SEBHA UNIVERSITY CONFERENCE PROCEEDINGS, VOL.5 NO. 4 2026
DOI: 10.51984/2HMAFX65

وقائع مؤتمرات جامعة سبها
Sebha University Conference Proceedings
Confrence Proceeeding homepage: http://www.sebhau.edu.ly/journal/CAS

هل تحتاج ليبيا الى اشتراطات التجمد والذوبان في تصميم الخرسانة؟ تحليل سجلات درجات الحرارة اليومية لعشر سنوات في 25 مدينة ليبية

أبوسيف اشتيوي [a] , فؤاد فروج [b]
[a] قسم الهندسة المعمارية و تخطيط المدن، كلية الهندسة، جامعة وادي الشاطئ ، ليبيا
[b] قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة وادي الشاطئ ، ليبيا

الملخص

يشيع في الممارسة الهندسية الليبية افتراض ان ظاهرة التجمد والذوبان لا تخص التصميم الخرساني المحلي، وعليه تختبر هذه الدراسة هذا الافتراض من خلال سؤالين: هل تحدث في المدن الليبية دورات تجمد وذوبان فعلية؟ وكيف تصنف هذه المدن وفق فئات التعرض في الاكواد المختصة؟ حللت الدراسة السلاسل اليومية لدرجة الحرارة الدنيا في 25 مدينة عبر عشرة مواسم شتوية (2016/2015 الى 2026/2025) باستخدام بيانات قاعدة NASA POWER، وبناء على هذه البيانات اتبع البحث مسارا من عدة مراحل يبدأ بحصر ايام التجمد، ثم غربلتها بمعيار الدورة الكاملة بنطاق عازل (±1 درجة مئوية)، ثم تصحيح النتائج بمقارنة ارتفاع الخلية بالارتفاع الفعلي للمدينة وصولا الى التصنيف حسب الكود. سجل وطنيا 227 يوم تجمد في العقد، وانعدم التجمد تماما في الشريط الساحلي كله. وكشف تصحيح الارتفاع انقلابات مهمة: هبطت حصيلة ايام التجمد في غات من 58 يوما الى 3 لان متوسط ارتفاع الخلية اعلى من المدينة بنحو 350 مترا، بينما ارتفعت في نالوت من 5 ايام الى 62 وفي غريان من 25 الى 47 لان متوسط ارتفاع الخلية اقل من ارتفاع المدينتين. انتهى التصنيف الى اسناد جميع المدن المدروسة عمليا الى الفئة F0: عشر مدن ساحلية بسجل صفري مطلق عبر العقد، وبقية المدن بأحداث من الندرة والضحالة بحيث لا ترقى الى التعرض الذي وضعت اشتراطات المقاومة لأجله، مع توصية بتوثيق ميداني للمدن الجبلية التي تستند ارقامها الى تقدير تصحيحي.

الكلمات المفتاحية:
التجمد والذوبان
الخرسانة
فئات التعرض
ليبيا
المناخ

Does Libya Need Freeze–Thaw Provisions in Concrete Design? A Ten-Year Analysis of Daily Temperature Records in 25 Libyan Cities

Abusaif Ishteewi [a], Fouad Farouj [b]

[a] Department of Architecture and Urban Planning, Faculty of Engineering, Wadi Al-Shati University, Libya
[b] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Wadi Al-Shati University, Libya

ABSTRACT

A widespread assumption in Libyan engineering practice holds that freeze–thaw action is irrelevant to local concrete design, yet this assumption has never been tested against climatic records. This study examines it through two questions: do genuine freeze–thaw cycles occur in Libyan cities, and how should these cities be classified under the exposure categories of international concrete codes? Daily minimum air temperature series for 25 cities over ten winter seasons (2015/2016–2025/2026) were retrieved from the NASA POWER database and analyzed in four stages: counting raw freezing days ($T_{min} \leqslant 0$ °C); screening them with a qualified-cycle criterion ($T_{min} \leqslant -1$ °C and $T_{max} \geqslant +1$ °C, a ±1 °C buffer); correcting for grid-cell elevation bias using the standard lapse rate of 6.5 °C/km against documented city elevations; and classifying each city according to the code. Nationally, 227

Keywords:
Concrete durability
Exposure classes
Freeze–thaw cycles
Libya
NASA POWER

*Corresponding author:
E-mail addresses: abu.ishteewi@wau.edu.ly ,(F. Farouj)fff119631963@gmail.com
Article History : Received 30 May 2026 - Received in revised form 30 September 2026 - Accepted 11 November 2026

raw freezing days were recorded in the decade, with none along the entire coastal strip. Elevation correction reversed the apparent map: Ghat fell from 58 days to 3, while Nalut rose from 5 to 62 and Gharyan from 25 to 47, shifting the likely exposure belt to the Nafusa escarpment. The deepest event nationwide was −2.9 °C, and the worst corrected case corresponds to roughly 2.3 potential cycles per year. All 25 cities are judged to fall practically within exposure class F0, with low-cost field temperature logging recommended for the mountain cities whose figures rest on corrective estimation.

المقدمة

تتضمن اكواد تصميم الخرسانة المعتمدة عالميا مثل ACI 318 [1] والمواصفة الاوروبية EN 206 [2]، اشتراطات خاصة لمقاومة التجمد والذوبان تشمل الخرسانة الحابسة للهواء وحدودا لنسبة الماء الى الاسمنت وحدا أدنى للمقاومة، وتقاس مقاومة الخلطات لهذه الظاهرة مخبريا وفق معايير قياسية أبرزها ASTM C666 [3]. وفي المقابل، جرت العادة في الممارسة الليبية على تجاوز هذه الاشتراطات كليا، استنادا الى قناعة عامة بان مناخ البلاد الحار يجعلها بعيدة عن هذا التأثير. هذه القناعة قد تكون صحيحة، لكنها تستند حتى الان الى الانطباع العام لا الى دراسة علمية تفحص السجل المناخي الليبي في ضوء متطلبات الاكواد العالمية.

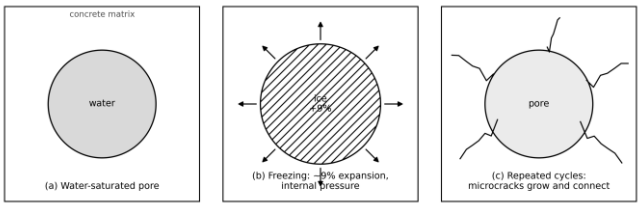
الكود ACI 318 يخصص فئة تعرض مستقلة هي الفئة F0 للعناصر الخرسانية في المناخات التي لا يتوقع فيها حدوث تجمد، وتعفى بموجبها من كامل الاشتراطات المذكورة [1]. وبذلك يتحول السؤال العام "هل نحتاج اشتراطات التجمد والذوبان؟" الى سؤال محدد: اي المدن الليبية يمكن اسنادها الى الفئة F0 بناء على الدليل المناخي؟

غير ان الاجابة في السياق الليبي تصطدم بمشكلة بنيوية وهي ان شبكة الرصد الارضي تعتبر شبه غائبة في وسط البلاد وجنوبها، والبديل العملي الوحيد هو التحليل المناخي عبر منصة NASA POWER [4]، وهي نواتج نمذجة لها حدود دقة معروفة وموثقة [5]. وعليه تقوم الدراسة على سؤالين: هل تحدث في المدن الليبية دورات تجمد وذوبان فعلية بتكرار يعتد به؟ وكيف تصنف هذه المدن وفق فئات التعرض في الكود؟ وتجيب عنهما عبر مسار من أربع مراحل يشرح في القسم الثالث.

الخلفية العلمية والدراسات السابقة

ظاهرة التجمد والذوبان

يتمدد الماء بنحو 9% من حجمه عند تجمده. فاذا تغلغل في مسامات الخرسانة ثم انخفضت الحرارة دون الصفر، ولد تجمده ضغطا داخليا على جدران المسامات، وإذا تجاوز هذا الضغط مقاومة الشد نشأت شقوق دقيقة تتسع وتترابط مع تكرار الدورات، وينتهي المسار الى تدهور في الخواص الميكانيكية للعنصر. وتتحكم في شدة الضرر عوامل اهمها درجة تشبع المادة بالماء، وبنية المسامات، وعدد الدورات، ونمط التذبذب الحراري. ويوضح الشكل (1) الية ضرر التجمد والذوبان داخل الخرسانة.



شكل1 الية ضرر التجمد والذوبان: (a) مسام مشبع بالماء داخل الخرسانة؛ (b) تجمد الماء وتمدده بنحو 9% مولدا ضغطا داخليا على جدران المسام؛ (c) نشوء شقوق دقيقة تتسع وتترابط مع تكرار الدورات. (رسم توضيحي أصلي)

وبالتالي فان الضرر ناتج عن الدورة الكاملة (تجمد ثم ذوبان) وليس عن البرودة في ذاتها، وعليه فان عد الايام الباردة وحده لا يعني شيئا ما لم يتحقق اكتمال الدورة. ايضا يعتبر عمق القاع الحراري للدورة عاملا حاسما، اذ اظهرت التحليلات الاحصائية للتجارب المخبرية ان التدهور يتسارع عشرات الاضعاف عند خفض قاع الدورة من −6 الى −18 درجة مئوية [6]، اي ان الانخفاضات البسيطة تحت الصفر تقع في أدنى سلم الخطورة حتى لو اكتملت الدورة.

الدراسات السابقة

تنقسم دراسات وادبيات التجمد والذوبان الى عدة محاور. الاول دراسات الاقاليم الباردة، حيث وجود الظاهرة مسلم به ويتجه البحث الى قياس شدة الضرر وتطوير خلطات مقاومة، ومنها دراسات الخرسانة الحابسة للهواء تحت مئات الدورات [7]. والثاني الدراسات المخبرية المعيارية وفق بروتوكولات مثل ASTM C666 وRILEM [8]، وهي تفترض وجود التعرض للتجمد والذوبان في تصميم التجربة ذاتها.

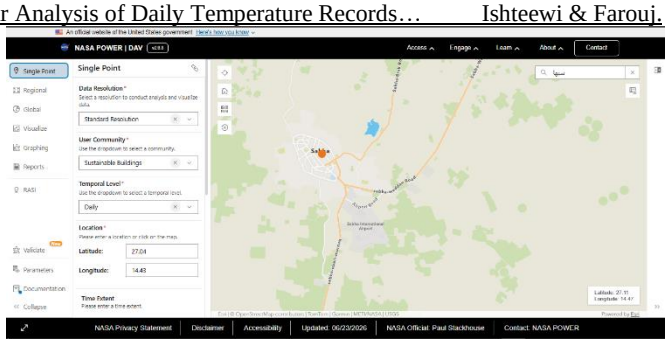
وفي مسار اخر وثيق الصلة، لاحظ باحثون في الخليج العربي ان استيراد اكواد صممت اساسا لمناخات معتدلة كان سببا رئيسيا في التدهور المبكر للمنشآت هناك، واقترحوا تقسيما مناخيا اقليميا (حار-جاف وحار-رطب) كخطوة تأسيسية تسبق اي اشتراط تصميمي [9]، وتطور هذا المسار لاحقا الى مقترح كود خليجي [10] ودراسات ميدانية على منشآت عمرها ثلاثون الى خمسون عاما وثقت انماط التدهور الفعلية [11].

اما عن مصدر البيانات، فقد اعتمدت دراسات عديدة في بيئات نامية قليلة المحطات على قاعدة NASA POWER، ومنها تقييم حديث في نيجيريا [12] ودراسات في تطبيقات الطاقة [13]، وتؤكد نتائجها صلاحية هذه البيانات للتحليلات الاقليمية طويلة المدى.

البيانات والمنهجية

مصدر البيانات ونطاق الدراسة

اعتمدت الدراسة قاعدة NASA POWER (اعداد Sustainable Buildings، دقة يومية، استخلاص نقطي، مخرجات CSV)، وجمعت لكل مدينة السلسلة اليومية الكاملة لدرجة الحرارة الدنيا T2M_MIN من 1 ديسمبر 2015 الى 31 مارس 2026، اي 3774 يوما متصلا، لخمس وعشرين مدينة تغطي الاقاليم الاربعة: الساحل (طرابلس، الزاوية، زوارة، مصراتة، سرت، بنغازي، درنة، طبرق، اجدابيا)، والمرتفعات الشمالية (غريان، نالوت، ترهونة، بني وليد، البيضاء)، والوسط (ودان، جالو، نسمة، الشويرف)، والجنوب (سبها، براك، اوباري، مرزق، القطرون، غات، الكفرة). ويوضح الشكل (2) واجهة الاستخراج والاعدادات المستخدمة



شكل 2 لقطة شاشة لواجهة NASA POWER Data Access Viewer موضحا عليها اعدادات الطلب (صورة من موقع NASA POWER)

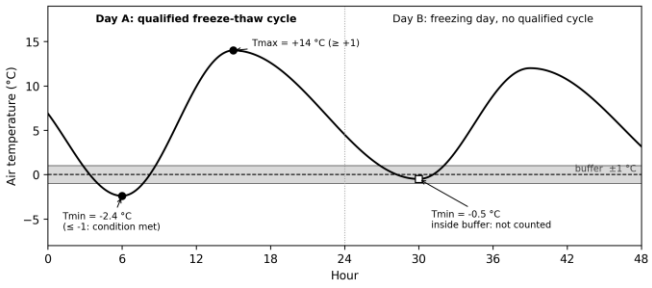
وتجدر الاشارة الى ان قيمة كل نقطة في هذه القاعدة تمثل متوسط خلية شبكية تقارب مساحتها 50×60 كم، وان الارتفاع المرافق للبيانات هو متوسط ارتفاع الخلية كلها وليس ارتفاع المدينة، وهي نقطة جوهرية تبنى عليها المرحلة الثالثة من التحليل. واختيرت نافذة عشر سنوات لان الغرض تصنيف غربلة يكشف وجود الظاهرة او انعدامها، لا حساب معدلات مناخية معيارية تتطلب ثلاثين سنة [14]، ولان العقد الاخير اصدق تمثيلا للمناخ التشغيلي للمنشآت التي تصمم اليوم. اما ارتفاعات المدن الفعلية فوثقت من قاعدة GeoNames الجغرافية [15] مع تحقق من ارتفاع المدن عبر نموذج التضاريس NASA SRTM [16]، وتعذر توثيق ست بلدات صغيرة (نسمة، براك، الشويرف، ودان، بني وليد، جالو) فعوملت ارتفاعاتها كغير موثقة.

مراحل التحليل الاربع

صممت المنهجية على أربع مراحل كالتالي:

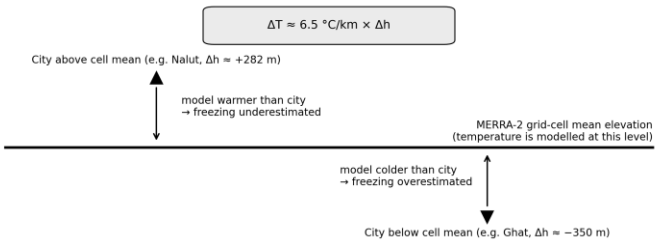
المرحلة الاولى، حصر ايام التجمد: يعرف يوم التجمد بانه كل يوم بلغت فيه الحرارة الدنيا الصفر المئوي او اقل، ولكنه لا يثبت اكتمال دورة.

المرحلة الثانية، معيار الدورة الكاملة: تعرف الدورة الكاملة بانها يوم تحقق فيه الشرطان معا: حرارة دنيا ≥ -1 درجة مئوية وحرارة عظمى $\leq +1$ درجة مئوية في اليوم نفسه. النطاق العازل ± 1 درجة يستبعد التذبذبات الوهمية الواقعة ضمن هامش خطأ المصدر ويضمن عبورا مؤكدا لنقطة الصفر في الاتجاهين، وذلك اتساقا مع المنهجيات المناخية المعتمدة في حساب الدورات من الرصد اليومي [17]. ويوضح الشكل (3) الدورة الكاملة بالرسم.



شكل 3 التعريف الاجرائي للدورة الكاملة على مدى يومين متتاليين افتراضيين: اليوم A يحقق الشرطين معا (الدنيا ≥ -1 والعظمى $\leq +1$) فيحتسب دورة كاملة، بينما اليوم B رغم انخفاضه دون الصفر يقع قاعه داخل النطاق العازل المظلل (± 1 °م) فلا يحتسب (رسم توضيحي أصلي).

المرحلة الثالثة، تصحيح الارتفاع: عند اختلاف ارتفاع الخلية عن ارتفاع المدينة اختلافا معتبرا، تحمل السلسلة الحرارية انحيازا منتظما يمكن تقديره من معدل التناقص الحراري القياسي 6.5 درجة مئوية لكل كيلومتر [18]. حسب الفارق بين الارتفاعين لكل مدينة موثقة، ثم اعيد عد التصحيح لدرجة الحرارة بمقدار الانحياز تقديرا هندسيا لا رصدا مباشرا. ويوضح الشكل (4) تصنيف انحياز الارتفاع حسب الموقع.



شكل 4 توضيح انحياز الارتفاع: بيانات الخلية تمثل الحرارة عند متوسط ارتفاع الخلية، فاذا كانت المدينة اعلى من هذا المتوسط ظهرت في البيانات ادفا من واقعها (حالة نالوت) وإذا كانت اخفض ظهرت أبرد من واقعها (حالة غات) (رسم توضيحي أصلي).

المرحلة الرابعة، التصنيف حسب المدينة الى الفئة F0 إذا كان سجلها صفريا عبر العقد، او كانت احداثها من الندرة والضحالة بحيث لا تشكل تعرضا بالمعنى الذي وضعت اشتراطات F1 لأجله، مع التوصية بتوثيق ميداني حيثما كانت الارقام ناتج تقدير تصحيحي لا رصد مباشر. ويوضح الشكل (5) المراحل التحليلية حسب الاتي.



شكل 5 المخطط الانسيابي لمراحل التحليل الاربع مع ناتج كل مرحلة.

النتائج

خريطة التجمد وبنيته الزمنية

يعرض الجدول (1) الحصيلة الكاملة، حيث سجل اجمالي 227 يوم تجمد في العقد، مع انعدام تام على الشريط الساحلي كله من زوارة الى طبرق (بقيعان حرارية بين +3.4 و+9.1 درجة) يمتد الى ترهونة وجالو، بينما سجل الجنوب الغربي اعلى القيم: غات (58 يوما) تليها مجموعة متقاربة تضم القطرون وغريان واوباري ومرزق وسبها (21 الى 25 يوما).

زمنيا يتركز التجمد كله في ثلاثة أشهر: يناير وحده يستأثر بنحو ثلاثة ارباع الاحداث (في غات 36 من 58)، ويتقاسم ديسمبر وفبراير الباقي، ولم يسجل اي حدث في مارس. والاحداث ليست روتينا سنويا بل نوبات برد تتكتل في شتاءات بعينها (أبرزها 2017/2016 و2019/2018 و2022/2021) تتخللها شتاءات شبه خالية. اما الشدة فهامشية في كل البلاد: أدنى قيمة مطلقة في العقد كله −2.88 درجة (سبها)، وجميع الاحداث محصورة في النطاق من 0 الى −3 درجات. كما ان اغلب ايام التجمد تقع داخل الشريط من −1 الى 0 الذي يستبعده النطاق العازل: فمن أصل 227 يوما لا يجتاز شرط القاع (≤ -1) سوى 63 يوما، وتختفي ايام أربع مدن كاملة عنده (نالوت، بني وليد، ودان، الزاوية).

جدول 1 نتائج المرحلتين الاولى والثانية للمدن الخمس والعشرين، مواسم 2016/2015 الى 2026/2025 وارتفاعات المدن

المدينة	العرض/الطول	ارتفاع الخلية (م)	ارتفاع المدينة (م)	ايام 0≥	ايام 1−≥	القاع (°م)
غات	24.96/ 10.17	1023	673	58	22	2.83−
القطرون	24.93/ 14.58	513	518	25	6	2.34−
غريان	32.17/ 13.02	604	704	25	10	2.47−
مرزق	25.92/ 13.92	478	449	24	6	2.36−
اوباري	26.59/ 12.77	568	463	24	6	2.40−
سبها	27.04/ 14.43	432	421	21	4	2.88−
نسمة	31.39/ 13.33	525	غير موثق	17	4	1.83−
براك	27.55/ 14.27	424	غير موثق	12	2	2.02−
الشويرف	29.99/ 14.26	396	غير موثق	7	2	1.42−
الكفرة	24.18/ 23.28	421	382	5	1	1.50−
نالوت	31.88/ 10.98	358	640	5	0	0.56−
بني وليد	31.75/ 14.02	376	غير موثق	2	0	0.90−
ودان	29.16/ 16.15	366	غير موثق	1	0	0.34−
الزاوية	32.75/ 12.72	129	20	1	0	0.22−
ترهونة	32.43/ 13.63	206	391	0	0	1.85+
جالو	29.05/ 21.50	75	غير موثق	0	0	2.22+
طبرق	32.08/ 23.96	111	50	0	0	3.41+
سرت	31.16/ 16.62	71	27	0	0	4.82+
زوارة	32.93/ 12.09	13	5	0	0	5.55+
مصراتة	32.38/ 15.09	8	8	0	0	7.55+
البيضاء	32.76/ 21.75	111	623	0	0	7.84+
بنغازي	32.11/ 20.08	34	5	0	0	8.17+
درنة	32.76/ 22.63	94	30	0	0	8.23+
اجدابيا	30.76/ 20.22	10	7	0	0	8.53+
طرابلس	32.90/ 13.18	17	7	0	0	9.08+

تصحيح الارتفاع يعيد رسم الخريطة

كشفت مقارنة ارتفاعات الخلايا بارتفاعات المدن الموثقة فوارق تصل الى مئات الامتار في الاتجاهين. يعرض الجدول (2) نتيجة اعادة العد بعد التصحيح للمدن الاحدى عشرة الموثقة، وتتلخص المحصلة في ثلاث ملاحظات.

جدول 2 تصحيح انحياز الارتفاع (معدل تناقص 6.5 °م/كم). الانحياز الموجب يعني نموذجا أبرد من واقع المدينة والسالب عكسه.

المدينة	ارتفاع الخلية (م)	ارتفاع المدينة (م)	الانحياز المقدر(°م)	ايام 0≥ خام	ايام 0≥ بعد التصحيح	مرشحو الدورة بعده
غات	1023	673	2.28+	58	3	0
نالوت	358	640~	1.83−	5	62	23
غريان	604	704	0.65−	25	47	19
اوباري	568	463	0.68+	24	12	3
مرزق	478	449	0.19+	24	21	5
القطرون	513	518	0.03−	25	26	6
سبها	432	421	0.07+	21	16	4
الكفرة	421	382	0.25+	5	4	1
ترهونة	206	391	1.20−	0	0	0
البيضاء	111	623	3.33−	0	0	0
الزاوية	129	20	0.71+	1	0	0

المناقشة

ابسط طريقة لقراءة النتائج هي النظر الى اسوأ حالة في البلاد. اعلى تقدير سجلته الدراسة هو نالوت بعد تصحيح الارتفاع: 23 يوم دورة محتملة خلال عشر سنوات، اي بمعدل 2.3 دورة في السنة، ما يعادل ليلتين الى ثلاث ليال في العام، وتليها غريان بما لا يتجاوز دورتين في السنة، وبقية المدن دون ذلك بكثير او عند الصفر تماما. ولوضع هذه الارقام في سياقها الهندسي تكفي مقارنتها بظروف الاختبار المخبري القياسي. حيث يعرض اختبار ASTM C666 العينة لما يصل الى ثلاثمئة دورة متعاقبة، كل دورة منها تجري على خرسانة مشبعة بالماء وتهبط الى −18 درجة مئوية [3]. في المقابل، لا يتجاوز أعمق حدث سجلته هذه الدراسة −2.9 درجة، وهو اضحل حتى من أخف الانظمة المخبرية المدروسة (−6 درجات) التي اظهرت عندها التجارب تدهورا ابطأ بعشرات الاضعاف منه عند الانظمة القياسية [6]. اي ان منشأة في أبرد موقع ليبي تحتاج نحو 130 عاما لتتراكم عليها مجرد عدد دورات اختبار مخبري واحد. يضاف الى ذلك ان الية الضرر تشترط تشبع المسامات بالماء وقت التجمد، وهو شرط يجعل الشتاء الليبي الجاف تزامنه مع ليالي التجمد القليلة امرا نادرا، وان بقي غير مشمول في هذه الدراسة.

بناء على ذلك، فان الحكم الهندسي الذي تنتهي اليه الدراسة هو ان جميع المدن الليبية المدروسة تقع عمليا ضمن الفئة F0: عشر مدن ساحلية بسجل صفري مطلق عبر العقد، وبقية المدن باحداث من الندرة والضحالة والجفاف بحيث لا ترقى الى التعرض الذي وضعت اشتراطات F1 لأجله. وتوصي الدراسة، بتركيب مسجل حرارة ارضي منخفض الكلفة لموسم شتوي واحد على الاقل في المدن الجبلية (جرف نفوسة والجبل الاخضر)، حيث ان ارقامها اما ناتج تقدير تصحيحي لا رصد مباشر واما تحفها شواهد نوعية محلية.

الخلاصة والتوصيات

تأتي نتائج هذه الدراسة لتقدم اعترافاً علمياً وتوثيقاً منهجياً لصحة القناعة العامة السائدة في الممارسة الهندسية الليبية، والتي كانت تفترض لعقود عدم الحاجة لاشتراطات التجمد والذوبان استناداً إلى الانطباع المناخي العام لقد أثبت الاختبار العلمي لسجلات عقد كامل (2015-2026) أن هذا الحدس المهني كان دقيقاً؛ حيث كشفت النتائج عن حصانة مطلقة للشريط الساحلي من أي أحداث تجمد. وحتى في أكثر المناطق عرضة للتجمد في المرتفعات الجبلية، أظهرت المعالجة الهندسية بتصحيح الارتفاع أن الأحداث تظل "نادرة وضالة" بقيعان حرارية لا تنخفض عن −2.9 درجة مئوية، وبمعدل لا يتجاوز 2.3 دورة سنوية. وبمقارنة هذه المعطيات بظروف الاختبارات المعيارية مثل ASTM C666، يتضح أن المنشأ في ليبيا يحتاج لقرون ليتراكم عليه ضرر

يعادل دورة اختبار مخبري واحد، مما يؤكد سلامة إسناد جميع المدن المدروسة إلى الفئة F0 وإعفائها من تكاليف واشتراطات الخرسانة الحابسة للهواء.

ولتعزيز هذه النتائج وتطويرها مستقبلاً، يوصي الباحثون بضرورة الانتقال من طور النمذجة إلى التحقق الميداني المباشر عبر التنسيق مع مصلحة الأرصاد الجوية الليبية لمطابقة البيانات، مع التأكيد على أهمية تركيب أجهزة تسجيل حرارة أرضية ((Data Loggersفي المدن الجبلية لمدة موسم شتوي واحد لتأكيد دقة التقديرات التصحيحية. كما تدعو الدراسة إلى توسيع النطاق الزمني للبحث ليشمل 30 عاماً لاستيفاء المعدلات المناخية المعيارية، مع ضرورة إجراء بحوث تكميلية تدرس أثر "الجفاف الشتوي" الليبي كعامل حماية طبيعي يقلل من احتمالات تشبع الخرسانة وقت التجمد، وصولاً إلى تحديث الكودات الوطنية بناءً على هذه الحقائق العلمية المثبتة.

قائمة المراجع

[1] ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

[2] EN 206:2013, Concrete — Specification, performance, production and conformity. Brussels: European Committee for Standardization (CEN).

[3] ASTM C666/C666M, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[4] R. Gelaro et al., "The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)," Journal of Climate, vol. 30, no. 14, pp. 5419–5454, 2017.

[5] NASA POWER Project, "Methodology: Meteorology — Validation against surface observations," NASA Langley Research Center.[Online].Available:https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/

[6] F. Gong, D. Zhi, J. Jia, Z. Wang, Y. Ning, B. Zhang, and T. Ueda, "Data-Based Statistical Analysis of Laboratory Experiments on Concrete Frost Damage and Its Implications on Service Life Prediction," Materials, vol. 15, no. 18, Art. no. 6282, Sep. 2022, doi: 10.3390/ma15186282.

[7] H. Shang et al., "Freeze-thaw durability of air-entrained concrete," The Scientific World Journal, 2013.

[8] RILEM TC 176-IDC, "Test methods of frost resistance of concrete," RILEM Publications.

[9] M. N. Haque, H. Al-Khaiat, and A. Kazaz, "Climatic zones—A prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf," Building and Environment, vol. 42, no. 6, pp. 2410–2416, 2007.

[10] H. Al-Khaiat, B. Jones, and M. N. Haque, "Designing durable concrete structures in the Arabian Gulf: A draft code," in Proc. 32nd Conf. Our World in Concrete and Structures, Singapore, 2007.

[11] M. G. Sohail, R. Kahraman, N. G. Ozerkan, N. A. Alnuaimi, B. Gencturk, M. Dawood, and A. Belarbi, "Reinforced Concrete Degradation in the Harsh Climates of the Arabian Gulf: Field Study on 30-to-50-Year-Old Structures," Journal of Performance of Constructed Facilities, vol. 32, no. 5, Art. no. 04018059, Oct. 2018, doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001204.

[12] "Evaluating the accuracy of MERRA-2 reanalysis data against in-situ observations under varying weather conditions," Nigerian Journal of Theoretical and Environmental Physics, 2026.

[13] "Validation and performance of satellite meteorological dataset MERRA-2 for solar and wind applications," Energies, vol. 14, no. 4, p. 882, 2021.

[14] WMO, Guidelines on the Calculation of Climate Normals, WMO-No. 1203. Geneva: World Meteorological Organization, 2017.

[15] GeoNames Geographical Database. [Online]. Available: https://www.geonames.org/

[16] T. G. Farr et al., "The Shuttle Radar Topography Mission," Reviews of Geophysics, vol. 45, RG2004, 2007.

[17] GLISA (Great Lakes Integrated Sciences and Assessments), "Freeze-Thaw Cycles: Methodology," University of Michigan. [Online]. Available: https://glisa.umich.edu/

[18] ISO 2533:1975, Standard Atmosphere. Geneva: International Organization for Standardization.