



الخصائص الميكانيكية وآليات التدهور في الخرسانة المحتوية على الميتاكاولين: مراجعة نقدية

محمد أحمد فرج *، أرحيم حسين عبدربه

قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة درنة - فرع القبة، ليبيا.

*muhammad.khalil@uod.edu.ly

Received: Dec 01, 2025; **Accepted:** Dec 27, 2025

المخلص—أدى الطلب المتزايد على الخرسانة إلى تكثيف الجهود البحثية الهادفة إلى تحسين خصائصها المختلفة، مثل المقاومة، والمتانة، والعمر الافتراضي، ومتطلبات الاستدامة. تتناول هذه المراجعة دور استخدام الميتاكاولين، (MK)، كمادة تستخدم كبديل جزئي للإسمنت في تحسين الخواص الميكانيكية ومتانة الخرسانة. من أجل تقليل الاعتماد على الإسمنت، الذي يعد من أكثر مكونات الخرسانة تكلفة وتأثيراً على البيئة، إلى جانب تعزيز الاستدامة في قطاع البناء. تبين نتائج الدراسات السابقة إلى أن استخدام الميتاكاولين في الخلطات الخرسانية يؤدي إلى تطور ملحوظ في قوة الخرسانة، حيث تم توثيق زيادة في القوة تتراوح بين 10% و20% مقارنة بالخرسانة المرجعية. كما بينت الخرسانة المحتوية على الميتاكاولين تحسناً في خصائص المتانة، بما في ذلك زيادة مقاومتها لهجوم الكبريتات وتقليل تغلغل الكلوريد والمواد الضارة الأخرى. في المقابل، أظهرت الدراسات أن استخدام الميتاكاولين يؤدي إلى امتصاص الماء ويزيد اللزوجة، وقد يؤدي إلى تقليل قابلية التشغيل بنسبة تصل إلى 20%. تخلص هذه المراجعة إلى أن الميتاكاولين يمثل خياراً فعالاً خاصة في المناطق التي يتوفر فيها بكثرة، لما له من دور في تعزيز المتانة وتحسين الخصائص الميكانيكية للخرسانة.

الكلمات المفتاحية—الميتاكاولين؛ الخرسانة المستدامة؛ الخواص الميكانيكية؛ التفاعل البوزولاني؛ آليات التدهور.

Abstract—The increasing demand for concrete has intensified research efforts aimed at improving its various properties, such as strength, durability, service life, and sustainability requirements. This review addresses the role of using metakaolin (MK) as a partial replacement for cement in enhancing the mechanical properties and durability of concrete. This approach aims to reduce reliance on cement, which is one of the most costly and environmentally impactful components of concrete, while also promoting sustainability in the construction sector. Results from previous studies indicate that the incorporation of metakaolin (MK) in concrete mixtures leads to a noticeable improvement in concrete strength, with reported increases ranging from 10% to 20% compared to reference concrete. Concrete containing metakaolin has shown improved durability properties, including increased resistance to sulfate attack and reduced penetration of chloride ions and other harmful substances. On the other hand, studies have shown that the use of MK leads to higher water absorption and increased viscosity, which may result in a reduction in workability of up to 20%. This review concludes that metakaolin MK represents an effective option, particularly in regions where it is abundantly available, due to its significant role in enhancing durability and improving the mechanical properties of concrete.

Keywords—Metakaolin; Sustainable concrete; Mechanical properties; Pozzolanic reaction; Deterioration mechanisms.

1. المقدمة

يعد الإسمنت المادة الرئيسية في إنتاج الخرسانة، إلا أن صناعته تساهم بنحو 7-8% من إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) الناتجة عن الأنشطة الصناعية البشرية [1,2]، بالإضافة الي الاستهلاك الكبير للمواد الخام المحلية. لمحاولة معالجة بعض هذه المعضلات من الناحية الاقتصادية والبيئية ازداد الاهتمام بدور مواد إحلال الإسمنت والمواد الإسمنتية المضافة (Supplementary Cementitious Materials, SCM) في إنتاج الخرسانة والإسمنت [3]. وقد أجري الباحثون العديد من الدراسات بهدف الاستفادة من المواد المضافة والثانوية الناتجة عن العمليات الصناعية، مثل الرماد المتطاير (Fly ash)، وأبخرة السيليكا (Silica fume)، والخبث (slag)، والميتاكاولين (MK) كبدائل جزئية للإسمنت البورتلاند (Portland Cement) في إنتاج الخرسانة [4]. ويتكون الميتاكاولين عند تسخين طين الكاولين الغني بمعدن الكاولينيت الى درجات حرارة تتراوح بين 600-800 درجة مئوية [5,6]. يتم التحكم في جودة الميتاكاولين اثناء عملية التصنيع، مما يجعله مادة أكثر تحكماً في خصائصها مقارنة بالمواد البوزولانية الصناعية الأخرى التي تعد نواتج ثانوية لصناعات أخرى. يعد طين الكاولين طينا طبيعيا يتكون من معادن سيليكات الألومنيوم مثل الفلسبارات عبر سلسلة معقدة من العمليات الجيولوجية. ويتكون الكاولين بصورة رئيسية من معدن الكاولينيت ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)، الى جانب كميات متفاوتة من معادن طينية أخرى مثل الديكيت، والهالوزايت، والناكرت، والانوكسيت [7]. رغم التقدم الكبير في فهم فاعلية الميتاكاولين على الخرسانة، لا تزال هناك فجوات بحثية هامة تتضمن دراسة دمجها مع المواد النانوية الأخرى، وتقييم الأداء في ظروف بيئية عدائية متعددة، كما يوصى بالتركيز على تحسين قابلية التشغيل للخرسانة عالية الأداء.

بسبب الحرارة العالية يفقد الكاولين بنيته البلورية ويتحول إلى مادة غير متبلورة غنية بأكاسيد السيليكا والألومينا (SiO_2 ، Al_2O_3) القابلة للتفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم ($Ca(OH)_2$) الناتج عن إمهاء الأسمنت، وقد أثبتت الدراسات أن هذا التفاعل يؤدي إلى تكوين مركبات هلام سيليكات الكالسيوم المميه وهلام ألومينو-سيليكات الكالسيوم ($C-S-H$ ، $C-A-S-H$) إضافية تسهم في تحسين البنية المجهرية وتقليل المسامية [8]. يعد النانو ميتاكاولين (NMK) شكلا متقدما من الميتاكاولين يتميز بحجم جسيمات نانوية ومساحة سطحية عالية جدا، مما يزيد من تفاعليته مقارنة بالميتاكاولين التقليدي. يعمل النانو ميتا كاولين على تحسين خواص الخرسانة من خلال تأثيرين أساسيين: تأثير الحشو النانوي والتفاعل البوزولاني المتسارع، وهو يساهم في زيادة القوة والمتانة. بسبب صغر حجم الجسيمات، تتسارع هذه التفاعلات مقارنة بالمواد الاسمنتية الأخرى التقليدية، وبالتالي تظهر تحسينات واضحة في مقاومة الضغط والقوة المبكرة حتى عند نسب إحلال منخفضة جدا (0.5 الى 5 بالمئة من وزن الاسمنت). كما يساعد النانو ميتاكاولين في تقليل نفاذية الخرسانة ورفع مقاومتها لاختراق الكلوريد بسبب تقليل المسامية وتشكيل بنية أكثر كثافة. هذه الخصائص تجعله خيارا مناسباً لتصميم خرسانة عالية الأداء ومتمينة في البيئات العدوانية، مع ضرورة ضبط نسبة الماء والملدنات لتجنب تدهور قابلية التشغيل الناتج عن زيادة النعومة ومساحة السطح [9].

نظراً للأهمية المتزايدة للميتاكاولين كمادة مضافة او تستخدم بديل جزئي للإسمنت وعالية الأداء، تم اجراء هذه الورقة لتقديم مراجعة نقدية للأدبيات العلمية الحديثة التي تبحث في تأثير استخدام الميتاكاولين على الخواص الميكانيكية للخرسانة القائمة على الاسمنت البورتلاند. وتحليل النتائج المتعلقة بمقاومة الضغط، مقاومة الانحناء ومقاومة الشد، مع مناقشة الآليات الفيزيائية والكيميائية المسؤولة عن هذه التأثيرات.

2. الخصائص الفيزيائية والكيميائية للميتاكاولين

يتميز الميتاكاولين بمساحة سطح نوعية عالية (15000 g/cm^2) وحجم حبيبات دقيق جداً وهي أعلى بكثير من الاسمنت البورتلاند، مما يجعله مادة مألثة ممتازة (Effective filler). كيميائياً، يتكون الميتاكاولين بشكل أساسي من السيليكا (SiO_2)، والألومينا (Al_2O_3) ويعتمد تحسين الخواص في الخرسانة المحتوية على الميتاكاولين على ثلاث آليات رئيسية: التأثير المائي الذي يقلل من الفراغات و يساهم في إعادة هيكلة شبكة المسام، وتسريع إمهاء الاسمنت في الأعمار المبكرة، والتفاعل البوزولاني، وهذا التفاعل يستهلك بلورات (CH) الضعيفة ويحولها إلى مركبات رابطة (C-S-H) تزيد من كثافة المصفوفة الاسمنتية [10]. إن التركيب الكيميائي للميتاكاولين يشابه الي حد ما تركيب الاسمنت باختلاف النسب كما موضح في الجدول 1 [11]، مما يمنحه القدرة على العمل كمادة إسمنتية مضافة مثالية. الجدول 2، يوضح التحليل الكيميائي لأربعة عينات من الميتاكاولين (A,B,C,D) من منطقة سبها، تمنهت، العافية، أقار، بالترتيب وجميع المواقع بجنوب ليبيا [12]. حيث يوضح الجدول مطابقة العينات لحدود المواصفة 03-ASTMC618 [13] وتصنف على انها بوزولانية طبيعية فئة N.

جدول 1. مقارنة بين التركيب الكيميائي للإسمنت والميتاكاولين [11]

Chemical composition	Cement (%)	Metakaolin (%)
Silica (SiO ₂)	17–25	50–60
Alumina (Al ₂ O ₃)	3–8	30–40
Magnesium oxide (MgO)	1–3	0–2
Potassium oxide (K ₂ O)	0–1	0.5–1.5
Sulfuric anhydride (SO ₄)	1–3	1–3
Calcium oxide (CaO)	60–65	0–0.5
Ferric oxide calcium oxide (Fe ₂ O ₃)	0.5–6	0.5–5

جدول 2. التحليل الكيميائي للميتاكاولين [12]

الأكاسيد	العينة A	العينة B	العينة C	العينة D	مطابقة ASTM C618
SiO ₂	53.42	70.33	57.95	58.46	
Al ₂ O ₃	40.84	25.32	24.52	34.36	
Fe ₂ O ₃	0.975	1.05	9.973	2.266	
مجموع SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	95.2	96.7	92.4	95.1	الحد الأدنى 70%
MgO	0.13	0.14	0.724	0.28	
CaO	0.1	0.0801	0.133	0.162	
K ₂ O	0.16	0.366	2.919	1.44	
Na ₂ O	0.22	0.35	0.35	0.22	
SO ₃	0.033	0.016	0.28	0	الحد الأقصى 4%
TiO ₂	3.019	1.51	1.12	1.37	
MnO	0.0088	0	0.034	0	
P ₂ O ₅	0.137	0	0.241	0.11	
Cr ₂ O ₃	0	0.011	0	0	
SrO	0.034	0.0063	0.0167	0.0209	
L.O.I	0.88	0.76	1.68	1.25	الحد الأقصى 10%

3. تأثير الميتاكاولين على مقاومة الضغط (Compressive Strength)

تعد مقاومة الضغط المؤشر الأكثر شيوعاً لتقييم أداء الخرسانة. أظهرت معظم الدراسات على أن عملية استبدال الإسمنت بالميتاكاولين يؤدي إلى زيادة جيدة في مقاومة الضغط، خاصة في الأعمار المبكرة (3-7 أيام) بسبب نشاطه البوزولاني العالي وتأثيره على تسريع إمالة الإسمنت، ويستمر هذا التأثير الإيجابي عادةً حتى عمر 28 يوماً وما بعده، وإن كان معدل الزيادة قد يتباطأ مقارنة بالأيام الأولى [14]. تدل الأبحاث إلى أن النسبة الأفضل للاستبدال تتراوح بين (10%، 20%) [12]، حيث يبدأ الأداء في الانخفاض عند النسب الأعلى (مثل 20-25%) نتيجة لنقص محتوى هيدروكسيد الكالسيوم (CH) اللازم لاستمرار التفاعل، بالإضافة إلى مشاكل التشغيلية التي قد تؤدي لزيادة المسامية إذا لم يتم استخدام الملدنات المتفوقة بشكل كافٍ [15، 16].

نظراً لنوعته الفائقة وتفاعليته العالية، يمكن لنانو ميتاكاولين تحقيق زيادات كبيرة في مقاومة الضغط عند نسب إحلال منخفضة جداً (1-5%). ربما أن تأثيره في ملء الفراغات النانوية له دوراً كبيراً بالإضافة إلى تفاعله السريع [9]. بالمقارنة مع إضافات أخرى مثل الرماد المتطاير غالباً ما يظهر الميتاكاولين أداءً أفضل في تطوير المقاومة المبكرة، بينما المقارنة بغير السيليكا، قد يتفوق عليه في بعض الخلطات التي تتطلب تحسيناً متوازناً بين القوة المبكرة وقابلية التشغيل [17]. جدول 3 يبين تأثير نسبة الميتاكاولين على مقاومة الضغط للخرسانة (قيم نموذجية من الدراسات).

جدول 3. تأثير نسبة الميتاكاولين على مقاومة الضغط للخرسانة (قيم نموذجية من الدراسات)

رقم المرجع	نسبة الزيادة (%)	المقاومة مع الميتاكاولين (MPa)	المقاومة المرجعية (MPa)	عمر الاختبار (يوم)	نسبة الميتاكاولين (%)
[18]	13%	43	38	28	5
[19]	20%	48	40	28	10
[20]	19%	50	42	28	15
[21]	-2%	44	45	28	20
[18]	24%	56	45	90	10

4. مقاومة الشد والانحناء (Splitting Tensile & Flexural Strength)

يعد تعزيز مقاومة الشد من العوامل المهمة للحد من التشققات في الخرسانة. أظهرت الدراسات أن إضافة الميتاكاولين يمكن أن تزيد من مقاومة الشد والانحناء للخرسانة بنسبة تتراوح بين 10، 18 % مقارنة بالخرسانة التقليدية. ويعود هذا التحسن بشكل رئيسي إلى تحسين المنطقة الانتقالية البينية بين الركام وعجينة الاسمنت. ففي الخرسانة العادية، تعتبر هذه المنطقة ضعيفة وتحتوي على بلورات كبيرة من هيدروكسيد الكالسيوم مع مسامية مرتفعة، مما يقلل من الترابط بين المكونات، بينما يؤدي وجود الميتاكاولين إلى تفاعل $Ca(OH)_2$ وتحويله إلى (C-S-H)، ما ينتج بنية كثيفة ومتماسكة تعزز قوة الترابط وتقلل من انتشار الشقوق المجهرية تحت الاحمال [22].

5. قابلية التشغيل للخرسانة المحتوية على الميتاكاولين (Workability)

قابلية التشغيل (Workability) من الخصائص الأساسية التي تتحكم في سهولة خلط الخرسانة أو المونة وصبها ودمكها دون حدوث انفصال حبيبي، وقد عكست معظم الدراسات أن إضافة الميتاكاولين تؤدي إلى انخفاض ملحوظ في قابلية التشغيل مقارنة بالخلطات المرجعية الخالية من المواد الاسمنتية المضافة، ويزداد هذا التأثير بزيادة نسبة الاستبدال [23]. ويرجع ذلك إلى النعومة العالية والمساحة السطحية الكبيرة لجزيئات الميتاكاولين، مما يسفر إلى زيادة الطلب على الماء وارتفاع لزوجة العجينة الاسمنتية، وهو ما ينعكس على انخفاض قيم الهطول وقطر الانتشار في اختبارات الهطول. في بعض النتائج لوحظ انخفاض قيمة الهطول بمقدار يتراوح بين 20-60 مم عند إحلال نحو 10% من الميتاكاولين عند ثبات نسبة الماء إلى الاسمنت، إلا إن هذا التأثير يمكن التحكم فيه بفعالية من خلال استخدام الملدنات الفائقة، حيث تسمح بالحفاظ على قابلية تشغيل مناسبة دون زيادة محتوى الماء، مما يحافظ على الخواص الميكانيكية والمتانة. كما لوحظ أن الخرسانة المحتوية على الميتاكاولين تتميز بتماسك أفضل ومقاومة الانفصال الحبيبي، وهو ما يجعلها مناسبة للخرسانة عالية الأداء [24].

6. خصائص المتانة وآليات التدهور (Durability and Deterioration Mechanisms)

تعد المتانة طويلة الأمد من أهم معايير تقييم أداء الخرسانة، خصوصاً في البيئات العدوانية التي تتعرض فيها المنشآت لعوامل كيميائية وفيزيائية تؤدي إلى تدهور خواصها مع الزمن. أوضحت العديد من الدراسات أن استخدام الميتاكاولين كبديل جزئي للإسمنت يساهم بشكل جيد في تحسين متانة الخرسانة على المدى الطويل، وذلك نتيجة لتأثيره المباشر على البنية المجهرية وتقليل نفاذية المصروفة الإسمنتية [25]. يؤدي التفاعل البوزولاني الناتج عن إضافة الميتاكاولين إلى استهلاك هيدروكسيد الكالسيوم الحر

وتكوين كميات إضافية من هلام سيليكات الكالسيوم المميه (C-S-H) وهلام ألومينو-سيليكات الكالسيوم (C-A-S-H)، مما يتسبب عنه بنية أكثر كثافة وانخفاض في حجم المسام الشعرية والمسام المتصلة [26]. هذا التحسن في البنية المجهرية يقلل من انتقال السوائل والغازات الضارة داخل الخرسانة، وهو ما يعكس إيجابياً على مقاومتها للتدهور مع الزمن.

7. مقاومة اختراق الكلوريد والصدأ (Chloride Resistance and Corrosion)

اختراق أيونات الكلوريد أحد أهم أسباب تآكل حديد التسليح في المنشآت الخرسانية، خاصة في البيئات البحرية والمناطق المعرضة لملاح إذابة الجليد. بينت الدراسات أن الخرسانة المحتوية على الميتاكاولين تتمتع بمقاومة أعلى لاختراق الكلوريد مقارنة بالخرسانة المرجعية، حيث لوحظ انخفاض معامل الانتشار للكلوريد بنسبة تصل إلى 40-60% عند نسب استبدال تتراوح بين 10-15% [27]. ويرجع هذا التحسن إلى عاملين رئيسيين تقلل النفاذية نتيجة زيادة كثافة العجينة الإسمنتية وقدرة الميتاكاولين الغني بالألومينا على تثبيت أيونات الكلوريد كيميائياً من خلال تكوين مركبات كلورو-ألومينات مستقرة، مما يقلل من تركيز الكلوريد الحر القادر على إحداث الصدأ [27].

8. مقاومة املاح الكبريتات (Sulfate Resistance)

تتعرض الخرسانة في بعض البيئات إلى هجوم الكبريتات، والذي يؤدي إلى تفاعلات تزيد حجم الخرسانة وتفكك تدريجي للخرسانة. بينت نتائج الأبحاث أن إضافة الميتاكاولين تحسن بشكل ملحوظ مقاومة الخرسانة لهجوم الكبريتات، حيث عكست العينات المحتوية على الميتاكاولين انخفاضاً في التمدد وفقدان الكتلة مقارنة بالخرسانة المرجعية [12، 28]. ويرتبط هذا السلوك بانخفاض محتوى هيدروكسيد الكالسيوم (CH) والحد من تكوين المواد الثانوية الضارة، إضافة إلى تقليل نفاذية الخرسانة، مما يحد من تغلغل أيونات الكبريتات إلى داخل الخرسانة [29].

9. مقاومة الكربنة (Carbonation Resistance)

تشكل الكربنة آلية تدهور بطيئة ولكنها خطيرة، إذ تؤدي إلى خفض قلوية الخرسانة وتعرض حديد التسليح لخطر الصدأ. تدل الدراسات إلى أن تأثير الميتاكاولين على مقاومة الكربنة يعتمد على نسبة الإحلال. فعند نسب إحلال معتدلة (15%) ومع ضبط نسبة الماء إلى المواد الإسمنتية، يمكن للميتاكاولين أن يحسن مقاومة الكربنة بسبب تقليل النفاذية [30]. إلا أن بعض الدراسات سجلت زيادة ضئيلة في عمق الكربنة عند نسب استبدال مرتفعة، نتيجة لاستهلاك هيدروكسيد الكالسيوم الذي يعمل احتياطي قلوي، مما يؤكد أهمية الاعتدال بين تحسين البنية المجهرية والحفاظ على القلوية الكافية [31].

10. الاستنتاجات والتوصيات

استناداً إلى التحليل النقدي للدراسات السابقة، تخلص هذه الدراسة إلى ما يلي:

- نسبة الاستبدال المثالية للميتاكاولين تتراوح بين 10% و15% من وزن الإسمنت، إذ تحقق هذه النسبة توازناً أمثل بين قابلية التشغيل والأداء الميكانيكي وتعزيز المتانة مع الزمن.
- يعد الميتاكاولين خياراً استراتيجياً للمنشآت البحرية والمنشآت المعرضة للأملاح والكبريتات، حيث يساهم في خفض النفاذية بنسبة قد تصل إلى 60%.
- أحياناً يتطلب استخدام الميتاكاولين خصوصاً عند النسب العالية إضافة جرعات أعلى من الملدنات الفائقة للحفاظ على مستوى مناسب من قابلية التشغيل.

References

- [1] Y.O. Abiodun, O.A. Olanrewaju, O.P. Gbenedor, E.F. Ochulor, D.V. Obasa, S.O. Adeosun, "Cutting cement industry CO₂ emissions through metakaolin use in construction," Atmosphere, Vol. 13(9), 1494, 2022.
- [2] N. Raveendran, V. Krishnan, "Engineering performance and environmental assessment of sustainable concrete incorporating nano silica and metakaolin as cementitious materials," Scientific Reports, Vol. 15(1), 1482, 2025.

- [3] T.A. Fode, Y.A.C. Jande, T. Kivevele, "Effects of different supplementary cementitious materials on durability and mechanical properties of cement composite–Comprehensive review," *Heliyon*, Vol. 9(7), e17924, 2023.
- [4] J.Z. Wang, Z. Che, K. Zhang, Y. Fan, D. Niu, X. Guan, "Performance of recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials (fly ash, GBFS, silica fume, and metakaolin): Mechanical properties, pore structure, and water absorption," *Construction and Building Materials*, Vol. 368, 130455, 2023
- [5] K. Boakye, M. Khorami, "Performance of Calcined Impure Kaolinitic Clay as a Partial Substitute for Portland Cement Concrete: A Review," *Journal of Composites Science*, Vol. 9(4), 145, 2025
- [6] X. Liu, Q. Chen, F. Song, Q. Zhang, S. Guo, Y. Qiao, Z. Jiang, H. Zhu, "Research on limestone calcined clay cement-based ultra-high performance concrete with high cement substitution: Mixture design and engineering properties," *Construction and Building Materials*, Vol. 409, 133913, 2023.
- [7] Ö.I. Ece, H.Ü. Ercan, "Global occurrence, geology and characteristics of hydrothermal-origin kaolin deposits," *Minerals*, Vol. 14(4), 353, 2024.
- [8] K. Weise, N. Ukrainczyk, A. Duncan, E. Koenders, "Enhanced metakaolin reactivity in blended cement with additional calcium hydroxide," *Materials*, Vol. 15(1), 367, 2022.
- [9] Q. Li, Y. Fan, Y. Zhao, Z. Liang, "Early-age properties evaluation of nano-metakaolin cement paste based on electrochemical impedance spectroscopy," *Buildings*, Vol. 12(10), 1763, 2022.
- [10] C. Zhong, D. Wang, L. Zhang, W. Mao, S. Xing, J. Chen, Y. Xiao, "Durability analysis of metakaolin recycled concrete under sulphate dry and wet cycle," *Scientific Reports*, Vol. 14(1), 16435, 2024.
- [11] G. Thankam, N. Thurvas, "Ideal supplementary cementing material–Metakaolin: A review," *International Review of Applied Sciences and Engineering*, Vol. 11(1), 58–65, 2020.
- [12] J.M. Abdalla, A.A. Okasha, "Effect of Using Burnt Clay on Improving Some Properties of Cement," *The Seventh National Conference on Building Materials*, Vol. 7, 2018.
- [13] ASTM, "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete," *ASTMC618-3*, 2003.
- [14] C.S. Poon, S.C. Kou, L. Lam, "Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 20: 858-865, 2005.
- [15] U. Imoh, M. Habashneh, S. Kaine, A.J. Babafemi, R. Hassan, M. Movahedi Rad, "Metakaolin-enhanced laterite rock aggregate concrete: strength optimization and sustainable cement replacement," *Buildings*, Vol. 15, 4553, 2025.
- [16] M.N. Al-Hashem, M.N. Amin, A. Ajwad, M. Afzal, K. Khan, M.I. Faraz, M.G. Qadir, H. Khan, "Mechanical and durability evaluation of Metakaolin as cement replacement material in concrete," *Materials*, Vol. 15(22), 7868, 2022.
- [17] M. Spak, "Preparation of High-Performance Concrete for Adjusting of Possibility of its Usage in Building Practice," *Key Engineering Materials*, Vol. 722, 298-304, 2016.

- [18] Y. Dong, L. Pei, J. Fu, Y. Yang, T. Liu, H. Liang, H. Yang, "Investigating the mechanical properties and durability of metakaolin-incorporated mortar by different curing methods," *Materials*, Vol. 15(6), 2035, 2022.
- [19] V. Katte, M. Amadou, N. Billong, S. Njoya, T.T. Tatietsé, "Study of the mechanical properties of metakaolin concrete based on the partial substitution of cement in a reference concrete by halloysite clay from balengou in west Cameroon," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol.18, 26-40, 2021.
- [20] H. Arel, "Influences of metakaolin on the durability and mechanical properties of mortars," *Arabian Journal for Science and engineering*, Vol. 39, 2014.
- [21] B. Abd Elshafy, S. Osman, "Effect of metakaolin on mechanical properties of concrete," 2nd Scientific Conference for Egyptian University Students At: Damietta University, 2019.
- [22] Z. Rong, G. Jiang, W. Sun, "Effects of metakaolin on mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cement-based composites," *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, Vol. 7, 1-15, 2018.
- [23] A.M. Rashad, "Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition—A comprehensive overview," *Construction and building materials*, Vol. 41, 303-318, 2013.
- [24] S. Al-Shmaisani, R. Kalina, R. Ferron, M. Juenger, "Comparison of SCM reactivity to performance in cement-based mixtures," *Materials and Structures*, Vol. 55, 241, 2022.
- [25] R. Siddique, J. Klaus, "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review," *Applied Clay Science*, Vol. 43, 392-400, 2009.
- [26] B.B. Sabir, S. Wild, J. Bai, "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, 441-454, 2001.
- [27] V. Malagavelli, S. Angadi, J. Prasad, S. Joshi, "Influence of metakaolin in concrete as partial replacement of cement," *International Journal of Civil Engineering and Technology*, Vol. 9, 105-111, 2018.
- [28] S. Wild, J.M. Khatib, A. Jones, "Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete," *Cement and concrete research*, Vol, 26(10), 1537-1544, 1996.
- [29] N.M Al-Akhras, "Durability of metakaolin concrete to sulfate attack," *Cement and concrete research*, Vol. 36(9), 1727-1734, 2006.
- [30] V.G. Papadakis, "Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress," *Cement and concrete research*, Vol. 30(2), 291-299, 2000.
- [31] M. Cao, X. Ming, K. He, L. Li, S. Shen, "Effect of macro-, micro-and nano-calcium carbonate on properties of cementitious composites—A review," *Materials*, Vol. 12(5), 781, 2019.