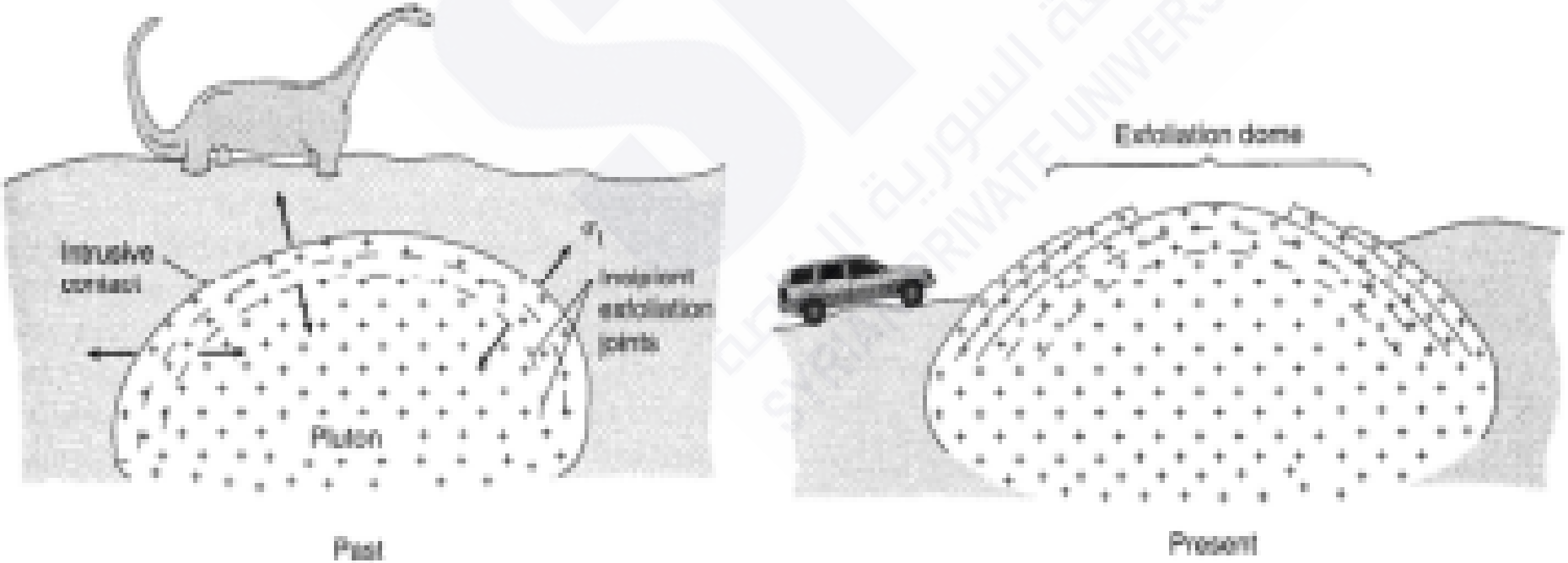
الشكل٣).

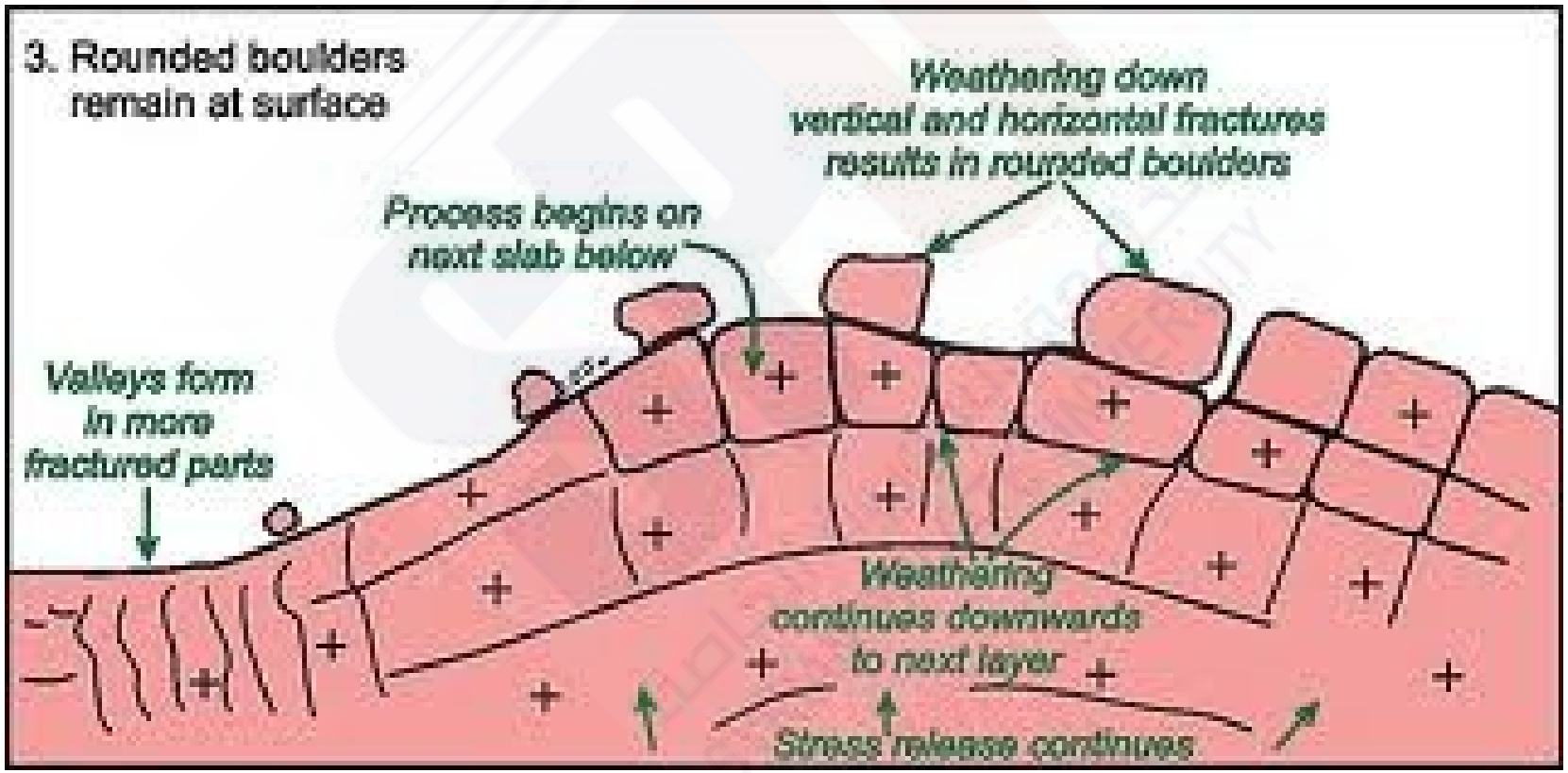


الشكل (٣):الفواصل العمدانية المتكونة من تبريد الحمم البازلتية

فواصل التقشر:

فواصل التقشر أو الفواصل الصفائحية (Exfoliation or Sheeting Joints) هي فواصل ذات أسطح محدبة موازية للسطح الطوبوغرافي للأرض، وتقل المسافة بين أسطح هذه الفواصل كلما اقتربنا من سطح الأرض في التكشف الصخري .وهي كسور شدية تتكون نتيجة إزالة حمل الصخور في الطبقات العليا أو بعد اندفاع الكتل الصخرية نحو الأعلى كما في التراكيب الملحية، **أي أن هذه الفواصل تتكون عندما يصبح محور الإجهاد الرئيس الأعظم (σ1) أفقياً، ومحور الإجهاد الرئيس الأدنى (σ3)شاقولياً** (الشكل٤).




3. Rounded boulders remain at surface
Weathering down vertical and horizontal fractures results in rounded boulders
Process begins on next slab below
Valleys form in more fractured parts
Weathering continues downwards to next layer
Stress release continues

علاقة الفواصل بالفوالق والطيات:

تترافق عملية تكون الفواصل مع عملية تكون الفوالق والطيات، إذ كلما نقترب من الفوالق فأن عدد الفواصل يزداد، خصوصاً إذا كانت أحدى مجاميع الفواصل باتجاه الفالق نفسه .

وفي هذه الحالة يمكن القول بأن الفوالق والفواصل المترافقة قد تكونت بتأثير نفس القوى التكتونية .

أما بالنسبة لعلاقة الفواصل مع الطيات فقد أجمع الكثير من الباحثين أن الفواصل يمكن أن تسبق عملية الطي أو ترافقها أو تعقبها.

مثلاً، فالأقواس الخارجية للطبقات الصخرية عند المناطق المفصلية للطيات المحدبة تمتاز بتركز الفواصل الشدية نتيجة للإجهاد الشدي التي تتعرض له خلال عملية الطي، فيما تتركز الفواصل القصية في الأقواس الداخلية لتلك الطبقات نتيجة للإجهاد الانضغاطي.

ولقد وجد أن هناك ثلاث أصناف من الفواصل

اعتماداً على علاقتها بمفصل الطية هي (الشكل ٥):

١- الفواصل المستعرضة(Transverse Joint):

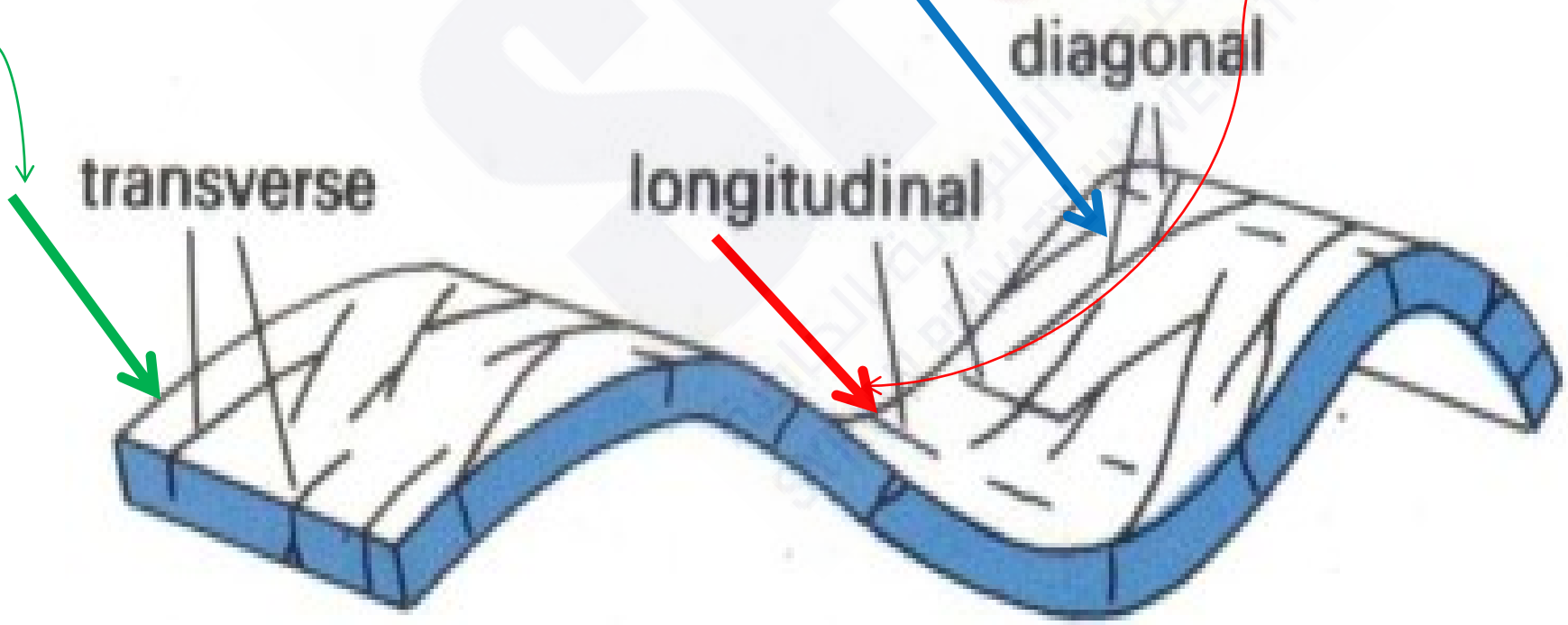
وهي التي تكون عمودية على خط مفصل الطية.

٢- الفواصل الطولية(Longitudinal Joints):

وهي التي تكون موازية لمفصل الطية.

٣- الفواصل المائلة(Diagonal Joints):

وهي التي تكون مائلة على مفصل الطية.



ثانيا: الشقوق:

تعرف الشقوق(Fissures or Cracks)على أنها كسور لا تحدث بامتداد مستوياتها حركة قصية، ولكن يحدث توسع (Dilation) لمستوى الكسر إذ تكون هناك مسافة كبيرة نسبياً بين جهتي الكسر، ولم يحدث فيها ترسيب لمواد معدنية .

أن اتساع الشقوق قد يكون بسبب القوى التكتونية التي كونت هذه الشقوق أو بسبب عوامل التعرية .

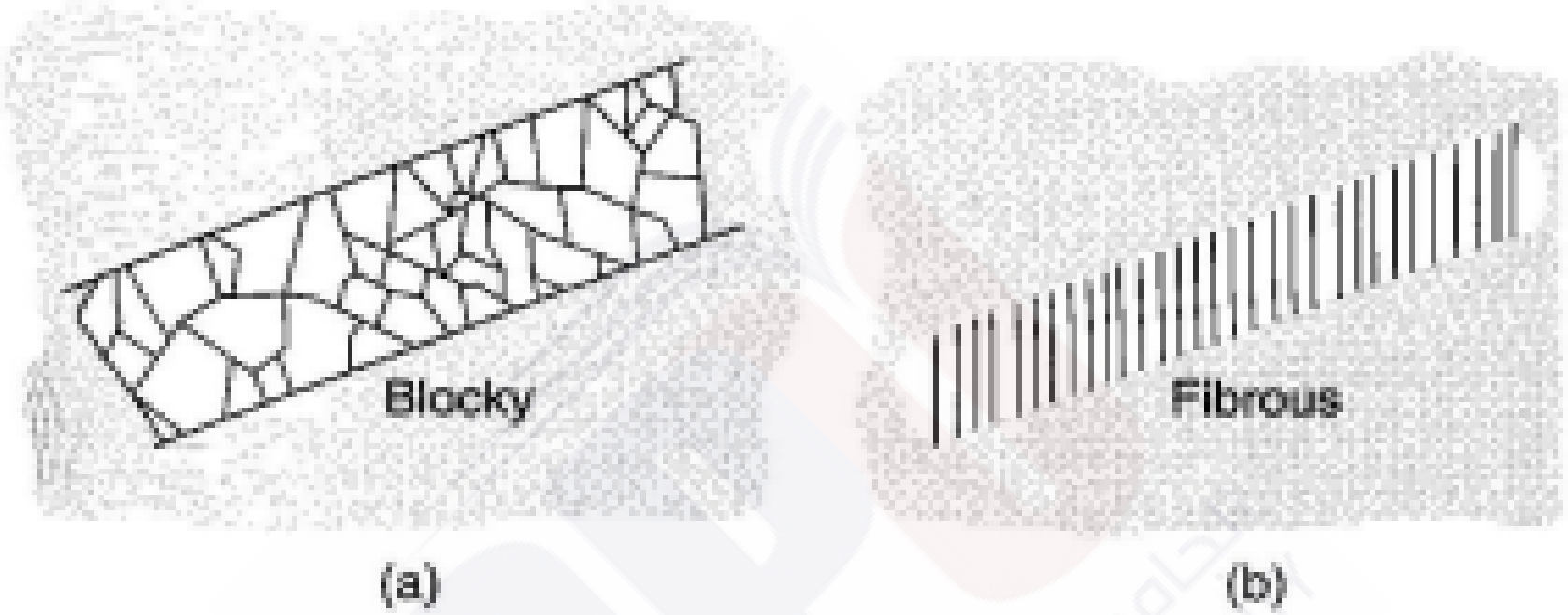
ومن المهم جداً التفريق بين الفاصل المفتوح وبين الشق، إذ أن قيمة فتحة الفاصل المفتوح لا تزيد عن (1cm)

بينما الشق هو الذي تزيد قيمة فتحته عن (1cm).

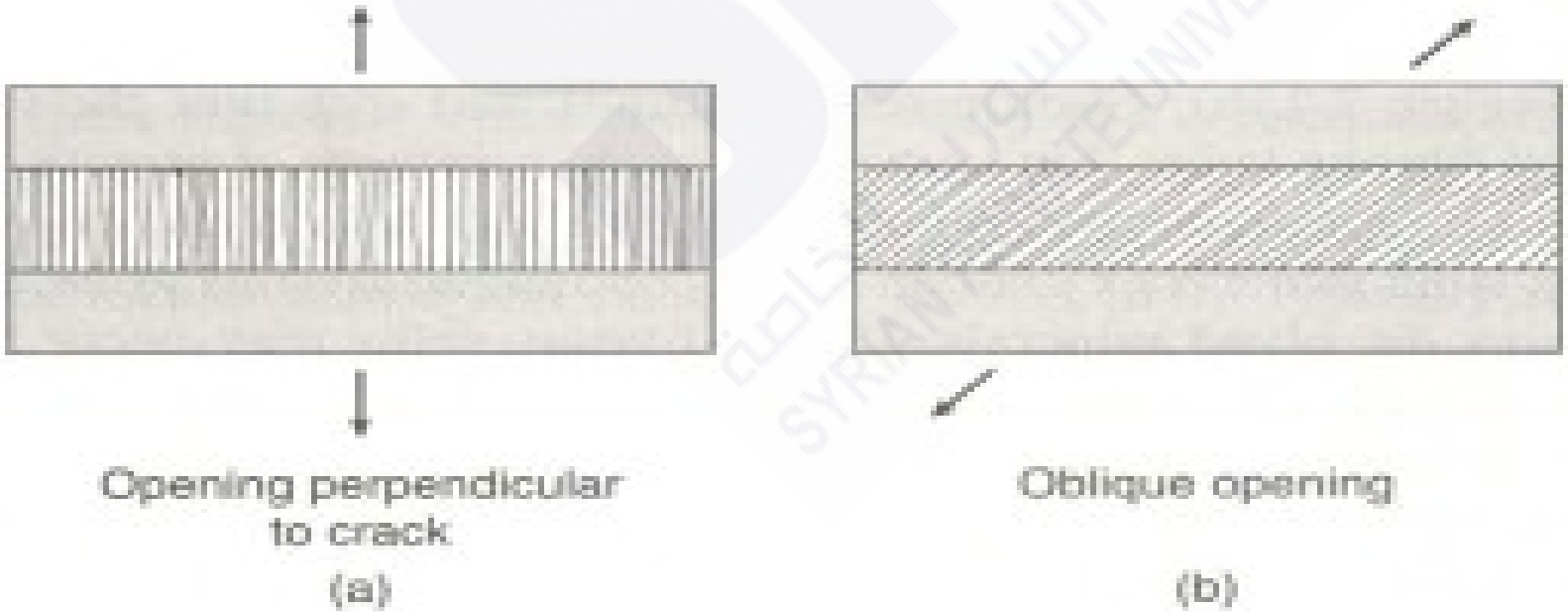
ثالثا: العروق:

العروق(Veins)هي كسور حدث لها توسع وتكون مملوءة بالمعادن المترسبة من المحاليل المائية المارة خلال الكسر .الكوارتز والكالسايت من أهم المعادن الشائعة المالئة للعروق، ولكن هنالك بعض المعادن التي من الممكن أن توجد داخل العروق مثل الزيولايت (Zeolite) والكلورايت (Chlorite). إن النمو المعدني في العروق يمكن أن يكون بشكل بلورات ليفية (Fibrous)ذات اتجاه معين للاستطالة (أي المحاور الطويلة للبلورات)أو بشكل كتلي (Blocky) غير ليفي وبدون ترتيب (الشكل٦). العروق الليفية تعد من التراكيب الجيولوجية المهمة في تحديد اتجاهات القوى المتسببة في حدوث الكسر،

إذ أن اتجاه محور البلورات الليفية داخل العرق تكون موازية لمحور الإجهاد الرئيس الأعظم ($\sigma 1$) المسئول عن تكون الكسر، والذي أما أن يكون عمودياً على سطح الكسر أو مائلاً عليه (الشكل٧).



الشكل): (٦العروق الكتلية والعروق الليفية



تحليل الإجهاد القديم Paleostress Analysis

مفهوم تحليل الإجهاد:

يعرف الإجهاد (Stress)على انه القوة المؤثرة على وحدة المساحة [S=F/A].وحدة قياس الإجهاد هي وحدات القوة على وحدات المساحة، مثل نيوتن/المتر المربع (باسكال)إذا كان متجه القوة (F)مائلاً على السطح فأنه سوف يتحلل إلى مركبتين إحداهما عمودية(Fn)تمثل الإجهاد العمودي (Normal Stress)والأخرى مماسية (Ft) (تمثل الإجهاد القصي(Shear Stress).إن متجه الإجهاد(Stress Vector) يعرف على أنه الإجهاد الذي يؤثر على السطح في نقطة معينة ويكون ذو مقدار كمي معين(Vector Quantity) ويرمز له بالرمز(σ).

عملية تحليل متجه الإجهاد بالأبعاد الثلاثة(X,Y,Z) تؤدي إلى الحصول على مركبات الإجهاد الرئيسة(Principal Stress Components) التي على أساسها

أمكن الحصول على ثلاثة محاور متعامدة تعرف بمحاور الإجهاد الرئيسة(Principal Stress Axes) هذه المحاور هي:

$\sigma 1$: (Maximum Principal Stress Axis).

محور الإجهاد الرئيسي الأعظم

$\sigma 2$: (Intermediate Principal Stress Axis).

محور الإجهاد الرئيسي المتوسط

$\sigma 3$: (Minimum Principal Stress Axis).

محور الإجهاد الرئيسي الأدنى

$(\sigma 1 \geq \sigma 2 \geq \sigma 3 \neq 0)$.حيث أن إن عملية إيجاد وضعية اتجاهات محاور الإجهاد الرئيسة الثلاثة المتسببة في تشويه الجسم الصخري تعرف بتحليل الإجهاد (Stress Analysis) يطلق على هذا التحليل أيضاً التحليل الديناميكي (Dynamic Analysis) وكذلك (Paleostress Analysis)تحليل الإجهاد القديم

طرائق تحليل الإجهاد:

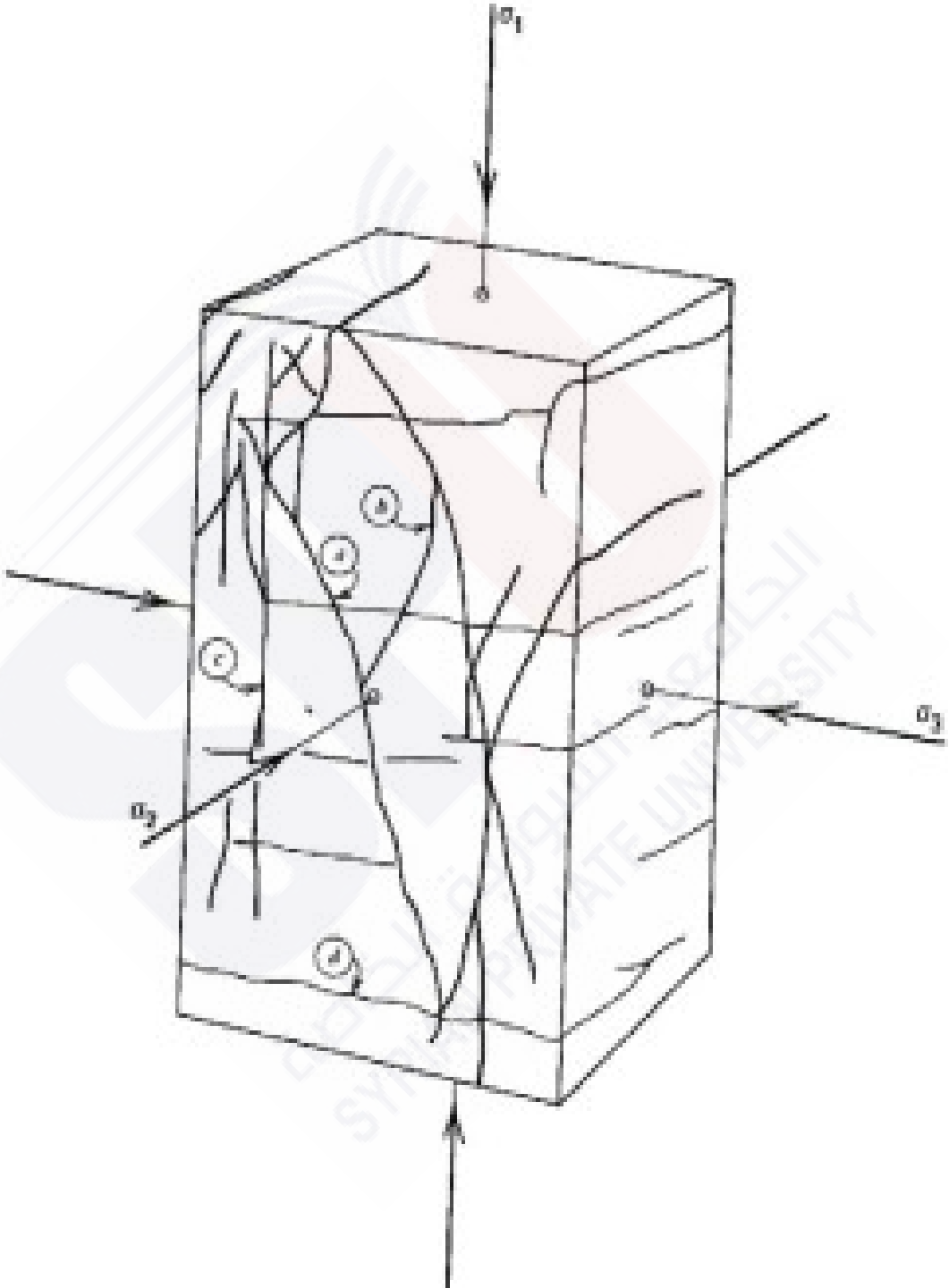
لغرض تحليل الإجهاد أما أن نعتمد على تحليل البيانات المستحصلة من الكسور (Fractures Data) (أو على البيانات المستحصلة من التراكيب المجهرية (Microstructural Data) مثل التوأمية (Twining). سوف نقتصر في هذا الموضوع على توضيح الطرائق التي تعتمد على البيانات المستحصلة من الكسور فقط والتي تستند في تحليل الإجهاد على النتائج المختبرية المختلفة لانهيار الصخور (Rock Failure) والمشتقة من تجارب ميكانيك الصخور Rock Mechanics حيث أثبتت هذه التجارب وجود علاقة هندسية بين قيم واتجاهات محاور الإجهاد الرئيسة المسلطة على عينة صخرية وبين أنواع واتجاهات الكسور في هذه العينة.

واحدة من أهم تجارب ميكانيك الصخور هي تجربة الضغط الثلاثي المحاور (Triaxial Compression) وذلك لان هذه التجربة تعد الأقرب إلى واقع حدوث الكسور في الطبيعة، حيث تسلط في هذه التجربة (شكل ١) ثلاثة إجهاد محورية متعامدة مختلفة القيم على عينة صخرية، هذه الإجهادات تحاكي الاجهادات الرئيسة الثلاثة $(\sigma1,\sigma2,\sigma3)$ بحيث تكون $(\sigma1 \geq \sigma2 \geq \sigma3 \neq 0)$. سبب تسليط محاور الإجهاد الرئيسة ينشأ نوعان من الكسور:

الأولى كسور شديه (Extension Fractures)وهي عبارة عن كسور مفردة موازية لمحور الإجهاد الرئيسي الأعظم ($\sigma1$) ولا تحدث على مستوياتها أي حركة قصية .

الثاني كسور قصي (Shear Fractures) وهي كسور مائلة على محور الإجهاد الرئيسي الأعظم وهي أما أن تكون مفردة (single) أو مقترنة(conjugate) وقد تحدث أو لا تحدث على مستوياتها حركة .

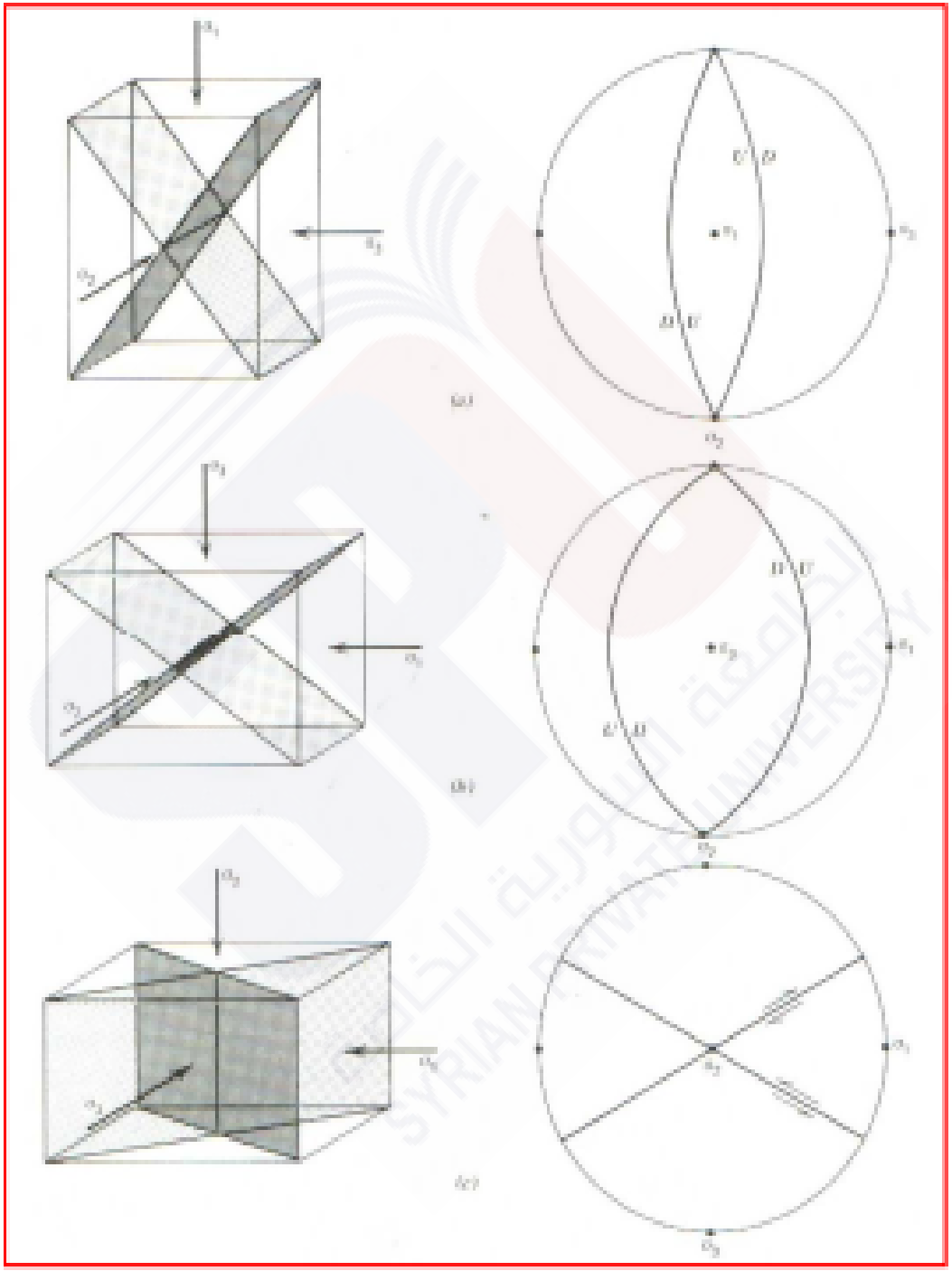
تحدث الحركة فقط عندما يكون الإجهاد التفاضلي (Differential Stress) غير مساوي للصفر $\sigma d = \sigma1 - \sigma3 \neq 0$.


σ_1
σ_2
σ_3

ً أولا: طريقة الفوالق المقترنة:

تعتمد هذه الطريقة على النموذج الذي افترضه أندرسون (Anderson, 1942) حيث وضع علاقة هندسية بين اتجاهات محاور الإجهاد الرئيسة وبين الزوايا التي يحصرها كسران مقترنان (الشكل٢) سواء حدثت حركة على مستويي الكسرين أم لم تحدث .

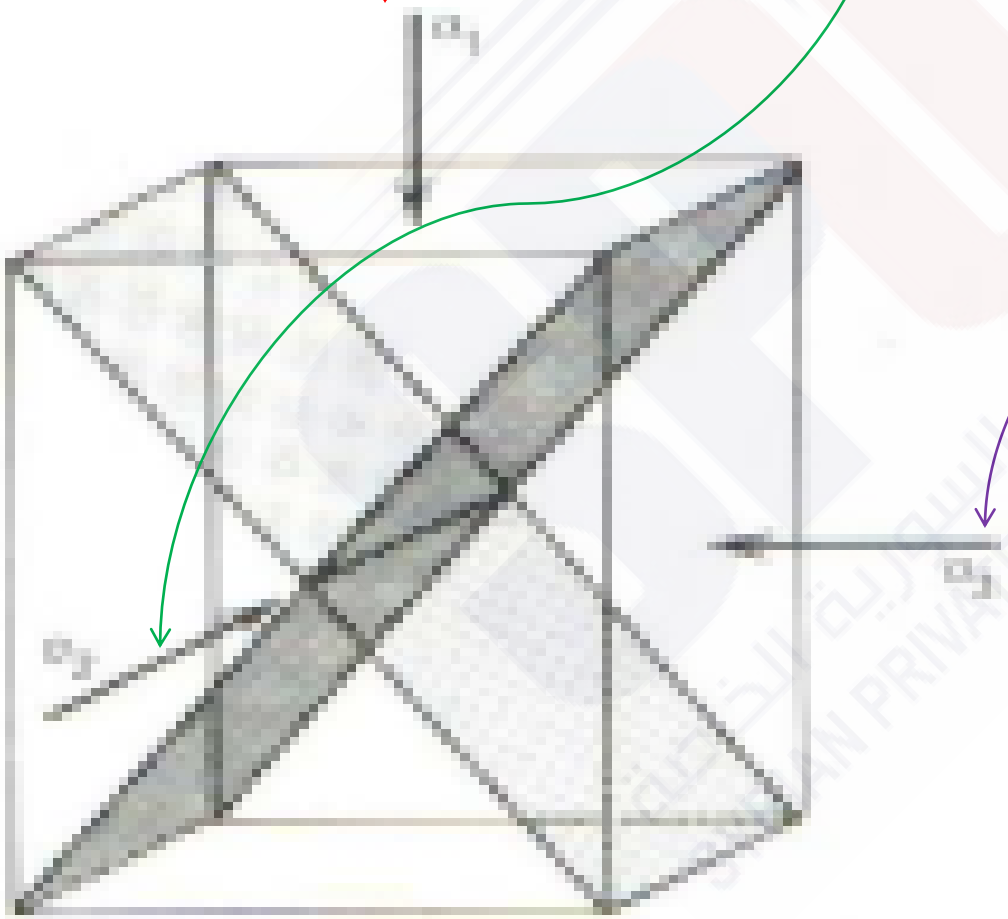
في حالة حدوث حركة فأن نوع الفالق المتكون سوف يعتمد على اتجاهات الإجهاد الرئيسة الثلاثة.



(σ1): ينصف الزاوية الحادة بين مستويي الكسرين المقترنين.

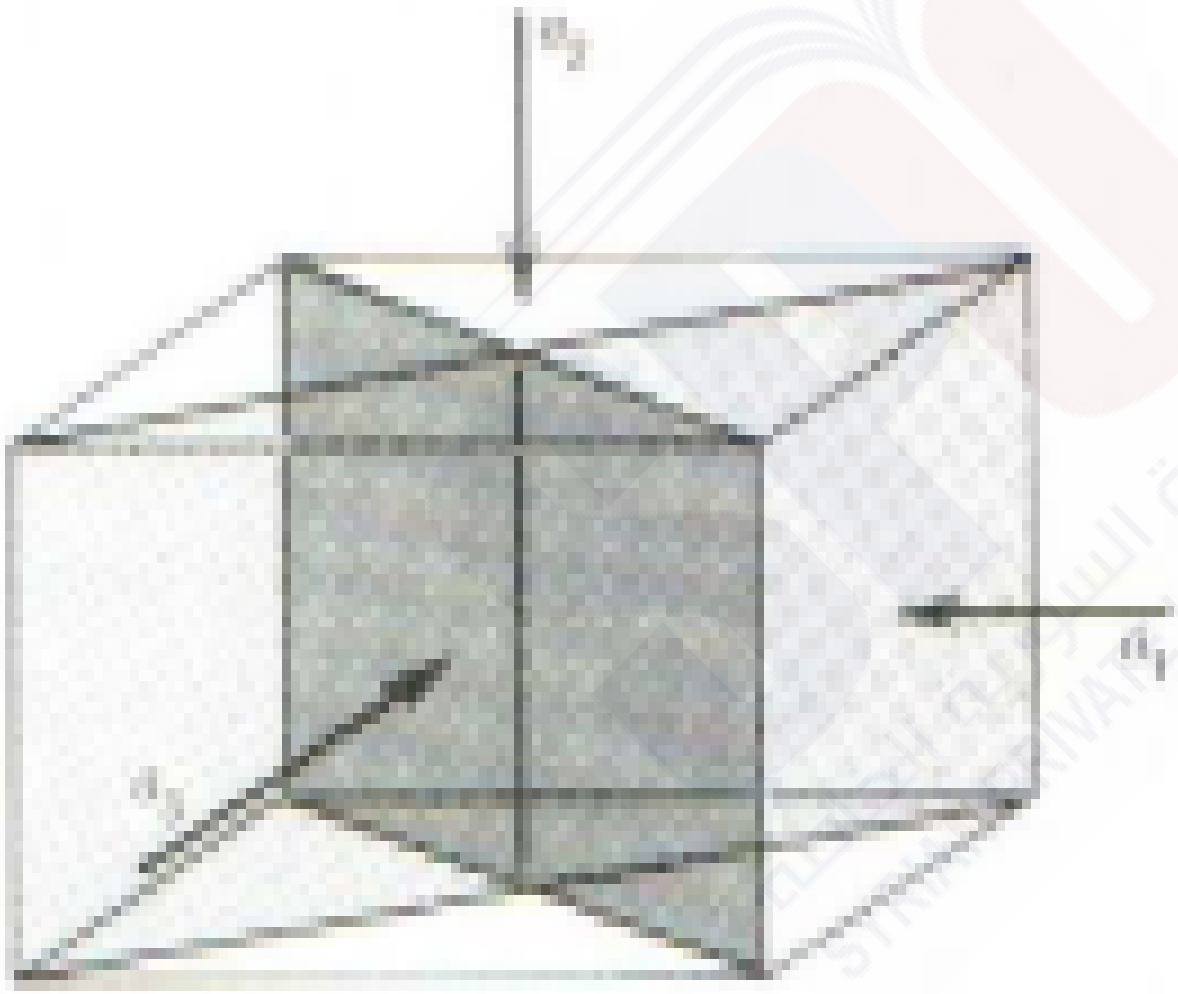
(σ2): يوازي خط تقاطع مستويي الكسرين المقترنين.

(σ3):ينصف الزاوية المنفرجة بين مستويي الكسرين المقترنين.

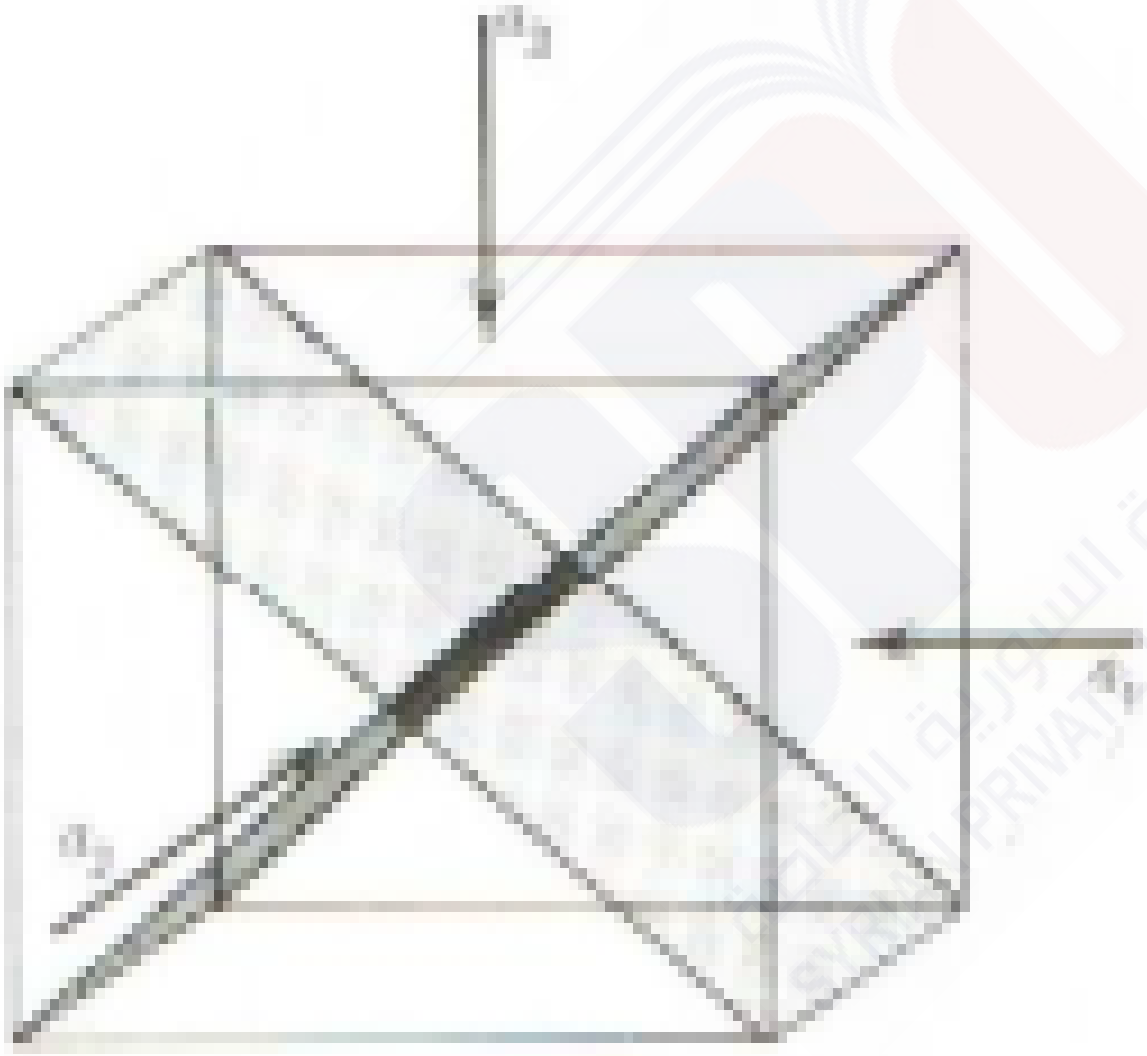


إذا كان (σ1) عمودياً فأن الفالق المتكون هو من النوع الاعتيادي (Normal Fault)

أما إذا كان ($\sigma 2$) عمودياً فان الفالق المتكون هو من النوع المضربي (انزلاقي) (Strike-Slip Fault)



أما إذا كانت (σ 3)عمودياً فان الفالق المتكون هو من النوع المعكوس (Thrust or Reverse Fault).



إن العلاقات التي وضعها اندرسون (Anderson) هي كما يلي:

($\sigma 1$): ينصف الزاوية الحادة بين مستويي الكسرين المقترنين.

($\sigma 2$): يوازي خط تقاطع مستويي الكسرين المقترنين.

($\sigma 3$):ينصف الزاوية المنفرجة بين مستويي الكسرين المقترنين.

إذا كان ($\sigma 1$) عمودياً فأن الفالق المتكون هو من النوع الاعتيادي (Normal Fault)

أما إذا كان ($\sigma 2$) عمودياً فان الفالق المتكون هو من النوع المضربي (انزلاقي) (Strike-Slip Fault)

أما إذا كانت (σ 3)عمودياً فان الفالق المتكون هو من النوع المعكوس (Thrust or Reverse Fault).

قد وضع (Anderson, 1942) شروطاً لتطبيق هذه الطريقة في الحقل وهي:

١- إن حزوز الصفائح (Slickenline) يجب أن تكون عمودية على خط تقاطع المستويين المقترنين.

٢- يجب أن تكون الحركة موزعة بشكل متناظر على طرفي الفالقين المقترنين.

٣- يجب أن يكون الفالقان المقترنان حديثي التكون(Newly formed)

أي أن مستوي الفالق لم يكن موجوداً قبل الحدث التكتوني(Tectonic event)

إنما الحدث التكتوني الذي سبب مستوي الكسر هونفسه المسئول عن الحركة على هذا المستوي.

في حالة توفر أحد الشروط السابقة في فالقين مقترنين فأنها تدعى بالفوالق شبه المقترنة(Quasi-conjugate).

أما في حالة عدم توفر هذه الشروط في الحقل فان نموذج اندرسون (Anderson)لا يمكن تطبيقه.

تطبيق طريقة الفوالق المقترنة:

لغرض تطبيق هذه الطريقة في تحديد اتجاهات محاور الإجهاد الرئيسة باستخدام المعلومـات الحقليـة فأننـا
بحاجة إلى معرفة وضعية الكسرين المقترنين فقط.

لتحديد وضعيات محاور الإجهاد الرئيسة يتم تسقيط القراءات على شبكة الإسقاط المجسم ولنـصف الكـرة السفلي بشكل دوائر عظمى .

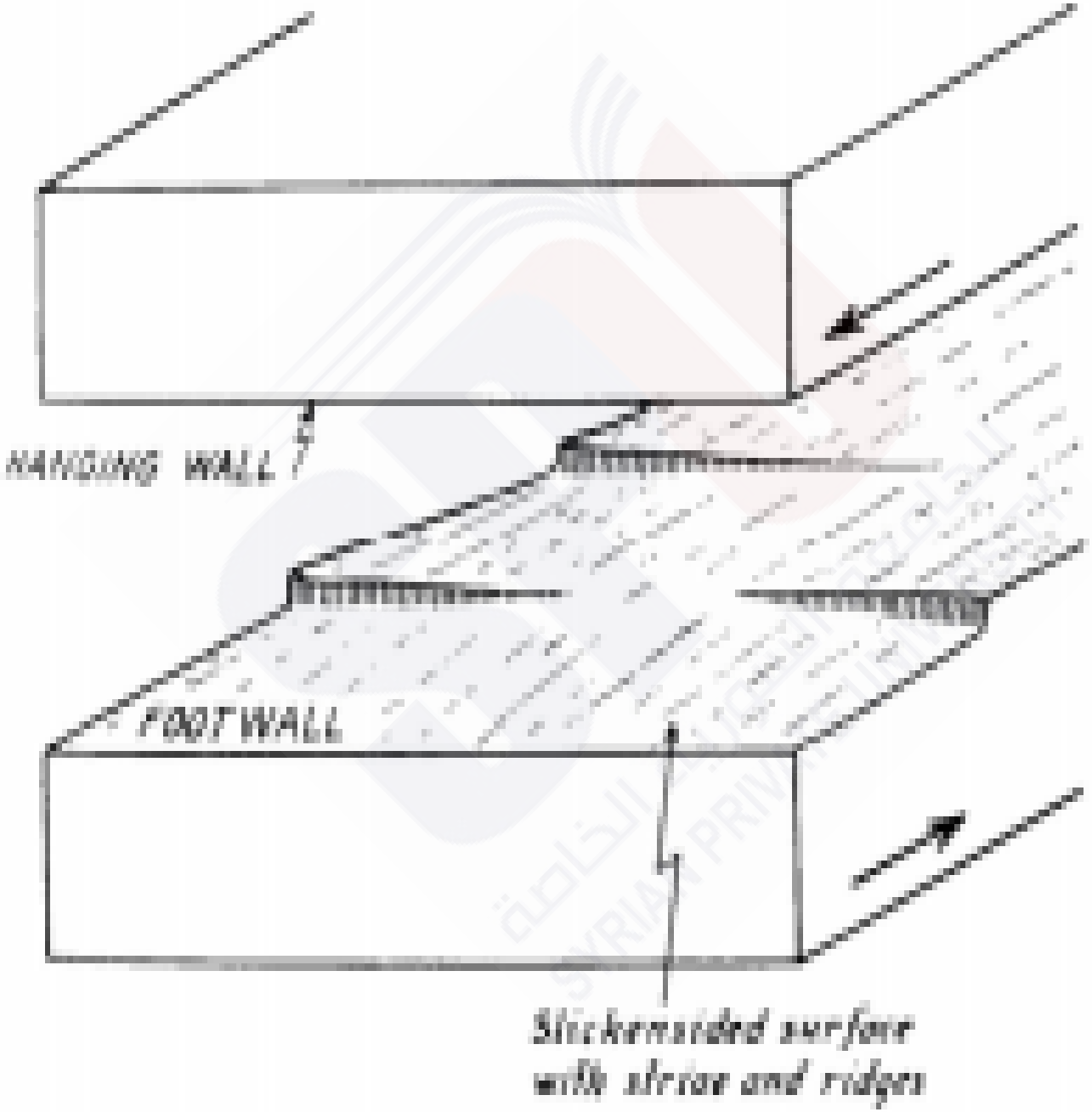
نقطة تقاطع الدائرتين العظمتين تمثل مسقط ($\sigma 2$).نجد قيمة الزاوية المحـصورة بـين مستويي الفالقين والتي هي الزاوية بين الدائرتين العظمتيين والمقاسة على دائرة عظمى ثالثة تكون نقطـة التقـاطع قطباً لـها.

إذا كانت الزاوية بين الدائرتين العظمتين حادة فان منصفها يمثل($\sigma 1$) أما إذا كانت منفرجة فان منـصفها يمثل($\sigma 3$).يجب أن تكون المسافة بين كل من($\sigma 1, \sigma 2, \sigma 3$) هي (90º) ومقاسه على دائرة عظمى (شكل ٢).

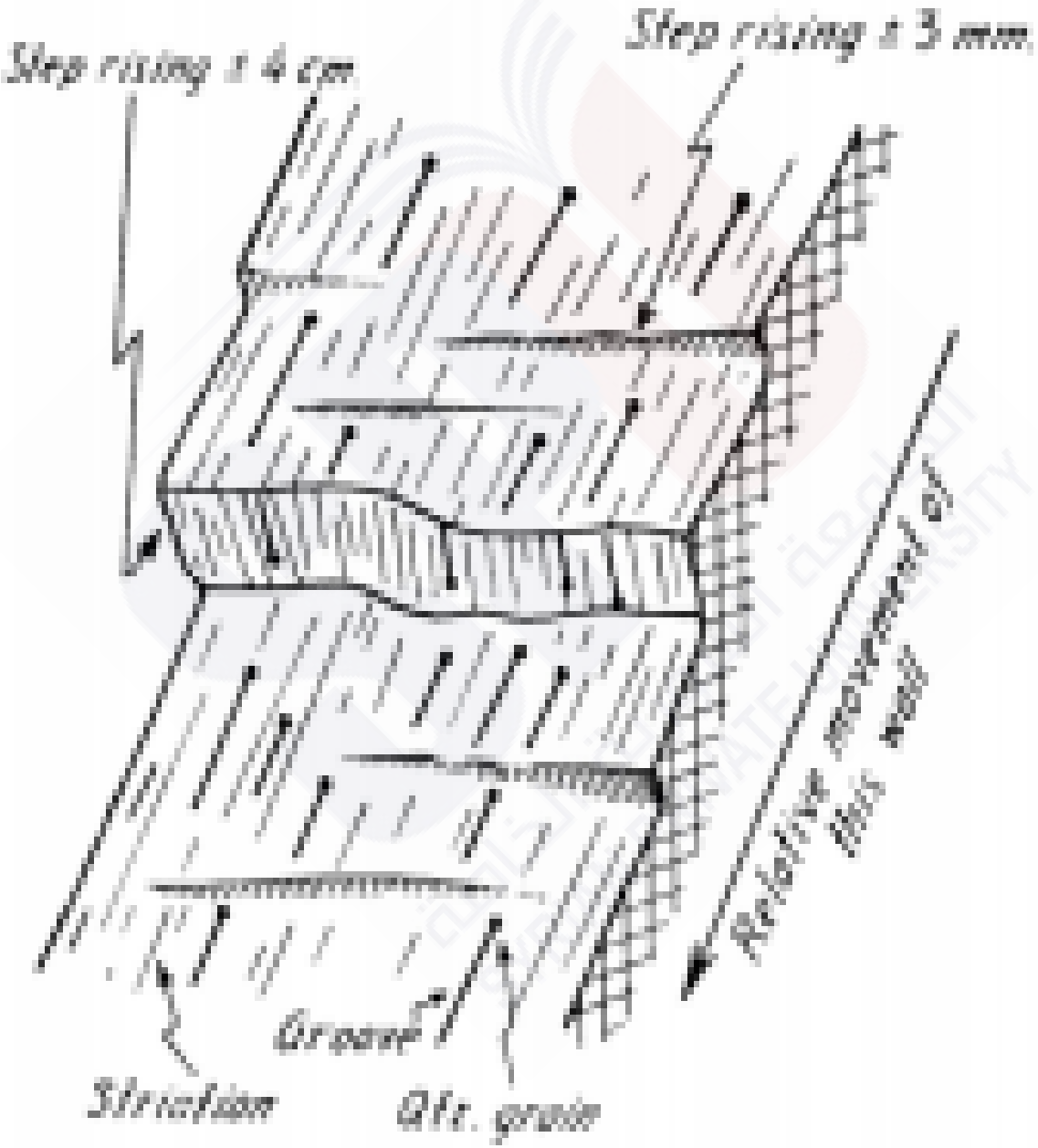
ثانيا: طرائق الفوالق الحاوية على حزوز الصفائح المصقولة:

إن سطوح مستويات الفوالق تمثل في الحقيقة سطوح قص (Shear Surface) يطلق على هذه السطوح مصطلح السطوح المصقولة (Slicken sides) وهي أما أن تحتوي أو لا تحتوي على تراكيب خطية (Linear Structures) (((الشكل٣). تتمثل التراكيب الخطية بأخاديد(Grooves) أو خطوط (Striations) يطلق عليها الخطوط أو الحزوز المصقولة(Slickenlines)وتسمى أيضاً السطوح المصقولة المخططة ((Lineated Slickensides) الشكل (4).

هناك تراكيب أخرى قد توجد على سطوح الفوالق تسمى المدرجات المصقولة Slickensteps وهي عبارة عن مدرجات صغيرة(Minute) steps تكون عادة عمودية أو تقريباً عمودية على الحزوز والأخاديد.


HANGING WALL
FOOTWALL
Slickensided surface
with striae and ridges

يمكن تحديد الحركات على مستويات الفوالق بواسطة الحزوز المصقولة (Slickenlines) والتي تكون موازيـة لاتجاه الحركة (Tjia, 1964).
المدرجات المصقولة (Slickensteps) في حالة تواجدها على سطح الفالق، فأنها تعد دليلاً على اتجاه الحركة أيضاً، حيث أن أوجه المدرجات (Steps Facing) تكون مضادة إلى اتجاه حركة الكتلة الأخرى للفالق (الشكل٤).


Step rising ± 4 cm.
Step rising ± 3 mm.
Relative movement of this part
Groove
Striation
Qtz. grain