

تأثيرات التجوية على صفات الحجر الجيري المستخدم في بناء جدار مقبرة تكليف - شمال العراق

عزالدين صالح حسن الجوادي

مركز بحوث السدود والموارد المائية

جامعة الموصل

نون حامد الدباغ

قسم هندسة النفط/ كلية الهندسة

جامعة الكتاف

(تاريخ الاستلام 2019/7/24 ، تاريخ القبول 2020/1/3)

الملخص

تهدف الدراسة الى تعيين تأثير عمليات التجوية على الصخور المستخدمة في البناء خلال فترة زمنية معلومة والتي يتم من خلالها معرفة ديمومة هذه الصخور. تمت الدراسة من خلال وصف أحجار الجدار من حيث درجة التجوية وتقدير مقاومتها باستخدام المطرقة الجيولوجية. أجريت فحوصات الكثافة الكلية والمسامية ونسبة امتصاص الماء لصخور الجدار وصخور المقلع غير المعرضة للتجوية، كما تم فحص نسبة تآكل صخور المقلع لبيان نسبة ديمومتها. أجريت دراسة بتروغرافية لأحجار الجدار المتأثرة بدرجات تجوية مختلفة وذلك باستخدام المجهر المستقطب والماسح الالكتروني للنماذج.

أظهرت الملاحظات الحقلية أن الجزء الأسفل من الجدار يمتاز بدرجة تجوية متوسطة إلى عالية ومقاومة واطئة، بينما الجزء العلوي يمتاز بدرجة تجوية قليلة ومقاومة عالية. كما أظهرت النتائج المخبرية بان لون مسحوق الصخرة ذات التجوية العالية يكون بني فاتح بينما في درجة التجوية المتوسطة والقليلة غالبا ما يكون لون المسحوق ابيض. بينت الفحوصات الفيزيائية تناقص الكثافة الكلية ونسبة الفضالة غير الذائبة للأحجار بازياد درجة التجوية اذ ترتفع نسبة الفضالة غير الذائبة من 13% في الصخور غير المتجوية الى 25% في الصخور عالية التجوية. بينما يحصل زيادة في نسبة امتصاص الماء من 6% الى 14% والمسامية من 14% الى 27% في الصخور غير المتجوية والصخور عالية التجوية وعلى التوالي. وضحت نتائج فحص التآكل أن صخور الكالكارينايت تمتاز بديمومة عالية جدا بينما كانت صخور الكالسيستاتيت متوسطة الديمومة و كالسرودايت وكالسيولتايت عالية الديمومة. أعطت الدراسة البتروغرافية بالمجهر المستقطب أربعة أنواع من المسامية هي مسامية ضمن الحبيبات، ومسامية بين الحبيبات، ومسامية القالب ومسامية الشقوق الدقيقة. بينت الدراسة البتروغرافية بالماسح الالكتروني تواجد أكاسيد الحديد و المعادن الطينية حول المسامات الصخرية والتي لم تظهر في الصخور غير المتجوية. كما بينت دراسة الماسح الالكتروني تآكل وذوبان بلورات الكالسايت لتشكيل المسامات، فضلا عن نمو بلورات الكالسايت الثانوي على السطح الداخلي للمسامات.

الكلمات الدالة: الحجر الجيري، تجوية، صفات فيزيائية، بتروغرافية، تآكل ومماناة.

The effects of weathering on limestone used for building the cemetery wall in Tel Kaif-North Iraq

Azealdeen, S.H. Al-Jawadi

*Dams and Water Resources Research
Centre
University of Mosul*

Thanoon H. Al-Dabbagh

*Department of petroleum Engineering /
College of Engineering
Al-Kitab University*

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the impact of weathering on rocks used in construction during a defined period of these rocks. The field study involves weathering and rock strength measurements using a geological hammer. Laboratory testing for both wall limestone and fresh quarry limestone was performed to determine the bulk density, the porosity and absorption of water, and the durability test was performed for fresh quarry limestone. A polarized microscope and scan electron microscope, petrographic analysis has been conducted for various weathering rates.

Field notes explain the moderate and high degree of weathering and low strength in the bottom of the wall, whilst the top is slightly weathered and high strength. Laboratory notes through stone crushing show a change from white to beige for slightly weathered samples to moderately and highly weathered samples in powder color. Increasing weathering reduces bulk density and insoluble residues, from 13% in non-weathered rocks to 25% in high-weathered rocks the level of insoluble residue increases. Water absorption in non-weathered rocks and high weathering rocks rises from 6% to 14% and porosity from 14% to 27% respectively. Durability tests show that calcarenite exceeds very high durability, high durability calcirudite and calcilutite, and moderately durable calcisiltite. Four types of porosity, intergranular, intragranular, mold and microfracture appear in the petrographic study using a polarized microscope. Clay minerals and iron oxides surrounding the pores appear in weathered specimens, not in fresh, calcite crystal oxidation and secondary calcite growth on the inner surface of voids have also been shown in the scanning of electron microscopes.

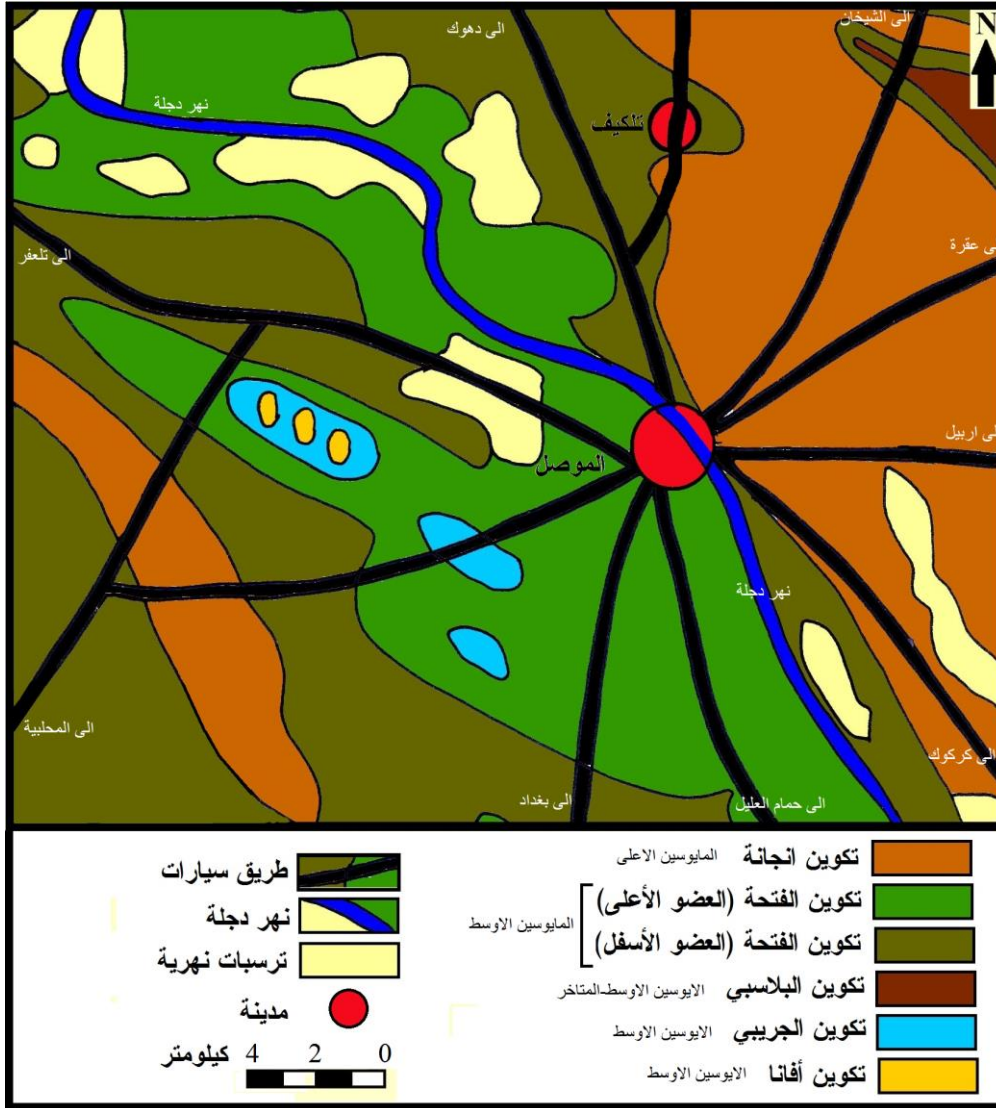
Keywords: Limestone, Weathering, Physical properties, Petrography, Slake durability.

المقدمة

استخدم الحجر الجيري المستخرج من تكوين الفتحة شمال العراق في أعمال البناء منذ قرون عديدة. واستخدمت القطع المتكسرة منه في بناء الجدران والسقوف، بينما استخدم حجر القطع بأشكال هندسية منتظمة في بناء الدعامات وتغليف الجدران. تم بناء جدار المقبرة في تليف شمال العراق قبل ما يقارب 60 عاما بصخور الحجر الجيري غير المعرض للتجوية. تتفاوت درجة التجوية باختلاف عوامل التجوية من أمطار ورياح ورطوبة وتغاير في درجات الحرارة (Pesce, et al., 2019).

يعزى تدهم بعض الأبنية القديمة والتاريخية المشيدة من أحجار الجير إلى تآكل بعض القطع المشيدة دون غيرها مما يؤدي إلى انهيار بعض أجزاء المباني أو كلها. يهدف البحث الحالي إلى دراسة تأثير التجوية على الأنواع المختلفة من الحجر الجيري المستخدم لأغراض البناء في قضاء تليف والعائد إلى تكوين الفتحة (الشكل

(1). وكما يهدف إلى دراسة تأثير الزمن والظروف الطبيعية على الصفات الهندسية للصخور قبل التجوية وبعدها. وكذلك تمييز الفرق في تأثير التجوية بالظروف المتشابهة على كل نوع من أنواع الحجر الجيري وتحديد أي الأنواع أكثر متانة ومقاومة للتجوية.



الشكل 1: خارطة موقعه تبين انتشار تكوين الفتحة شمال مدينة الموصل، محورة عن (GEOSERV,2000).

تتعرض أحجار البناء بصورة عامة والمستخدمة خلال عمر البناء إلى عمليات التجوية Weathering، وتعد مياه الأمطار والتغاير في درجات الحرارة من أهم العوامل المؤثرة على تجوية أحجار البناء والصخور، ويلعب هذان العاملان دورا كبيرا في تركيز حامض الكربونيك H_2CO_3 الذي يؤدي إلى ذوبان وتجوية الصخور تجوية كيميائية، كما يؤديان إلى تقشر وتكسر الصخور بالتجوية الميكانيكية (Baronio and Cancelli, 1981). وقد حصلت زيادة مطردة كبيرة في تأثير التجوية على أحجار البناء في العقود الأخيرة، ويعزى سبب ذلك إلى زيادة نسبة غاز ثنائي أكسيد الكربون CO_2 في الجو نتيجة الاستخدام المفرط في حرق الوقود الصلب والسائل في عمليات التصنيع الذي أدى إلى تلوث الهواء. ينتج حامض الكربونيك الضعيف من

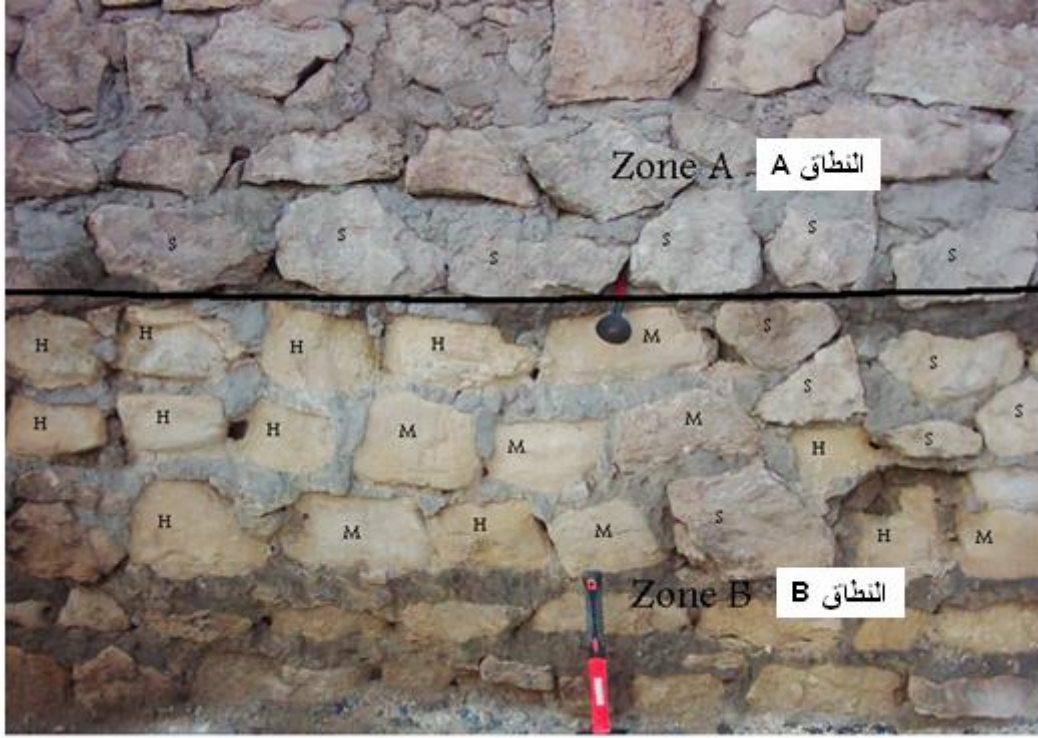
ذوبان غاز CO₂ الموجود في الهواء وفي التربة بمياه الأمطار، ويقوم هذا الحامض بإذابة الصخور والمعادن مثل الحجر الجيري ومعادن الكالسايت (Baronio and Cancelli, 1981).

تعد الإذابة أول مراحل التجوية الكيميائية، والتي يمكن إن تحصل من خلال مياه الأمطار والمياه الجارية أو تأثير الغشاء المائي membrane water الرقيق حول الأجزاء الصلبة من الصخرة نتيجة الشد السطحي للماء. وتعتمد كمية المطول الناتج عن الإذابة على كمية المياه المارة على المساحات الصلبة للصخور، وعلى قابلية الصخرة على الذوبان، ونتيجة الذوبان تنتقل الأجزاء المذابة بالماء لتترك مطها فراغات، وهذه العملية هي المسؤولة عن تكون الكهوف والفجوات في الحجر الجيري (Pesce, et al., 2019).

إن مياه الأمطار تكون بحالة تناسب مع الضغط الجزئي الثابت لغاز ثنائي أكسيد الكربون في الهواء وبذلك يكون ذوبانه قليلا وعندما ينساب الماء خلال التربة ويكون بتماس مع غاز ثنائي أكسيد الكربون في الهواء داخل فراغات التربة ويكون تحت ضغط جزئي أكبر مما يؤدي إلى زيادة نسبة غاز ثنائي أكسيد الكربون المذاب (Ollier, 1984). ولكن تزداد قابلية ذوبان الحجر الجيري بارتفاع درجة الحرارة، وزيادة محتوى الماء من غاز ثنائي أكسيد الكربون، أو نقصان الدالة الحمضية في المطول (Fookes and Hawkins, 1988). وتعد مياه الأمطار ودرجات الحرارة من أهم العوامل الخارجية المؤثرة في التجوية الكيميائية للصخور، وتتمثل العوامل الداخلية بمكونات الصخرة والنسيج، كذلك يعد الزمن هو العامل الثالث المشترك بينهما. وتؤدي كل من العوامل الخارجية والداخلية والزمن إلى إضعاف الصخرة ونقصان مقاومتها الانضغاطية (Dhakal, 1996).

تؤدي التجوية الفيزيائية إلى تفتت الصخور إلى قطع اصغر حجما مما يؤدي ذلك إلى زيادة الحجم الكلي لها وتقليل الكثافة وزيادة المساحة السطحية للصخرة والتي تتعرض إلى عمليات التجوية الكيميائية، التي تقوم بدورها في إحداث تغيير في معدنية الصخرة إلى أشكال معدنية أقل مقاومة وربما إلى تطلها. وقد تؤدي التجوية الفيزيائية والكيميائية للحجر الجيري إلى إذابته وانتقاله من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة (Heidari, et al., 2017).

جرت عملية النمذجة والتحري الموقعي للمجموعة الأولى من أحجار البناء والمتمثلة بالحجر الجيري لجدار المقبرة والذي يمثل سياج المقبرة والجدار الساند للتل الأثري الذي أقيمت عليه هذه المقبرة، وقد بني هذا الجدار عام 1948 ميلادية. لقد لوحظ حقليا تقسيم سياج المقبرة إلى جزئين مختلفين من النظرة الأولى على امتداده من حيث تأثر أحجار البناء بالتجوية، فالجزء العلوي يكون قليل التأثر أما الجزء السفلي فيكون متأثرا بشكل أكبر بعمليات التجوية (الشكل 2)، وتلاحظ هذه الظاهرة من تأثر الأجزاء السفلى من الأبنية المشيدة من حجر بعمليات التجوية أكثر من تأثر الأجزاء العليا في معظم الأبنية الأثرية التي قام بدراستها فترز وأخرون في مدينة القاهرة (Fitzner, et al., 2007).



الشكل 2: صورة أمامية لجدار المقبرة توضح تأثير التجوية في الجزء الأسفل منه (النطاق B). S = قليل التجوية M = متوسط التجوية H = عال التجوية

الموقع وجيولوجية المنطقة

يقع قضاء تلييف شمال محافظة نينوى ويبعد مركزه حوالي 20 كم عن مدينة الموصل، وأصل كلمة تلييف هو آرامي ويتكون من مقطعين هما تل Tel وهو الأرض المرتفعة وكيب Keepe والتي تعني الأحجار، وبهذا يكون معناها تل الأحجار. يقع مركز قضاء تلييف بين خطي طول (43.06 و 43.08) ودائرتي عرض (36.30 و 36.31). تنكشف في المنطقة صخور تكوين الفتحة من عمر المايوسين الأوسط (Bellen, et al., 1959)، وهذه الصخور تنكشف على العموم في معظم أرجاء شمال العراق وبالخصوص في محافظة نينوى (الشكل 1). لهذا استخدمت أحجار هذا التكوين في أعمال البناء منذ قرون عديدة، وبقيت شواهد هذا الاستخدام في الآثار المنتشرة في المنطقة للحضارات القديمة، وتظهر المقالع القديمة على شكل طبقات مقلوعة بوضوح على طريق موصل - تلييف.

تكوين الفتحة (المايوسين الاوسط) عبارة عن تعاقبات لدورات رسوبية تتكون من صخور المارل Marl والحجر الجيري Limestone والجبس Gypsum وتحديث تداخلات لصخور حجر الرملي Sandstone ضمن العضو العلوي للتكوين (Al-Naqib and Aghawan, 1993) (شكل 1).

طرائق العمل

تم تصنيف الأحجار حسب درجة تجويتها حقلياً (جدول 1). كما تم استخدام المطرقة الجيولوجية في تقدير مقاومة الصخور (جدول 2). أخذت نماذج من جدار المقبرة ومن معمل حلان اللوس الفني في تلييف، والذي

يقلع أحجاره من تكوين الفتحة في نفس المنطقة لغرض إجراء الفحوصات المختبرية والتي اشتملت على الكثافة الكلية والمسامية ونسبة امتصاص الماء لصخور الجدار وصخور المقلع غير المعرضة للتجوية، وفحص التآكل والديمومة Slake durability لصخور المقلع كما أجريت على النماذج دراسة بتروغرافية أحجار الجدار المتأثرة بدرجات تجوية مختلفة وذلك باستخدام المجهر المستقطب والماسح الإلكتروني. اجري المسح بالمجهر الإلكتروني نوع Wollongong Stereoscan 440 Leica Cambridge Ltd. في مختبرات جامعة وولونغونغ في استراليا University, Australia على بعض هذه النماذج وذلك لتوضيح تأثير التجوية وتكون الفجوات وانتشار المعادن الطينية وأكسيد الحديد. واستخدم جهاز الأشعة السينية XRD Spellman DF3 في الدراسة المعدنية لثلاثة نماذج تمثل الدرجات الثلاث من التجوية في مختبرات الجامعة أنفة الذكر.

الجدول 1: درجات التجوية ووصفها (Hawkins, 1986).

المصطلح	المختصر	الوصف
غير مجواة	G	لا يظهر أي تغير في لون الصخرة، مقاومة عالية.
قليلة التجوية	SW	تغاير لوني على سطوح الانقطاع، لا يحصل انخفاض في المقاومة.
متوسطة التجوية	MW	تغاير لوني قرب سطوح الانقطاع، خفض المقاومة.
عالية التجوية	HW	50% من الصخرة يتغير لونها، 50% خفض المقاومة.
تامة التجوية	CW	معظم الصخرة يتغير لونها، خفض المقاومة إلى مقاومة التربة الهندسية.

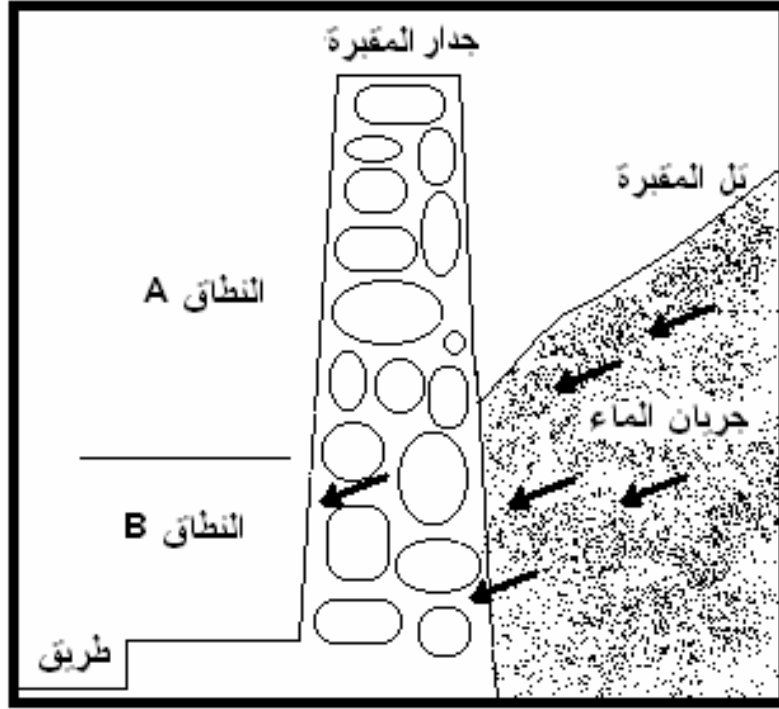
الجدول 2: تقدير مقاومة الصخور باستخدام المطرقة الجيولوجية (Williamson, 1984).

الاختصار	رد الفعل لضربة المطرقة	المقاومة المستنبطة (ميكاباسكال)	الرسم التوضيحي
RQ	ارتداد كبير	> 103	
PQ	تشكل حفرة صغيرة	55-103	
DQ	حصول حفرة في الصخرة	21-55	
CQ	حصول حفرة وانزلاق الحافات	7-21	
MQ	يمكن تقطيعها باليد	< 7	

استنادا إلى الملاحظات الحقلية أعلاه تم تقسيم جدار المقبرة في هذه الدراسة إلى نطاقين مختلفين اعتمادا على نسبة تأثر أحجار البناء بالتجوية:

- النطاق A: يقع فوق مستوى التربة للتل الأثري من داخل المقبرة، وتكون أحجار البناء فيه قليلة التجوية Slightly weathered.

2. النطاق B: يقع تحت النطاق A أي تحت مستوى التربة للتل من داخل المقبرة وتكون معظم أحجار البناء فيه متوسطة وعالية التجوية Moderately and highly weathered (شكل 2 و 3).



الشكل 3: مقطع تخطيطي لجدار وتل المقبرة يوضح جريان المياه خلال الجزء السفلي من الجدار.

أجريت عمليات تحر الموقع لأحجار البناء بوصف اللون والتغاير اللوني والنسيج وتعيين درجة التجوية استنادا إلى نظام تصنيف الصخور الموحد Williamson,) Unified Rock Classification System (1984) والى تصنيف هاوكنس (Hawkins, 1986)، فضلا عن تقدير مقاومة الأحجار حقليا بواسطة المطرقة الجيولوجية ذات الرأس الكروي وملاحظة تأثير المطرقة على سطح الصخرة (Williamson, 1984). اختير أثناء العمل المجموعة الأولى من النماذج بواقع ستة عشر نموذجا مختلفة في درجة التجوية من النطاق B لإجراء الفحوصات المخبرية وقد اقتصررت النماذج على ثلاث درجات من التجوية حيث لم يلاحظ صخور غير مجوية Fresh و صخور كاملة التجوية completely weathered حسب تصنيف هاوكنس (Hawkins, 1986) (جدول 1). ولم يؤخذ نماذج من النطاق A لأنه ضم درجة واحدة من التجوية وهي تجوية قليلة Slightly weathered. أعتد في اختيار المجموعة الثانية من النماذج وعددها أربعة على النسيج المتمثل بتغاير حجم الحبيبات استنادا إلى المواصفات البريطانية (BS 5930, 1981) والموضحة في الجدول (3). أخذت النماذج من معمل حلان اللوس الفني في تكليف والذي يقلع أحجاره من تكوين الفتحة في نفس المنطقة وذلك لأجراء فحص التآكل والديمومة عليها.

الجدول 3: تصنيف الحجر الجيري اعتمادا على حجم الحبيبات (BS 5930,1981).

اسم الصخرة	الوصف	قطر الحبيبات (مم)
كالسيرودايت	صدفي، حبيبات خشنة	> 2.00
كالكارينايت	أوليت، حبيبات متوسطة	0.06 – 2.00
كالسيلتايت	ميكرايت، حبيبات ناعمة	0.002 – 0.06
كالسيلوتايت	صلصالي أو طيني	< 0.002

أجريت الفحوصات الفيزيائية المتمثلة بالكثافة الكلية Bulk density، ونسبة امتصاص الماء Water absorption، والوزن النوعي للحبيبات الصلبة Grains unit weight، ونسبة الفراغات Voids ratio، والمسامية Porosity، استنادا إلى المواصفات الأمريكية لفحص المواد (ASTM, RTH 106-93, RTH 109-93, RTH 108-93). وتم تحضير شرائح صخرية رقيقة للنماذج لغرض إجراء الدراسة الصخرية Petrography عليها والتعرف على المكونات المعدنية والنسيجية وتوضيح الظواهر التحويرية التي تشتمل على السمنتة والإذابة والإحلال والتشققات الدقيقة التي غالبا ما تحدث نتيجة تأثير التجوية على هذه الصخور. ولغرض ترسيخ الدراسة الصخرية اجري مسح بالمجهر الالكتروني وللإسهاب في دراسة التغيرات المعدنية نتيجة التأثير بالتجوية استخدمت طريقة الإذابة والترشيح في دراسة الفضالة غير الذائبة على كل النماذج، فضلا عن الدراسة المعدنية (Regmi, et al., 2013).

وأخيرا اجري فحص التآكل والديمومة Slake durability (ISRM,1979) على النماذج واجري الفحص بعشر دورات من الترتيب والتجفيف وكما أشار إلى ذلك دهكال وآخرون (Dhokal et al., 2002) لغرض بيان مدى تغاير تأثر كل نوع من الحجر الجيري بهذا الاختبار ومقارنة هذه النتائج مع تغاير درجات التجوية في الطبيعة، وتم إجراء هذا الفحص في مختبر ميكانيك التربة في جامعة الموصل.

النتائج والمناقشة

بينت تحريات الموقع أن معظم أحجار البناء التي لها درجات تجوية قليلة ومتوسطة تميل إلى اللون الرصاصي (Grey)، بينما يغلب اللون البني الفاتح Beige على النماذج قليلة التجوية. إن اللون هو أحد العوامل التي يعتمدها تصنيف دنهام Dunham في تمييز الصخور الجيرية ذات الصفات الفيزيائية والكيميائية المتباينة (Flugel, 2004). وظهر تغاير بين اللون الحقيقي للنموذج الصخري ولون المسحوق له حيث يميل لون المسحوق للنماذج قليلة ومتوسطة التجوية إلى اللون الأبيض White بينما تبقى النماذج عالية التجوية محافظة على لونها الرصاصي (جدول 4). وقد يشير ذلك إلى ازدياد نسبة المعادن الطينية عندما تكون درجة التجوية عالية والتي تعطي هذا اللون وتحافظ عليه حتى بعد طحن النموذج.

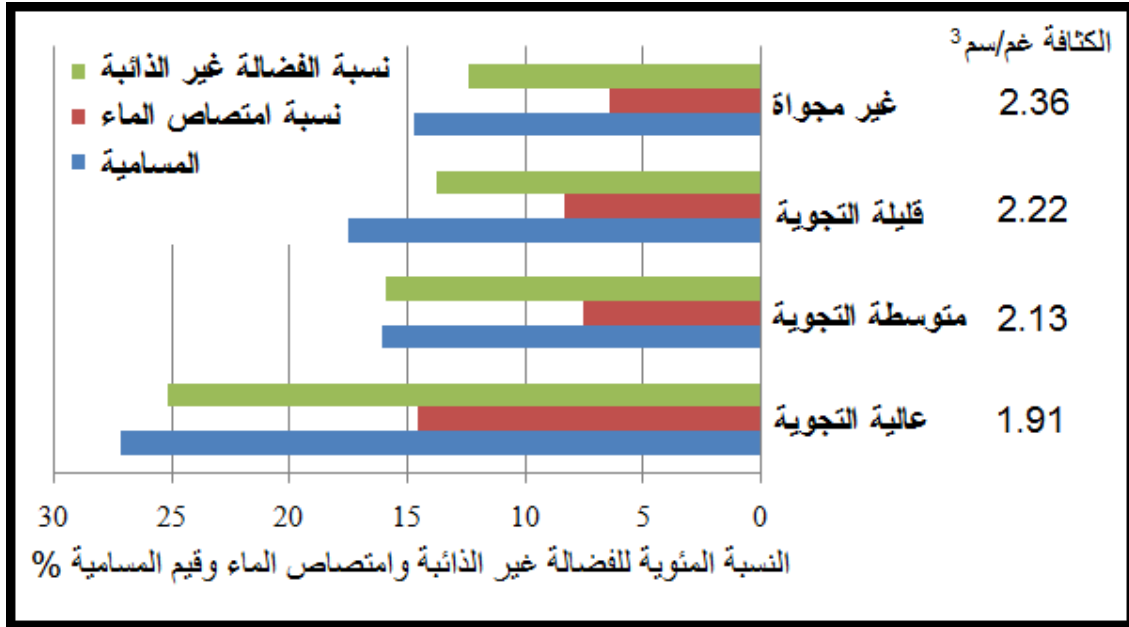
إن معدلات قيم الصفات الفيزيائية لأحجار البناء من الحجر الجيري تظهر تغايرا واضحا مع درجات التجوية، إذ تكون أعلى قيم للكثافة الكلية في الحجر الجيري قليل التجوية وتنخفض هذه القيم بازدياد درجة التجوية (الشكل 4). ويلاحظ من الشكل 4 أن قيم المسامية ونسبة امتصاص الماء تزداد إلى الضعف تقريبا

عندما تزداد درجة التجوية من القليلة والمتوسطة إلى العالية، مما يوضح ازدياد الفجوات وتأثير الإذابة الكبير على الحجر الجيري في المرحلة عالية التجوية. وان قيم المسامية ونسبة امتصاص الماء في المراحل الأولى القليلة والمتوسطة التجوية كانت متقاربة، وان قيمتها للمرحلة متوسطة التجوية كانت اقل من المرحلة قليلة التجوية (الشكل 4)، وقد يعزى سبب ذلك إلى ترسيب المعادن الثانوية ونمو بلورات الكالساييت في الفجوات والذي يؤدي بدوره إلى انخفاض هذين المعاملين لعلاقتها الجيدة مع بعضهما، وهذا يتطابق مع التفسير الذي ذكره (Mohammad, 2003).

الجدول 4: تصنيف ووصف النماذج المأخوذة من جدار لمقبرة.

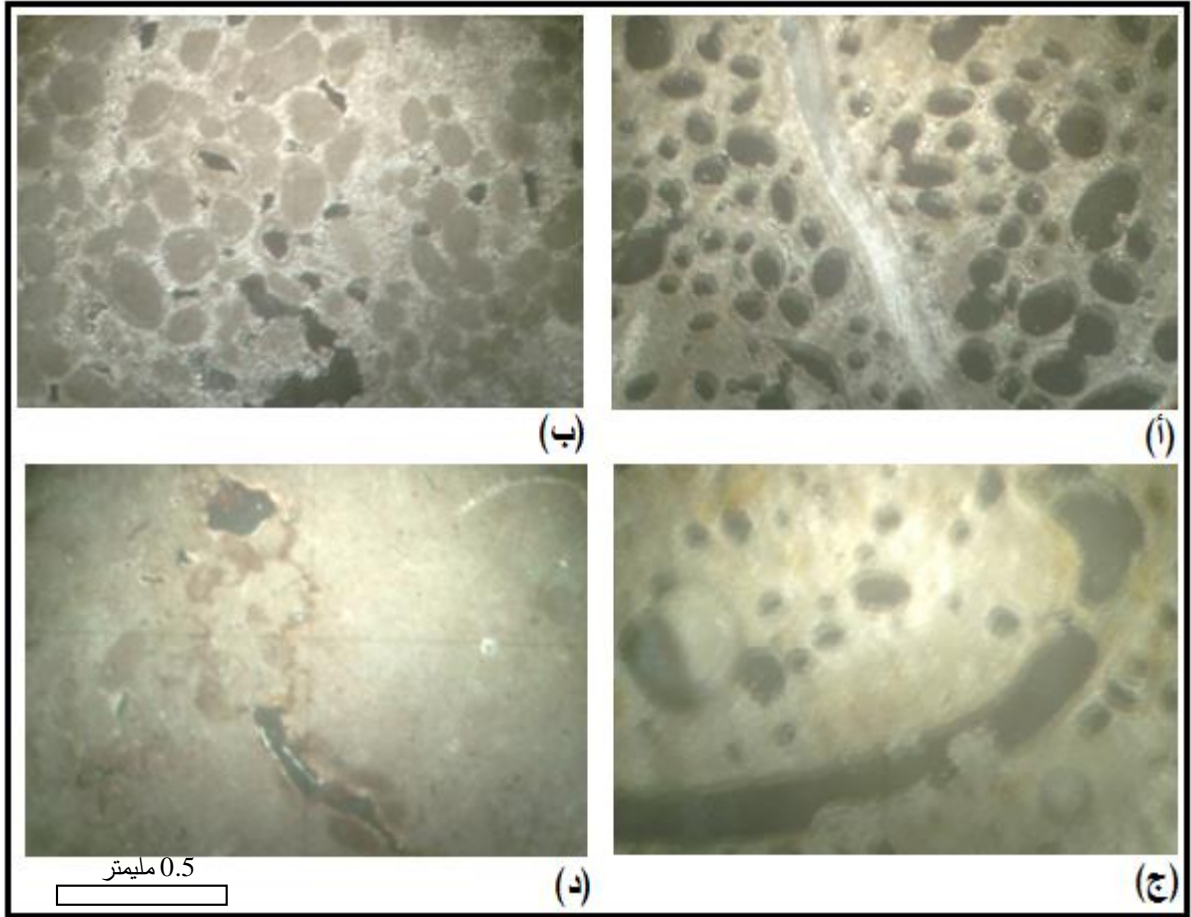
رقم النموذج	الوصف المجهرى	التصنيف	لون المسحوق	اللون	درجة التجوية
1	ميكرايت، شقوق دقيقة	كالسيلتايت	B	B	H
2	شقوق دقيقة، طين وإذابة	كالسيلوتايت	B	B	H
3	بيليسيبيودا، مسامات وإعادة تبلور	كالسيرودايت	B	G	S
4	ميكرايت، شقوق دقيقة	كالسيلتايت	B	B	H
5	مسامية ضمن الحبيبات، شقوق دقيقة وطين	كالكارينايت	B	B	H
6	بيليسيبيودا، كاستروبودا، بيليت وإعادة تبلور	كالسيرودايت	W	G	S
7	بيليت، طين، مسامات، ستيلولايت وإعادة تبلور	كالكارينايت	W	G	S
8	بيليسيبيودا، بيليت وإعادة تبلور	كالسيرودايت	B	B	S
9	كاستروبودا، ميكرايت ومسامات	كالسيرودايت	B	G	H
10	بيليسيبيودا، مسامات وسمنت	كالسيرودايت	B	G	M
11	سبارايت، بيليت وسمنت	كالكارينايت	W	B	S
12	بيليت، شقوق دقيقة وسمنت	كالكارينايت	W	B	M
13	بيليسيبيودا ومسامات	كالسيرودايت	W	G	S
14	مسامات، سمنت وطين	كالسيلوتايت	B	G	M
15	شقوق دقيقة، ميكرايت ورمل	كالسيلتايت	B	B	H
16	بيليت ورمل	كالكارينايت	W	G	S

H: عال S: قليل M: متوسط B: بني فاتح G: رصاصي
W: ابيض



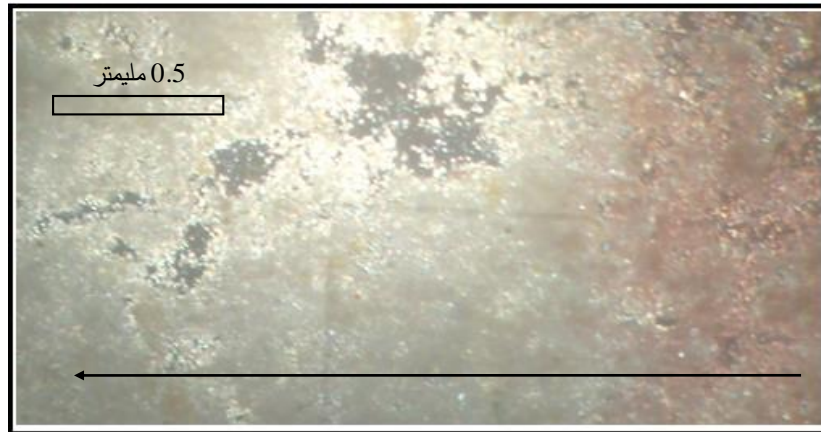
الشكل 4: تباير كل من نسبة الفضالة غير الذائبة ونسبة امتصاص الماء والمسامية مع تباير درجات التجوية.

تعد المعادن الطينية وأكسيد الحديد والحببيات المعدنية مثل الكوارتز والفلسبار فضلا عن الجيرت والفلنت أكثر أنواع الفضالة غير الذائبة insoluble residue في الصخور الجيرية (Fooks and Hawkins, 1988). وتعد المعادن الطينية وأكسيد الحديد من أكثر مواد الفضالة غير الذائبة التي وضحتها الدراسة الصخرية في أحجار البناء المأخوذة من تكوين الفتحة والمتأثرة بالتجوية، حيث تزداد نسبة الفضالة بازدياد درجة التجوية (الشكل 4). إن هذه النتيجة تتطابق مع ما بينه فلوكل (Flugel, 2004) من ازدياد قابلية ذوبان الصخور الجيرية وتأثرها بالتجوية اعتمادا على زيادة تواجد وتوزيع المواد غير الجيرية وخصوصا المعادن الطينية. اشتمل الوصف الصخري للشرائح الرقيقة على العلاقة بين المسامية ودرجات التجوية، والتي بينت أربعة أنواع من المسامية فهناك مسامية ضمن الحبيبات Interpartical، وبين الحبيبات Intrapartical، و مسامية مطبوعة Mold، ومسامية الشقوق الدقيقة Microfractures وكما موضحة في اللوحة 1.

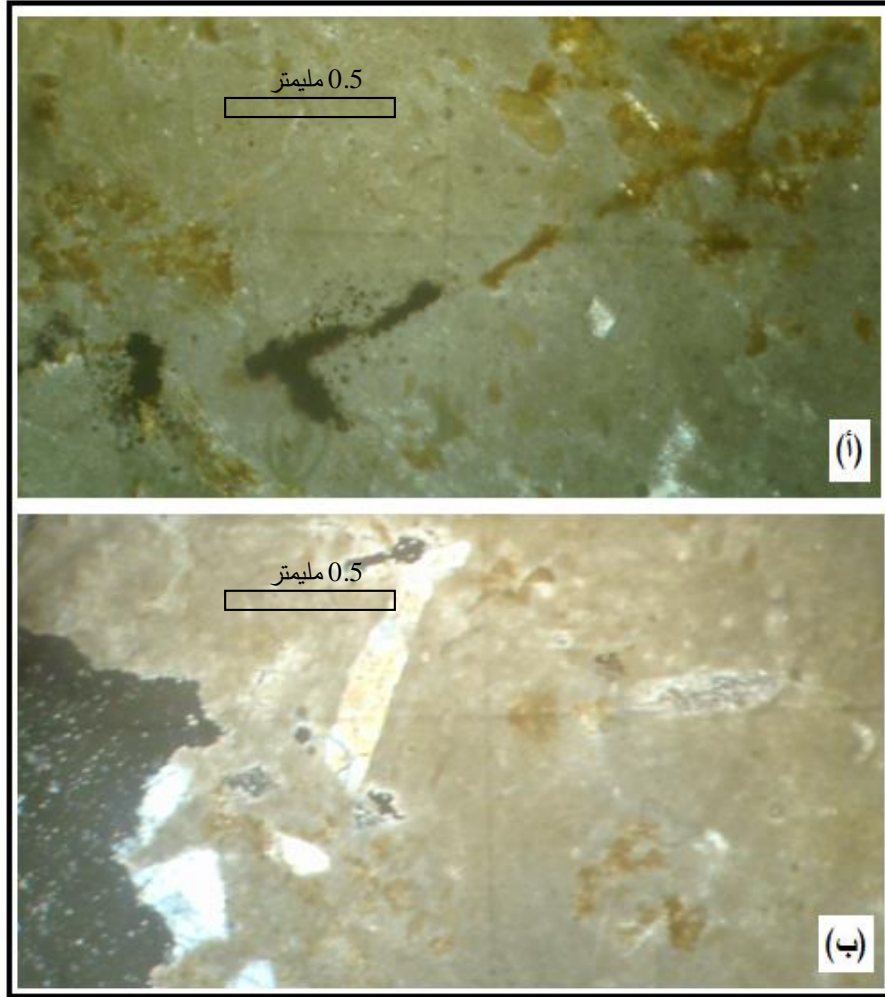


اللوحة 1: أنواع المسامية التي تم تمييزها في الشرائح الرقيقة لأحجار البناء. (أ) مسامية ضمن الحبيبات (ب) مسامية بين الحبيبات (ج) مسامية مطبوعة (د) مسامية الشقوق الدقيقة.

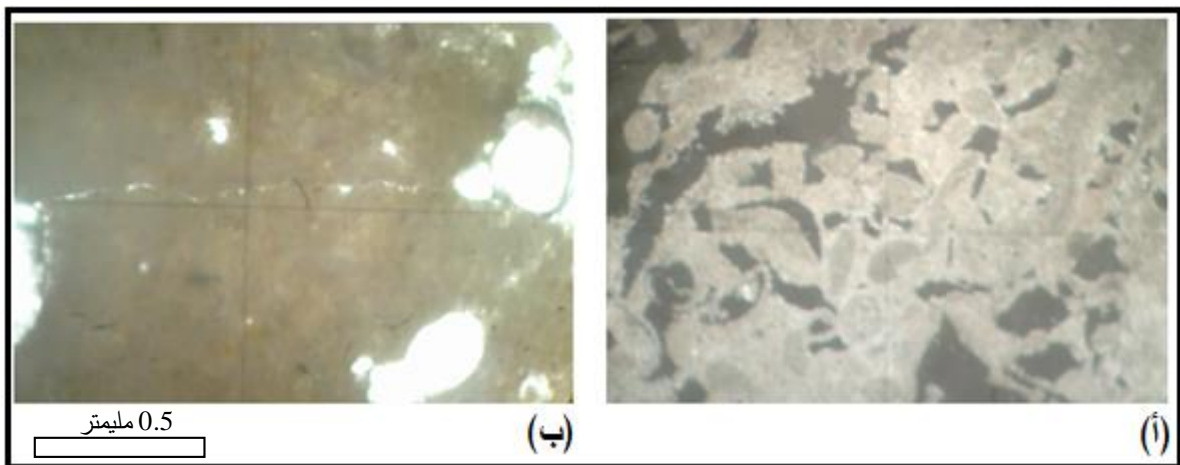
أظهرت اللوحة رقم 2 أن الصخور قليلة التجوية تحوي على مسامية واطئة وتزداد المسامية بازدياد درجة التجوية باتجاه السطح الخارجي للصخرة. وقد تمتلئ هذه المسامات بالمواد الطينية أو نمو بلورات الكالسيت الثانوي أو المواد العضوية كلياً أو جزئياً كما تظهره اللوحة 3. وقد تكون المسامات معزولة Isolated pores أو متصلة بواسطة تشققات طولية كما توضحها اللوحة 4.



اللوحة 2: ازدياد المسامية باتجاه السطح الخارجي للصخرة باتجاه السهم.

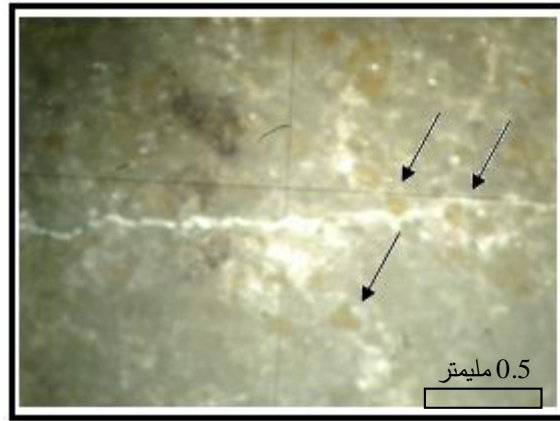


اللوحة 3: امتلاء المسامات كلياً أو جزئياً بالمعادن الطينية أو المواد العضوية أو ببلورات الكالسيت الثانوي. (أ) امتلاء المسامات بالمواد الطينية (اللون الأصفر) والمواد العضوية (اللون الأسود). (ب) امتلاء المسامات كلياً بالكالسيت (جهة اليمين والوسط) وجزئياً (جهة اليسار).



اللوحة 4: نوعا المسامية المعزولة والمتصلة (أ) مسامية معزولة (ب) مسامية متصلة بالشفوق الدقيقة.

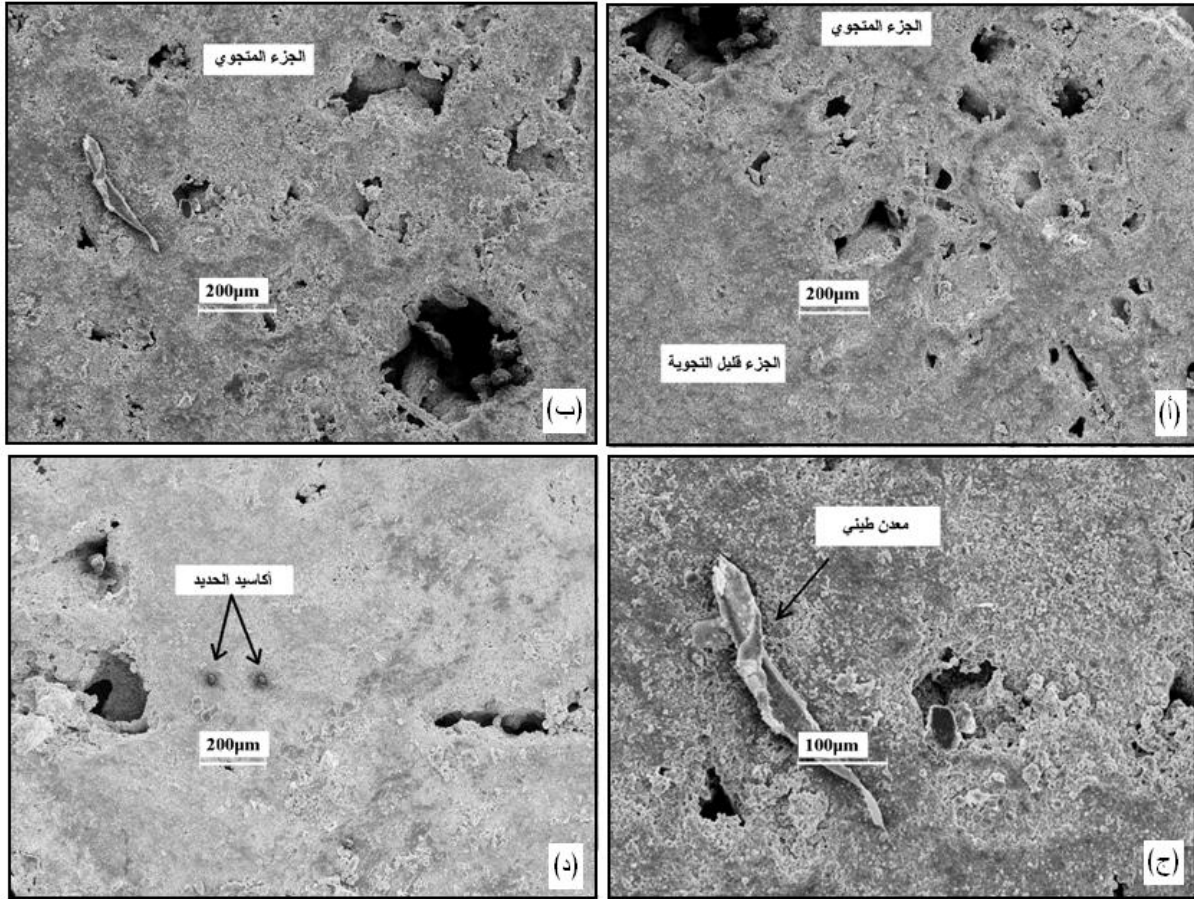
تبين اللوحة 5 أن الشقوق الدقيقة لا تقطع المعادن الطينية وإنما تمر من جانبها وعلى حافتها، وهذا يدل على احتمالية حصول التشققات في مراحل متأخرة. ويلاحظ على الأغلب زيادة تواجد المعادن الطينية بالنماذج ذات درجات التجوية العالية (لوحة 3). وقد بين (Flugel, 2004) العلاقة بين الصفات البتروفيزيائية Petrophysical properties للصخور والنسيج الصخري وتأثير ذلك على مقاومة الصخور المستخدمة كأحجار بناء لعمليات التجوية. فيما أشار أولير (Ollier, 1984) إلى إن معظم المسامية الناتجة من إذابة أجزاء المتحجرات يعود إلى تكونها أصلاً من معدن الأراكونايت Aragonite ومن ثم تقل المسامية بنمو وترسيب معدن الكالساييت Calcite الثانوي في هذه الفجوات، وذلك لأن معدن الأراكونايت له قابلية على الذوبان أعلى من الكالساييت بعشر مرات تقريباً مع العلم أن هذين المعدنين يتكونان من كربونات الكالسيوم.



اللوحة 5: النفاذ الشقوق الدقيقة حول المعادن الطينية وعدم قطعها (لاحظ تأثير الأسهم).

توضح صور المجهر الماسح الإلكتروني Scanning Electron Microscope انتشار المسامات الدقيقة في الحجر الجيري للجزء المتجوي وندرتها في الجزء قليل التجوية، فضلاً عن انتشار المعادن الطينية في الجزء المتجوي، وكذلك تواجد أكسيد الحديد (لوحة 6). ويتبين تآكل أجزاء من بلورات الكالساييت خلال عملية ذوبانها وتكوين الفجوات (لوحة 7). فضلاً عن نمو بلورات الكالساييت الثانوي على سطوح الفجوات والتي قد تؤدي فيما بعد إلى تقليل المسامية (لوحة 8) (Rekalova and Bianco, 2018). ويلاحظ من خلال اللوحات انتظام الفجوات في خطوط تمثل اتجاه التشققات إذ إن المسامات الناتجة عن الإذابة تكون قريبة جداً من التشققات في الصخور (Rothert, et al., 2007; Dorn and Krinsley, 2019). أجرى جيرميناريو وآخرون (Germinario, et al., 2017) دراسة بتروغرافية باستخدام المجهر المستقطب والماسح الإلكتروني على الشرائح الصخرية بالاتجاهين العمودي والموازي لسطح التجوي في الصخرة للتعرف على تأثير عمق التجوية على مسامية الأحجار. كما بينت أن المسامية عموماً تزداد بزيادة التجوية وقد تقل أحياناً بسبب نمو بلورات الكالساييت أو ترسب المواد الطينية والعضوية وأكدت صور الماسح الإلكتروني ذلك. أظهرت الدراسة احتمالية أن تكون التشققات في جسم الصخرة المتجوية قد حدثت في مراحل متأخرة وذلك نتيجة تأثرها بالتجوية وليس بالعمليات التحويرية digenesis (Eppes and Keanini, 2017). كما بينت الدراسة تحت الماسح الإلكتروني انتشار

الفجوات الدقيقة في الحجر الجيري وتواجد المعادن الطينية وأكسيد الحديد في الأجزاء المتجوية وندرة الفجوات الدقيقة عدم تواجد المعادن الطينية وأكسيد الحديد في الأجزاء غير المتجوية.

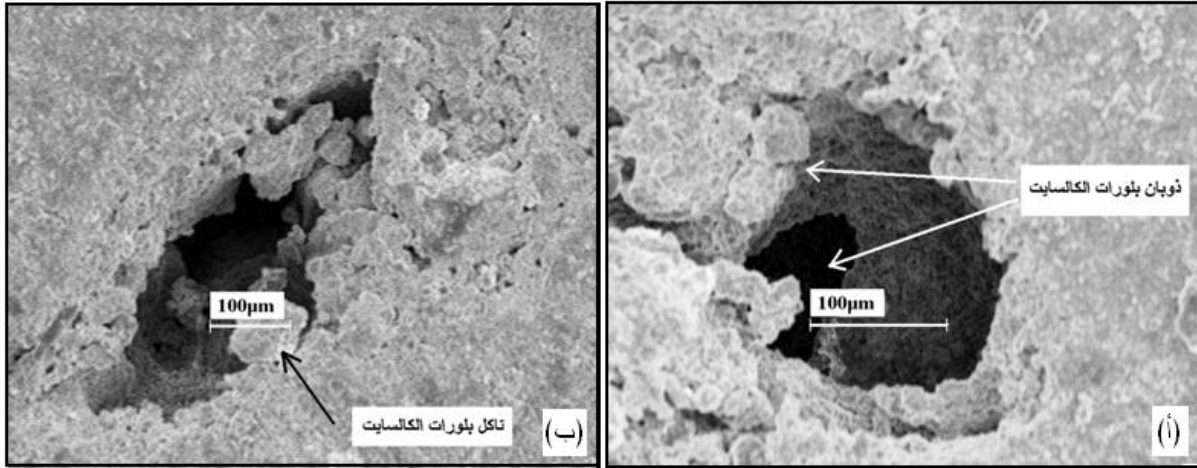


اللوحة 6: انتشار المسامات والمعادن الطينية وأكسيد الحديد في الجزء المتجوي من الصخرة (أ) الجزء المتجوي في جهة اليمين وغير المتجوي في جهة اليسار (ب) انتشار المسامات والمعادن الطينية في الجزء المتجوي (ج) نظرة مكبرة للمعدن الطيني قرب المسامات (د) انتشار أكسيد الحديد قرب المسامات.

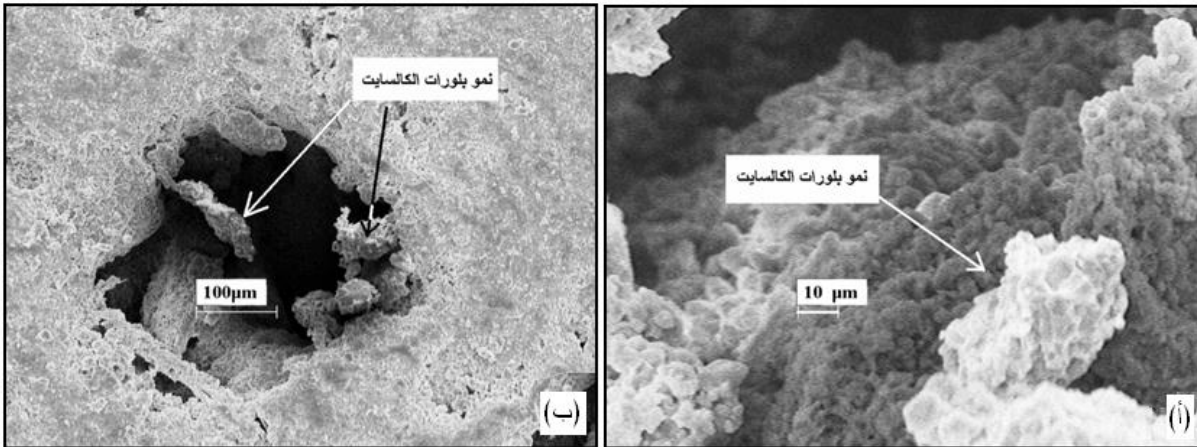
إن الدراسة المعدنية بواسطة جهاز الأشعة السينية للنماذج 13 و 14 و 15 والتي تمثل مراحل التجوية القليلة والمتوسطة والعالية على التوالي لم توضح أي تغاير محسوس في المعدنية للصخور (الشكل 6)، وقد يكون سبب ذلك هو استخدام النموذج الكلي في الاختبار من دون تركيز للمعادن غير الذائبة والتي كان من المؤمل تحسبها في النموذج الكلي.

تكون قيم الديمومة لالحجر الجيري من نوع الكالكارينيات عالية جدا، بينما تكون القيم عالية لالحجر الجيري للنوعين كالسيرودايت وكالسيولوتايت ومتوسطة إلى عالية لالحجر الجيري نوع كالسيسلتايت (جدول 5). وجدير بالذكر أن معظم أنواع الحجر الجيري في هذه الدراسة كانت عالية الديمومة (الجدول 5)، وذلك لما يعتقد أن تأثير العمر بالمياه والتجفيف على هذه الصخور قليلا وذلك لقلّة تواجد المعادن الطينية فيها (Moh'd, 2002). وكما هو معلوم فإن أهمية هذا الاختبار تكمن في حدوث تغيير في المقاومة وعوامل المرونة للصخور اعتمادا على مكوناتها ونسيجها عندما تكون بقية العوامل الخارجية كالمناخ والوقت متساوية. إذ تعتمد المكونات على التجوية الكيميائية، بينما يعتمد النسيج على التجوية الفيزيائية (Dhakar, 1996). وقد أشار محمد وآخرون

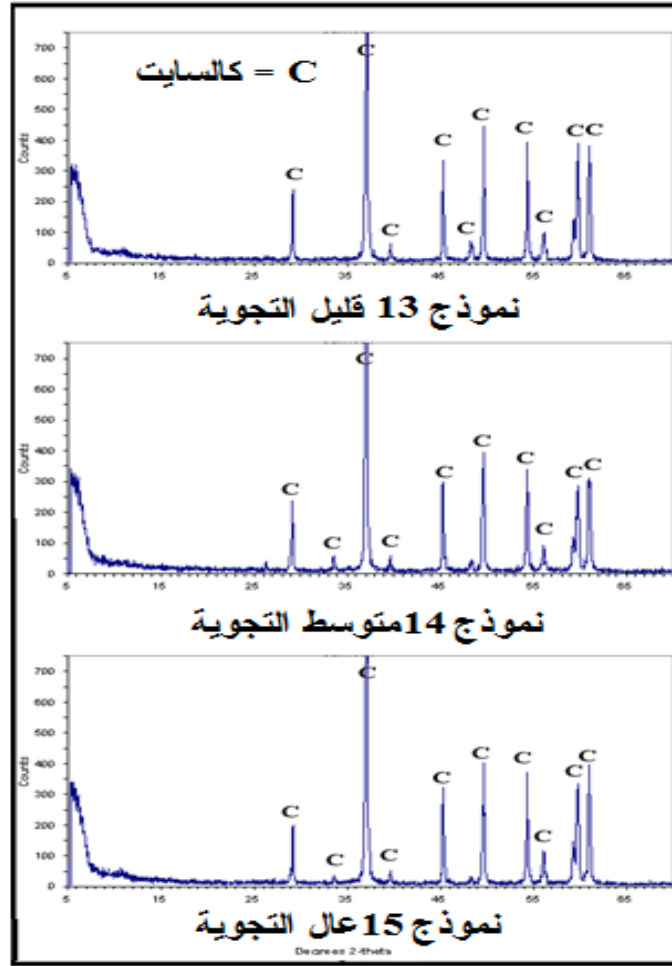
(Mohamed, *et al.*, 2006) إلى اختلاف نتائج دراسة التجوية عن نتائج فحص المتانة، وبينوا أن سبب ذلك هو اختلاف تصرف الصخور نتيجة تعرضها للظروف الجوية الطبيعية عن الظروف المختبرية عند غمرها في الماء وتجفيفها.



اللوحة 7: ذوبان وتآكل بلورات الكالسيت (أ) ذوبان السطح الخارجي لبلورات الكالسيت (ب) تآكل الحافات لبلورات الكالسيت مما يؤدي إلى انفصالها عن بقية البلورات.



اللوحة 8: النمو الثانوي لبلورات الكالسيت داخل المسامات (أ) نظرة مكبرة لبلورة الكالسيت الثانوي (ب) نمو بلورات الكالسيت داخل المسامات والذي يؤدي إلى تقلص حجم المسام.



الشكل 6: التحليل المعدني بوساطة جهاز الأشعة السينية لثلاث نماذج مختلفة درجة التجوية.

الجدول 5: تصنيف الديمومة للأصناف الأربعة من الحجر الجيري في منطقة الدراسة (نسبة الوزن المتبقي لكل دورة).

عدد الدورات	نوع الحجر الجيري			
	كالسبروديت	كالكارينايت	كالسيلتايت	كالسيلوتايت
1	98.5	99.1	96.5	98.3
2	97.3	98.4	95.1	97.3
3	96.5	98.1	94.2	96.5
4	95.6	97.7	93.0	95.4
5	94.3	97.1	91.5	94.1
6	93.4	96.7	90.3	93.1
7	92.5	96.2	89.1	92.1
8	91.7	96.0	88.0	91.2
9	90.7	95.4	86.9	90.2
10	89.8	95.0	85.8	89.2
التصنيف	عال	عال جدا	متوسط-عال	عال

الاستنتاجات

1. أكدت الملاحظات الحقلية الدقيقة على صخور الجيرية في جدار المقبرة تأثر النطاق B وهو الجزء الأسفل من الجدار بالتجوية أكثر من النطاق A وهو الجزء الأعلى من الجدار بسبب تأثير المياه المرشحة من تربة التل خلف الجدار. إذ تزداد كمية ثنائي أكسيد الكربون المذابة في الماء خلال التربة في فصل الشتاء عندما تكون درجات الحرارة منخفضة مما يؤدي إلى زيادة حمضية الماء وتكون أعلى من حمضية مياه الأمطار، إذ تتراوح حمضية مياه الأمطار في منطقة الدراسة بين (5.7-7.4) (محمود وآخرون، 2007).
2. إن ارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى زيادة قابلية الصخور للذوبان، وحيث أن الجدار يقع باتجاه الجنوب فإنه يكون معرضاً لأشعة الشمس خلال فترات طويلة من النهار في فصلي الربيع والصيف. وعليه فإن زيادة الحمضية وارتفاع درجة الحرارة يؤديان إلى زيادة درجة التجوية في الجزء الأسفل من الجدار بينما يتعرض الجزء العلوي فقط لارتفاع درجة الحرارة وبذلك تكون التجوية فيه قليلة.
3. يميل لون مسحوق معظم الصخور قليلة التجوية إلى اللون الأبيض بينما لون مسحوق الصخرة عالية التجوية إلى اللون البني الفاتح. وذلك لزيادة نسبة الفضالة غير الذائبة على حساب إذابة أجزاء من الجير في الصخور عالية التجوية وتحول الفضالة غير الذائبة إلى معادن طينية بفعل التجوية الكيميائية.
4. تقل قيم الكثافة الكلية بزيادة درجة التجوية بينما تتصرف المسامية ونسبة امتصاص الماء تصرفاً متشابهاً إذ ترتفعان في الصخور قليلة التجوية نسبة إلى الصخور غير المتجوية ثم تنخفضان قليلاً في الصخور متوسطة التجوية وتزداد قيمتهما بشكل ملحوظ في الصخور عالية التجوية. يستنتج من هذا إمكانية تحديد الصخور عالية التجوية وفصلها عن بقية درجات التجوية الأخرى من خلال معدلات قيم الكثافة الكلية ونسبة امتصاص الماء والمسامية.
5. بينت الدراسة البتروغرافية بالمجهر الضوئي بان هناك أربعة أنواع من المسامية وهي مسامية ضمن الحبيبات، وبين الحبيبات، ومسامية مطبوعة، ومسامية الشقوق الدقيقة.
6. لم تبين الدراسة المعدنية تحت الأشعة السينية أي تمييز في درجات التجوية للصخور الجيرية حيث لم تظهر أي اختلاف معدني في النماذج الثلاثة المختلفة في درجة التجوية، وعلية فقد تكون غير ضرورية في مثل هذه الدراسات. في حين بين اختبار فحص المتانة تأثير النسيج الصخري وحجم الحبيبات على تباين قابلية الصخور الجيرية لمقاومة التجوية. حيث أظهر الكالكارينايت متانة عالية جد، والكالسيرودايت والكالسيلوتايت متانة عالية أما الكالسيستايت فمتانته بين المتوسطة إلى العالية.

المصادر العربية

- محمود، طارق احمد وعبد الوهاب، سعدي صالح وصالح، رياض محمود (2007) "التلوث الهوائي وخصائص مياه الأمطار في مدينة الموصل"، مجلة هندسة الرافدين، مجلد 5، عدد 3، ص. (21-32).

المصادر الأجنبية

- Al-Naqib, S.Q., and Aghwan, Th.A. (1993) "Sedimentological study of the clastic units of Lower Fars Formation" Iraqi Geological Journal, Vol. 26, pp. 108-121.
- ASTM, RTH 106-93, "Method for determination of the water content of a rock sample"
- ASTM, RTH 108-93, "Method of determining density of solids"
- ASTM, RTH 109-93, "Method of determining effective (as received) and dry unit weights and total porosity of rock cores"
- B.S. 5930, (1981) "British standard code of practice for site investigations" British Standards Institution, HMSO, London.
- Baronio, G and Cancelli, A. (1981) "Behaviour of clastic rocks in polluted atmosphere" Proceedings of the international symposium on weak rock, Tokyo, pp. 173-178.
- Bellen, R.C. Van, Dunnington, H.V., Wetzel, R. and Morton, D.M., (1959) "Lexique stratigraphique international" Vol. III, sie, 333p.
- Dhakal, G., Yoneda, T., Kato, M., and aneko, K. (2002) "Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks" Engineering geology, Vol. 65, pp. 31-45.
- Dhakal, G.P., (1996) "The potential of granite and diorite as construction aggregates" M.Sc. Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Dorn, R.I. and Krinsley, D.H. (2019) "Nanoscale Observations Support the Importance of Chemical Processes in Rock Decay and Rock Coating Development in Cold Climates", Geosciences, 9, 121, pp. 1-28.
- Eppes, M.C. and Keanini, R. (2017) "Mechanical weathering and rock erosion by climate-dependent subcritical cracking", Reviews of Geophysics, American Geophysical Union, pp. 1-39.
- Fitzner, B., Heinrichs, K. and La Bouchordiere, D. (2007) "Limestone weathering on historical monuments in Cairo, Egypt", Geological Institute, Aachen University, Working group, Natural stones and weathering, Wuellnerstrasse 2, D-52062 Aachen, Germany.
- Flugel, E., (2004) "Microfacies of carbonate rocks, analysis, interpretation and application" Springer-Verlag, Berlin, pp. 976.
- Fookes, P.G. and Hawkins, A.B. (1988) "Limestone weathering: Its engineering significance and a proposed classification scheme" Q. J. Of Engineering Geology, London, Vol. 21, pp. 7-31.
- Germinario, L., Siegesmund, S., Maritan, L., Simon, K. and Mazzoli, C. (2017) "Trachyte weathering in the urban built environment related to air quality" *Herit Sci* 5:44, DOI 10.1186/s40494-017-0156-z, Springer, pp. 1-17.
- Hawkins, A.B. (1986) "Rock descriptions" Geological Society, Engineering geology special publication, No. 2.
- Heidari, P., Li, L., Jin, L., Williams, J.Z. and Brantley, S.L., (2017) "A reactive transport model for Marcellus shale weathering" *Geochimica et Cosmochimica Acta* 217, Elsevier, pp. 421-440.
- ISRM (1979) "Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties" International journal of rock mechanics and mining sciences, Vol. 16, No. 2, pp 148-156.

- Moh'd,B.K., (2002) "Estimating Some Pore-Related Properties of Limestone from Bulk Density and Water Absorption Data" *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*.
- Mohamed,Z., Rafek,A.G. and Komoo,I. (2006) "A geotechnical engineering characterisation of interbedded Kenny weak rock in Malaysian wet tropical environment" *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*.
- Mohammad,B.K. (2003) "The salt durability of some Jordanian limestone as a function of there petrophysical properties" *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*.
- Ollier,C. (1984) "Weathering", 2nd edition, Longman Inc., New York.
- Pesce,C., Moretto,L.M., Orsega,E.F., Pesce,G.L., Corradi,M. and Weber,J., (2019) "Effectiveness and Compatibility of a Novel Sustainable Method for Stone Consolidation Based on Di-Ammonium Phosphate and Calcium-Based Nanomaterials" *Materials*, 12, 3025; doi:10.3390/ma12183025.
- Regmi,A.D., Yoshida,K., Dhital,M.R. and Pradhan,B. (2013) "Weathering and mineralogical variation in gneissic rocks and their effect in Sangrumba Landslide, East Nepal" *Environ Earth Sci.*, DOI 10.1007/s12665-013-2649-8
- Rekalova,E.K. and Bianco,L., (2018) "Importance of optical microscopic investigation in provenance studies and quality characteristics of both historical and natural Lower Globigerina building limestone of Malta" *REVIEW OF THE BULGARIAN GEOLOGICAL SOCIETY*, vol. 79, part 3, pp. 93–94 National Conference with international participation "GEOSCIENCES 2018".
- Rothert,E., Eggers,T., Cassar,J., Ruedrich,J., Fitzner,B. and Siegesmund,S., (2007) "Stone properties and weathering induced by salt crystallization of Maltese Globigerina Limestone" *Geological Society, London, Special Publications*, 271, pp. 189–198.
- Williamson,D.A., (1984) "Unified rock classification system" *Bulletin Association of Engineering Geology*, Vol.XXI, No.3, pp. 345-354.