





Carbon Emissions Life Cycle Assessment of Cement Industry in Libya

Mohamed-Inweer Abdulrahman Inweer^{1*}  , Yasser Fathi Nassar²  

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

²Center for Research and Studies on Renewable Energies and Sustainable Development, Wadi Alshatti University, Brack, Libya

ARTICLE HISTORY

Received 15 July 2025
Revised 31 July 2025
Accepted 03 August 2025
Online 04 August 2025

KEYWORDS

Life cycle assessment;
System boundary;
Cement Industry;
CO₂ emissions;
Libya.

ABSTRACT

The cement industry is experiencing rapid growth due to the swift urban expansion in various countries around the world, with global cement production reaching approximately 4.2 billion tons in 2024. The cement industry contributes about 44% of total CO₂ emissions in the industrial sector, which is estimated to account for around 30% of global emissions. This study aims to estimate CO₂ emissions throughout the life cycle of the cement industry in Libya by tracking CO₂ emission sources in four cement production plants from the quarry stage to the demolition phase and waste transport to landfills. It also considers the additional amount of CO₂ emissions from cement-exporting countries to the Libyan market (Egypt, Tunisia, and Turkey) during manufacturing and transportation processes. Including the CO₂ emissions from imported cement within the total CO₂ emissions of locally produced cement is a novel addition exclusive to this study, which has contributed to determining the true environmental cost of cement production in Libya. The results obtained indicate that the CO₂ emission factor for the cement industry in Libya is approximately 1,083.60 kg CO₂ per ton of cement consumed in Libya, a figure that is high compared to the global average of 0.798 tons CO₂ per ton of cement, and is close to the emissions of some countries such as Egypt, South Africa, and Myanmar, which rely on traditional fuels for energy production in cement plants. The study also identified the contribution percentage of each stage of the cement industry life cycle to CO₂ emissions. Additionally, the study presented some measures and strategies to reduce pollution and mitigate environmental damage.

تقييم انبعاثات الكربون خلال دورة حياة صناعة الاسمنت في ليبيا

محمد انوير عبدالرحمن انوير^{1*}، ياسر فتحي نصار²

الكلمات المفتاحية	الملخص
تقييم دورة الحياة دورة حياة صناعة الاسمنت صناعة الاسمنت انبعاثات ثاني أكسيد الكربون ليبيا	تشهد صناعة الاسمنت نموا متسارعا نتيجة التوسع الحضري السريع في مختلف دول العالم، حيث وصل الإنتاج العالمي لمادة الاسمنت في عام 2024 إلى حوالي 4.2 مليار طن سنويا، تساهم صناعة الاسمنت بحوالي 44% من إجمالي انبعاثات CO ₂ في الصناعة والمقدرة بحوالي 30% من الانبعاثات العالمية، تهدف هذه الدراسة إلى تقدير انبعاثات CO ₂ خلال دورة حياة صناعة الاسمنت في ليبيا، من خلال تتبع مصادر هذه الانبعاثات في أربعة مصانع لإنتاج الاسمنت من مرحلة الحجر إلى مرحلة الهدم ونقل النفايات للمكب، كما اخذ في الاعتبار إضافة كمية انبعاثات CO ₂ من الدول المصدرة للاسمنت إلى السوق الليبي (مصر وتونس وتركيا) خلال عمليات التصنيع والنقل، يُعد احتساب انبعاثات CO ₂ الناتجة عن الاسمنت المستورد ضمن إجمالي الانبعاثات الوطنية إضافة نوعية تميز هذه الدراسة، والتي ساهمت في الوصول إلى قيمة للتكلفة البيئية الحقيقية لصناعة الاسمنت في ليبيا. أظهرت النتائج المتحصّل عليها أن معامل انبعاثات CO ₂ لصناعة الاسمنت في ليبيا يقدر بحوالي 1083.60 كجم CO ₂ /طن اسمنت وهي قيمة مرتفعة قياسا بمتوسط الانبعاثات العالمية البالغة 0.798 طن CO ₂ /طن اسمنت، وتقترب من انبعاثات بعض الدول كمصر وجنوب أفريقيا وميانمار التي تعتمد على الوقود التقليدي في إنتاج الطاقة لمصانع الاسمنت. كما حددت الدراسة نسبة مساهمة كل مرحلة من مراحل دورة حياة صناعة الاسمنت في انبعاثات CO ₂ وقدمت الدراسة بعض التدابير والاستراتيجيات للحد من التلوث وتلطيف الضرر البيئي، وأوصت بإجراء البحوث العلمية لتطوير صناعة الاسمنت في ليبيا من خلال تحديث المنشآت ايجاد بدائل محلية أطف على البيئة مثل استخدام الميتاكوولين في إنتاج الخرسانة كمادة بوزولانية أو جيوبوليمر عوضا عن الاسمنت التقليدي، وضرورة التحول إلى الاعتماد على مصادر الطاقة النظيفة كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح في مصانع الاسمنت.

حيث بلغ إنتاج الأسمنت حول العالم في عام 2024 حوالي 4.2 مليار طن [3] وتُعد صناعة الأسمنت من العمليات كثيفة الاستهلاك للطاقة، حيث تُستخدم الطاقة الحرارية والكهربائية في مختلف مراحل الإنتاج من طحن

المقدمة
يعتبر الإسمنت ثاني أكثر المواد استخدامًا على مستوى العالم بعد الماء، ويستخدم الإسمنت بشكل رئيسي كمادة رابطة في الخرسانة [2,1]،

الدوار للمركبات الأولية دون الوصول إلى درجة انصهارها) هي الأكثر مساهمة بنسبة 88% من إجمالي الانبعاثات. في مصر [10] تم إجراء دراسة لمدة سنة كاملة على مصنع اسمنت العربية، الذي يستخدم الوقود الاحفوري في إنتاج الكلنكر بمعدل (24.8% فحم، 45.1% فحم الكوك، 30.1% غاز طبيعي). تم حساب الانبعاثات وفقا للمنهجية المعتمدة للأمم المتحدة (ACM0003) ومن خلال مقارنة الانبعاثات في حالة الدراسة مع حالة العمل المعتاد للمصنع قدرت الدراسة معامل الانبعاثات بحوالي 1.163 طن/CO₂/طن اسمنت. في تركيا [11] تم الاعتماد على تقييم دورة الحياة (LCA) لتحديد الآثار البيئية لصناعة الاسمنت وإيجاد طريقة لتقليلها، وتعتبر مرحلة إنتاج الكلنكر أهم مرحلة في إنتاج الاسمنت وتمثل أثارها البيئية في استهلاك الوقود الاحفوري وانبعاثات الهواء، أشارت الدراسة إلى أن النسبة الأكبر لانبعاثات CO₂ في صناعة الاسمنت حوالي 93% تأتي من إنتاج الكلنكر لاستهلاكه كمية كبيرة من الوقود، بينما تستهلك عمليات النقل 2% وعمليات المواد الأولية 5%، وتوصلت الدراسة إلى أن معامل انبعاثات CO₂ لصناعة الاسمنت في تركيا يقدر بحوالي 602 كجم CO₂/طن اسمنت، وكان نصيب عملية الكلسنة 530 كجم CO₂/طن اسمنت، ويُعزى ذلك إلى استخدام الوقود الحيوي عوضاً عن الوقود الاحفوري في المصنع، ومن أجل تقليل هذه الانبعاثات تم تقديم بعض الحلول فيما يتعلق بالطاقة والمواد الخام مثل تعديل نسب المواد في الكلنكر واعتبار النفايات مورداً للطاقة والمواد الخام، فبدلاً من استخراج المواد الخام من الطبيعة يمكن استخدام مواد خام بديلة كالنفايات الصناعية وقد تصل نسبة التوفير في الطاقة إلى حوالي 90% في بعض المواد المعاد تدويرها [12].

في إيطاليا [13] تم تقييم الأثر البيئي لصناعة الاسمنت المنتج في أحد عشرة مصنعا في إيطاليا وفق المعيار الأوروبي EN 197-1. اظهر التحليل انه من بين المراحل المختلفة التي تنطوي عليها عمليات إنتاج هذه المواد- استخراج وإنتاج المواد الخام والوقود والنقل وعمليات الإنتاج الأساسية- فان المرحلة الأساسية مسنولة عن معظم انبعاث غازات الاحتباس الحراري (أي أكثر من 85% من إجمالي عملية الكلنكر وأكثر من 79% من إجمالي عملية الاسمنت)، ويُعزى ذلك إلى حقيقة أن أكثر من 95% من احتياجات الطاقة في صناعة الاسمنت الإيطالي يتم تلبيةها عن طريق مصادر الطاقة الأولية غير المتجددة.

في ميانمار [4] تم تقييم الآثار البيئية للاسمنت البورتلاندي العادي لمصنع اسمنت ماكس ميانمار الذي ينتج 2100 طن/يوم. تم تقييم دورة حياة إنتاج الاسمنت (LCA) بأكملها باستخدام فرضيتين لاستبدال الوقود وقد أظهرت النتائج أن استخدام مزيج من الوقود (90% فحم، 10% غاز) يتسبب في انبعاثات 1.012 طن CO₂/طن كلنكر، وان استخدام وقود الفحم بنسبة 100% سيزيد الانبعاثات إلى 1.067 طن CO₂/طن كلنكر وان استخدام وقود الغاز بنسبة 100% سيقبل الانبعاثات إلى 0.32 طن CO₂/طن كلنكر، إن إنتاج الاسمنت بالطرق التقليدية له آثار سلبية على البيئة وان مرحلة الكلسنة تساهم بحوالي 89% من الانبعاثات، وان التحول من الفحم الحجري إلى الغاز الطبيعي يمكن أن يقلل الانبعاثات بنسبة معتبرة.

في الهند [14] الدولة المصنفة ثاني أكبر منتج للاسمنت في العالم، حيث بلغ إنتاجها السنوي سنة 2024 حوالي 390 مليون طن. فقد قطعت صناعة الاسمنت فيها خطوات هائلة من التطوير التكنولوجي واستيعاب أحدث

المواد الخام إلى حرق الكلنكر في الأفران الدوارة (الكلنكر هو المادة الناتجة عن حرق المواد الأولية في الفرن الدوار)، كما وتعتبر صناعة الأسمنت مساهماً رئيسياً في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وتقدر مجموع انبعاثات CO₂ لصناعة الاسمنت حول العالم بحوالي 1.6 مليار طن متري سنوياً والتي تمثل حوالي 8% من إجمالي الانبعاثات العالمية [3]. تصنف صناعة الاسمنت وفقاً لوكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) Environmental Protection Agency بأنها ثالث أكبر ملوث صناعي عالمي، حيث تطلق ما يزيد عن 500 كيلوطن من أكسيد النيتروجين وثاني أكسيد الكبريت وأول أكسيد الكربون سنوياً [4]. ورغم النمو الذي يشهده سوق صناعة الاسمنت والفرص الوظيفية التي يتيحها في مجال الإنشاءات السكنية وغير السكنية المرافقة لها كمراكز التسوق والمطارات والطرق والجسور ومشاريع البنية التحتية والمرافق الخدمية الحكومية كالمدارس والمستشفيات وغيرها وتأثيره الإيجابي المباشر على قطاعات أخرى ذات صلة كالنقل والتصنيع والخدمات اللوجستية، إلا أن هذا لم يمنع حكومات الدول من فرض لوائح بيئية صارمة على عملية الإنتاج والتي قد تؤدي إلى تقييد نمو هذا السوق [5]. لذلك اتخذت العديد من الدول استراتيجيات لخفض هذه الانبعاثات، تمثلت في تحسين كفاءة الطاقة والتحول إلى وقود منخفض الكربون وتعزيز كفاءة المواد الداخلة في الصناعة وتطوير طرق إنتاج مبتكرة تقترب من صافي انبعاثات كربون مساوية للصفر، ويساهم هذان الأخيران بشكل كبير في خفض الانبعاثات بشكل مباشر [6].

تهدف هذه الدراسة إلى تتبع انبعاثات CO₂ على طول مسار تصنيع واستهلاك الاسمنت في ليبيا (من المحجر إلى المكب)، متضمناً أيضاً الانبعاثات الناجمة عن الاسمنت المستورد وهو ما يميز هذه الدراسة. ولعدم وجود معلومات كافية عن جميع مصانع الاسمنت في ليبيا، فقد تم دراسة حالة أربعة مصانع موزعة بين المنطقة الشرقية والغربية وهي مصنع الهواري للاسمنت في مدينة بنغازي ومصنع الفتاح في مدينة درنة ومصنع زليتن ومصنع البرج في مدينة زليتن، ويمكن تعميم النتائج على باقي المصانع الليبية الأخرى نظراً للتشابه الكبير في هيكلية هذه المصانع. استخدم في هذه الدراسة تحليل دورة الحياة (LCA) Life Cycle Assessment وفق المنهجية ISO 14040 لحساب كمية انبعاثات CO₂ من مرحلة تجهيز المواد الخام من المحجر إلى مرحلة هدم المباني وإزالتها ونقلها للمكب، يقدم تحليل (LCA) توضيحاً شاملاً ونتائج كمية ويسمح بمقارنة الآثار على البيئة [7،8]. تميزت هذه الدراسة عن غيرها بشمولية مراحل دورة الحياة كافة، بما في ذلك الاستيراد، مما يقدم منظوراً جديداً في تقييم الأثر البيئي لصناعة الأسمنت في ليبيا.

تكمن أهمية هذه الدراسة في أنها تأتي متسقة مع التزامات الدولة الليبية في الحد من الاحترار الكوني وتلطيف الضرر البيئي الناجم عن انبعاثات CO₂، كونها احد الدول المصدقة على اتفاقية باريس للتغير المناخي.

أجريت العديد من الدراسات الدولية والإقليمية لتقييم صناعة الاسمنت باستخدام تحليل دورة الحياة (LCA)، ففي تونس [9]، تم استخدام منهجية تقييم دورة الحياة (LCA) لتقييم الآثار البيئية لإنتاج طن واحد من الاسمنت البورتلاندي، حيث كانت حدود النظام لهذه الدراسة من مرحلة تجهيز المواد الخام إلى التعبئة والتغليف، ووفقاً لنتائج هذه الدراسة فان معامل انبعاثات CO₂ للاسمنت البورتلاندي في تونس يقدر بحوالي 670 كجم CO₂/طن اسمنت، كما أن مرحلة الكلسنة (الكلسنة هي معالجة حرارية داخل الفرن

الحياة (LCA)، بالإضافة إلى استكشاف ما إذا كان خلط الاسمنت مع الجرافين يمكن أن يقلل من الآثار البيئية لدورة حياة المنتج النهائية. أظهرت النتائج أن إنتاج الاسمنت يولد 775 كجم CO₂/طن و 57% من انبعاث CO₂ الجيولوجي في المملكة المتحدة، وان خلط الجرافين الاسترالي مع الاسمنت بهذه النسبة يوفر 16.5% من كمية الاسمنت ويؤدي إلى انخفاض الاحتباس الحراري بنسبة 14.5% لكن استخدام الجرافين المنتج في دول مثل فرنسا والبرازيل يحقق انخفاض أكبر يصل إلى 15.9% ويعزى السبب في ذلك إلى اعتماد دولتي فرنسا والبرازيل على الطاقة الكهرومائية في إنتاج الجرافين.

محلياً، لم يشهد تحليل دورة حياة صناعة الاسمنت (LCA) اهتماماً من قبل الباحثين وملت ساحة البحث العلمي من الأبحاث العلمية المتخصصة في هذا التحليل، باستثناء بعض الأبحاث التي ناقشت التلوث الناجم عن تصنيع الاسمنت في بعض مصانع الاسمنت [20، 21]، ودراسة حول مصادر التلوث في ليبيا، حيث قُدر معامل انبعاث CO₂ من صناعة الاسمنت -كونها أحد مصادر التلوث في البلاد- بحوالي 867 كجم CO₂ لكل طن اسمنت [22].

تبين مما تم عرضه في هذه الدراسات أن دورة حياة الاسمنت (LCA) يمكن اعتبارها أداة فعالة لتقييم الآثار البيئية الناتجة عن صناعة الاسمنت، وان استخدام هذه الأداة قد ساعد على اقتراح تدابير عديدة كان من شأنها الحد من انبعاثات CO₂ في صناعة الاسمنت، كما تبين أن كل دراسة هي بمثابة إضافة علمية ولها خصوصيتها لاختلاف حثياتها من حيث تقنيات التصنيع ونوع المواد الخام ونوع الطاقة المستخدمة، وتميزت هذه الدراسة عن غيرها بشمولية مراحل دورة الحياة (LCA) كافة بما في ذلك استيراد الاسمنت، مما يقدم منظوراً جديداً في تقييم الأثر البيئي لصناعة الاسمنت في ليبيا حيث تضمنت تتبع مسار انبعاثات CO₂ من خلال دورة حياة شاملة تبدأ من المحجر وتنتهي بالهدم والإزالة ونقل المخلفات إلى المكب، مروراً بمراحل الصناعة من عمليات تحضير وتصنيع ونقل واستهلاك وما بعد الاستهلاك لمادة الاسمنت. تعتبر الدولة الليبية حالة خاصة وذلك لان جزء من الاسمنت المستهلك في السوق المحلي مستورداً من عدة دول الأمر الذي يجعل من (LCA) أكثر تعقيداً، ولذلك كان من الضروري دمج التلوث البيئي في تلك المصانع والنقل مع الانبعاثات الناجمة عن صناعة الاسمنت في ليبيا وهي نظرة شاملة لصناعة الاسمنت من وجهة نظر الاحترار الكوني، هذا الأسلوب الشامل الجديد يعطي أرقام حقيقية للأثر البيئي لصناعة الاسمنت في ليبيا واقترح الحلول المناسبة لدعم صانعي القرار من خلال توصيات لوضع إستراتيجية وطنية تراعي التنمية الاقتصادية في إطار بيئة نظيفة من خلال استثمار الموارد الطبيعية وفق تكنولوجيا نظيفة وتطوير ممارسات إنتاجية واستهلاكية مستدامة، وصولاً إلى الاقتصاد الأخضر [23] وتعد هذه الدراسة سابقة محلية من نوعها رغم نقص وندرة المعلومات الأساسية حول صناعة الاسمنت في ليبيا، ويمكن حصر المساهمة العلمية لهذه الدراسة في النقاط التالية:

- تحديد معامل انبعاثات CO₂ لصناعة الاسمنت في ليبيا.
- اقتراح سياسات مناسبة للحد من هذه الانبعاثات.

ولإظهار الدراسة في صورتها الأكاديمية تم تقسيم ما تبقى منها إلى عدة أجزاء، حيث تناول الجزء الثاني عرضاً للمنهجية المتبعة شملت نبذة عن صناعة وسوق الاسمنت في ليبيا وفرضيات وحدود الدراسة ومصادر الأيقين في النتائج، وتحليل تقييم دورة حياة صناعة الاسمنت في ليبيا، وحدود النظام

التقنيات، ففي الوقت الحالي يعتمد حوالي 99% من إجمالي الطاقة الإنتاجية لصناعة الاسمنت في الهند على التقنيات الحديثة والصدقية للبيئة، وفي هذا الإطار كان للمجلس الوطني للاسمنت ومواد البناء بوزارة التجارة والصناعة الهندية دور هام في البحث وتطوير تكنولوجيا صناعة الاسمنت، شمل التطوير توسيع قاعدة المواد الخام واستخدام مواد النفايات واستخدام مصادر الطاقة المتجددة كطاقة الرياح والطاقة الشمسية، ومن نتائج هذا التطوير انه قبل عقدين من الزمن كان متوسط استهلاك خط واحد لإنتاج الاسمنت 3000 طن يومياً ما يقارب 880 كيلوكالوري/كجم (3682 جيجا جول/طن كلنكر) و 120 كيلو وات/طن اسمنت، اليوم وصل إنتاج الخط الواحد من الاسمنت إلى أكثر من 12000 طن يومياً بمتوسط استهلاك طاقة حرارية 726 كيلوكالوري/كجم (3037 جيجا جول/طن كلنكر) و متوسط استهلاك طاقة كهربائية 78 كيلوات/طن اسمنت، وهذا يقارب أفضل المستويات العالمية والتي تقدر بـ 686 كيلوكالوري/كجم (2870 جيجا جول/طن كلنكر) و 68 كيلو وات/طن اسمنت، أظهرت صناعة الاسمنت الهندية أداء هائلاً من حيث حماية البيئة من خلال التدابير المختلفة لتقليل الانبعاثات، فقد تم زراعة أكثر من 17 مليون شجرة في العقد الماضي والتي يمكن أن تكون بالوعة للكربون [15، 16]. لقد حققت صناعة الاسمنت الهندية انخفاضاً كبيراً في إجمالي انبعاثات CO₂ من 1.12 طن CO₂/طن اسمنت سنة 1996 إلى 0.721 طن CO₂/طن اسمنت في الوقت الحالي ومن المتوقع زيادة خفض هذه الانبعاثات إلى 0.58 طن CO₂/طن اسمنت بحلول عام 2050.

في جنوب أفريقيا [17] تم إجراء محاكاة لنموذج من إنتاج مصانع الاسمنت لتحديد آثاره على السكان المحليين والموارد والنظام البيئي من خلال تقييم دورة حياة الاسمنت (من المحجر إلى البناء). حيث قدرت الدراسة أن معامل انبعاث CO₂ لصناعة الاسمنت في جنوب أفريقيا يساوي 993 كجم CO₂/طن اسمنت.

في أوروبا [18] أمكن تبني سياسات لإزالة الكربون من إنتاج الاسمنت وذلك باستخدام تقييم دورة الحياة (LCA)، كاستخدام الوقود البديل وتحسينات الأفران واحتجاز الكربون وتخزينه، حيث تم استخدام قاعدة بيانات دورة الحياة المعدلة (based on ecoinvent v.3.6) التي تتضمن سيناريوهات تم تطويرها باستخدام نموذج التقييم المتكامل IMAG (النموذج المتكامل لتقييم البيئة العالمية)، تظهر النتائج انه بحلول عام 2050 سيتم إنتاج الاسمنت مع انخفاض كبير في انبعاثات CO₂ باستخدام استبدال الكلنكر بنسبة 42% أو الوقود البديل بنسبة 25% أو تحسين كفاءة الأفران بنسبة 12% مقارنة بعام 2020، وعند دمج هذه التدابير يمكن أن تقلل انبعاثات CO₂ من إنتاج الاسمنت بنسبة 58% (باستثناء احتجاز الكربون وتخزينه) وحوالي 88% (بما في ذلك احتجاز الكربون وتخزينه) بحلول عام 2050 مقارنة بعام 2020 مما قد يخفف انبعاثات CO₂ إلى 90 كجم CO₂/طن اسمنت بحلول عام 2050.

في المملكة المتحدة [19] تم إجراء دراسة لتقييم الأثر البيئي لإنتاج الاسمنت البورتلاندي العادي المنتج في المملكة المتحدة المخلوط بالجرافين المنتج في استراليا بنسبة 0.02% وزناً، باستخدام تقييم دورة الحياة (LCA) وتم تقييم 18 تأثيراً بيئياً لإنتاج الاسمنت البورتلاندي العادي والجرافين- كون الاسمنت مساهم بشكل كبير في تغير المناخ- مما يستلزم إيجاد بدائل للتخفيف من الآثار البيئية لهذه المادة الإنشائية الأساسية، وذلك باستخدام تقييم دورة

- 2- تفتيت المواد الخام في كسارات خاصة تصل قدرتها الإنتاجية إلى أكثر من 1000 طن/ساعة ولها القدرة على تكسير الصخور التي تصل أطوالها حتى 1.5 متر وبوزن يصل إلى 2000 كجم للصخرة الواحدة وذلك إلى أحجام مناسبة للطحن ثم تخزينها في خزانات خاصة، حيث تستهلك وحدات التفتيت (الكسارات والمطاحن) 60% من الطاقة الكهربائية المستهلكة في صناعة الاسمنت والمقدرة بنحو (100-120) كيلووات ساعة/طن اسمنت وحوالي 4% من الوقود [29]
- 3- طحن المواد الخام بشكل منفصل ثم خلطها بنسب محددة حتى تتجانس ثم تنقل إلى الفرن الدوار.
- 4- تحرق المواد الخام داخل فرن دوار اسطواني بقطر (4.75-5 متر) وطول (75-150 متر) إلى درجة حرارة تتراوح بين (1300-1650 درجة مئوية)، فتحدث تفاعلات كيميائية تنتج مركبات جديدة وتعرف هذه العملية بالكلسنة، ثم يبرد ناتج الكلسنة إلى 120 درجة مئوية فيتكثف على شكل كرات صغيرة تعرف بالكلكنر، تستحوذ عملية إنتاج الكلكنر على الكمية الأكبر من استهلاك الطاقة الحرارية اللازمة لصناعة الاسمنت وتقدر هذه الكمية بـ 90-95% إضافة إلى 20-25% من الطاقة الكهربائية، لذلك تعد عملية إنتاج الكلكنر هي المسؤولة عن القدر الأكبر من انبعاثات CO₂ من بين مراحل التصنيع والمقدرة بحوالي 93% [11، 25].
- 5- نقل الكلكنر المبرد بواسطة السيور المتحركة إلى صهاريج خرسانية اسطوانية الشكل قطرها (20-25 متر) وارتفاعها (45-50 متر) تعرف بمغذيات طواحين الكلكنر.
- 6- طحن الكلكنر في طواحين طاقتها الإنتاجية في حدود 100 طن/ساعة إلى مسحوق ناعم ليصبح اسمنتا مع إضافة كبريتات الكالسيوم المائية (CaSO₄.2H₂O) المعروفة بالجبس بنسب متفاوتة (3-5%).
- 7- تخزين الاسمنت في خزانات اسطوانية خرسانية قطرها في حدود (18-20 متر) وارتفاعها في حدود (50-55 متر).
- 8- تعبئة الاسمنت في أكياس قياسية بوزن 50 كجم ثم ينقل للاستهلاك
- فرضيات وحدود الدراسة ومصادر اليقين في النتائج
- تم اعتماد الفرضيات التالية للوصول للحل لعدم وجود البيانات الكافية:
- نظرا لتعدد شركات صناعة الاسمنت في الدول المصدرة إلى ليبيا (مصر، وتونس) عليه تم احتساب مسافة النقل البري من عاصمة الدولة إلى اقرب مصنع اسمنت في ليبيا، أما النقل البحري فاحتسبت المسافة من احد مواني الدولة المصدرة (تركيا) إلى ميناء مدينة مصراتة وأهملت المسافة البرية من مصنع الاسمنت إلى ميناء انطاليا في تركيا.
 - تبني قيم انبعاثات CO₂ لوسائل النقل البري المدرجة في قوائم الهيئة الدولية المعنية بتغير المناخ IPCC (0.4kg CO₂/ton/km) [30].
- فيما يتعلق بحدود الدراسة فتمثل في أن الدراسة لم تشمل كامل مصانع الاسمنت الليبية وكذلك لم تشمل الدراسة كافة المدن الليبية.
- أما المصادر الرئيسية لعدم اليقين في النتائج فتمثل في:
- تباين كبير في معاملات انبعاثات CO₂ على سبيل المثال في قطاع المواصلات ورد معاملين بنسبة تفاوت تصل إلى 100%. وكذلك معامل انبعاثات CO₂ لقطاع الطاقة الكهربائية ولحرق الوقود الاحفوري [31-37].

العام لصناعة الاسمنت. بينما مثلت النتائج المتحصل عليها بيانيا ورقميا ونوقشت في فقرة النتائج والمناقشة، ثم الخلاصة والتوصيات وختمت الدراسة بقائمة من 55 مرجعا.

منهجية الدراسة

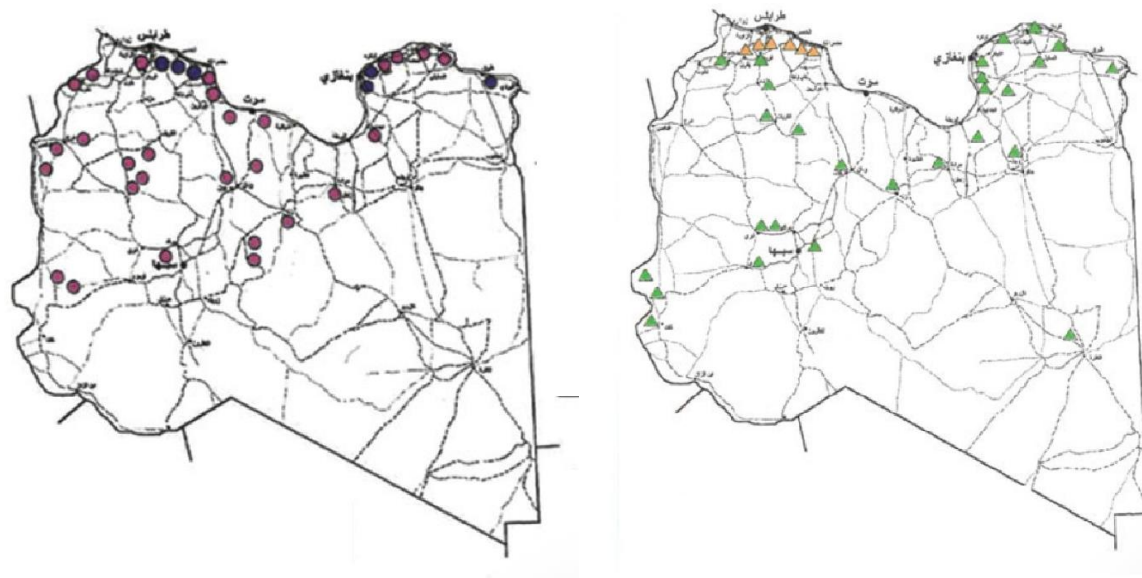
نبذة مختصرة عن صناعة وسوق الاسمنت في ليبيا

يعد قطاع صناعة الاسمنت في ليبيا من القطاعات الإنتاجية الصناعية الهامة المملوكة للدولة، تأتي ليبيا في المرتبة الثانية والستين في قائمة الدول المنتجة للاسمنت في العالم بإجمالي إنتاج قدره 3.34 مليون طن/سنة تقريبا [1] بدأت صناعة الاسمنت في ليبيا في ستينيات القرن الماضي وكان لمواقع توفر الخامات الأولية الأساسية لهذه الصناعة دورا في تحديد مواقع إنشاء أولى المصانع في كلا من مدينتي الخمس وبنغازي، كما هو مبين في الشكل (1)، حيث يلاحظ تواجد معظم هذه الخامات في المناطق الشمالية الغربية والشمالية الشرقية (حيث تتركز مصانع الاسمنت الحالية)، وفي بعض المناطق الوسطى والجنوبية من ليبيا، يقدر عدد مصانع الاسمنت في ليبيا بحوالي 7 مصانع عاملة كما هو موضح في الجدول (1)، ورغم هذا العدد إلا أن خبراء مختصون في صناعة الأسمنت يرون أن ليبيا تشهد أزمة حادة في قطاع الأسمنت منذ عام 2023 تتمثل في فجوة كبيرة بين العرض والطلب وارتفاع غير مسبوق في الأسعار، فبينما تبلغ الطاقة التصميمية لمصانع الأسمنت الليبية نحو 9-21 مليون طن سنويًا فإن الإنتاج الفعلي أقل من ذلك بكثير، حيث بلغ نحو 3.1 مليون طن فقط في عام 2020 مقابل طلب في السوق المحلي قدر بنحو 5.3 مليون طن، وأشارت تقديرات محلية إلى أن الطلب على الأسمنت وصل إلى حوالي 7 ملايين طن في عام 2024 [24].

يصنع الاسمنت البورتلاندي بطريقتين الجافة والرطبة، ففي الطريقة الجافة تبقى المواد الخام جافة طيلة المراحل التي تسبق عملية الحرق، وأما الطريقة المبللة فيتم فيها خلط المواد الأولية بالماء بنسبة 35-50% وهذه الطريقة اقل استعمالا لاستهلاكها الكبير للطاقة (الاستهلاك العالمي من الطاقة الحرارية 6.2 جيغا جول/طن كلكنر) وتقدر انبعاثات CO₂ الناجمة عن هذه الطريقة بحوالي 1.09 طن CO₂/طن اسمنت عند استعمال وقود الفحم، بينما الطريقة الجافة أكثر كفاءة في استهلاك الطاقة وبالتالي هي الأكثر استعمالا (الاستهلاك العالمي من الطاقة الحرارية 3-3.5 جيغا جول/طن كلكنر) وتقدر انبعاثات CO₂ الناجمة عن هذه الطريقة بحوالي 0.89 طن CO₂/طن اسمنت عند استعمال وقود الفحم، وتباين هذه الكميات بين دول العالم لعلاقتها بكفاءة استخدام الطاقة [25]

وتتلخص مراحل إنتاج الاسمنت الليبي بالطريقة الجافة في الخطوات الآتية [26، 27]:

- 1- استخراج المواد الخام (الأولية) من المحاجر بالجرف والقشط والتفجير ونقلها إلى المصنع، حيث تتكون هذه المواد من أحجار الحجر الجيري بنسبة 79% من إجمالي الخامات والطين بنسبة 19.5% بالإضافة إلى مواد مضافة ومنها خامات الحديد بنسبة 1.5% من إجمالي الخامات [26] ويتم نقل المواد الخام من المحاجر إلى مصانع الاسمنت باستخدام سيارات شحن بحمولة 100 طن وتعمل بوقود الديزل، تستهلك عملية الاستخراج والنقل 7% من إجمالي الوقود المستهلك [11]، وأشار [28] إلى أن عمليات المحاجر والنقل والتحضير والطحن تنتج ما نسبته 10% من إجمالي انبعاثات عملية تصنيع الاسمنت.



(ب) مواقع مناجم الحجر الجيري

(أ) مواقع مناجم الطين

الشكل 1: مواقع توفّر الخامات الجيرية والطينية في ليبيا [38]

الجدول 1: البيانات الأساسية لمصانع الاسمنت في ليبيا *

اسم المصنع	المنطقة	نوع الوقود المستعمل	الطاقة الكهربائية المستهلكة MWh/y	كمية الوقود المستهلك		كمية التغذية للفرن	موقع المحجر	معدلات الإنتاج	
				طن/ساعة	غير متوفر			فعلي (كلنكر) طن/ساعة	فعلي (اسمنت) طن/سنة
المرقب	الخمس	(NG) غاز طبيعي	غير متوفر	غير متوفر	غير متوفر	منطقة المصنع	مصنع مصراة	0.33 مليون طن/سنة	164983
سوق الخميس	طر ابلس	(HFO) وقود ثقيل	غير متوفر	غير متوفر	غير متوفر	منطقة العزبية 17 كلم	مصنع مصراة	1 مليون طن/سنة	483659
لبدة	الخمس	غاز طبيعي	غير متوفر	غير متوفر	غير متوفر	منطقة المصنع	مصنع مصراة	1 مليون طن/سنة	451000
زليتن	زليتن	غاز طبيعي	111136	9.3	230	منطقة المصنع	مصنع مصراة	2 مليون طن/سنة	715118
البرج	زليتن	وقود ثقيل	144960	13.95	300	منطقة المصنع	مصنع مصراة	1.4 مليون طن/سنة	960070
الفتانج	درنه	وقود ثقيل	83980.16	8.08	173.8	منطقة المصنع	غير متوفر	1 مليون طن/سنة	550000
الهوراي	بنغازي	غاز طبيعي	113793.6	9.52	235.5	منطقة المصنع	غير متوفر	1.6 مليون طن/سنة	720000

* (جميع البيانات المذكورة في الجدول تم الحصول عليها شخصيا عن طريق الاتصال بالمصنع)

$$Q_{RM,CO_2} = 0.1 Q_{CM,CO_2} \quad (1)$$

حيث: Q_{CM,CO_2} تمثل كمية انبعاثات CO_2 السنوية في مرحلة تصنيع الاسمنت

2. مرحلة تصنيع الاسمنت المحلي (Q_{CM,CO_2})

في هذا البحث تم استحداث صيغة رياضية عامة لاحتساب كمية انبعاثات CO_2 اعتمادا على نوع الطاقة المستخدمة (كهرباء، غاز طبيعي، زيت ثقيل) في مصانع الاسمنت وكانت على الصورة التالية:

$$Q_{CM,CO_2} = \sum_{i=1}^N EF_{f_i,CO_2} \times Q_{f_i} \quad (2)$$

حيث: Q_{CO_2} تمثل كمية انبعاثات CO_2 بوحدة (كجم CO_2 /طن أسمنت)، EF فيرمز الى معامل انبعاث CO_2 لكل نوع من الوقود المستخدم f_i بوحدة كجم CO_2 /وحدة قياس (للطاقة الكهربائية ميغاوات ساعة وللوقود كجم) أما الرمز Q_{f_i} فيشير الى كمية الطاقة المستهلكة لإنتاج الاسمنت في السنة بوحدة (الميغاوات ساعة/السنة للطاقة الكهربائية وبوحدة كيلوجرام وقود/السنة للوقود)، يوضح الجدول (2) قيم EF_{f_i,CO_2} لبعض أنواع الوقود المستخدم في صناعة الاسمنت في ليبيا.

الجدول 2: معامل انبعاث CO_2 لبعض أنواع الوقود [12]

نوع الوقود	EF_{f_i,CO_2}	الوحدة
الطاقة الكهربائية	0.875	كجم CO_2 /كيلووات ساعة
الغاز الطبيعي	2.983	كجم CO_2 /طن غاز
زيت النفط الخفيف (الديزل)	3.1	كجم CO_2 /كجم ديزل
زيت النفط الثقيل (المازوت)	3.114	كجم CO_2 /كجم مازوت
الغاز الحيوي (60% ميثان)	2.75	كجم CO_2 /كجم غاز حيوي

كما يمكن تقدير معامل انبعاثات CO_2 (EF_{C,CO_2}) لصناعة الاسمنت في ليبيا من خلال هذه المرحلة، عن طريق استخدام المعادلة التالية .

$$EF_{C,CO_2} = \frac{Q_{CO_2}}{Q_C} \quad (3)$$

• تبين كبير في البيانات من مصادر الحصول عليها فيما يتعلق بكميات الطاقة والإنتاج وكميات التغذية بالمواد الخام الفعلية لمصانع الاسمنت في ليبيا عموما.

• الفارق الكبير في حمولة شاحنات نقل الاسمنت (شاحنة بالمقطورة) بين ما هو مسموح به قانونا وبين ما يحدث فعليا -ليس في كل الحالات والأماكن- حيث تتراوح هذه الحمولة من 60 طن إلى 110 طنا.

تحليل تقييم دورة الحياة

يعد تحليل تقييم دورة الحياة (LCA) أداة بيئية منهجية واسعة الانتشار لتقييم التأثيرات المحتملة في العديد من المجالات منها صناعة الطاقة [12]، حيث يوفر تحليلا شاملا ونتائج كمية بالإضافة إلى انه يسمح بتقييم ومقارنة التأثيرات على الوحدات المحددة عالميا وهو طريقة تقييم من أربع خطوات تم توحيدها وفقا للمعيار الدولي ISO14040 وقد تم تطبيق (LCA) في هذا البحث لتقييم صناعة الاسمنت في ليبيا من خلال تحديد كمية انبعاثات CO_2 الناتجة عن هذه الصناعة [17،18].

دورة حياة صناعة الاسمنت الشاملة في ليبيا

تتضمن هذه الدورة 7 مراحل هي: مرحلة المحجر والنقل والصناعة وتشمل الصناعة المحلية وما يستورد من الخارج، والنقل البري الداخلي، وموقع عمليات البناء والتشييد، ثم الهدم ونقل النفايات إلى المكب. كما هو موضح في الشكل (2).

حدود النظام العام لصناعة الاسمنت في ليبيا

حدود هذا النظام هي دورة حياة صناعة الاسمنت الشاملة في ليبيا كما هو موضح في الشكل (3).

حساب الانبعاثات خلال مراحل صناعة الاسمنت

1. مرحلة نقل المواد الأولية من المحجر إلى المصنع (Q_{RM,CO_2})

كما سبق ذكره- فان انبعاثات هذه المرحلة تشكل حوالي 10% من إجمالي انبعاثات CO_2 نتيجة تصنيع الاسمنت [28].



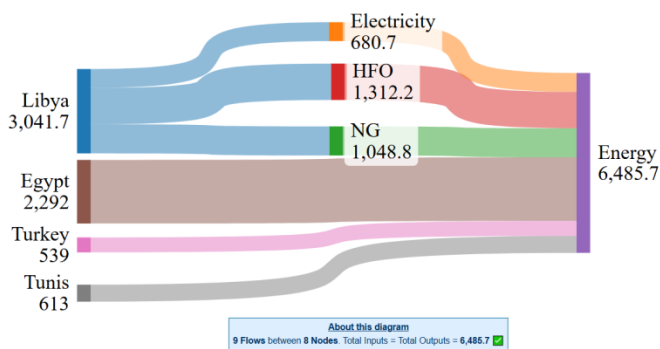
الشكل 2: دورة حياة صناعة الاسمنت الشاملة في ليبيا

انبعاثات مرحلة الهدم تمثل 5.7% من انبعاثات المباني.

$$Q_{C\&B,CO_2} = 0.057 Q_{R,CO_2} \quad (7)$$

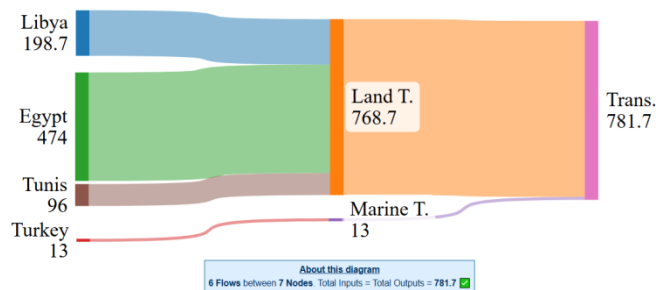
النتائج والمناقشة

ركزت الدراسة على حصر انبعاثات CO₂ خلال دورة حياة صناعة الاسمنت في ليبيا، حيث تناولت بالتحليل إنتاج أربعة مصانع من مصانع الاسمنت العاملة في ليبيا، وهي مصنع زليتن ومصنع البرج في مدينة زليتن ومصنع الفتاح في مدينة درنة ومصنع الهواري في مدينة بنغازي، ولأجل الوصول إلى تقييم يعكس حقيقة هذا الأثر تم تقسيم دورة حياة صناعة الاسمنت في ليبيا إلى ست مراحل هي، مرحلة المحجر والتصنيع والاستيراد والنقل البري والإنشاءات وأخيرا الهدم والإزالة ونقل المخلفات، يبين الشكل (5) مخطط "سانكي" لانبعاثات CO₂ بوحدة كيلوطن CO₂/سنة والناجمة عن استهلاك الطاقة خلال مرحلة التصنيع لمصانع الاسمنت في ليبيا ومصانع الدول المصدرة للاسمنت إلى ليبيا.



الشكل 5: مخطط سانكي لانبعاثات CO₂ نتيجة الطاقة [كيلوطن CO₂/سنة]

حيث يتبين جليا من هذا الشكل أن استخدام NG عوضا عن HFO سيققل انبعاثات CO₂ بنسبة تتعدى 11% كما يمكن تقدير معامل انبعاث CO₂ في مرحلة إنتاج الاسمنت في ليبيا بحوالي 752 كيلوجرام CO₂/طن اسمنت. ويُعزى هذا الارتفاع إلى استخدام الوقود الثقيل وكذلك ارتفاع معامل انبعاث CO₂ لصناعة الطاقة الكهربائية في ليبيا. كما يبين الشكل (6) مخطط "سانكي" لانبعاثات CO₂ بوحدة كيلوطن CO₂/سنة الناجمة عن عمليات نقل الاسمنت من المصانع الليبية وكذلك المستوردة من الخارج عن طريق النقل البحري (في حالة الاستيراد من تركيا) والنقل البري (في حالة الاستيراد من مصر وتونس).



الشكل 6: مخطط سانكي لانبعاثات CO₂ نتيجة المواصلات [كيلوطن CO₂/سنة]

بُعزى التباين الكبير في انبعاثات CO₂ في النقل البري نتيجة الاستيراد لتبني فرضية -سبق توضيحها- وهي نقل الاسمنت من عاصمة الدولة المصدرة إلى أقرب مصنع اسمنت لحدودها مع ليبيا. ففي حالة مصر -ولعدم وجود

3. مرحلة الاستيراد من دول مصر وتونس وتركيا ($Q_{I\&ET,CO_2}$)

لحساب مساهمة الدول المصدرة للاسمنت إلى ليبيا في انبعاثات CO₂ خلال دورة حياة صناعة الاسمنت في ليبيا تم الأخذ بعين الاعتبار انبعاثات هذه الدول الموضح في الجدول (3)، بالإضافة إلى انبعاثات تصدير الاسمنت إلى ليبيا عبر النقل البري والبحري والتي تم تقديرها بواسطة البرنامج المقدم مجانا من شركة Logward الألمانية لتكنولوجيا اللوجستيات (<https://www.logward.com/freebies/co2-calculator>).

$$Q_{I\&ET,CO_2} = \sum_{l=1}^m [EF_{C,CO_2,k} \times Q_{EC,k} + Q_{ET,CO_2,k}] \quad (4)$$

حيث: $EF_{C,CO_2,k}$ يمثل معامل انبعاث CO₂ لصناعة الاسمنت للدولة المصدرة (الجدول 3)، $Q_{EC,k}$ كمية الاسمنت المصدرة إلى ليبيا بالطن في السنة، $Q_{ET,CO_2,k}$ كمية انبعاثات CO₂ الناتجة عن نقل الاسمنت من الدولة المصدرة إلى ليبيا (باستخدام البرنامج Logward)

الجدول 3: معامل انبعاث CO₂ لصناعة الاسمنت في بعض الدول

الدولة المصدرة	معامل انبعاث CO ₂ كجم CO ₂ /طن اسمنت	المصدر
تركيا	602	[11]
مصر	1163	[10]
تونس	670	[9]

4. النقل البري الداخلي (Q_{IT,CO_2})

نظرا لعدم وجود بيانات توضح كميات الاسمنت المستهلكة في المدن الليبية فقد تم تقدير استهلاك الاسمنت لبعض المدن الرئيسية الموزعة على كامل جغرافية ليبيا وفقا لنسب عدد سكانها إلى التعداد العام لسكان ليبيا كما هو موضح في الشكل (4)، واحتساب المسافة التي تفصلها عن مصانع الاسمنت بواسطة نظم المعلومات الجغرافية تم حساب انبعاثات CO₂ الناتجة عن عمليات النقل البري الداخلي باستخدام المعادلة (5)،

$$Q_{IT,CO_2} = EF_{tru,CO_2} \times \sum_{l=1}^m Q_{c,l} \times D_l \quad (5)$$

حيث: EF_{tru,CO_2} يمثل معامل انبعاث CO₂ من شاحنات النقل الليبية، $Q_{c,l}$ تشير إلى كمية الاسمنت المنقولة للمدينة والتي تقع على مسافة D_l كيلومتر من مصنع الاسمنت.

5. مرحلة البناء والتشييد ($Q_{C\&B,CO_2}$)

تشمل هذه المرحلة عملية إنشاء الوحدات الخرسانية. ذكر [40] انه على الصعيد العالمي تعتبر الخرسانة - التي يشكل فيها الاسمنت 10-15% من الخليط - مسؤولة عن 4-8% من انبعاثات CO₂ العالمية، كما ذكر [41] انه من حيث انبعاثات CO₂ حسب دورة الحياة فان مرحلة البناء تشكل 1.9% من انبعاثات القطاع المنزلي وتقدر كمية انبعاثات CO₂ للقطاع المنزلي في ليبيا بحوالي 8592750 طن CO₂ سنويا [22] وعليه:

$$Q_{C\&B,CO_2} = 0.019 Q_{R,CO_2} \quad (6)$$

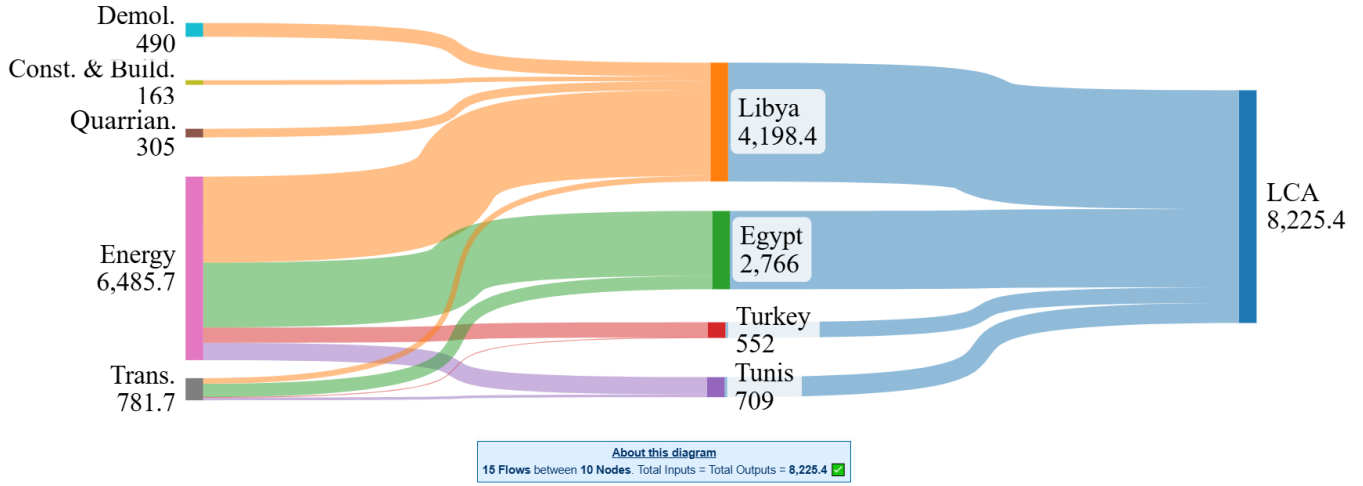
حيث Q_{R,CO_2} تمثل كمية انبعاثات CO₂ السنوية من القطاع المنزلي.

6. مرحلة الهدم ونقل النفايات للمكب

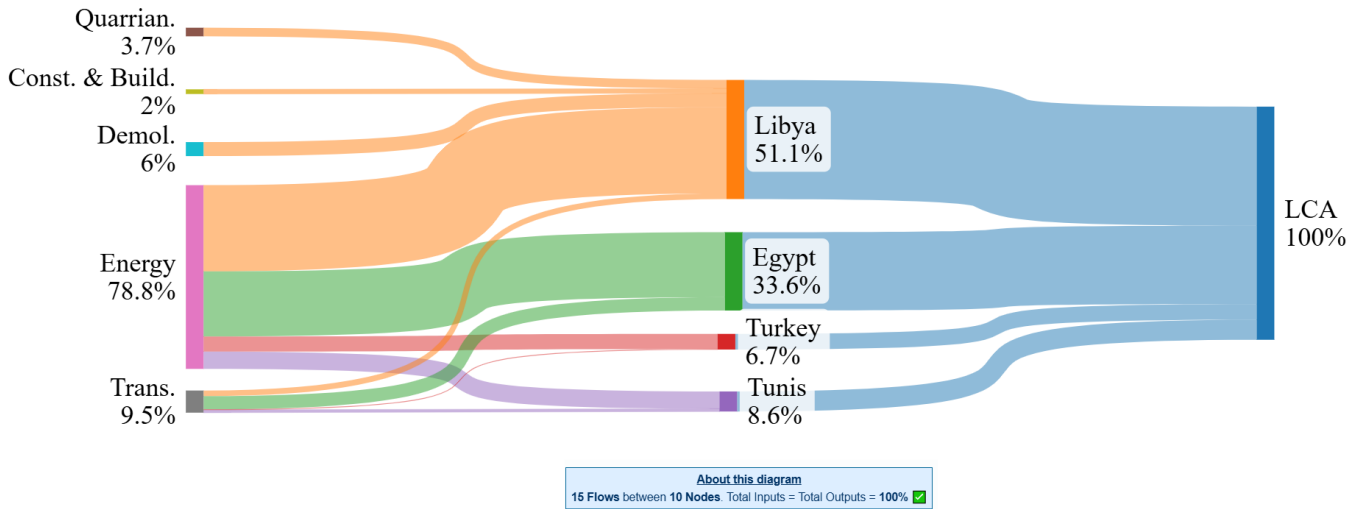
تشمل هذه المرحلة عمليات الهدم والإزالة للمباني الخرسانية لانتهاء عمرها الافتراضي أو لأغراض التطوير والتوسعة ونقل مخلفات الهدم إلى المقالب العمومية، ذكر [41] انه من حيث انبعاثات CO₂ حسب دورة الحياة، فان

يستعرض الشكلان (7، 8) مخططاً "سانكي" لانبعاثات CO₂ بوحدة كيلوطن CO₂/سنة لدورة الحياة لصناعة الاسمنت في ليبيا بالكامل من الحجر إلى المكب والنسبة المئوية لمساهمة كل مرحلة من مراحل دورة الحياة في إجمالي انبعاثات CO₂ في صناعة الاسمنت في ليبيا. وبالتالي فإنه يمكن تقدير معامل انبعاث CO₂ لصناعة الاسمنت في ليبيا بحوالي 1.083 طن CO₂ لكل طن أسمنت مستهلك في ليبيا.

معلومات عن المصنع الذي يصدر الاسمنت لليبيا- فقد تم فرض أن الاسمنت يُنقل براً من القاهرة إلى مصنع اسمنت بنغازي لمسافة 1088 كلم تقريبا، وفي حالة تونس فالاسمنت ينقل من العاصمة تونس إلى مصنع اسمنت زليتن العاصمة وطرابلس لمسافة 770 كلم تقريبا، بالإضافة إلى كمية الاسمنت المستوردة من مصر أكبر بحوالي 1.9 عنها من تونس. كذلك من الملاحظ أن انبعاثات CO₂ من النقل البحري أقل بكثير من النقل البري.



الشكل 7: مخطط "سانكي" لانبعاثات CO₂ بوحدة كيلوطن CO₂/سنة لدورة حياة صناعة الاسمنت في ليبيا



الشكل 8: مخطط "سانكي" نسبة مساهمة مراحل دورة الحياة لصناعة الاسمنت في ليبيا في انبعاثات CO₂

3. استخدام أسرات الكربون، والتي يمكن أن تقلل من انبعاث الكربون بنسبة لا تقل عن 85% [23].
4. استخدام النقل البحري في عمليات الاستيراد من تونس ومصر عوضاً عن عمليات النقل البري وبالتالي ستصبح كمية انبعاثات CO₂ نتيجة الشحن البحري لحوالي 1736 ألف طن من الاسمنت المستورد سنوياً من ميناء الإسكندرية إلى ميناء بنغازي حوالي 15851.3 طن CO₂، وكذلك الحال عند شحن 915 ألف طن من الاسمنت المستورد سنوياً من ميناء تونس إلى ميناء مصراتة ستكون كمية انبعاثات CO₂ حوالي 6423 طن CO₂ وهذا ستخفض انبعاثات CO₂ بنسبة 6.66%.

استراتيجيات الحد من التلوث في صناعة الاسمنت في ليبيا يستعرض هذا الجزء من الدراسة إمكانية تلطيف الأثر البيئي وذلك عن طريق إتباع التدابير التالية:

1. استخدام مصادر نظيفة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح لإنتاج الطاقة الكهربائية [42-45]. وبالتالي فإن التلوث الناجم عن الطاقة الكهربائية سينعدم وهذا بدوره سيققل انبعاثات CO₂ بنسبة 8,28%.
2. استخدام الغاز الطبيعي عوضاً عن الوقود الثقيل في عمليات حرق الكلنكر في الأفران [23]، وهذا سيققل انبعاثات CO₂ بنسبة 3.20%.

انبعاثات CO₂ الناتجة عن نقل البضائع برا وبحرا وجوا. كما تم استخدام برنامج Excel لمعالجة البيانات، ومثلت النتائج عن طريق برنامج Sankey/MATIC.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن معامل انبعاث CO₂ لصناعة الاسمنت في ليبيا يبلغ حوالي 1083.60 كجم CO₂/طن اسمنت وهي قيمة مرتفعة قياسا بمتوسط الانبعاثات العالمية 0.798 طن CO₂/طن اسمنت، وتقترب من انبعاثات بعض الدول كمصر وجنوب أفريقيا وميانمار التي تعتمد على الوقود التقليدي في إنتاج الطاقة لمصانع الاسمنت، وبالرغم من أن صناعة الاسمنت في ليبيا لا تعتمد على هذا النوع من الوقود بل تعتمد على وقود الغاز والوقود الثقيل اللذان لا يختلفان كثيرا في حجم انبعاثاتهما عن الفحم لكن الباحث يعتقد أن هناك أسباب أخرى لارتفاع انبعاثات CO₂ في ليبيا منها قدم معظم مصانع الاسمنت وعدم تحديثها، وما يدعم هذه التوقعات هو أن انبعاثات صناعة الاسمنت في دول مثل تونس وتركيا والهند والمملكة المتحدة اقل بكثير من انبعاثات ليبيا رغم استخدامها لنفس نوع الوقود المستخدم في ليبيا، كما قدمت الدراسة بعض التدابير والاستراتيجيات للحد من التلوث وتلطيف الضرر البيئي، وبناء على ما سبق أوصت الدراسة بالتالي:

- إجراء البحوث العلمية لتطوير صناعة الاسمنت في ليبيا من خلال تحديث المنشآت وتعديل نسب الكلنكر واستخدام الإضافات والاستفادة من تجارب الدول المتقدمة في هذا المجال.
- استهداف مصانع الاسمنت الليبية الأخرى بالبحث والتي لم تشملها هذه الدراسة.
- إعادة النظر في استيراد الاسمنت من الخارج وخاصة من الدول التي ساهمت في رفع قيمة ابعاثات CO₂ في ليبيا كالاسمنت المستورد من دولة مصر.
- ضرورة التحول الطاقة في مصانع الاسمنت إلى الاعتماد على مصادر الطاقة النظيفة كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح وهي طاقات متاحة في ليبيا بحسب الدراسات.
- وضع إستراتيجية وطنية تراعي التنمية الاقتصادية في إطار بيئة نظيفة من خلال استثمار الموارد الطبيعية وفق تكنولوجيا نظيفة وتطوير ممارسات إنتاجية واستهلاكية مستدامة وصولا إلى الاقتصاد الأخضر.

Author Contributions: "All authors have made a substantial, direct, and intellectual contribution to the work and approved it for publication."

Funding: "This research received no external funding."

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

References

- [1] D. Cheng, "Projecting future carbon emissions from cement production in developing countries," *Nature Communications*, vol. 14, p. 8213, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43660-x>
- [2] K. Devi, and V. Lakshmi. "Impacts of cement industry on Environment-An overview," *Asia Pacific Journal of Research*, vol. 1, no. 57, pp. 156-161, 2017. <https://www.researchgate.net/publication/323029097>

5. استخدام الميتاكوولين في إنتاج الخرسانة كمادة بوزولانية أو جيوبوليمر عوضا عن الاسمنت التقليدي سيؤدي إلى تقليل انبعاثات CO₂ بنسبة تقارب 70% في مرحلة الطاقة [46-50]. وبالتالي يمكن تخفيض انبعاثات CO₂ بنسبة 32.33% من إجمالي انبعاثات دورة حياة صناعة الاسمنت في ليبيا.

6. تبني سياسات ترشيد استهلاك الطاقة وكفاءة الطاقة في التوليد والاستهلاك [51،52].

7. التوسع في الأنظمة البيئية السالبة الانبعاثات، مثل الغابات والمسطحات الخضراء والطحالب [23].

8. ادراج تكلفة الضرر البيئي في الحسابات الاقتصادية يعطي المشكلة بعدا مرئيا ويدعم فرص التنافس للطاقت الصديقة للبيئة في سوق الطاقة حتى في الدول التي تدعم أسعار الطاقة مثل ليبيا [53-55].

الخلاصة والتوصيات

يشكل إنتاج الاسمنت مصدرا كبيرا لانبعاث CO₂ في ليبيا مما يستلزم اتخاذ إجراءات فورية للتخفيف من أثاره الضارة على تغير المناخ وعلى البيئة. ركزت هذه الدراسة على تقييم الأثر البيئي لصناعة الاسمنت في ليبيا، حيث تناولت بالتحليل إنتاج أربعة مصانع وهي مصنع زليتن ومصنع البرج في مدينة زليتن ومصنع الفتاح في مدينة درنة ومصنع الهوارى في مدينة بنغازي، ولأجل الوصول إلى تقييم يعكس حقيقة هذا الأثر تم استخدام تحليل تقييم شامل لدورة حياة صناعة الاسمنت (LCA) من المحجر إلى إزالة المبنى ونقل المخلفات، حيث تم تقسيم هذه الدورة إلى سبع مراحل هي مرحلة المحجر والصناعة والنقل البري للإنتاج والإنشاءات والمرحلة الأخيرة من مراحل دورة الحياة وهي الهدم والإزالة ونقل المخلفات، ولأن الدراسة -كما سبق ذكره- تناولت بالتحليل التقييم الشامل لصناعة الاسمنت في ليبيا فقد تم إدخال مرحلة جديدة إلى دورة الحياة تتمثل في مرحلة استيراد الاسمنت من الخارج، مثلت جميع المراحل في نظام شامل كما تم توضيحه في الشكل (3)، ومن اجل حساب مسافات النقل البري والبحري للاسمنت المستورد من الخارج (مصر، تونس، تركيا) وبالتالي حساب الانبعاثات الناتجة عن هذا النقل فقد تم استخدام العديد من المنصات مثل منصة GIS لتحديد المسافات الفاصلة بين مصانع الاسمنت ونقاط التوزيع في كافة ربوع الدولة الليبية. كما تم استخدام منصة Logwards وهي عبارة عن آلة حاسبة مجانية لحساب

- [3] <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>
- [4] E. Thwe, D. Khatiwada, and A. Gasparatos. "Life cycle assessment of a cement plant in Naypyitaw, Myanmar." *Cleaner Environmental Systems*, vol. 2, no. 6, p. 100007, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2020.100007>
- [5] "Fortune business insights," 2024. <https://www.fortunebusinessinsights.com/>.
- [6] International Energy Agency, 2023.
- [7] S. Mohammed, et al. "Carbon and Energy Life Cycle Analysis of Wind Energy Industry in Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 50-69, 2023. <https://doi.org/10.51646/jesed.v12i1.150>
- [8] A. Elmariami, W. El-Osta, Y. Nassar, Y. Khalifab and M. Elfleet, "Life Cycle Assessment of 20 MW Wind Farm in

- Libya," *Applied Solar Energy*, vol. 59, no. 1, p. 64–78, 2023. <https://doi.org/10.3103/S0003701X22601557>
- [9] M. Cherni, A. Sebei, B. Amor, N. Hssine, and N. Hajjaji. "Critical reviews and benchmarking Tunisian clinker and cement with Life Cycle Assessment results," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, no. 7, p. e03174, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03174>
- [10] W. Keshk, "Mitigation of greenhouse gases emissions and reduction energy consumption in cement industry in Egypt, (Case study: Arabian cements plant)," *Journal of Environmental Sciences (JES)*, vol. 52, no. 11, pp. 1-17, 2023. <https://doi.org/10.21608/jes.2023.218805.1561>
- [11] B. Kaygin. "Life cycle assessment of a cement plant in Turkey," MSc. thesis, Dokuz Eylül University, Turkey, 2022. <https://avesis.deu.edu.tr/dosya?id=79d7a7a7-0315-4a23-a490-45b3a862f55a>
- [12] Y. Nassar, et al. "Carbon footprint and energy life cycle assessment of wind energy industry in Libya," *Energy Conversion and Management*, vol. 300, no. 1, p. 117846, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117846>
- [13] L. Moretti, and S. Caro. "Critical analysis of the Life cycle assessment of the Italian cement industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 152, no. 5, pp. 198-210, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.136>
- [14] A. Pahuja, "The Indian cement sector – technological status and prospects," <https://www.ncbindia.com/>, up dated 2025.
- [15] M. Alsbhaway, and M. Inweer. "Sustainability strategy to protect Sebha-Brak road from sand encroachment," *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, 87-93. 2023. <https://doi.org/10.63318/vc243768>
- [16] M. Inweer. "Protection of Desert Roads against Sand Dunes mobilization," *Journal of Pure & Applied Sciences*, vol. 13, no. 4, pp. 808-85, 2019. <https://doi.org/10.51984/jopas.v18i4.391>
- [17] B. Akintayo, O. Olanrewaju, and O. Olanrewaju. "Life cycle assessment of ordinary Portland cement production in South Africa: Mid-Point and End-Point approaches," *Sustainability*, vol. 16, no. 7, p. 3001, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16073001>
- [18] M. Georgiades, et al. "Prospective life cycle assessment of European cement production," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 194, no. 7, p. 106998, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106998>
- [19] R. Ricardo, et al. "Environmental assessment of cement production with added graphene," *Cleaner Environmental Systems*, vol. 14, no. 9, p. 100206, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100206>
- [20] H. Ibrahim, A. Okasha, and M. Elatrash. "Emissions of SO₂, NO_x and PMs from Cement Plant in Vicinity of Khoms City in North Western Libya," *Journal of Environmental Science and Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 620-628, 2012. <https://www.researchgate.net/publication/276292750>
- [21] A. Okasha, "Effect of Al-Mergheb Portland Cement Factory On Vegetation Cover," *An-Najah University Journal for Research*, vol. 28, pp. 85-100, 2012. <http://hdl.handle.net/20.500.11888/1984>
- [22] Y. Fathi, K. Aissa, and S. Alsadi, "Air Pollution Sources in Libya," *Research & Reviews: Journal of Ecology and Environmental Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 63-79, 2018. <https://www.researchgate.net/publication/323526028>
- [23] M. Salem, et al. "Towards Green Economy: : Case of Electricity Generation Sector in Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 14, no. 1, p. 334–360, 2025. <https://doi.org/10.51646/jesd.v14i1.549>
- [24] كشادة, "صناعة الأسمنت في ليبيا وأفاق تطويرها ..مصنع أسمنت مصراتة نموذجًا," <https://www.eanlibya.com/economy/>, 2025.
- [25] ESCW, "تحسين كفاءة الطاقة واستخدامات الوقود الاحفوري الانظف في قطاعات مختارة في بعض بلدان الاسكوا E/ESCW," A/SDPD/2005/1(PART 1), 2005.
- [26] الأهلوية للأسمنت, <https://ahcc.ly/cement-industry/>, 2025.
- [27] البرج للأسمنت, <https://aucc.com.ly/investment-areas/al-borg-cement-factory/>, 2025.
- [28] BBC, "Climate change: The massive CO₂ emitter you may not know about," <https://www.bbc.com/news/science-environment-46455844>, 2018.
- [29] R. Fatahi, et al. "Modeling of energy consumption factors for an industrial cement vertical roller mill by SHAP-XGBoost: (a conscious lab) approach," *Scientific Reports*, vol. 12, p. 7543, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11429-9>.
- [30] E. Teo, G. Lin, and L. Lim. "Energy-related CO₂ emissions from the manufacturing and transportation of cement," *International Journal of Sustainable Society*, vol. 2, no. 4, pp 327-340, 2010. <https://doi.org/10.1504/IJSoc.2010.036939>
- [31] N. Yasser, K. Aissa, and S. Alsadi, "Estimation of Environmental Damage Costs from CO₂e Emissions in Libya and the Revenue from Carbon Tax Implementation," *Low Carbon Economy*, vol. 8, pp. 118-132, 2017. <https://doi.org/10.4236/lce.2017.84010>
- [32] N. Yasser, M. Salem, K. Iessa, I. AlShareef, K. Ali and M. Fakher, "Estimation of CO₂ emission factor for the energy industry sector in libya: a case study," *Environment, Development and Sustainability*, vol. 23, pp. 13998-14026, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01248-9>
- [33] K. Iessa, Y. Nassar and M. Salem, "Quantities inventory of CO₂ emitted from the energy industry sector in Libya: A case study," in *The International Scientific Symposium on Environmental Science March 9th -10th, 2022*, Tulkarm-Palestine, 2022.
- [34] A. Makhzom, et al. "Carbon Dioxide Life Cycle Assessment of the Energy Industry Sector in Libya: A Case Study," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 3, pp. 145-163, 2023. <https://ijeess.org/index.php/ijeess/article/view/58>
- [35] A. Makhzom, et al. "Estimation of CO₂ emission factor for Power Industry Sector in Libya," in *The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES 2023)*, Gaza Strip-Palestine, 2023. <https://doi.org/10.1109/ieCRES57315.2023.10209528>
- [36] Y. Nassar, M. Salem and H. El-Khozondar. "Estimation of CO₂ Emissions from the Electric Power Industry Sector in Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 14, no. 1, p. 42–55, 2025. <https://doi.org/10.51646/jesd.v14i1.415>
- [37] M. Salem, et al. "Estimation of CO₂ Emission within Libya's Electricity Generation Sector," *Next Research*, vol. 2, no. 3, p. 100567, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100567>
- [38] <https://nmcly.com/index.php/alkhamat-almndnyt/alkhamat-almndnyt-allaflyzy/altynat>, 2024.
- [39] <https://www.facebook.com/photo/?fbid=4283064995065312&set=a.209066049131914>.

- [40] Enterprise, "hbrjwh] hboqv," <https://enterprise.press/ar/greeneconomys/>
- [41] S. Cho, and C. Chae. "A Study on Life cycle CO2 Emissions of Low-Carbon Building in South Korea," *Sustainability*, vol. 8, no. 6, p. 579, 2016. <https://doi.org/10.3390/su8060579>
- [42] M. Khaleel, et al. "Towards Sustainable Renewable Energy," *Applied Solar Energy*, vol. 59, no. 6, pp. 557–567, 2023. <https://doi.org/10.3103/S0003701X23600704>
- [43] M. Khaleel, et al. "Evolution of emissions: The role of clean energy in sustainable development," *Challenges in Sustainability*, vol. 12, no. 2, pp. 122-135, 2024. <https://doi.org/10.56578/cis120203>
- [44] M. Andeef, et al. "Transitioning to Solar Fuel Instead of Fossil Fuel in the Electricity Industry," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 4, p. 32–46, 2023. <https://ijeess.org/index.php/ijeess/article/view/68>
- [45] M. Khaleel, et al. "Towards Hydrogen Sector Investments for Achieving Sustainable Electricity Generation," *Solar energy and sustainable development Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 71-96, 2024. <https://doi.org/10.51646/jsesd.v13i1.173>
- [46] Y. Abiodun, et al. "Cutting Cement Industry CO2 Emissions through Metakaolin Use in Construction," *Atmosphere*, vol. 13, no. 9, p. 1494, 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13091494>
- [47] F. Farouj, and E. Al-zwai. "The Effect of Burning Time of Pozzolana Southern Libya on the Properties of Concrete," *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 24-29, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_05
- [48] E. Alajwad and A. Akasha. "Resistance of Geopolymer Mortar to Sulphates Attack (Using Local Pozzolana in Southern Libya)," *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 2, no. 1, pp. 90-94, 2024. <https://waujpas.com/index.php/journal/article/view/63/40>
- [49] M. Aqila and F. Farouj. "Effect of Mixing Ratios Using Local Pozzolana as a Partial Cement Replacement on Plastic Cracking in Cement Mortar," *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 92-97, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_10
- [50] A. Saïdy and F. Farouj. "Effectiveness of Calcium Hydroxide as an Alkaline Activator of Geopolymer Mortar," *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 132-137, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_16
- [51] M. Eteriki, W. El-Osta, Y. Nassar and H. El- Khozondar. "Effect of Implementation of Energy Efficiency in Residential Sector in Libya," in *The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES 2023)*, Gaa Strip- Palestine, 2023. <https://doi.org/10.1109/ieCRES57315.2023.10209521>
- [52] M. Abdunnabi, N. Etiab, F. Yasser, H. El-Khozondar and R. Khargotra. "Energy savings strategy for the residential sector in Libya and its impacts on the global environment and the nation economy," *Advances in Building Energy Research*, vol. 17, no. 4, pp. 379-411, 2023. <https://doi.org/10.1080/17512549.2023.2209094>
- [53] A. Awad, et al. "Energy, economic and environmental feasibility of energy recovery from wastewater treatment plants in mountainous areas: a case study of Gharyan city – Libya," *Acta Innovations*, vol. 50, no. 4, pp. 46-56, 2023. <https://doi.org/10.62441/actainnovations.v50i.335>
- [54] A. Asfour, et al. "Photovoltaic solar energy for street lighting: A case study at Kuwaiti Roundabout, Gaza Strip, Palestine," *Power Eng. Eng. Thermophys*, vol. 3, no. 2, pp. 77-91, 2024. <https://doi.org/10.56578/peet030201>
- [55] M. Al-Maghalseh, "The Environmental Impact and Societal Conditions of PV Power Plants: A Case Study of Jericho Gate-Palestine Stat Of," *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 16-31, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_03