Wadi Alshatti University Journal of
Pure and Applied Sciences

مجلة جامعة وادي الشاطئ
للعلوم البحتة والتطبيقية

Volume 4, No. 2, July-December 2026 Online ISSN: 3006-0877 المجلد 4، الاصدار 2، يوليو- ديسمبر 2026

RESEARCH ARTICLE CIVIL ENGINEERING

Study of Natural Marble Specifications in Southern Libya

Khamis Hassan Juma Khamis[1,*], Fouad Faraj Farouj[1]

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Wadi Alshatti University, Brack, Libya

ARTICLE HISTORY
Received 27 June 2026
Revised 25 July 2026
Accepted 29 July 2026
Online 01 August 2026

KEYWORDS
Natural marble;
Southern Libya;
XRF chemical analysis;
Onyx and travertine;
Dimension ston.

ABSTRACT

This study evaluates the chemical, physical, and mechanical specifications of natural ornamental stones from five quarry sites in the Wadi Alshatti / Zella region of southern Libya: Tarouth, Mahruqa Right, Mahruqa Left, Zella, and Al-Ghaylaniya, all locally marketed as "marble." Samples were characterized by X-ray Fluorescence (XRF) chemical analysis, bulk density and water absorption (ASTM C97), uniaxial compressive strength (ASTM C170), and sulfuric-acid (H_2SO_4) resistance, with three replicate specimens per site. Results show that Mahruqa Left exhibits the highest compressive strength (87.45 ± 0.77 MPa) and CaO content (87.8%), with low water absorption (0.31%) and a density of 2.68 g/cm3, consistent with a high-purity calcitic marble. Tarouth (CaO = 79.7%; 64.93 MPa) and Mahruqa Right (CaO = 75.9%; 64.00 MPa, currently inactive) classify as dolomitic and calcite-dolomite marbles, respectively. Chemical analysis reveals that the Zella stone is not true marble: its exceptionally high sulfate content (SO_3 = 31.91%) identifies it as a calcite-sulfate onyx of evaporitic/hydrothermal origin rather than a metamorphic carbonate rock. Similarly, Al-Ghaylaniya, with MgO = 19.60%, the highest water absorption (8.78%) and the lowest compressive strength (34.30 MPa), is geologically a dolomitic travertine. These findings indicate that two of the five commercially traded "marble" sources are mineralogically distinct stone types, with direct implications for correct classification, pricing, and end-use selection in the Libyan dimension-stone industry.

دراسة مواصفات الرخام الطبيعي في الجنوب الليبي

اسم اخميس حسن جمعة خميس[1،*]، فؤاد فرج فروج[1]

الكلمات المفتاحية
الرخام الطبيعي
جنوب ليبيا
التحليل الكيميائي XRF
الأونكس والترافرتين
أحجار الزينة.

الملخص

. نظرا لعدم توفر بيانات علمية حول المواصفات الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية حول الرخام المستخرج من الجنوب الليبي مما يحد من اماكنية الاستفادة منة في اعمال التشطيب لذلك يتناول هذا البحث تقييم المواصفات الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية للأحجار الزخرفية الطبيعية المستخرجة من خمسة مواقع محاجر في منطقة جنوب ليبيا، وهي: تاروث، محروقة يمين الطريق، محروقة يسار الطريق، زلة، وغيلان، وجميعها يُسوَّق محلياً تحت مسمى "الرخام". حيث خضعت العينات لعدة اختبارات منها التحليل الكيميائي بالفلورة السينية (XRF)، والكثافة الظاهرية وامتصاص الماء، ومقاومة الضغط الأحادية المحور ، ومقاومة حمض الكبريتيك (H_2SO_4)، بواقع ثلاث عينات مكررة لكل موقع. وأظهرت النتائج أن موقع محروقة يسار الطريق يسجل أعلى مقاومة ضغط (87.45MPa) وأعلى محتوى من أكسيد الكالسيوم (87.8%)، مع امتصاص ماء منخفض (0.31%) وكثافة 32.68 g/cm، بما يندرج تحت تصنيف مع رخام كالسيتي عالي النقاء. ويُصنَّف موقعا تاروث (CaO=79.7%؛ 64.93MPa) ومحروقة يمين الطريق (CaO=75.9%؛ 64.00MPa، وهو متوقف حالياً عن الاستغلال) كرخام دولوميتي ورخام كالسيت-دولوميت على التوالي. وكشف التحليل الكيميائي أن حجر زلة ليس رخاماً حقيقياً، إذ يتميز بمحتوى استثنائي الارتفاع نسبة ثالث أكسيد الكبريت (SO3=31.91%) يحدد طبيعته كأونكس كالسيتي-كبريتاتي ذي أصل تبخري/حراري مائي وليس صخراً كربوناتياً متحولاً. وبالمثل فإن حجر غيلان، بمحتوى أكسيد المغنيسيوم (MgO=19.60%) وأعلى امتصاص ماء (8.78%) وأدنى مقاومة ضغط (34.30MPa)، يُصنَّف جيولوجياً كترافرتين دولوميتي. تشير هذه النتائج إلى أن اثنين من بين المواقع الخمسة المتداولة تجارياً تحت مسمى "الرخام"هما في الحقيقة نوعان معدنيان مختلفان، بما يحمل دلالات مباشرة على التصنيف الصحيح والتسعير واختيار الاستخدام النهائي في صناعة أحجار الزينة الليبية.

المقدمة

يُعدّ الرخام الطبيعي من أبرز أحجار الزينة المستخدمة في التكسية والأرضيات والتطبيقات المعمارية، لما يجمعه من قيمة جمالية وخصائص ميكانيكية مناسبة. غير أن تسويق الأحجار الكربوناتية محلياً تحت مسمى

*Corresponding author
https://doi.org/10.63318/waujpasv4i2_18
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

"الرخام"كثيراً ما يجري بالاعتماد على المظهر الخارجي وحده، دون تحقّق معملي من تركيبها الكيميائي وخواصها الفيزيائية، رغم أن هذا التحقّق هو الفيصل في تحديد القيمة التجارية والاستخدام السليم للحجر [1,2].وتندرج هذه الأحجار عموماً ضمن ما يُعرف اصطلاحاً بأحجار الزينة (Dimension Stone)، أي الكتل الصخرية الطبيعية التي تُقطع وتُشكَّل بأبعاد محددة لأغراض معمارية وزخرفية، سواء أكانت رخاماً أم جرانيتاً أم غيرهما من الصخور التجارية [3,4]، وهو التصنيف الواسع الذي يستوجب تمييز كل نوع صخري بدقة قبل طرحه تجارياً.وتزخر منطقة الجنوب الغربي الليبي — وتحديداً نطاق وادي الشاطي وزلة و غيلان— بتشكيلات كربوناتية متعددة تُستغل تجارياً وتُتداول جميعاً تحت مسمى "الرخام"، دون أن تحظى بتوثيق علمي محكّم يثبت هذه التسمية أو ينفيها. ومن هنا تنبع أهمية هذه الدراسة التي تسعى إلى سدّ تلك الفجوة عبر توصيف معملي دقيق يربط التصنيف التجاري بالتصنيف الجيولوجي الفعلي.وتهدف الدراسة تحديداً إلى تقييم خمسة مواقع محاجر (تاروث، محروقة يمين الطريق، محروقة يسار الطريق، زلة، وغيلان) باستخدام التحليل الكيميائي بالفلورة السينية (XRF)، وقياس الكثافة وامتصاص الماء ومقاومة الضغط ومقاومة حمض الكبريتيك، بغية التحقق من التصنيف الصخري الصحيح لكل موقع وتحديد مدى ملاءمته للاستخدام الإنشائي والزخرفي.وتكمن مساهمة هذه الدراسة في كونها أول توثيق معملي منهجي يجمع بين التحليل الكيميائي (XRF) والخواص الفيزيائية والميكانيكية ومقاومة الأحماض في منظومة اختبار واحدة لخمسة مواقع محاجر متجاورة في منطقة وادي الشاطي وغيلان و زلة، وهو ما يتيح للمرة الأولى معرفة خواص هذه المواقع تكشف أن اثنين منها ليسا رخاماً بالمعنى الجيولوجي رغم تسويقهما كذلك، بما يوفر أساساً علمياً موثقاً لإعادة التصنيف التجاري لأحجار المنطقة.. ولا سيما الرخام، باهتمام متزايد في السنوات الأخيرة نظراً لأهميتها في قطاع البناء والإنشاء، إذ ركّزت الأبحاث الحديثة على تقييم خصائصها الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية ومدى تأثرها بالعوامل المحيطة، بهدف تحديد مدى صلاحيتها للاستخدامات الهندسية.ففي مجال السلوك الكيميائي للرخام، تناول دراسة أثر التآكل الحمضي على الخواص الميكانيكية للرخام بعد تعريض العينات لمحاليل مختلفة الحموضة ثم قياس مقاومة الضغط، وخلصوا إلى انخفاض واضح في المقاومة كلما زاد التعرض للوسط الحمضي نتيجة اتساع المسام وتنامي الشقوق الدقيقة، مؤكدين أهمية اختبار مقاومة الأحماض في الحكم على جودة الرخام الهندسي [5].وفي السياق نفسه، بيّنة دراسة قارنت الرخام بأحجار أخرى أن المعالجة بالمحاليل الحمضية تخفض الكثافة وترفع المسامية وتُضعف الترابط الحبيبي، بدرجات تتفاوت تبعاً للتركيب المعدني لكل حجر، وهو ما يجعل قياس الكثافة والامتصاص إلى جانب مقاومة الأحماض مؤشرات متكاملة في توصيف الرخام [6].ومن زاوية التوصيف الفيزيائي، قدّمت دراسة تقييماً جيوتكنياً لرخام Gahiratشمل الكثافة وامتصاص الماء ومقاومة الضغط، وأظهروا ارتباطاً وثيقاً بين انخفاض الامتصاص والمسامية من جهة وارتفاع مقاومة الضغط من جهة أخرى، بما يجعل هذه الخواص مجتمعةً معياراً موثوقاً لتصنيف جودة الرخام [7].وعلى صعيد ربط التركيب الكيميائي بالأداء، أبرزت الدراسات التي اعتمدت التحليل بالفلورة السينية (XRF) إلى جانب قياس الكثافة والامتصاص ومقاومة الضغط أن ارتفاع محتوى أكسيد الكالسيوم وانخفاض نسبة الامتصاص يقترنان بارتفاع مقاومة الضغط وتحسّن جودة الرخام للاستخدامات الإنشائية، وهي العلاقة التي تتبناها هذه الدراسة أساساً للتمييز بين المواقع [8].أما في تمييز الرخام عمّا يشابهه من أحجار، فقد أوضحت دراسة عن الأونكس-ترافرتين أن هذه الأحجار، رغم تشابهها الظاهري مع الرخام، تختلف عنه جوهرياً في تركيبها الكيميائي وخواصها الفيزيائية؛ إذ يقترن ارتفاع الامتصاص وانخفاض مقاومة الضغط فيها بطبيعتها الرسوبية، وهو ما يستوجب فصلها عن الرخام في التصنيف والتسويق [9].ويتبيّن من مجمل هذه الأعمال أن أغلبها انصبّ على توصيف خاصية بعينها أو على دراسة تأثير عامل محيط في نوع محدد من الرخام، في حين تتميّز الدراسة الحالية بجمعها بين التحليل الكيميائي (XRF) والخواص الفيزيائية (الكثافة والامتصاص) والميكانيكية (مقاومة الضغط) ومقاومة الأحماض في منظومة واحدة، وتطبيق ذلك على أحجار الجنوب الغربي الليبي لتقييم مدى توافق تصنيفها التجاري مع تصنيفها الجيولوجي، وهو جانب لم يحظَ بدراسة كافية في الأدبيات المنشورة.وتجدر الإشارة إلى أن الأبحاث المحلية الحديثة المنشورة في مجلة جامعة وادي الشاطي عزّزت الاهتمام بالاستخدامات الهندسية لمخلفات الرخام ومواد المحاجر في المنطقة؛ إذ تناولت إحداها إعادة توظيف غبار رخام وادي الشاطي كمادة حشو في الخلطات الإسفلتية الساخنة [10]، في حين قارنت دراستان أخريان الخواص الفيزيائية والميكانيكية لمواد طبقة الأساس المستخرجة من محاجر مختلفة في المنطقة، بما يوفر مرجعية إضافية لمقارنة نتائج الكثافة والامتصاص والمقاومة الميكانيكية مع النتائج الحالية [11,12].

وتتجاوز أهمية هذه الدراسة الجانب العلمي البحت إلى أبعاد اقتصادية وبيئية مباشرة. فمن الناحية الاقتصادية، يُقدَّر حجم سوق الرخام العالمي حالياً بنحو 73 إلى 77 مليار دولار أمريكي، ومن المتوقع أن ينمو بمعدل نمو سنوي مركّب يتراوح بين 4.3% و5.2% ليقارب 100 مليار دولار بحلول عام 2034 [13]، وهو ما يؤكد الجدوى الاقتصادية لتوصيف مواقع الجنوب الليبي وتصنيفها علمياً تمهيداً لاستثمارها.

ومن الناحية البيئية، فإن استخراج أحجار الزينة ومعالجتها يولّد كميات كبيرة من مخلفات القطع والصقل والغبار الصخري، وهي مخلفات قد تشكل عبئاً بيئياً حقيقياً ما لم تُدرج ضمن منظومة استخدام أو تدوير واضحة. وتجدر الإشارة إلى أن منطقة وادي الشاطي تشهد بالفعل ضغوطاً بيئية موثّقة ناجمة عن الاستغلال المكثف لمواردها الطبيعية؛ إذ أظهرت دراسة سابقة أُجريت في القسم الشرقي من الوادي (أشكدة-برقن) آثاراً بيئية حالية ومتوقعة ناجمة عن الإفراط في سحب المياه الجوفية [14]. وهذا يؤكد - في سياق أوسع - أهمية اعتماد ممارسات استغلال مدروسة بيئياً لأي نشاط استخراجي إضافي في المنطقة، بما في ذلك استخراج أحجار الزينة ومعالجتها. ويكتسب هذا البعد أهمية خاصة في سياق مواقع الدراسة الخمسة، إذ يوفر التصنيف الجيولوجي الدقيق الذي توصلت إليه هذه الدراسة أساساً لتوجيه كل نوع صخري إلى استخدامه الأمثل بما يقلل الفاقد ويحدّ من تراكم المخلفات غير المستغلة.

المواد وطرق الاختبار

منطقة الدراسة والمو اقع المختارة

شملت الدراسة خمسة مواقع محاجر تقع ضمن النطاق الجغرافي للجنوب

الغربي منطقة وادي الشاطئ ، وهي: تاروث، محروقة يمين الطريق (متوقف حالياً عن الاستغلال)، محروقة يسار الطريق، زلة، وغيلان. تم اختيار هذه المواقع لتمثيلها التنوع الصخري في المنطقة، ولكونها مصادر تجارية فعلية يتم استغلالها أو تم استغلالها سابقاً في سوق أحجار الزينة المحلي.

وفيما يلي توضيح الاشكال (5-1) مناطق الدراسة.

الشكل 1: يوضح محاجر ثاروت

الشكل 2: يوضح محاجر محروقة يمين الطريق

الشكل 3: يوضح محاجر زلة

الشكل 4: محاجر غيلان

الشكل 5: يوضح محاجر محروقة يسار الطريق

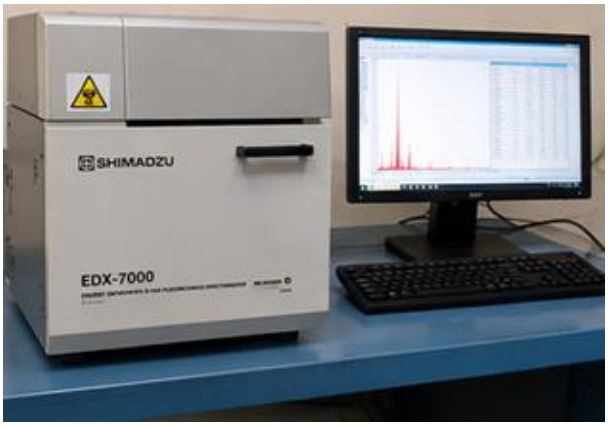
مواد العينات وطرق الاختبار

اعتمدت الدراسة على عيّنات صخرية جُمعت ميدانياً من المواقع الخمسة، ثم قُطّعت وجُلّيت في المختبر على هيئة مكعبات قياسية بأبعاد 50×50×50مم لاختبارات الضغط كما في الشكل (6)، مع تجهيز عينات إضافية لكل من قياسات الكثافة والامتصاص والمعالجة الحمضية. ولضمان موثوقية القراءات، أُخذت ثلاث عينات مكررة من كل موقع في جميع الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية، واعتُمد المتوسط الحسابي والانحراف المعياري لكل مجموعة.

الشكل 6: يوضح عينة لكل موقع

حُدّد التركيب الكيميائي للعينات بجهاز الفلورة السينية (Rigaku NEX

QC+QuantEZ) كما في الشكل (7)، إذ طُحنت العينات وتجانست قبل التحليل لتقدير نسب الأكاسيد الرئيسية، وعلى رأسها أكسيد الكالسيوم (CaO) وأكسيد المغنيسيوم (MgO) وثالث أكسيد الكبريت (SO3)، وهي المؤشرات الحاسمة في التمييز بين الرخام والترافرتين والأونكس.



الشكل 7: يوضح جهاز الفلورة السينية

أما الكثافة الظاهرية وامتصاص الماء فقُدّرا وفق المواصفة ASTM C97 [15]، وهي متوافقة منهجياً مع المعيار الأوروبي EN 13755:2008 [16] المعتمد لتحديد امتصاص الماء بالضغط الجوي للأحجار الطبيعيةالشكل (8)، حيث جُفّفت العينات في فرن حتى ثبات الوزن، ثم غُمرت في الماء وسُجّل وزنها المشبع ووزنها المغمور بطريقة أرخميدس، لتُحسب الكثافة ونسبة الامتصاص من العلاقات المعيارية.

الشكل 8: يوضح اختباري الكثافة والامتصاص

وقيست مقاومة الضغط الأحادية المحور وفق ASTM C170 [17]بتسليط حمل متزايد على المكعبات حتى الانهيار وقسمة حمل الكسر على مساحة المقطع شكل (9)؛ وتُعدّ الكثافة على وجه الخصوص من الخواص الفيزيائية الأساسية المستخدمة أيضاً في التوصيف الجيوفيزيائي العام للصخور [18].

الشكل 9: اختبار مقاومة الضغط

ولتقييم سلوك الأحجار تجاه الوسط الحمضي، غُمرت عينات موزونة في محلول حمض الكبريتيك (H2SO4) بتركيز 5% لمدة زمنية موحدة، ثم غُسلت وجُفّفت وأُعيد وزنها، واحتُسبت نسبة الفقد في الكتلة كمؤشر على مقاومة كل حجر للتآكل الكيميائي. كما في الشكل (10)

الشكل 10: يوضح اختبار تاثير حمض الكبريتيك

ويلخّص الجدول (1) الاختبارات والمواصفات القياسية المعتمدة.

الجدول 1: الاختبارات المعملية والمواصفات القياسية المستخدمة

الاختبار	Standard
التحليل الكيميائي (XRF)	Rigaku NEX QC
الكثافة الظاهرية	ASTM C97
امتصاص الماء	ASTM C97
مقاومة الضغط الأحادية	ASTM C170
مقاومة حمض الكبريتيك (H2SO4 5%)	—

النتائج

تكشف نتائج التحليل الكيميائي بالفلورة السينية (الجدول 2) عن تباين جوهري في التركيب المعدني بين المواقع الخمسة، وهو تباين ينعكس مباشرةً على الخواص الفيزيائية والميكانيكية الموضّحة لاحقاً. فبينما يهيمن أكسيد الكالسيوم على ثلاثة مواقع بنسب تتجاوز 75%، يبرز موقعا زلة وغيلان بسمات كيميائية شاذة عن النمط الكربوناتي المتوقع للرخام.

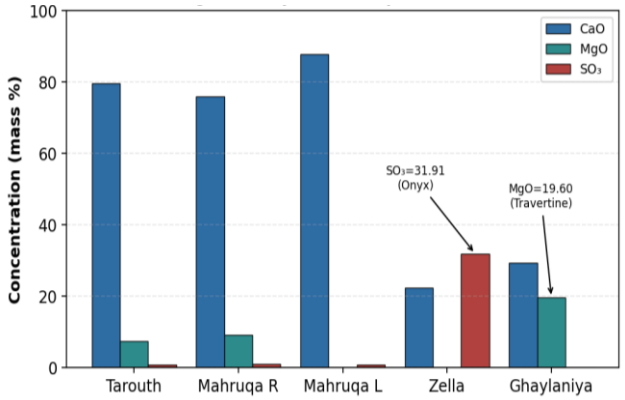
الجدول 2: التركيب الكيميائي (XRF) لأهم الأكاسيد في المواقع الخمسة (%)

الأكسيد	تاروث	م. يمين	م. يسار	زلة	غيلان
CaO	79.70	75.90	87.80	22.47	29.35
MgO	7.38	9.14	—	0.00	19.60
SO3	0.83	0.98	0.88	31.91	0.13
SiO2	6.77	6.89	5.87	0.29	3.16
Al2O3	2.77	3.85	3.84	0.00	0.65
Fe2O3	0.34	0.39	0.32	0.21	1.16

*ملاحظة: القيم تمثل النسب الوزنية التقريبية للأكاسيد كما قُدّرت بجهاز XRF؛ وقد أُدرجت القيم الأبرز دلالةً على التصنيف الصخري، ولا تمثل التركيب الكيميائي الكامل. ويُعزى الفارق الكبير بين مجموع هذه الأكاسيد و100% في موقعي زلة وغيلان أساساً إلى فقد الاشتعال (LOI)، المتمثل في ماء التبلور المرتبط ببلورات الجبس في زلة وثاني أكسيد الكربون المتحرر من التحلل الحراري للمكوّن الكربوناتي في غيلان، وهو ما لم يُقس ضمن نطاق هذه الدراسة.

ويوضّح الشكل (11) بصرياً حجم هذا التباين، إذ تتقارب أعمدة أكسيد الكالسيوم في تاروث ومحروقة يمين الطريق ومحروقة يسار الطريق عند

مستويات مرتفعة (75–88%) تعكس طابعها الكربوناتي النموذجي، في حين ينفرد عمود ثالث أكسيد الكبريت في زلة بارتفاع حاد لا نظير له في بقية المواقع، كما يبرز عمود أكسيد المغنيسيوم في غيلان بوصفه الأعلى قيمةً بين جميع العينات؛ وهو تباين بصري مباشر يترجم الانحراف الكيميائي لهذين الموقعين عن نمط الرخام الكربوناتي المتوقع.

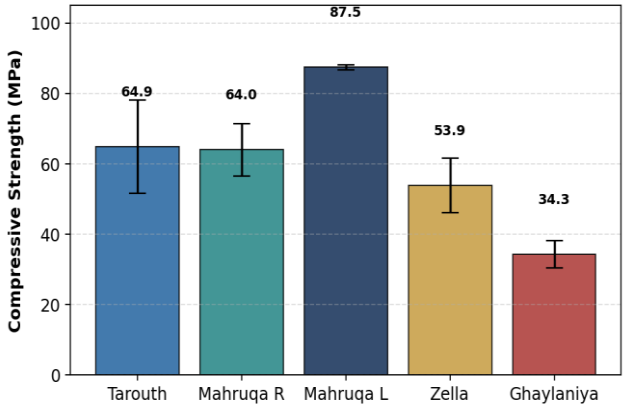


الشكل 11: التركيب الكيميائي لأهم الأكاسيد (CaO، MgO، SO3) في المواقع الخمسة

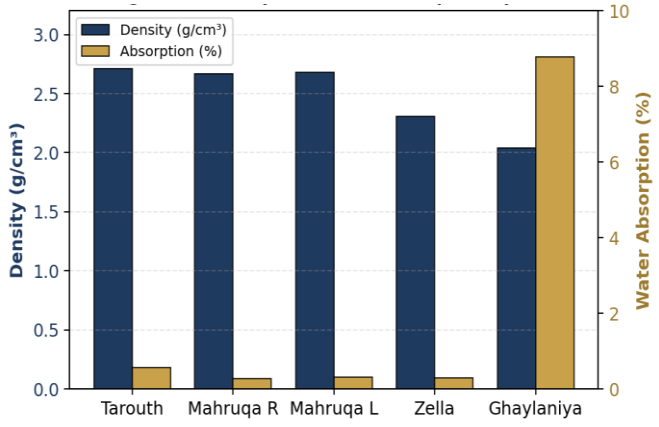
الجدول 3: الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمواقع الخمسة (القيم المتوسطة

الموقع	الكثافة g/cm³	الامتصاص %	مقاومة الضغط MPa
تاروث	2.71	0.58	64.93
محروقة يمين	2.67	0.28	64.00
محروقة يسار	2.68	0.31	87.45
زلة	2.31	0.30	53.90
غيلان	2.04	8.78	34.30

ويُظهر الشكل (12) تفوّق محروقة يسار الطريق الواضح في مقاومة الضغط عن بقية المواقع، ، بما يدل على تجانس داخلي عالٍ في هذا الموقع تحديداً؛ في المقابل يتقارب عمودا تاروث ومحروقة يمين الطريق عند مستوى وسطي مشترك تقريباً، بينما ينخفض عمودا زلة وغيلان تباعاً إلى ما دون ذلك. أما الشكل (13) فيبرز التباين الحاد في امتصاص الماء بين موقع غيلان، الذي يسجّل عموداً مرتفعاً بشكل لافت يفوق 8%، وبقية المواقع التي تنخفض أعمدتها إلى ما دون 1%، وهو تباين بصري يعزّز مباشرةً الاستنتاج الكيميائي بشأن الطبيعة المسامية المختلفة لحجر غيلان.



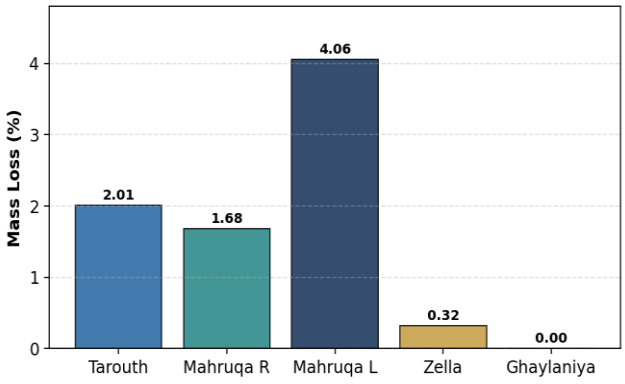
الشكل 12: مقاومة الضغط الأحادية المحور للمواقع الخمسة (المتوسط ± الانحراف المعياري)



الشكل 13: الكثافة الظاهرية وامتصاص الماء لكل موقع

الجدول 4: نسبة الفقد في الكتلة بعد المعالجة بحمض الكبريتيك (H2SO4 5%)

الموقع	وزن قبل g	وزن بعد g	الفقد %
تاروث	299	293	2.01
محروقة يمين	297	292	1.68
محروقة يسار	271	260	4.06
زلة	314	313	0.32
غيلان	260	260	0.00



الشكل 14: نسبة الفقد في الكتلة بعد المعالجة بحمض الكبريتيك بتركيز 5%

يبيّن الشكل (14) تدنّي نسبة الفقد الكتلي في زلة وغيلان(0.32% و0.00% على التوالي) في مقابل ارتفاعها الملحوظ في محروقة يسار الطريق (4.06%)، وهو نمط عكسي لافت يُناقَش تفسيره تفصيلاً في القسم التالي، إذ يعكس اختلاف آلية تفاعل كل حجر مع الوسط الحمضي بحسب تركيبه المعدني الأصلي لا مقاومته الميكانيكية.

ولتقييم مدى مطابقة الخواص الفيزيائية والميكانيكية المقاسة للحدود المرجعية المعتمدة عالمياً، يلخّص الجدول (5) الحدود الدنيا والقصوى المنصوص عليها في مواصفتي ASTM C503 (للرخام) وASTM C615 (للجرانيت) [19,20].

وبمقارنة نتائج الجدولين (2) و(3) بحدود الجدول (5)، يتضح أن مقاومة الضغط في تاروث ومحروقة يمين الطريق ومحروقة يسار الطريق (64.93 و64.00 و87.45 ميجا باسكال على التوالي) تتجاوز الحد الأدنى المشترط للرخام (52 ميجا باسكال)، بل يقترب موقع محروقة يسار الطريق من نصف الحد الأدنى المشترط للجرانيت؛ كما أن موقع زلة (53.90 ميجا باسكال)

الجدول 5: الحدود المرجعية للخواص الفيزيائية والميكانيكية للرخام والجرانيت وفق ASTM C503 وASTM C615

الخاصية	Marble (ASTM C503)	Granite (ASTM C615)	ملاحظة الحد
امتصاص الماء (%)	0.20 max	0.40 max	حد أقصى
الكثافة الظاهرية (g/cm^3)	2.590 min	2.560 min	حد أدنى
معامل الانثناء (MPa)	6.89 min	8.27 min	حد أدنى
مقاومة الانضغاط (MPa)	52 min	131 min	حد أدنى
مقاومة التآكل (ASTM C241)	10 min	25 min	حد أدنى

يحقق الحد الأدنى للرخام بفارق ضئيل. في المقابل، يقع موقع غيلان (34.30 ميجا باسكال) دون الحد الأدنى المطلوب للرخام. أما من حيث امتصاص الماء، فتتجاوز جميع المواقع الخمسة الحد الأقصى المسموح به للرخام (0.20%) دون استثناء؛ إذ تسجل تاروث ومحروقة يمين الطريق ومحروقة يسار الطريق وزلة قيماً تتراوح بين 0.28% و0.58%، وهي ضمن الحد الأقصى المسموح للجرانيت (0.40%) باستثناء تاروث (0.58%) الذي يتجاوزه أيضاً، بينما يتجاوز موقع غيلان (8.78%) كلا الحدين بفارق كبير. أما الكثافة الظاهرية، فتحقق تاروث ومحروقة يمين الطريق ومحروقة يسار الطريق (2.71 و2.67 و2.68 g/cm^3) الحد الأدنى المشترط لكل من الرخام (2.590) والجرانيت (2.560)، في حين يقع موقعا زلة (2.31) وغيلان (2.04) دون هذا الحد في كلتا المواصفتين. وتُظهر هذه المقارنة أن معيار امتصاص الماء الصارم الخاص بالرخام (ASTM C503) يمثل نقطة الضعف النسبية حتى في المواقع ذات المقاومة الميكانيكية والكثافة الجيدتين، وهو ما يستوجب مراعاته عند اختيار الاستخدام النهائي لكل موقع، لا سيما في التطبيقات المعرّضة للرطوبة.

ويستحق موقع تاروث تحديداً وقفة تفسيرية إضافية، إذ يجمع بين أعلى كثافة ظاهرية ومقاومة انضغاط جيدة من جهة، وأعلى امتصاص ماء بين المواقع الأربعة الأخرى (باستثناء غيلان) من جهة أخرى، وهو ما يبدو تناقضاً ظاهرياً. غير أن الكثافة الظاهرية تقيس الكتلة الكلية لوحدة الحجم، بينما يعكس الامتصاص تحديداً درجة اتصال المسام ببعضها (Connected/Open Porosity) لا حجمها الكلي؛ فالحجر قد يكون كثيف البنية إجمالاً، لكن تشكّل حدود الحبيبات بين البلورات الدولوميتية والكالسيتية شبكة مسامية متصلة تسمح بنفاذ الماء رغم التماسك الميكانيكي الجيد. وقد أظهرت دراسة مرجعية سابقة أن متانة الأحجار المسامية ترتبط ببنية المسام (حجمها وتوزيعها واتصالها) بقدر ارتباطها بالمقاومة الميكانيكية ذاتها، وأن الحجرين المتقاربين في الكثافة قد يختلفان جوهرياً في سلوكهما تجاه الماء تبعاً لهذه البنية المسامية الدقيقة [21]. وهذا يفسر عملياً سبب كون امتصاص الماء مؤشراً مستقلاً لا يمكن استنتاجه من الكثافة أو المقاومة وحدهما، ويؤكد أهمية اعتماد الحدين معاً (كما في الجدول 5) عند تقييم صلاحية كل موقع للاستخدام الإنشائي أو الزخرفي.

المناقشة

يتضح من الجدول (3) أن موقع محروقة يسار الطريق يتصدّر المواقع جميعها في مقاومة الضغط بقيمة بلغت 87.45MPa بانحراف معياري ضئيل (0.77) يدل على تجانس عالٍ في العينة، وهي قيمة تقترن بأعلى محتوى من أكسيد الكالسيوم (87.8%) وامتصاص ماء منخفض لا يتجاوز 0.31%. تجتمع هذه المؤشرات لترسم صورة رخام كالسيتي عالي النقاء، وتتسق مع ما أوردته الدراسة [7] من ارتباط طردي بين نقاء الكالسيت وانخفاض الامتصاص وارتفاع مقاومة الضغط في الرخام.

ويأتي موقعا تاروث ومحروقة يمين الطريق في مرتبة وسطى متقاربة (64.93 و64.00MPa على التوالي)، غير أن ارتفاع محتواهما من أكسيد المغنيسيوم (7.38% و9.14%) يضعهما في خانة الرخام الدولوميتي والكالسيت-دولوميتي بدلاً من الرخام الكالسيتي الخالص. ورغم أن موقع محروقة يمين الطريق متوقف حالياً عن الاستغلال، فإن خواصه تبقى مؤهلة للاستخدام في التكسية الداخلية. ويُلاحظ في المقابل أن مقاومة الضغط في موقع تاروث سجّلت انحرافاً معيارياً أعلى نسبياً (64.93 ± 13.31MPa)، أي ما يقارب 20% من قيمة المتوسط، مقارنةً بباقي المواقع؛ وهو ما قد يعكس عدم تجانس داخلي في نسيج الحجر أو وجود شوائب موضعية، ويستدعي توسيع حجم العينة من هذا الموقع تحديداً في الدراسات اللاحقة للتحقق من ثباته.

على أن أهم ما أسفرت عنه الدراسة يكمن في موقعي زلة وغيلان، اللذين يُباعان محلياً بوصفهما رخاماً بينما تنفي نتائج التحليل الكيميائي هذه الصفة نفياً قاطعاً. فحجر زلة يحمل محتوى استثنائياً من ثالث أكسيد الكبريت بلغ 31.91%، وهي نسبة لا يمكن أن توجد في رخام كربوناتي متحوّل، بل تدل علي ان الحجر أونكس كالسيتي-كبريتاتي نشأ عبر ترسيب تبخري أو حراري مائي حول الينابيع المعدنية [22,23]. ويعزّز هذا الاستنتاج كثافته المنخفضة (2.31 g/cm3)التي تبتعد عن نطاق الرخام النموذجي.

ومن اللافت أن حجر زلة سجّل أدنى فقد كتلي عند معالجته بحمض الكبريتيك (0.32% فقط، الجدول 4)، وقد يبدو ذلك للوهلة الأولى مؤشر مقاومة عالية، غير أن تفسيره الحقيقي أن الكبريتات موجودة أصلاً في تركيب الحجر، فلا يجد الحمض الكبريتي ما يذيبه إضافةً إلى ما هو متبلور سلفاً. وهذا السلوك نفسه يميّز الأونكس عن الرخام الكالسيتي الذي يتفاعل مع الحمض بفقد أوضح، كما لوحظ في محروقة يسار الطريق (4.06%).

أما حجر غيلان فيجمع بين محتوى مرتفع من أكسيد المغنيسيوم (19.60%) وأعلى نسبة امتصاص للماء بين المواقع (8.78%) وأدنى مقاومة ضغط (34.30MPa)، مما يوكد تصنيفه كالترافرتين الدولوميتي المسامي لا الرخام. ويتطابق هذا النمط مع ما رصدته الدراسة [9] من أن ارتفاع المسامية في الأحجار الرسوبية يخفض مقاومتها الميكانيكية ويرفع امتصاصها للماء، ومع ما أكد [5] من العلاقة العكسية بين تنامي المسام وتراجع مقاومة الضغط في الأحجار الكربوناتية.

وتجدر مقارنة النتائج الفيزيائية والميكانيكية للمواقع الخمسة بما أورده الباحثون في دراسات مواد طبقة الأساس بمنطقة وادي الشاطي وبراك الشاطي؛ إذ تقع قيم الكثافة والامتصاص المسجلة لمواقع تاروث ومحروقة يمين الطريق ومحروقة يسار الطريق ضمن الحدود التي اعتُمدت لتصنيف مواد الأساس الصالحة إنشائياً في تلك الدراسات، أو أفضل منها [11,12]، وهو ما يعزز صلاحية هذه المواقع لاستخدامات إنشائية إضافية تتجاوز

التكسية الزخرفية، بينما يؤكد الانخفاض النسبي لمقاومة الضغط وارتفاع الامتصاص في موقع غيلان محدودية استخدامه في مثل هذه التطبيقات مقارنةً بالحدود الدنيا الموصى بها لطبقات الأساس.

بناء على ما تقدّم، تتأكد ضرورة إعادة التصنيف التجاري لموقعي زلة وغيلان، بحيث يُسوَّق الأول بوصفه أونكس والثاني بوصفه ترافرتين، لا رخاماً، تماشياً مع مبادئ التصنيف والتسمية التجارية المعتمدة عالمياً للأحجار الكربوناتية الزخرفية [24]. ولهذا التصحيح أثر عملي مزدوج: فهو يصون الشفافية في السوق المحلية من جهة، ويوجّه كل حجر إلى استخدامه الأمثل من جهة أخرى؛ إذ يلائم الأونكس التطبيقات الزخرفية والإضاءة الخلفية لشفافيته الجزئية، بينما يصلح الترافرتين للتكسية ما لم يتعرّض لأحمال إنشائية عالية [9].

وتُقر الدراسة بمحدودية جوهرية تتمثل في اعتماد التصنيف الصخري لموقعي زلة وغيلان على التحليل الكيميائي بالفلورة السينية (XRF) دون تأكيد مباشر بالفحص البتري المجهري أو اختبار حيود الأشعة السينية (XRD)، وهو ما يجعل النتائج الحالية استدلالاً كيميائياً قوياً لا تأكيداً معدنياً قاطعاً؛ ولذا أُدرج الفحص البتري المكمّل ضمن التوصيات في قسم الاستنتاجات كخطوة ضرورية لترسيخ إعادة التصنيف. كما أن الاعتماد على ثلاث عينات مكررة لكل موقع، وإن كان كافياً لأغراض هذه الدراسة الاستكشافية، يبقى حجماً محدوداً إحصائياً، لا سيما في موقع تاروث الذي أظهر تبايناً داخلياً ملحوظاً في مقاومة الضغط.

الخلاصة

تُبيّن هذه الدراسة أن الاسم التجاري وحده معيار غير كافٍ لتصنيف أحجار الزينة، وأن التحقّق المعملي بالتحليل الكيميائي والخواص الفيزيائية والميكانيكية هو الفيصل الحقيقي بين الرخام وما يشابهه من أحجار كربوناتية أخرى. فمن بين المواقع الخمسة التي تُسوَّق جميعها محلياً تحت مسمى "الرخام"، لا ينطبق هذا التصنيف علمياً إلا على ثلاثة منها، بينما يكشف التركيب الكيميائي لموقعي زلة وغيلان عن طبيعة جيولوجية مغايرة تماماً (أونكس كالسيتي-كبريتاتي وترافرتين دولوميتي على التوالي)، وهو ما يستدعي إعادة تصنيفهما جيولوجياً وتجارياً على حدٍّ سواء، بما يترتب عليه من فروق في القيمة السوقية ومجالات الاستخدام الآمن. ويمكن إجمال أبرز ما توصلت إليه الدراسة فيما يأتي:

- يمثّل موقع محروقة يسار الطريق أجود المواقع، إذ جمع أعلى مقاومة ضغط (87.45MPa) وأعلى نقاء كالسيتي (CaO=87.8%) مع امتصاص ماء منخفض، بما يؤهله للاستخدامات الإنشائية والزخرفية معاً.
- يُصنَّف موقعا تاروث ومحروقة يمين الطريق رخاماً دولوميتياً وكالسيت-دولوميتياً بمقاومة ضغط متوسطة تقارب 64MPa.
- حجر زلة أونكس كالسيتي-كبريتاتي وليس رخاماً، بدليل محتواه الاستثنائي من ثالث أكسيد الكبريت (31.91%) وكثافته المنخفضة.
- حجر غيلان ترافرتين دولوميتي مسامي، يجمع بين أعلى امتصاص للماء (8.78%) وأدنى مقاومة ضغط (34.30ميجا باسكال) بين المواقع.

وبصورة أعم، تؤكد هذه النتائج أن الاعتماد على المظهر الخارجي وحده في تسويق أحجار الزينة في الجنوب الليبي ينطوي على مخاطر تجارية وإنشائية حقيقية، وأن اعتماد التوصيف المعملي كخطوة إلزامية قبل الطرح التجاري هو السبيل الوحيد لضمان تطابق التسمية مع الخواص الفعلية للحجر، وحماية كل من المنتج والمستهلك والمصمّم الإنشائي على حدٍّ سواء.

التوصيات والدراسات المستقبلية

بناءً على النتائج المتقدمة، توصي الدراسة بإجراء فحص بتري مجهري واختبار حيود الأشعة السينية (XRD) وفق المواصفة ASTM C1721 [25] لتأكيد التصنيف المعدني لموقعي زلة وغيلان تأكيداً قاطعاً، وتوسيع حجم العينة المدروسة في كل موقع، وبخاصة موقع تاروث الذي أظهر تبايناً داخلياً ملحوظاً في مقاومة الضغط، بما يعزز الموثوقية الإحصائية للنتائج. كما يوصى بإجراء اختبار مقاومة السحل وفق جهاز بوهمي (Böhme) القياسي بدلاً من الطريقة التقريبية المقارنة المعتمدة في هذه الدراسة، وتوسيع نطاق الدراسة مستقبلاً ليشمل مواقع محاجر إضافية في الجنوب الليبي بغية بناء قاعدة بيانات إقليمية شاملة لتصنيف أحجار الزينة. ومن الناحية العملية، يوصى بالتنسيق مع الجهات الرقابية والمعنية بالمواصفات والمقاييس في ليبيا لاعتماد إعادة التصنيف التجاري المقترحة لحجري زلة وغيلان، بما يضمن انتقال نتائج هذه الدراسة من الإطار العلمي إلى التطبيق الفعلي في السوق المحلي لأحجار الزينة.

Author Contributions: "**Khamis** and **Farouj**: Conceptualization, methodology; **Khamis**: writing—original draft preparation; **Farouj**: review and editing. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript."

Funding: "This research received no external funding."

Data Availability Statement: "No data were used to support this study."

Conflicts of Interest: "The authors declare that they have no conflict of interest."

Acknowledgments: "The authors would like to express their appreciation to the Civile Engineering Development of Wadi Alshatti University, Brack-Libya, for their support during the study."

References

[1] L. Primavori. Planet Stone, Ed. PHI Publisher, Verona, Italy, 2016. https://planetedizioni.com

[2] M. Carter and W. Bell. Dimension Stone: Geology, Properties, and Use, 2nd ed. Geological Society of America, Boulder, CO, 2019. https://pubs.geoscienceworld.org

[3] ASTM International. "Standard Terminology Relating to Dimension Stone." ASTM C119-18, 2018. https://www.astm.org/c0119-18.html

[4] ASTM International. "Standard Specification for Granite Dimension Stone." ASTM C615/C615M-18, 2018. https://www.astm.org/c0615_c0615m-18.html

[5] Y. Liu, M. Zhai, and W. Liu. "Mechanical properties and energy evolution law of marble under the coupled effects of chemical corrosion and dry-wet cycles." *PLoS ONE*, vol. 19, no. 11, p. e0313359, 2024. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313359

[6] Z. Huang, W. Zeng, Q. Gu, Y. Wu, et al. "Investigations of variations in physical and mechanical properties of granite, sandstone, and marble after temperature and acid solution treatments." *Constr. Build. Mater*., vol. 307, p. 124943, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124943

[7] S. Bukhari, M. Basharat, H. Akgün, Y. Sarfraz, and M. Riaz. "An evaluation of the geotechnical characteristics of Gahirat Marble using empirical methods: A case study from the Chitral area, Khyber Pakhtunkhwa, North Pakistan." *J. Himal. Earth Sci.*, vol. 54, no. 2, pp. 28-39, 2021. https://journal.uop.edu.pk/jhes

[8] A. Mohmand and A. Zaryab. "Petrographic composition, physico-chemical characteristics, and mechanical properties of the Renzikhel marbles in Central Afghanistan." *J. Nat. Sci. Rev.*, vol. 3, no. 4, pp. 90-103, 2025. https://journals.asianindexing.com/index.php/jnsr

[9] M. Bastidas, et al. "The quantification of physico-mechanical properties and durability of onyx-travertines from Santa Ana de los Ríos de Cuenca, Ecuador." *Herit. Sci.*, vol. 10, p. 194, 2022. https://doi.org/10.1186/s40494-022-00826-y

[10] B. Younes, M. Bin Miskeen, and M. Fekroun. "Using Marble Dust from the Wadi Al-Shati Area as a Filler Material in Hot Asphalt Mixtures." *Wadi Alshatti University journal of pure and applied sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 377-386, 2026. https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_41

[11] H. Salem. "Study and Comparison of Physical and Mechanical Properties of Highway Base Layer Materials from Different Sources." *Wadi Alshatti University journal of pure and applied sciences*, vol. 3, no. 2, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_19

[12] A. Hassan and A. Albarkuoli. "Comparative Study of Physical and Mechanical Properties of Base Course Materials from Three Different Gravel Pits within the Municipality of Brack Alshatti, Libya." *Wadi Alshatti University journal of pure and applied sciences*, Special Issue: 1st Int. Conf. on Modern Technologies and AI (2024 Proceedings), pp. 94-99, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpassp1FCRTA-2024_14

[13] Fortune Business Insights. "Marble Market Size, Share & Industry Analysis." *Fortune Business Insights*, 2024. https://www.fortunebusinessinsights.com/ar/marble-market-104560

[14] A. Naji and M. Inweer. "الآثار البيئية الحالية والمتوقعة للإفراط في سحب المياه الجوفية في القسم الشرقي من وادي الشاطئ (أشكدة-برقن)." *Sebha University Journal of Pure & Applied Sciences*, vol. 21, no. 4, pp. 182-190, 2022. https://doi.org/10.51984/JOPAS.V21I4.2146

[15] ASTM International. "Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone." ASTM C97/C97M-18, 2018. https://www.astm.org/c0097_c0097m-18.html

[16] European Committee for Standardization (CEN). "Natural Stone Test Methods – Determination of Water Absorption at Atmospheric Pressure." EN 13755:2008, Brussels, 2008. https://knowledge.bsigroup.com/products/natural-stone-test-methods-determination-of-water-absorption-at-atmospheric-pressure

[17] ASTM International. "Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone." ASTM C170/C170M-17, 2017. https://www.astm.org/c0170_c0170m-17.html

[18] W. Telford, L. Geldart, and R. Sheriff. "Applied Geophysics." 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, 1990. https://www.cambridge.org

[19] ASTM International. "Standard Specification for Marble Dimension Stone." ASTM C503/C503M-16, West Conshohocken, PA, 2016. https://www.astm.org/c0503_c0503m-16.html

[20] ASTM International. "Standard Specification for Granite Dimension Stone." ASTM C615/C615M-18, West Conshohocken, PA, 2018. https://www.astm.org/c0615_c0615m-18.html

[21] D. Benavente, M. García del Cura, R. Fort, and S. Ordóñez. "Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength." *Engineering Geology*, vol. 74, pp. 113-127, 2004. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.03.005

[22] R. Bates and J. Jackson. "Glossary of Geology." 4th ed. American Geological Institute, Alexandria, VA, 1997. https://store.geosociety.org

[23] F. Pirajno. Hydrothermal Processes and Mineral Systems, Springer, Dordrecht, 2009. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8613-7

[24] I. Badouna, et al. "Petrological and Geochemical Properties of Greek Carbonate Stones, Associated with Their Physico-Mechanical and Aesthetic Characteristics." *Minerals*, vol. 10, no. 6, p. 507, 2020. https://doi.org/10.3390/min10060507

[25] ASTM International. "Standard Guide for Petrographic Examination of Dimension Stone." ASTM C1721-21a, West Conshohocken, PA, 2021. https://www.astm.org/c1721-21a.html