

نقييم معاملات الهشاشة لبعض الصخور من خلال قياسات الأمواج فوق الصوتية

اعداد : د.م. نضال ابراهيم¹

أ. غطفان رزوق²

ملخص:

يصنف البازلت وفقا لخواصه الميكانيكية بأنه صخر متجانس (Isotropic) أما بالنسبة للجص فيعتبر صخرا متجانس تناظريا (Isotropic transverse) وبالتالي فإن قيم البارامترات الميكانيكية تتعلق بشكل مباشر باتجاه قياس هذه البارامترات . يستطيع الشخص باستخدام الطرق غير الإتلافية كتقنية الأمواج فوق الصوتية و التي تعتمد على فهم تأثير الخواص الميكانيكية على سرعة الأمواج فوق الصوتية ضمن الصخور ، أن يتنبأ بالبارامترات الميكانيكية .

تم تنفيذ التجارب على 35 عينة جص و 11 عينة بازلت جُمعت من السبور المنفذة من قبل المؤسسة العامة لاستصلاح الأراضي (حلبة-زلبية في دير الزور) بغية تحديد الخواص الجيوتقنية للصخور. التجارب هي تجربة تحديد متانة الكسر أحادي المحور (UCS) و تجربة تحديد متانة الشد وفق التجربة البرازيلية BTS، و تجربة قياس سرعة الأمواج فوق الصوتية ، و حددت قيمة الكثافة الجافة (γ_d) و قيمة معامل يونغ الديناميكي (E_d) . ربط بين معاملات الهشاشة brittleness المحسوبة من متانة الكسر أحادي المحور و متانة الشد مع المتغير ($\gamma_d^2 * E_d$) الناتج عن ضرب مربع الكثافة الجافة (γ_d) بمعامل يونغ الديناميكي (E_d) بهدف شرح سلوك الصخر بعد مرحلة المرونة مع الحصول على قيمة أفضل لمعامل التحديد (R^2)

الكلمات المفتاحية: ميكانيك الصخور، حفر، الهشاشة.

Evaluate the brittleness factors for some rocks by ultrasonic measurements.

Summary:

Basalt is classified as a isotropic rock in according to its mechanical properties. But gypsum is considered isotropic transverse rock . coming the mechanical parameters values joins practice direction of parameters .

By using a nondestructive method such as the ultrasonic test which depends on understanding the effectual of mechanical properties upon speed of ultrasonics inside rocks , one can indirectly predict the mentioned parameters

Tests were completed within 35 gypsum and 11 basalt rocks specimens which collected by completions under the direction of General Organization for Land Development (Directorate of Geological Investigation)

The tests were included specifying the some of mechanical properties unconfined compression strength (UCS) , Brazilian Tensile strength (BTS), Ultrasonic Test , dry unit weight (γ_d)and dynamic Young's modulus (E_d)

The research is aimed at explanation behavior of rock after elasticity stage and superior of correlation coefficient (R^2). Internal cohesion and brittleness concepts values from the unconfined compression strength and Brazilian tensile strength were correlated with the ($\gamma_d^2 * E_d$)value.

Keywords : rock mechanics; Drilling; brittleness

1- دراسة مرجعية :

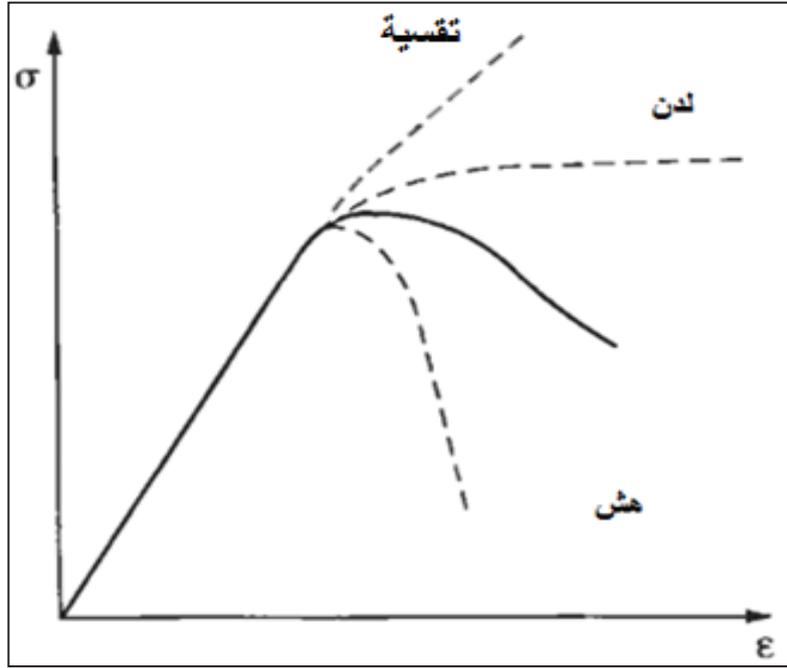
تعد الهشاشة أحد أهم الخواص الميكانيكية للصخور ، و لا يوجد تعريف شامل للهشاشة أو طريقة قياس تحدد هشاشة الصخر بدقة لذلك فتحدد الهشاشة عملية تجريبية بصورة كبيرة جدا. عرفت الهشاشة من قبل عدد من الباحثين الشكل (1) ، ويتم الحصول على معاملاتها من بارامترات أخرى مثل إجهاد الخضوع σ_y ، و معامل المرونة الابتدائي E_i و معامل المرونة ألسكوني E_s و معامل المرونة المماسي E_T (Baron,1962; Hajiabdolmajid and Kaiser, 2003; Aubertin et al, 1994) يتم تحديد معاملات الهشاشة من خلال ربط أكثر من بارامتر من البارامترات الميكانيكية للصخور من خلال علاقات مختلفة تستخدم بشكل رئيسي قياسات متانة الانهيار أحادي المحور و متانة الشد. [1] [2] التي تمثلت بالعلاقات الرياضية التالية:

$$B_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (1)$$

$$B_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad (2)$$

$$b_3 = \frac{1}{2} (\sigma_c * \sigma_t) \quad (3)$$

$$B_3 = \sqrt{\frac{(\sigma_c * \sigma_t)}{2}} \quad (4)$$



الشكل (1) يظهر الفرق بين المواد اللدنة و المواد الهشة

تم إجراء مجموعة أخرى من الأبحاث تم خلالها ربط هذه المعاملات مع معاملات أخرى لتكوين صورة واضحة عن هشاشة الصخر و نذكر أبرزها :

أ - تم تحديد علاقة جيدة بين معدل الحفر (DRI) ودليل الهشاشة (B₃) من أجل 14 صخر مختلف مع معامل تحديد $R^2 = 0.86$ [3].
 ب- تمت دراسة العلاقة بين الخواص الميكانيكية للصخور ومعاملات الهشاشة مع قابلية الحفر (DRI) المنفذة على 32 نوع من الصخور الرسوبية والنارية والمتحولة وتم التوصل إلى دليل جديد للهشاشة B4 حيث أعطى أكبر قيمة لمعامل التحديد $R^2 = 0.75$ [4]

$$B4 = (\sigma_c * \sigma_t)^{0.72} \quad (5)$$

ث - أيضا تمت دراسة العلاقة بين الخواص الميكانيكية للصخور (UCS , TS) ومقاومة الصخور للإنغراس (SH) shore hardness مع دلائل الهشاشة (B1, B2 , B3) لبيانات 143 نوع من العينات الصخرية مأخوذة من دراسات سابقة ، وتوصل إلى

علاقة جيدة بين (SH) و دليل الهشاشة (B3) مع قيمة لمعامل التحديد $R^2 = 0.85$ ، وبالتالي كانت أكثر ثقة من العلاقة بين (SH) و دليلي الهشاشة (B2 , B1). [5]. إن تحديد الخواص الميكانيكية للصخور بهدف تحديد معاملات الهشاشة يتم بطرق مختلفة منها ما هو تقليدي يلزم فيها جهد كبير لتحضير العينات و هذه التجارب يتم فيها إتلاف العينات ومنها الطرق غير الإتلافية كتقنية الأمواج فوق الصوتية، والتي تعتمد على فهم تأثير الخواص الميكانيكية على سرعة الأمواج فوق الصوتية ضمن الصخور . تعتبر الطرق غير التقليدية لتحديد البارامترات الميكانيكية للصخور مكلفة و تتطلب زمن و جهد كبيرين لذا تم البحث عن طرق بديلة أقل تكلفة و غير إتلافية للعينات (سرعة الأمواج) ، و في بحثنا هذا تم العمل على إيجاد قيم TS , UCS من خلال سرعة الأمواج الطولية V_p في الصخر بهدف حساب معاملات الهشاشة . اقترحت طريقة الأمواج فوق الصوتية لكونها توفر إمكانية الحصول على البارامترات بدون تخريب العينة، و بتكاليف منخفضة نسبياً، و هي بسيطة وسريعة و رخيصة أكثر من الطريقة التقليدية المتمثلة بتجربة الضغط أحادي المحور والتجربة البرازيلية التي يتطلب تحضير عيناتها جهد و وقت ودقة على الرغم من بساطة التجربة . نحدد سرعة الأمواج الطولية (الضغط) و سرعة الأمواج العرضية (القص) وفق المعادلتين التاليتين :

$$V_p = \frac{L_p}{T_p} \quad (6)$$

$$V_s = \frac{L_s}{T_s} \quad (7)$$

حيث: V_p : سرعة الأمواج الطولية (م/ثا)، و V_s : سرعة الأمواج العرضية (م/ثا)

L_p : طول الموجة الطولية (م)، و L_s : طول الموجة العرضية (م)

T_p : زمن انتقال الموجة الطولية (ثا)، و T_s : زمن انتقال الموجة العرضية (ثا)

اقترحت المعادلة الأسية التالية من أجل 27 نوع مختلف من الصخور بهدف تحديد UCS من خلال معرفة قيمة الأمواج الطولية فقط [6] [10]:

$$UCS = 9.95V_p^{1.21} \quad (8)$$

حيث :

UCS : إجهاد الإنهيار تحت الضغط (ميغا باسكال).

V_p : سرعة الامواج الطولية (كم/ثا).

تم العمل على 13 عينة من أنواع مختلفة من الصخور الكربوناتيية من أنقرة في تركيا و ثبت أن قيم إجهاد الانهيار أحادي المحور (UCS) ومعامل يونغ ألسكوني (E_s) لهذه الصخور يمكن أن تحدد من قيمة سرعة الأمواج فوق الصوتية باستخدام علاقات خطية بسيطة وفق المعادلات (8) ، (9) التالية [9] [7]

$$V_s = 0.0937E_s + 1.7528... (8)$$

$$V_p = 0.0317UCS + 2.0195... (9)$$

حيث: V_p و V_s سرعة الأمواج الطولية و العرضية (كم/ثا)، و UCS إجهاد الانهيار أحادي المحور (كغ قوة/سم²). E_s : معامل يونغ الستاتيكي (ميغا باسكال). نفذت دراسة على 44 عينة من الحجر الكلسي و 12 من الحجر الرملي و 8 من الحجر المارلي ، هذه العينات تم الحصول عليها من آبار حفر استكشافية في مواقع عديدة في إيران وتم اختيار أنواع الصخور المتجانسة التي لا تحتوي مستويات تطبق بهدف التخلص من تأثيرات عدم التجانس على القياسات وتم تحديد علاقة كل من معامل يونغ ألسكوني (E_s) ومعامل يونغ الديناميكي (E_d) و إجهاد الانهيار أحادي المحور (UCS) مع المقدار ($\gamma_d * V_p$) و كان أفضلها العلاقة بين معامل يونغ ألسكوني (E_s) و المقدار ($\gamma_d * V_p$) مع معامل تحديد ($R^2 = 0.92$) الذي يعتبر جيد جدا .

كما تم مقارنة قيم إجهاد الانهيار أحادي المحور (UCS) المحددة انطلاقا من سرعة الأمواج الطولية (V_p) و انطلاقا من المقدار ($\gamma_d * V_p$) حيث كانت القيم المحددة

انطلاقاً من المقدار $(\gamma_d * V_p)$ أفضل من القيم المحددة انطلاقاً من المقدار (V_p) .
[8] [11].

2- هدف البحث:

استخدام قياسات الأمواج فوق الصوتية لمعرفة قيم و ربط المعاملات الديناميكية بمعاملات الهشاشة(عن طريق الاجهاد الحدي للانهييار تحت الضغط و الشد) عن طريق المضاهاة.

3- مواد و طرائق البحث:

تم الحصول على العينات الصخرية بشكل رئيسي لنوعين من الصخور (الجص و البازلت). حفظت العينات اللبائية و نقلت مع المحافظة على سلامتها إلى المختبر المختص (مخبر ميكانيك الصخور-الشركة العامة للدراسات و الاستشارات الفنية في دمشق) حيث أجريت عليها التجارب المختلفة لتحديد بعضاً من مواصفاتها الجيوتقنية. عولجت النتائج باستخدام برنامج المعالجة الإحصائية (SPSS 21). وفيما يلي لمحة عن أهم التجارب المستخدمة لتحديد المواصفات المختلفة للصخور المدروسة .

أ- تجربة الضغط (الانهيار) أحادي المحور : (UCS)

نفذت تجربة الضغط أحادي المحور على عينات البازلت و الجص وفقاً للمواصفات الأمريكية لاختبار المواد (ASTM D-2938-95). قسمت العينة بحيث يكسر القسم الأول بالحالة الجافة ، والقسم الآخر بالحالة المشبعة، و ذلك بعد غمر العينة لمدة 15 يوم بالماء قبل كسرها . تم تحضير العينات للاختبار وفقاً للمواصفات الأمريكية لاختبار المواد (ASTM- D4543-85). حدد معامل تصحيح الشكل حسب (ASTM 1986)
(بالعلاقة التالية :

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{ca}}{0.88 + (0.24 * \frac{D}{L})} \quad (10)$$

حيث أن:

σ_c = قيمة إجهاد الانهيار احادي المحور (المصحح) للعينات ذات طول يساوي الى ضعف القطر.

σ_{ca} = قيمة إجهاد الانهيار احادي المحور للعينة المدروسة.

وجد أن من أجل النسبة $[1-3] = (L/D)$ فإن قيمة معامل تصحيح الشكل تتراوح من 0.89 حتى 1.04 وفق الجمعية العمومية لميكانيك الصخور (ISRM 2001) يتم حساب الإجهاد وفق المعادلة :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (11)$$

σ : الإجهاد (كغ قوة/سم²)
 F : القوة المطبقة (كغ قوة)
 S : مساحة المقطع (سم²)

ب- تجربة الشد غير المباشرة (التجربة البرازيلية) (BTS) :

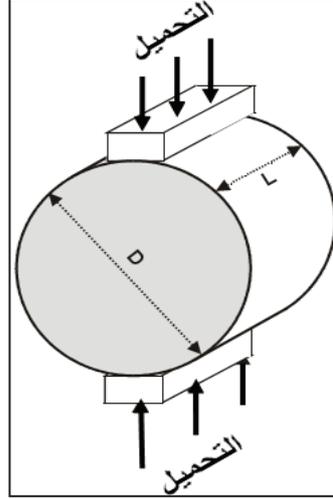
حضرت العينات المأخوذة من نفس الصخور التي طبق عليها تجربة الضغط أحادي المحور بالدقة المطلوبة ونفذت التجربة البرازيلية وفق (ASTM D-3967-95a) ، تم تحميل القوة المطبقة على العينة بمعدل 1.25 مم/دقيقة حتى يتم تحطيم قوى الترابط بين الحبات الصخرية المكونة للعينة الشكل (2) وتم حساب متانة الشد وفق القانون التالي :

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DL} \quad (12)$$

حيث :

σ_t : مقاومة الشد وتقدر ميغا باسكال
 F : مقدار القوة التي تشققت عندها العينة
 كيلو نيوتن

D : قطر عينة الاختبار مم L : طول (سماكة) عينة الاختبار مم



الشكل (2) يوضح آلية إجراء التجربة البرازيلية

ت- قياس سرعة الأمواج الطولية ومعامل المرونة الديناميكي :

تم تحضير العينات لتجربة قياس سرعة الأمواج الطولية V_p وتحديد معامل المرونة الديناميكي E_d وفقا للمواصفات الأمريكية لاختبار المواد ($ASTM D-2845-95^{E1}$)

تم تحديد مسافة انتقال الموجة على طول العينة الصخرية بين مركز المرسل والمستقبل، ويجب الانتباه إلى تعامد محور المرسل والمستقبل مع مكان الاتصال بالعينة الصخرية بمقدار انحراف لا يتجاوز 2° درجة ، و تم تحديد الوصول الأول الذي يمثل موجة الضغط (الطولية) . و قد يحجب وصول موجة القص بسبب الاهتزازات الناشئة عن رنين النواقل و انعكاس موجة الضغط .

نحدد سرعة الأمواج الطولية (الضغط) وفق المعادلة (6).

يجب التنويه إننا قمنا بقياس فقط الأمواج الطولية أما سرعة الأمواج العرضية فقد تم

حسابها من إحدى العلاقات التجريبية (8).

تم تحديد كثافة العينة الصخرية بقياس الكتلة و قياس الحجم من متوسط الأبعاد الخارجية وفق العلاقة التالية :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (13)$$

ρ : كثافة العينة الصخرية (كغ/م³) :m كتلة العينة (كغ) : V حجم العينة الصخرية (م³).

بالمحصلة فإننا قسنا المعاملات التالية (إجهاد الانهيار تحت الضغط و الشد، معامل يونغ الديناميكي الناتج من السرعتين الطولية و العرضية للأمواج).

4- النتائج والمناقشة:

يتضمن الجدولان (1) ، (2) قيم نتائج التجارب المنفذة على العينات الصخرية و قيم معاملات الهشاشة لعينات البازلت و عينات الجص على التوالي ، التي تم حسابها وفق العلاقات الرياضية السابقة استنادا لإجهاد الانهيار أحادي المحور (UCS) ومثانة الشد (TS)، و حددت قيمة المتوسط الحسابي والانحراف المعياري وعامل التغير .

جدول (1) النتائج التجريبية و قيم معاملات الهشاشة للعينات البازلتية

معامل التغير %	الانحراف المعياري	المتوسط الحسابي	مجال التغير	الخصائص الميكانيكية
46.01	60.83	132.19	181.68 – 24.70	مثانة الانضغاط في الحالة الجافة UCS ميغا باسكال
43.55	6.29	14.44	21.17 – 3.48	مثانة الشد TS ميغا باسكال
22.38	2.01	8.99	11.79– 5.08	معامل الهشاشة B ₁ (Hunca and Das, 1974)
6.35	0.05	0.79	0.84– 0.67	معامل الهشاشة B ₂ (Hunca and Das, 1974)
44.08	13.55	30.75	43.85 – 6.56	معامل الهشاشة B3 (Altındag, 2008)

62.84	699.13	1112.6	1923.08 – 42.98	معامل الهشاشة b3 (Altındag, 2002)
54.19	131.58	242.83	381.26– 24.70	معامل الهشاشة B4 (Olgay Yarali , Eren Soyer 2011)
21.66	1205.89	5568.18	6189 – 2084	سرعة الأمواج الطولية V _p م/ثا
32.56	2119.55	6510.27	8639– 994	معامل المرونة الديناميكي (Ed) ميغا باسكال

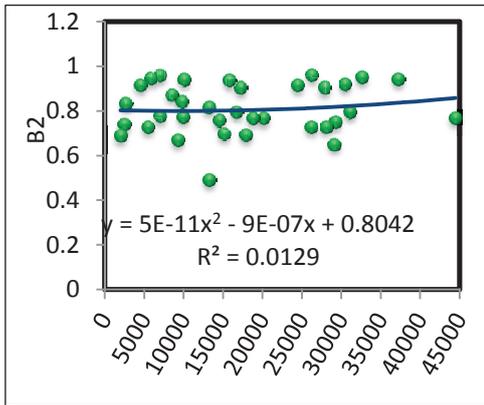
جدول (2) النتائج التجريبية و قيم معاملات الهشاشة لعينات الجص :

معامل التغير %	الانحراف المعياري	المتوسط الحسابي	مجال التغير	الخصائص الميكانيكية
34.65	7.41	21.37	40.43 – 9.31	متانة الانضغاط في الحالة الجافة UCS ميغا باسكال
65.82	1.53	2.32	5.29 – 0.34	متانة الشد TS ميغا باسكال
82.67	12.85	15.55	49.13– 2.92	معامل الهشاشة B ₁ (Hunca and Das, 1974)
13.73	0.11	0.81	0.96– 0.49	معامل الهشاشة B ₂ (Hunca and Das, 1974)
47.49	2.25	4.73	10.34– 1.36	معامل الهشاشة B3 (Altındag, 2008)
89.99	24.52	27.24	106.94– 1.85	معامل الهشاشة b3 (Altındag, 2002)
66.43	10.95	16.48	47.61– 2.56	معامل الهشاشة B4 (Olgay Yarali , Eren Soyer 2011)
35.77	1247.58	3488.11	5134– 1189	سرعة الأمواج الطولية V _p م/ثا
66.57	1995.89	2997.98	6127– 318	معامل المرونة الديناميكي (Ed) ميغا باسكال

استنادا إلى ما سبق وبهدف زيادة قيمة معامل التحديد (R^2) وإيجاد المعامل الأكفأ لاعتماده في التعبير عن هشاشة الصخر استخدمنا المتغير ($\gamma_d^2 * E_d$) ، ونفذت عملية الربط بين المتغير ($\gamma_d^2 * E_d$) و معاملات الهشاشة لعينات البازلت و الجص .

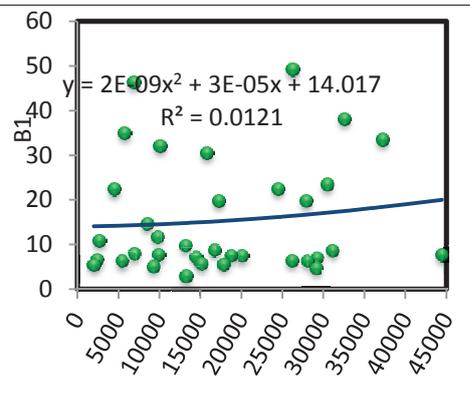
تقييم معاملات الهشاشة لبعض الصخور من خلال قياسات الأمواج فوق الصوتية

تمثل الأشكال 3,4,5,6 ربط بين المتغير $(\gamma_d^2 * E_d)$ و كل من معاملات الهشاشة (B_1, B_2) لعينات الجص و البازلت على التوالي، تظهر هذه الأشكال وجود ارتباط ضعيف نسبياً بالنسبة لعينات الجص يفسر ذلك باحتواء الجص على مستويات تطبق نتج عنها عدم تجانس في خواص الصخر في الاتجاهات المختلفة مما أثر على القياسات على عكس البازلت الذي يتمتع بالتجانس في كافة الاتجاهات .



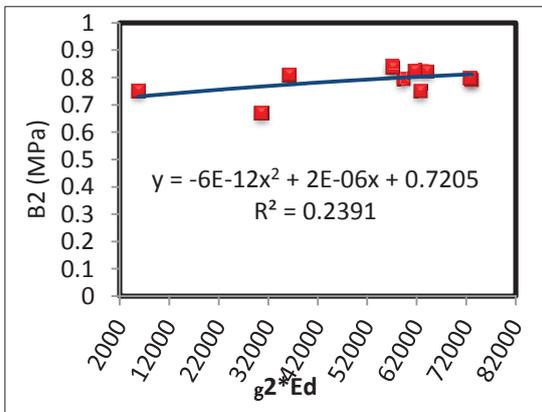
الشكل (4)

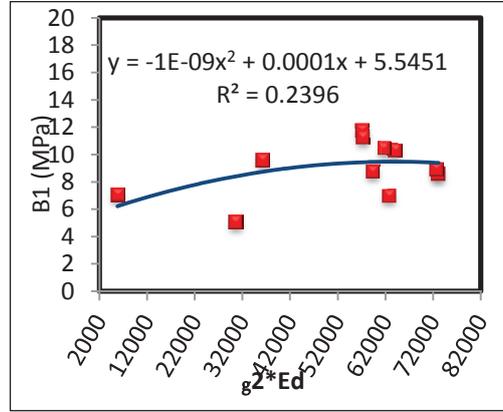
العلاقة بين $(\gamma_d^2 * E_d)$ و (B_2) للجص



الشكل (3)

العلاقة بين $(\gamma_d^2 * E_d)$ و (B_1) للجص



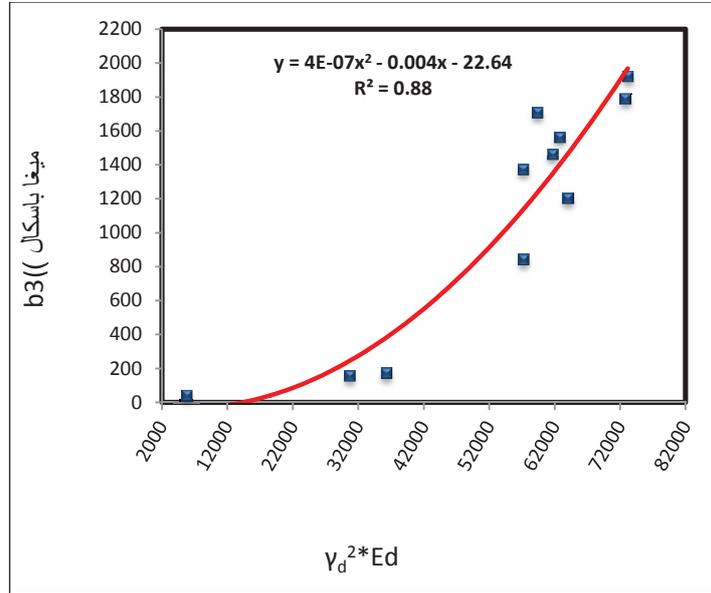


الشكل (5)

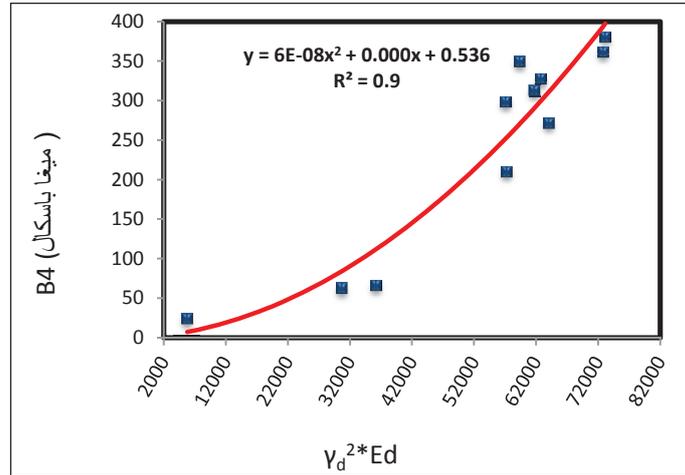
الشكل (6)

العلاقة بين (B_1) و $(\gamma_d^2 * E_d)$ للبازلت العلاقة بين (B_2) و $(\gamma_d^2 * E_d)$ للبازلت

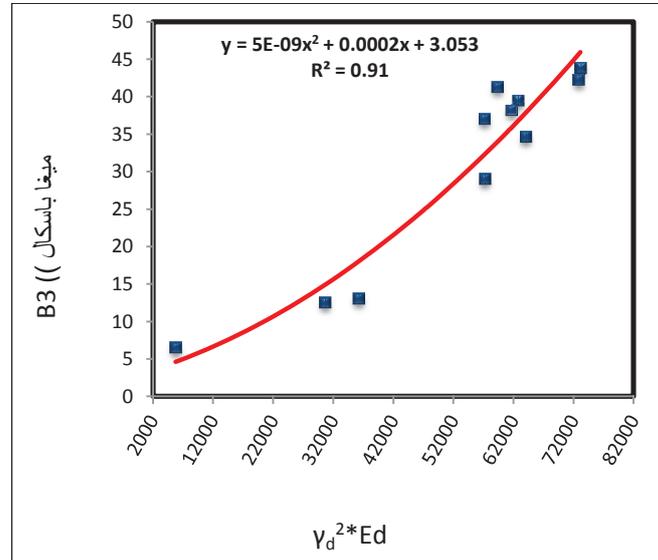
تمثل الأشكال (7) (8) ، (9) ، ربط بين المتغير $(\gamma_d^2 * E_d)$ و كل من معاملات الهشاشة لعينات البازلت، تظهر الأشكال علاقات من الدرجة الثانية.



الشكل (7) العلاقة بين (b_3) و $(\gamma_d^2 * E_d)$ للبازلت

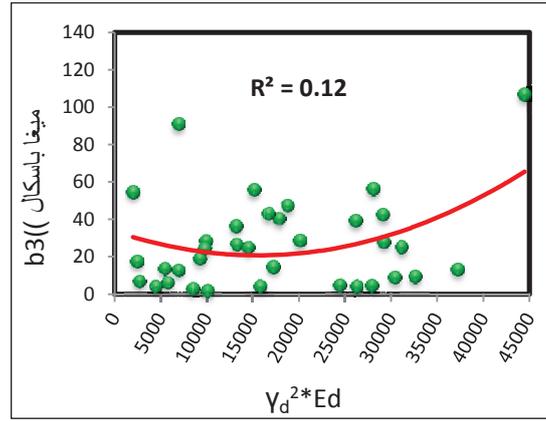


الشكل (8) العلاقة بين $(\gamma_d^2 * E_d)$ و (B_4) للبازلت

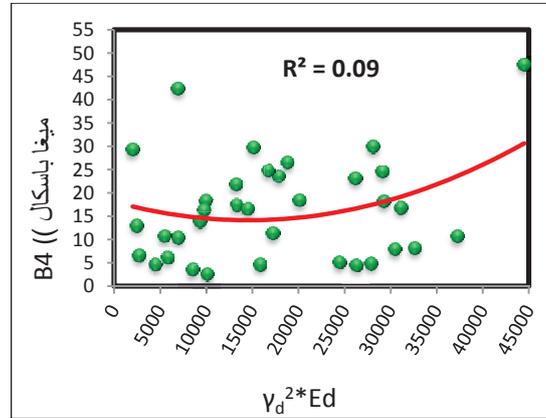


الشكل (9) لعلاقة بين $(\gamma_d^2 * E_d)$ و (B_3) للبازلت

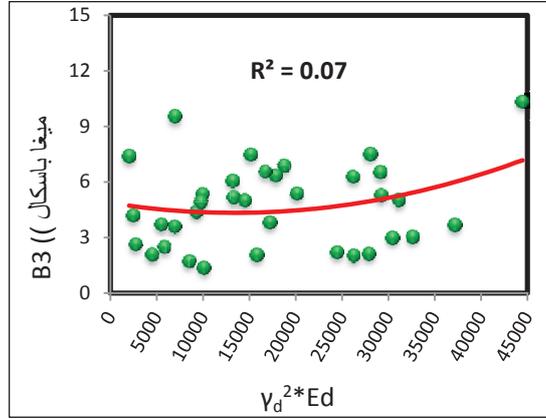
تمثل الأشكال (10)، (11)، (12)، ربط بين المتغير $(\gamma_d^2 * E_d)$ و كل من معاملات الهشاشة لعينات الجص على التوالي، تظهر هذه الأشكال وجود ارتباط ضعيف بالنسبة لعينات الجص يدل عليه معامل التحديد R^2 .



الشكل (10) العلاقة بين $(\gamma_d^2 * E_d)$ و (b_3) للجص



الشكل (11) العلاقة بين $(\gamma_d^2 * E_d)$ و (B_4) للجص



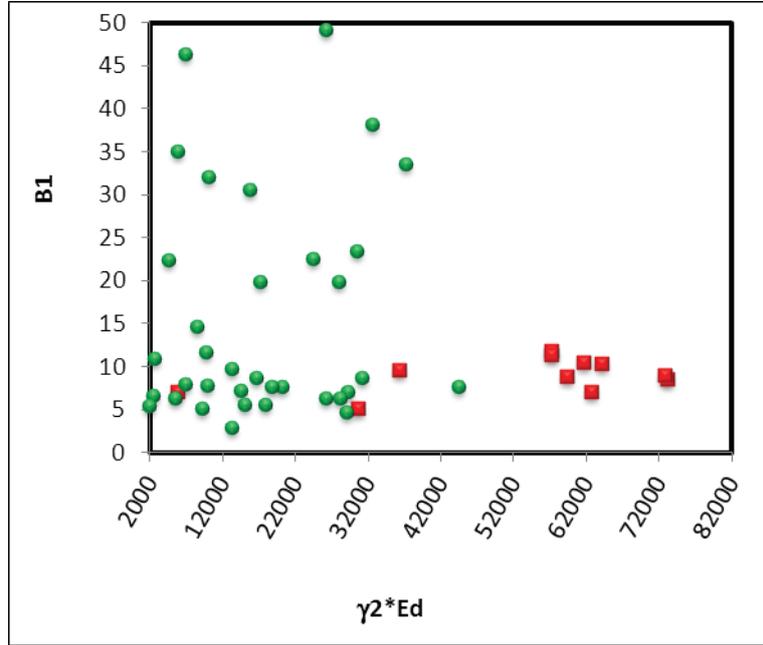
الشكل (12) العلاقة بين $(\gamma_d^2 * E_d)$ و (B_3) للجص

يحتوي الجص على مستويات تطبق (تورق) نتج عنها عدم تجانس في خواص الصخر في الاتجاهات المختلفة مما أثر على القياسات على عكس البازلت الذي يتمتع بالتجانس في كافة الاتجاهات .

المضاهاة :

قدمنا في الأشكال السابقة عمليات ربط بين معاملات الهشاشة لصخور الجص و البازلت كل على انفراد مما أدى إلى إعطاء نتائج تعبر عن كل صخر على حدى.

في هذا القسم قمنا بتمثيل معاملات الهشاشة $(B_1, B_2, B_3, B_4, b_3)$ لصخري البازلت و الجص معاً على نفس المنحني مع المقدار $(\gamma_d^2 * E_d)$ كما هو مبين بالأشكال 13، 14، 15، 16، 17. إن الفائدة الكبيرة لهذه المنحنيات تتمثل في امكانية تقدير معاملات الهشاشة لباقي الصخور (الغير مدروسة هنا) و ذلك عن طريق قياسات الأمواج فوق الصوتية و حساب المقدار $(\gamma_d^2 * E_d)$ و من ثم اسقاط ذلك على المنحنيات.

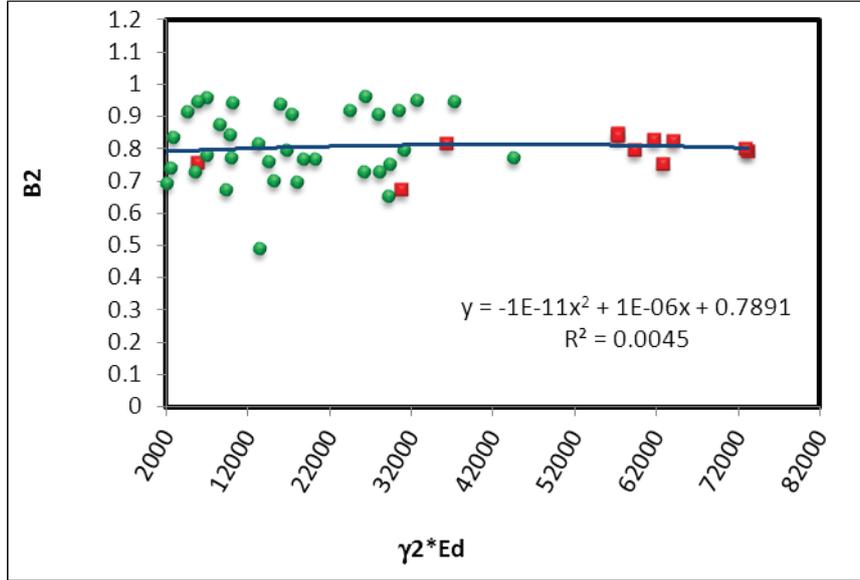


الشكل 13 يمثل المنحني العام للصخور بالنسبة لمعامل الهشاشة B1

نلاحظ من الشكل 13 وجود تبعثر للنقاط التي تخص معامل الهشاشة B1 و لكن يمكن ملاحظة تمركز عدد جيد من النقاط حول القيمة 7 لهذا المعامل و لكن لا بد من تأكيد هذه النتيجة بقياسات الأمواج الصوتية لصخور أخرى تقع بين البازلت و الجص بقيم قساوتها.

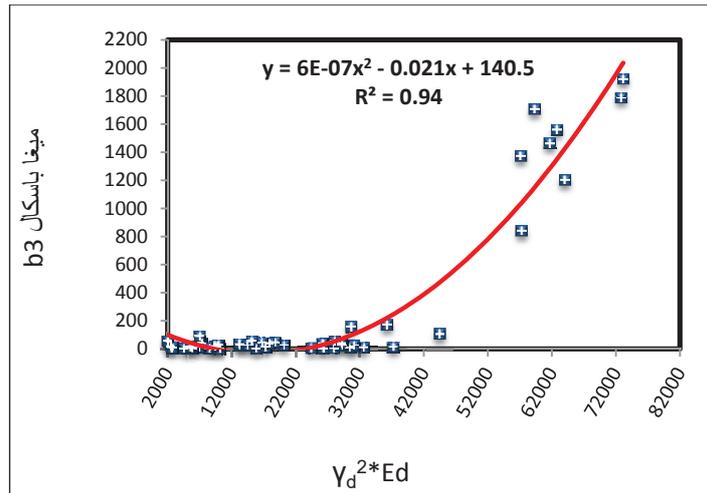
إن النتائج على الشكل 14 الخاصة بالمعامل B2 تعتبر جيدة و تتمحور حول القيمة 0.8 و بالتالي يمكن فرض أن هذه القيمة يمكن أن تكون ثابتة بالنسبة للصخور.

تقييم معاملات الهشاشة لبعض الصخور من خلال قياسات الأمواج فوق الصوتية

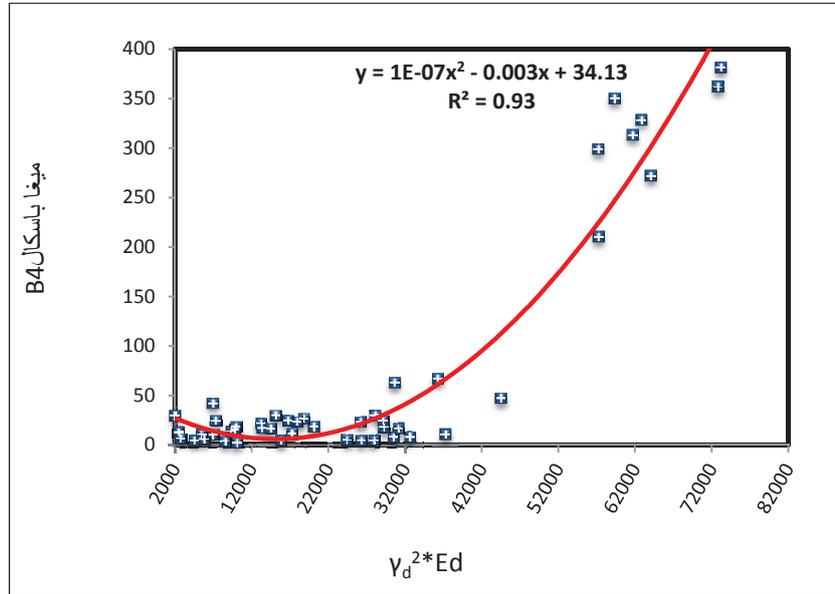


الشكل 14 يمثل المنحني العام للصخور بالنسبة لمعامل الهشاشة B2

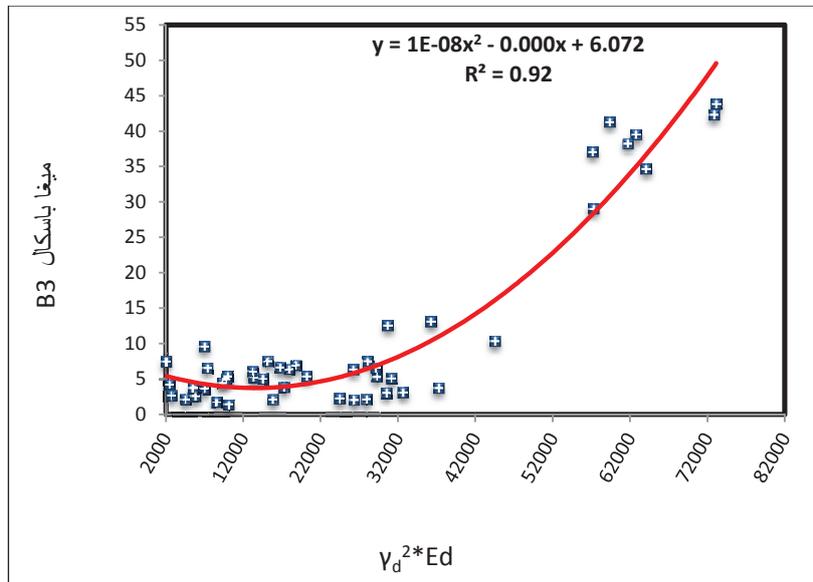
إن الأشكال 15، 16، 17 عبارة عن منحنيات ذات قيم متغيرة لمعاملات الهشاشة مع المقدار $(\gamma_d^2 * E_d)$ و بالتالي يكفي الحصول على قيمة هذا المقدار للصخور المختلفة و إسقاطها على المنحنيات للحصول على قيم معاملات الهشاشة.



الشكل 15 يمثل المنحني العام للصخور بالنسبة لمعامل الهشاشة b3



الشكل 16 يمثل المنحني العام للصخور بالنسبة لمعامل الهشاشة B4



الشكل 17 يمثل المنحني العام للصخور بالنسبة لمعامل الهشاشة B3

الاستنتاجات والتوصيات :

- يوجد تباين ضعيف بالخواص الميكانيكية لصخور البازلت الكتلتي و اختلاف كبير بالخواص الميكانيكية لصخور الجص .
- تبين النتائج التأثير الكبير للتطبيق على الخواص الميكانيكية حيث أن الطبقات التي تم الحصول منها على اللباب الصخري لعينات الجص أفقية التطبيق.
- إجراء المقارنة بين معاملات الهشاشة مع قياسات سرعة الأمواج فوق الصوتية يجب أن يتم على صخور خالية من التطبيق كي لا تؤثر على نتائج القياسات و عدم دمج نتائج قياسات التجارب المنفذة على صخور مختلفة التركيب الفلزي .
- تم التوصل الى منحنيات مضاهاة من خلال ربط النتائج لصخري الجص و البازلت.
- يكفي إجراء قياس الأمواج فوق الصوتية للصخور كي نتمكن من تحديد كافة قيم معاملات الهشاشة للصخر المدروس و ذلك باستخدام منحنيات المضاهاة.
- يمكن إغناء البحث من خلال الحصول على قياسات الأمواج فوق الصوتية لصخور أخرى ذات قساوة مختلفة و إعادة عمل منحنيات المضاهاة.

6. المراجع:

- 1- ASTM (1995) . standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. ASTM D 2938 , Philadelphia.
- 2- ASTM (1985) . standard practice for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances. ASTM D4543 , Philadelphia.
- 3- K.Thuro R.J. Plinninger, S. Zäh, S. Schütz , Scale effects in rock strength properties. Unconfined compressive test and Brazilian test, Helsinki University of Technology finish national group of ISRM , Espoo, Finland .JUNE 3-7,2001, pp 169-174
- 4- Hajiabdolmajid V, Kaiser . Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunnelling. Tunnelling and Underground Space Technol. 2003: 35-48.
- 5- Aubertin M, Gill DE, Simon R. On the use of the brittleness index modified (BIM) to estimate the post-peak behaviour of rocks. Rock Mechanics, Nelson & Laubach (eds), Balkema. 1994 pp.945-952.
- 6- Baron LI (1962) Determination of properties of rocks, (in Russian). Gozgotekhizdat. Moscow
- 7- Hunca V, Das B (1974). Brittleness determination of rocks by different methods. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr,11: 389-392.
- 8- Rasit Altindag , Relationships between brittleness and specific energy in excavation mechanics. (in Turkish). Proceedings of IX Regional Rock Mechanics Symposium, İzmir, Türkiye 2008, pp. 427-451.
- 9- Rasit Altindag , Avni Guney , Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks , Academic Journals of Mugla University, Mugla, Türkiye , 18 August, 2010, pp. 2107 - 2118,
- 10- Yasar, E., and Erdogan, Y.2004.“Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young’s modulus of carbonate rocks.” Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41 5 , 871–875
- 11- Moradian, M. Behnia Predicting the Uniaxial Compressive Strength and Static Young’s Modulus of Intact Sedimentary

تقييم معاملات الهشاشة لبعض الصخور من خلال قياسات الأمواج فوق الصوتية

Rocks Using the Ultrasonic Test/ international journal of
geomechanics ASCE / January /February 2009 , P 14-19