International Science and Technology Journal
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
Volume 37 العدد
Part 2 المجلد
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
International Science and Technology Journal
ISTJ

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

| | | |
|---|---|---|
| Received | 2025/10/30 | تم استلام الورقة العلمية في |
| Accepted | 2025/11/28 | تم قبول الورقة العلمية في |
| Published | 2025/11/29 | تم نشر الورقة العلمية في |


# إضافة ثاني أكسيد التيتانيوم كبديل جزئي من وزن الأسمنت في الخلطة الخرسانية

**حنان علي الخويلدي، ألاء أحمد العماري، راضية أحمد حميدة**

قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة الزاوية – ليبيا

h.alkauwaylidi@zu.edu.ly

**الملخص:**

يتناول هذا البحث دراسة تأثير إضافة ثاني أكسيد التيتانيوم إلى الخرسانة كحل مبتكر لمواجهة التلوث الهوائي وتعزيز خاصية التنظيف الذاتي. يعمل ثاني أكسيد التيتانيوم كمحفز ضوئي، حيث يتم تنشيطه بواسطة الأشعة فوق البنفسجية، مما يساعد في تجزئة الملوثات الضارة مثل أكاسيد النيتروجين، أكاسيد الكبريت، والمركبات العضوية المتطايرة، وتحويلها إلى مركبات أقل ضرر على البيئة، والتي يمكن التخلص منها بسهولة عن طريق الأمطار والرياح.

تم إعداد عينة مرجعية وثلاث عينات أخرى تحتوي على نسب مختلفة من ثاني أكسيد التيتانيوم مضاف إلى الخلطة الخرسانية، وكانت النسب عبارة عن 3%، 4%، و5%من وزن الأسمنت.

الهدف من تنوع النسب هو دراسة تأثيرها على الخصائص الأساسية مثل مقاومة الضغط، التشغيلية، والمتانة، بالإضافة إلى فعاليتها في تقليل الملوثات وتحقيق خاصية التنظيف الذاتي.

وقد بينت النتائج أن زيادة نسبة ثاني أكسيد التيتانيوم تؤدي إلى تحسن قدرة الخرسانة على التنظيف الذاتي وإزالة الملوثات.

أمّا بالنسبة إلى الخصائص الميكانيكية للخرسانة، فقد تبين أن الخرسانة المضاف إليها ثاني أكسيد التيتانيوم أظهرت نتائج إيجابية، حيث كانت مقاومة الضغط أعلى من المتوسط المستهدف لجميع النسب المدروسة. من بين النسب المختلفة كانت إضافة 4% من ثاني أكسيد التيتانيوم كجزء من وزن الأسمنت هي الأمثل، حيث حققت توازن بين مقاومة


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

الضغط وقدرة الخرسانة على مقاومة الملوثات وإزالة الصبغة، مما يعزز من فعاليتها في بيئات ملوثة.

على الرغم من أن الخرسانة ذاتية التنظيف تتطلب تكلفة ابتدائية أعلى بسبب المواد المضافة، إلا أن هذه التكلفة تُعوض جزئيًا من خلال تقليل احتياجات الصيانة وتحقيق فوائد بيئية واقتصادية على المدى البعيد، مما يجعلها خيارًا ذو قيمة على المدى الطويل.

**الكلمات المفتاحية :** التحفيز الضوئي، خرسانة صديقة للبيئة، ثاني أكسيد التيتانيوم ($TiO_2$)، تحسين جودة الهواء.

# Addition of titanium dioxide as a partial replacement of cement by weight in concrete mixes

**Hanan .A. Alkhuwaylidi, Ala .A. Elamaree, Radia .A. Hmida**

Civil Engineering Department, Factually of Engineering,
University of Zawia, Libya
**h.alkauwaylidi@zu.edu.ly**

**Abstract:**

This research examines the effect of adding titanium dioxide to concrete as an innovative solution to address air pollution and enhance self-cleaning properties. Titanium dioxide acts as a photocatalyst that is activated by ultraviolet radiation, helping to break down harmful pollutants such as nitrogen oxides ($NO_x$), sulfur oxides ($SO_x$), and volatile organic compounds (VOCs). These pollutants are converted into less harmful compounds that can be easily washed away by rain or dispersed by wind.

A reference sample and three additional samples were prepared, containing different proportions of titanium dioxide added to the concrete mixture—3%, 4%, and 5% of the cement weight. The purpose of varying these ratios was to study their impact on key characteristics such as compressive strength, workability, and durability, as well as their effectiveness in reducing pollutants and achieving self-cleaning behavior.

The results showed that increasing the amount of titanium dioxide improved the concrete's ability to self-clean and remove contaminants. In terms of mechanical properties, concrete containing titanium dioxide achieved compressive strengths above the target average for all tested ratios. Among the studied mixtures, the 4%


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

titanium dioxide content proved to be the most effective, offering the best balance between compressive strength, resistance to pollutants, and color stability, thereby enhancing performance in polluted environments.
Although self-cleaning concrete involves a higher initial cost due to the addition of titanium dioxide, this expense is partly offset by reduced maintenance needs and long-term environmental and economic benefits. Therefore, titanium dioxide-enhanced concrete represents a sustainable and valuable option for future construction applications.
**Keywords:** Photocatalysis, Eco-friendly concrete, Titanium dioxide ($TiO_2$), Improving air quality**.**

**مقدمة**

مع استمرار الحاجة للبناء والنمو العمراني، وزيادة التلوث الناتج عن صناعة الأسمنت ،أصبح من الضروري إيجاد حل يجمع بين احتياجات البناء والمحافظة على البيئة. في العقود الماضية توجهت الأنظار إلى المحفزات الضوئية وطرق دمجها داخل مواد البناء. ولعل أول ماجاء في هذا السياق هو ماقام به العالم الكيمياء كاسارا بتعديل خصائص الأسمنت وإدخال مادة محفزة ضوئية ضمن تركيبته الأساسي ( Cassar, L., et al, 1997). في حين ركزت معظم الدراسات على تطوير اسمنت يحتوي على مواد محفزة ضوئية، تعتمد هذه الدراسة على إضافة المادة المحفزة ضوئيا كبديل جزئي من وزن الأسمنت في الخلطة الخرسانية

**مشكلة البحث:**

يتكون الهواء الجوي بشكل رئيسي من (78% نيتروجين، 20.95% أكسجين، و0.93% أرجون)، مع وجود نسب ضئيلة من الغازات الأخرى مثل ثاني أكسيد الكربون. ومع ذلك، فإن الأنشطة البشرية مثل حرق الوقود الأحفوري والأنشطة الصناعية والزراعية تساهم بشكل كبير في تلوث الهواء، خاصة من خلال انبعاث أكاسيد النيتروجين وأكاسيد الكبريت وغيرها من هذه الملوثات التي تُعتبر من أبرز أسباب المشكلات البيئية والصحية؛ حيث يساهم التلوث الهوائي عالمياً في حوالي 7ملايين حالة وفاة مبكرة سنوياً، مما يجعله رابع أكبر عامل خطر يساهم في العبء العالمي للأمراض (Raddatz et al., 2022). وتؤدي هذه الملوثات بدورها إلى تكوين الضباب الدخاني، والأمطار الحمضية، وتآكل البنية التحتية، مما يؤثر على جودة الهواء والبيئة الحضرية.


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

كما تؤدي أكاسيد النيتروجين أيضًا إلى تفاقم مشكلة الاحتباس الحراري عبر دورها في تكوين الأوزون على مستوى سطح الأرض، مما يخلق تحديات بيئية معقدة. كما أن انتشار هذه الملوثات يزيد من تكاليف الصيانة وإصلاح البنية التحتية، خصوصًا في المناطق الحضرية، ويؤثر على فعالية أنظمة التهوية والمرافق الهندسية.

في ظل التحديات البيئية الحالية، تبرز الحاجة الملحة إلى حلول مبتكرة في مجال الهندسة المدنية لتحسين جودة الهواء والحد من التلوث. ومن بين التقنيات الواعدة، تبرز تقنية التحفيز الضوئي (Photocatalysis) التي تعتمد على مواد عازلة تُحفّز التفاعلات الكيميائية عند تعرضها للضوء. وفي هذا السياق، تعد الخرسانة المحفزة ضوئياً مادة صديقة للبيئة (Topličić-Ćurčić et al., 2017)، وقد توصلت دراسات سابقة إلى التأثير الإيجابي للمحفزات الضوئية على خصائص الأسمنت، خاصة في قدرته على إزالة الملوثات وتحسين الأداء البيئي (Sakthivel et al., 2018)، (Şahin & Mardani, 2022)، (Zailan et al., 2016).

تُمكّن هذه التقنية من تفكيك الملوثات، مثل أكاسيد النيتروجين وأكاسيد الكبريت، وتحويلها إلى مركبات أقل ضررًا، مما يجعلها خيار مستدام وفعال لتحسين هواء المدن وتعزيز صحة البيئة الحضرية.

**المواد التي تم استخدامها وخواصها**

**1. الأسمنت**

يعتبر الأسمنت المكون الفعال الرئيسي الذي تتوقف عليه مقاومة الخرسانة. وأهم العوامل المؤثرة في الأسمنت هي كميته ونعومته وتركيبه الكيميائي. وقد تم في هذه الدراسة استخدام الأسمنت البورتلاندي العادي من إنتاج مصنع الاتحاد العربي للإسمنت والمطابق للمواصفات الليبية (340\2009).

**2. الركام الناعم**

تكمن أهمية الركام الناعم في قدرته على ملء الفراغات الموجودة بين حبيبات الركام الخشن، مما يعزز من كثافة الخلطة الخرسانية. علاوة على ذلك، يعمل الركام الناعم مع الأسمنت لتشكيل عجينة متماسكة تغلف حبيبات الركام الخشن، مما يسهم في تحقيق التماسك اللازم للخرسانة وزيادة قوتها.

نتيجة لهذه الخصائص، يُستخدم الركام الناعم بنسبة تتراوح عادة بين 35% و45% من الحجم الكلي للخرسانة، وذلك لضمان تحقيق توازن بين سهولة التشغيل والقوة الهيكلية. تم


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

في هذه الدراسة استخدام رمل زليتن وهو مطابق للمواصفات البريطانية ( BS 882:1992).

**جدول 1. خصائص الركام الناعم المستخدم**

| ر،ق | الخاصية | النتائج |
|---|---|---|
| 1 | المقاس الاعتباري | 1.18 |
| 2 | الوزن النوعي | 2.6 |
| 3 | وزن وحدة الحجوم | 1661.9 |

### 3. الركام الخشن

الركام الخشن يُعد أحد المكونات الرئيسية في الخرسانة، ويتألف من حبيبات الصخور أو الحصى التي يزيد قطرها عادةً عن 4.75 ملم. يُستخدم الركام الخشن بنسبة تتراوح بين 40% و55% من الحجم الكلي للخلطة الخرسانية، تم استخدام ركام خشن ذو مقاس اعتباري أكبر (20mm). جدول 2. يبين خصائص ركام الخشن الذي تم استخدامه.

**جدول 2. خصائص الركام الخشن المستخدم**

| ر، ق | الخاصية | النتائج |
|---|---|---|
| 1 | المقاس الاعتباري | 20mm |
| 1 | الوزن النوعي | 2.7 |
| 2 | وزن وحدة الحجوم | 1620.9 |

### 4. ماء الخلط

ماء الخلط هو عنصر أساسي في صناعة الخرسانة، حيث يتفاعل مع الأسمنت لتكوين عجينة تربط مكونات الخليط معًا. يُعتبر الماء مهمًا لتحقيق التفاعل الكيميائي بين الأسمنت والماء، والذي ينتج عنه "الهيدرات"، وهي المادة التي تمنح الخرسانة صلابتها.

إن ضبط نسبة الماء للإسمنت (w/c) أمر مهم جدا حيث أن زيادة كمية الماء تؤدي إلى ضعف قوة الخرسانة، بينما ينتج عن قلة الماء صعوبة في درجة التشغيل، في هذه الدراسة تم استخدام ماء صالح للشرب.


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

**5. المادة المضافة (ثاني أكسيد التيتانيوم)**

في بعض الحالات، تُضاف مواد معينة إلى الخلطة الخرسانية بهدف تحسين خواصها أو إكسابها ميزات إضافية، تُعتبر المواد المحفزة ضوئيًا من الإضافات التي شاع استخدامها مؤخرا لما لها من تأثير إيجابي على أداء الخرسانة ومن أهم هذه المواد:

1. ثاني أكسيد التيتانيوم ($TiO_2$) .
2. أكسيد الزنك ($ZnO$) .
3. ثالث أكسيد التنجستن ($W_2O_3$) .
4. إلمينيت ($FeTiO_3$) .
5. تيتانات السترونشيوم ($SrTiO_3$) .

وفي هذه الدراسة تم استخدام مسحوق ثاني أكسيد التيتانيوم كعامل محفز ضوئيا، والذي يمنح الخرسانة المميزات التالية:

1. خرسانة صديقة للبيئة: حيث انه يقلل من نسبة تركيز أكاسيد النيتروجين وأكاسيد الكبريت وبعض الملوثات الأخرى المتواجدة في الغلاف الجوي.
2. المحافظة على ديمومة الخرسانة.
3. التقليل من استنفاذ طبقة الأوزون.
4. التقليل من تأكل الأسطح، وتكوين بقع على سطح الخرسانة.

ثاني أكسيد التيتانيوم هو مركب كيميائي يرمز له ($TiO_2$) متعدد الاستخدامات بالتالي يدخل في العديد من التطبيقات الصناعية مثل الطلاء والعوازل ....إلخ. ويعتبر أيضا مركب صديق للبيئة، لأنه غير سام على عكس بعض المحفزات الأخرى التي قد تحتوي على معادن ثقيلة أو مركبات سامة. الشكل 1. يبين التركيب البلوري ومسحوق ثاني أكسيد التيتانيوم.

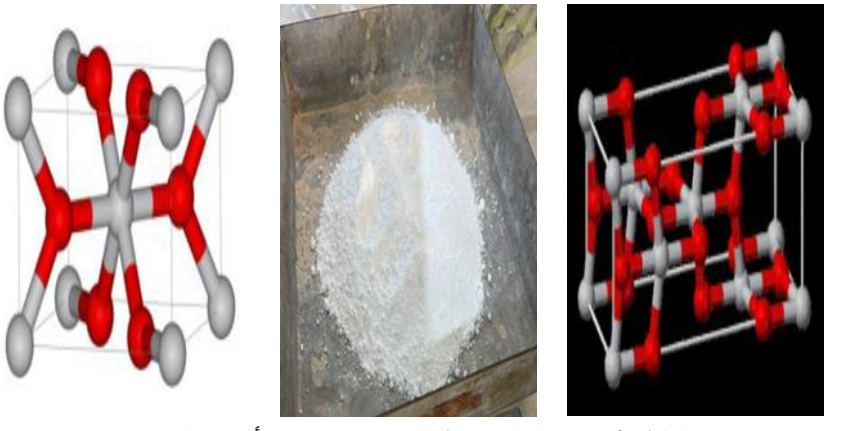
أظهرت الدراسات الحديثة دور ثاني أكسيد التيتانيوم في تقليل تلوث الهواء عند إضافته كنسبة من وزن الأسمنت في الخلطة الخرسانية مع الحفاظ على خصائص الخرسانة الميكانيكية. إذ أنه يُظهر خصائص استثنائية كمحفز ضوئي يتميز بقدرته الفريدة على امتصاص الأشعة فوق البنفسجية وتحفيز التفاعلات الكيميائية التي تؤدي إلى تكوين جذور الهيدروكسيل ($\cdot OH$) شديدة التفاعل. جدول 3. يبين الخصائص الفيزيائية لثاني أكسيد التيتانيوم المستخدم.


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

**جدول 3. الخصائص الفيزيائية لثاني أكسيد التيتانيوم**

| الخواص الفيزيائية لثاني أكسيد التيتانيوم | |
|---|---|
| الكتلة المولية | g . mol−1 79.8658 |
| معامل الانكسار | 2.55 ~ 2.76 |
| صلادة موس | 6−5.5 ،7−6 |
| نسبة السعة | 114 الى 31 |
| معامل التمدد الخطي | ₽ 25 |
| التوصيل الحراري | 1.809الى 10.3 |
| امتصاص الزيت | 30~18 ،48~16 |
| حجم الجسيمات | 0.2 ~ 0.3, 0.3 |



الشكل 1. يبين التركيب البلوري ومسحوق ثاني أكسيد التيتانيوم

**إعداد الخلطة والعينات**

وقد اعتمدت الدراسة المعملية على إعداد الخلطات الخرسانية في معمل الخرسانة بالمعهد العالي للعلوم والتقنية بالزاوية. شملت الدراسة إجراء الاختبارات الأولية للمواد ومن ثم تم تحديد نسب مكونات الخلطة الخرسانية استنادًا إلى خلطات تجريبية، حيث تم تصميم خلطة خرسانية ذات مقاومة (M30) بنسب خلط (2.5:2:1) من ( أسمنت، رمل، ركام خشن)، مع تحديد محتوى الماء للإسمنت (w/c=0.55) لجميع الخلطات المنفذة.

وقد تم إعداد أربع خلطات خرسانية في هذه الدراسة: الاولى الخلطة المرجعية وهي خلطة من دون أي إضافات، وباقي الخلطات بإضافة نسب مختلفة 3%، 4%، و5% من مادة


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

ثاني أكسيد التيتانيوم كعامل محفز ضوئيا من وزن الأسمنت، بهدف دراسة تأثير هذه الإضافة على الخصائص الهندسية والميكانيكية للخرسانة ومعرفة قدرة الخرسانة على تقليل الملوثات البيئية وتحسين جودة الهواء عن طريق عملية التحفيز الضوئي.

**الاختبارات**

تم إجراء اختبارات على الخرسانة في حالتيها الطازجة والصلبة، تضمنت اختبار الهبوط واختبار مقاومة الضغط، بالإضافة إلى الفحوصات الموجهة لتقييم كفاءتها في إزالة الملوثات. وتهدف هذه الاختبارات إلى ضمان توافق الخرسانة مع المعايير والمواصفات الفنية المطلوبة.

**اختبار الهبوط**

تم اختبار الهبوط طبقا المواصفات البريطانية (BS 1881 part 102 -1988). الشكل 2. يبين اختبار الهبوط للخرسانة الطازجة.

الشكل 2. يبين اختبار الهبوط للخرسانة الطازجة

**الجدول 4. يبين مقدار هبوط الخرسانة لجميع الخلطات**

| الخلطة الخرسانية حسب نسبة المادة المضافة | مقدار الهبوط (mm) | مقدار الهبوط المسموح به للخلطات العادية للدرجة التشغيل المتوسطة حسب المواصفات البريطانية (mm) |
|---|---|---|
| 0% (المرجعية) | 50 | 50-120 |
| %3 | 75 | |
| %4 | 80 | |
| %5 | 90 | |


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

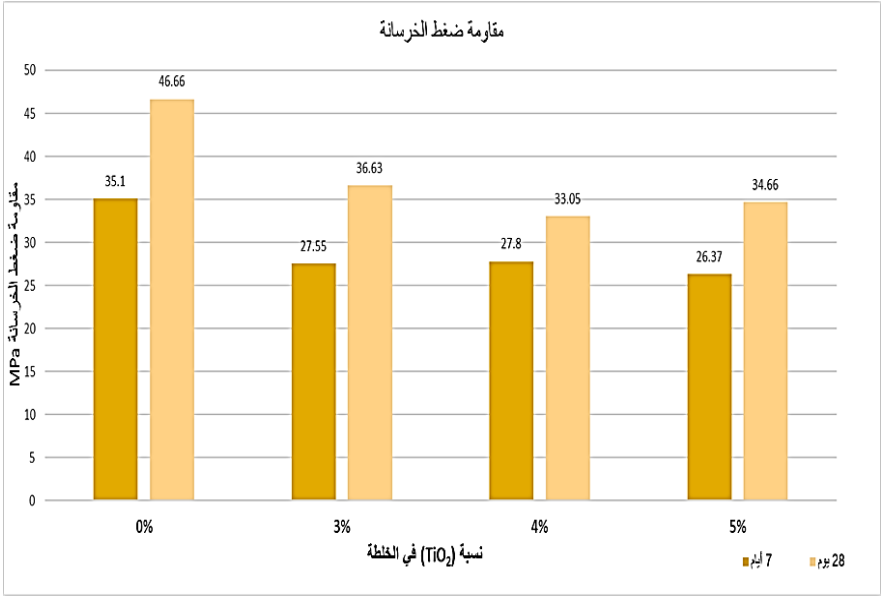
تبين النتائج في الجدول رقم (4) وقوع قوام الخلطات الخرسانية ضمن حدود المواصفات المسموح بها كخلطة خرسانية صالحة للأعمال العادية.

**اختبار مقاومة الضغط للخرسانة**

أجرى هذا الاختبار حسب المواصفات البريطانية (BS 1881 part 108). الجدول (5) والمخطط رقم (1) يوضحان نتائج اختبار مقاومة الخرسانة للضغط لجميع الخلطات بعمر (7 و28 يوم)، وقد أظهرت النتائج أن مقاومة الضغط تختلف بين الخلطات الخرسانية المختلفة، حيث لوحظ أن كلما زادت نسبة ($TiO_2$) من وزن الأسمنت قلت المقاومة.

**جدول 5. يبين مقاومة الخرسانة للضغط**

| رقم العينة | % $TiO_2$ | 7 أيام | 28 يوم |
|---|---|---|---|
| 1 | %0 | 35.1 | 46.66 |
| 2 | %3 | 27.55 | 36.63 |
| 3 | %4 | 27.8 | 33.05 |
| 4 | %5 | 26.37 | 34.66 |




مخطط 1. يبين مقاومة الخرسانة للضغط


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

**اختبار هجوم الملوثات**

لضمان كفاءة وفعالية الخرسانة ذاتية التنظيف يتم إجراء اختبارات متعددة لتقييم أدائها في مواجهة الملوثات البيئية المختلفة. هناك العديد من الطرق المستخدمة في تقييم الخرسانة ذاتية التنظيف، في هذا البحث تم التطرق إلى اختبارين فقط نظرا لبساطتهما وسهولة تطبيقهما وهما:

- اختبار إزالة ثاني أكسيد النيتروجين وتحليل النواتج باستخدام جهاز المطياف الضوئي.
- اختبار إزالة الصبغة (صبغة الفلورسنت).

1. اختبار إزالة ثاني أكسيد النيتروجين وتحليل النواتج باستخدام جهاز المطياف الضوئي:

في هذا الاختبار يتم استخدام الماء المقطر كوسيط لجمع نواتج تحلل الملوثات مثل أكاسيد النيتروجين (NOx) الناتجة عن الخرسانة ذاتية التنظيف.

تم الاختبار تحت تأثير الأشعة فوق البنفسجية، الموجودة بشكل طبيعي في أشعة الشمس، نظرًا لدورها الأساسي في تفعيل عملية التحفيز الضوئي اللازمة للتفاعل، تم تحليل عينات المياه المجمعة في مختبرات مصفاة الزاوية. الشكل 3. يبين تعرض مكعب الخرسانة لغاز ثاني أكسيد النيتروجين($NO_2$).

تعتمد النتائج في هذا الاختبار على قياسات الامتصاص الضوئي للنواتج المتحللة في الماء المقطر الذي استخدم لجمع بقايا الملوثات. تُعتبر زيادة تركيز النترات ($NO_3^-$) المؤشر الأساسي لنجاح الخرسانة ذاتية التنظيف في إزالة أكاسيد النيتروجين (NOx). جدول 6. يبين النتائج المتحصل عليها من الاختبار. الشكل 4. يبين تحضير العينات قبل تحليلها.

**الجدول 6. يبين تركيز النواتج المتحللة في الماء المقطر**

| رقم العينة | % $TiO_2$ | تركيز ($NO_3^-$) (ppm) | | تركيز ($SO_4^{-2}$) (ppm) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | قبل | بعد | قبل | بعد |
| 1 | 0 | 7.37 | 1.54 | 30 | 27 |
| 2 | 3 | 4.8 | 22.2 | 110 | 300 |
| 3 | 4 | 0.4 | 30 | 4 | 8 |
| 4 | 5 | 0.8 | 9.2 | 18 | 30 |


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

حيث أظهرت النتائج الموضحة في الجدول أعلاه انخفاضًا ملحوظًا في تركيز أكاسيد النيتروجين في الهواء نتيجة للزيادة في تركيز النترات في الماء المقطر. تراوحت نسبة النجاح في التفاعل بين 75% و90% حسب كمية ($TiO_2$) المضاف إلى الخلطة.

كما نشير إلى أنه وجد في العينات أثناء تحليلها أيونات الكبريت رغم عدم تعرضها المباشر لأكاسيد الكبريت، ونرجح أن السبب في ذلك هو قرب مكان إجراء الاختبار من مصفاة الزاوية لتكرير النفط والتي أحد انبعاثاتها أكاسيد الكبريت.

الشكل 3. يبين تعرض مكعب الخرسانة لغاز ثاني أكسيد النيتروجين($NO_2$)

الشكل 4. يبين تحضير العينات قبل تحليلها

**اختبار إزالة الصبغة (صبغة الفلورسنت)**

يتم تقييم فعالية الخرسانة ذاتية التنظيف عن طريق المراقبة البصرية لعملية إزالة الصبغة.


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

في هذا الاختبار يتم رش أربع مكعبات خرسانية من عينات مختلفة بصبغة فلورسنت كما موضح بالشكل 5. ثم تعرض العينات لأشعة الشمس المباشرة كما موضح بالشكل7.

يتم التقاط صور للمكعبات على فترات زمنية محددة لمراقبة التغيرات في لون الصبغة، وبالتالي تحديد كمية الصبغة التي تم إزالتها في كل فترة.

من خلال هذه الملاحظات يتم تقييم قدرة الخرسانة على التنظيف الذاتي وكفاءتها في إزالة الصبغات تحت تأثير الضوء الطبيعي. الشكل 6. يوضح صبغة الفلورسنت التي تم استخدامها.

الشكل 5. يبين رش المكعبات الخرسانية بالصبغة

الشكل 6. صبغة الفلورسنت المستخدمة


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

بعد إجراء الاختبار أظهرت العينات تفاوت في النتائج من حيث قدرتها على إزالة الصبغة وفقاً للزمن وتعرضها لأشعة الشمس كما هو مبين في الشكل 7-8-9-10، والنتائج كانت حسب الفاعلية كالاتي:

العينة الأولى (4%): أظهرت انخفاضًا ملحوظًا في كثافة الصبغة بعد مدة قصيرة من التعرض، مع استمرار عملية التنظيف الذاتي بشكل تدريجي.

العينة الثانية (3%): تميزت بمعدل أبطأ في إزالة الصبغة مقارنة بالعينة الأولى، مع إزالة واضحة للصبغة على مدى زمني أطول.

العينة الثالثة (5%): أظهرت قدرة متوسطة على التنظيف الذاتي وإزالة الصبغة.

العينة المرجعية: لم تظهر أي تغيّر في كثافة الصبغة خلال فترة التعرض، مما يشير إلى غياب خاصية التنظيف الذاتي.

الشكل 7. يبين العينات بعد رشها مباشرة

الشكل 8. يبين العينات بعد مرور ساعة واحدة


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

الشكل 9. يبين العينات بعد مرور 3 ساعات

الشكل 10. يبين العينات بعد مرور 48 ساعة

**الاستنتاج:**

- إن زيادة نسبة ثاني أكسيد التيتانيوم تتناسب طرديا مع زيادة نسبة التنظيف الذاتي وإزالة الملوثات.
- إن مقاومة الضغط بعد 28 يوما من المعالجة أعلى من متوسط القوة المستهدفة لعينات الخرسانة المضاف إليها ثاني أكسيد التيتانيوم بنسب (3%،4%، و5%) من وزن الأسمنت.
- من النتائج المتحصل عليها أعلاه وجد أن استخدام نسبة 4 % من ثاني أكسيد التيتانيوم من وزن الأسمنت تعطي مقاومة ضغط مناسبة مع قدرة عالية في مقاومة الملوثات وإزالة الصبغة.
- تُعد الخرسانة ذاتية التنظيف خيارًا ذو تكلفة ابتدائية أعلى مقارنةً بالخرسانة التقليدية نتيجة استخدام مواد مضافة، إلا أن هذه التكلفة تُعوض جزئيًا من خلال تقليل احتياجات الصيانة وتحقيق فوائد بيئية واقتصادية على المدى البعيد.


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

**التوصيات**

- في إطار حرصنا على تعزيز الأداء وتحقيق الأهداف المرجوة تأتي هده التوصيات استنادا إلى تحليل الشامل للمعطيات والبيانات المتوفرة مع الأخذ بعين الاعتبار احتياجات مشروع وتطلعاته المستقبلية نوصي بالتالي:
- نوصي بالتركيز على تحقيق مبدأ التصميم المستدام في قطاع البناء والتشييد.
- ينبغي التركيز على تحقيق حلول صديقة للبيئة مع الحفاظ على خصائص الخرسانة الميكانيكية والوظيفية الأساسية لضمان أداء موثوق ودائم.
- التوعية المجتمعية بأهمية المواد الصديقة للبيئة وذلك لتوضيح أهمية اعتماد مواد بناء مبتكرة ومضادة للتلوث كجزء من الحلول المستدامة للبنية التحتية المستقبلية.
- كما يوصى بأن تسعى الدولة إلى زيادة عدد محطات مراقبة جودة الهواء وتغير المناخ للحصول على نتائج دقيقة يمكن من خلالها تحديد الأماكن المستهدفة بدقة لتطبيق الخرسانة ذاتية التنظيف للتقليل من مخاطر التلوث الهوائي.
- التوجه إلى استخدام تقنية التحفيز الضوئي في مشاريع رصف الطرق خاصة في الطرقات ذات الكثافة السكانية العالية، بالإضافة إلى استخدامها في عملية تنقية ومعالجة مياه الصرف الصحي.
- نُوصى بإجراء المزيد من الاختبارات على الخرسانة ذاتية التنظيف لتقييم فعاليتها في مقاومة أول أكسيد الكربون، كونه غازًا ملوثًا قد يساهم في تفاعلات الكربنة التي تؤثر على حديد التسليح.

**المراجع**

Aissa, A. H., Puzenat, E., Plassais, A., Herrmann, J. M., Haehnel, C., & Guillard, C. (2011). Characterization and photocatalytic performance in air of cementitious materials containing TiO2. Case study of formaldehyde removal. *Applied Catalysis B: Environmental*, *107*(1–2), 1–8.

Cassar, L., et al. (1997). "Materiali cementizi e fotocatalisi" (Cementitious materials and photocatalysis). Proceedings of the FAST Congress on Innovative Materials, Milan, Italy, November 1997.

Raddatz, T., Raddatz, S., Weschler, C. J., & Raddatz, L. (2022). The Burden of Air Pollution: A Perspective on Global Health


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/harc1524

Inequalities. *Sustainability*, *14*(10), 6125. DOI: 10.3390/su14106125.

Şahin, Hatice Gizem, and Ali Mardani. "Self-Cleaning Concrete." *Conference Paper*, September 2022.

Sakthivel, R., Arun Kitcha, T., and M. Dhanabal. "Behaviour of Self-Cleaning Concrete using Photocatalytic Material." International Journal for Scientific Research & Development, vol. 6, no. 2, 2018, pp. 1468–1473. ISSN: 2321-0613

Topličić-Ćurčić, Gordana, et al. "Photocatalytic Concrete – Environment Friendly Material." *Proceedings of the 5th International Conference on Contemporary Achievements in Civil Engineering*, Subotica, Serbia, April 21, 2017, doi:10.14415/konferencijaGFS2017.041.

Zailan, Siti Norsaffirah, Norsuria Mahmed, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah, and Andrei Victor Sandu. "Self-Cleaning Geopolymer Concrete - A Review." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 133, 2016, Article 012026. doi:10.1088/1757-899X/133/1/012026.


Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية