تقنيات تشييد الأبنية على الواجهات البحرية حسب الكودات العالمية

د.م بشرى درويش العكاري [1] د.م وليد غسان سليمان [2]

1. مقدمة

تعتبر الواجهات البحرية من المشاريع المعمارية والهندسية المعقدة بسبب تعرضها لظروف بيئية قاسية مثل الأمواج، الرياح، الملوحة، والتآكل[1]. لذا يجب أن تُصمم وتُنفذ وفقاً لأعلى المعايير العالمية لضمان متانتها وديمومتها.

الواجهة هي مساحة اتصال تربط بين مجموعتين جغرافيتين مختلفتين بالنسبة للمدن الساحلية، فإننا نتحدث عن الواجهة الحضرية–الميناءية. هذه الواجهة عبارة عن منصة تقبل تيارات المحيط على جانب الميناء والتدفقات البحرية والبرية على الجانب الآخر.

التحديات التي تتعرض لها الواجهات البحرية:

- تأثير الأملاح والكلوريدات على الخرسانة وحديد التسليح.
- الرطوبة العالية وتأثيرها على مواد البناء.
- قوى الأمواج والمد والجزر.
- التآكل السريع للمواد الإنشائية.
- تأثير الرياح والمياه المالحة على مواد الإكساء.

٢- اشتراطات بعض الكودات العالمية:

تفرض الكودات العالمية اشتراطات خاصة للبناء في المناطق البحرية والرطبة منها:

1. اشتراطات الكود الأمريكي (ACI 318 و ACI 350.5)

* متطلبات الخرسانة:[2]

- نسبة الماء إلى الإسمنت (w/c): يجب ألا تزيد عن 0.40 للعناصر المعرضة للرذاذ الملحي
- المقاومة المميزة للبيتون: يجب ألا تقل مقاومة البيتون عن35Mpa
- طبقة التغطية: يجب ألا تقل عن 50mm للأعمدة والجوائز، 75mm للأساسات المعرضة مباشرة لمياه البحر.

1- مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه
2- مدرس ، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

– نفاذية الخرسانة: اختبار نفاذية كلوريدات لا يزيد عن 1000 colomb في اختبار ASTM C1202

* أنواع الإسمنت الموصى بها: يوصي الكود باستخدام أنواع فعالة في الواجهات البحرية مثل:

– الإسمنت البورتلاندي من النوع V (مقاوم للكبريتات)

– الإسمنت المخلوط مع البوزولانا أو خبث الأفران (Slag Cement)

– الإسمنت مع إضافات خاصة مثل السيليكا فيوم (Microsilica)

* فولاذ التسليح: يوصي الكود باستخدام فولاذ تسليح غير قابل للصدأ (مثل الفولاذ المقاوم للصدأ) في المناطق التي تتعرض لارتفاع مستويات الرطوبة. كما يجب أن يتم حماية التسليح داخل الخرسانة باستخدام طبقات حماية ضد التآكل

2. اشتراطات الكود الأوروبي (EN 206 و Eurocode 2) [5]

* تصنيف البيئة البحرية: يجب أن يكون كما يلي:

– XD3: مناطق معرضة للرذاذ الملحي

– XS1: مناطق تحت الماء

– XS2: مناطق المد والجزر

– XS3: مناطق الأمواج

* اشتراطات خاصة:

– أقل طبقة تغطية: 45mm للعناصر الهيكلية

– حد أقصى لمحتوى الكلوريد: 0.2% من وزن الإسمنت

– يجب إضافة مثبطات التآكل: مثل نيتريت الكالسيوم

– يجب استخدام حديد تسليح مقاوم للصدأ: وذلك عند توقع تركيز كلوريدات عالي

3. اشتراطات كود البناء الدولي (IBC)

* متطلبات التصميم الإنشائي:

– عوامل تحميل إضافية: يجب التصميم على أحمال إضافية لمراعاة قوى الأمواج والرياح

– تصميم الأساسات: بحيث يأخذ بعين الاعتبار حماية كافية من تأثير التآكل تحت سطح الأرض

1– مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

2– مدرس ، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

– أنظمة التصريف: يجب أن تكون فعالة لمنع تجمع المياه حول الأساسات

* مواد البناء المطلوبة:

– البيتون: يجب أن يكون البيتون مقاوم للكبريتات والكلوريدات

– فولاذ التسليح: يجب أن يكون مغلف أو مقاوم للصدأ أو مطلي بالإيبوكسي

– مواد العزل: يمكن استخدام مواد عازلة مقاومة للماء والأملاح

4. تقنيات الحماية وفقاً لمعايير ASTM [6]

* طرق حماية الخرسانة: تتم باستخدام:

– الطلاءات الواقية: مثل الإيبوكسي البوليمري (ASTM D6943)

– أنظمة الكاثودية: لحماية حديد التسليح من الصدأ (ASTM C876)

– معالجة الخرسانة: بإضافة مركبات السيليكا (ASTM C1580)

* تقنيات العزل المائي: يتم تحقيق العزل المائي عن طريق:

– الأغشية المطاطية: مثل (EPDM ASTM D4637)

– أغشية البيتومين المعدل: (ASTM D1970)

– أنظمة الحقن بالكريستال: لتقليل النفاذية (ASTM C1585)

5. اشتراطات الكود السعودي (SBC) للمناطق الساحلية

* متطلبات خاصة:

– زيادة طبقة التغطية البيتونية: بمقدار 10mm إضافية عن القيم القياسية

– فحص محتوى الكلوريدات: شهرياً أثناء الصب

– منع استخدام مواد تحتوي على كبريتات: وخاصة في التشطيبات النهائية

– أنظمة التهوية: يجب أن تكون فعالة لمنع تكثف الرطوبة

6. الكود العربي السوري : [9]

- البلاطات الخرسانية والأسطح: يوصي الكود السوري باستخدام خرسانة مصممة وفقاً للمعايير البيئية المعتمدة في المنطقة، مع التأكيد على استخدام إضافات مقاومة للتآكل.
- الأساسات: في المناطق الرطبة، يجب تصميم الأساسات بحيث تكون مرتفعة عن سطح الأرض إذا كان هناك احتمال لارتفاع مستوى المياه الجوفية.
- التسليح والمواد: يفرض الكود السوري استخدام مواد مقاومة للرطوبة وتحديد أنواع التسليح التي يمكن استخدامها في البيئات ذات الرطوبة العالية.

1– مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

2– مدرس ، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

- الجدران الخارجية: يُنصح بتركيب مواد عازلة للرطوبة على الجدران الخارجية لمنع تسرب الماء والهواء الرطب إلى الداخل.

3-التقنيات المتقدمة المستخدمة عالمياً:

أ. تقنيات الخرسانة المقاومة: وتتميز الخرسانة عالية الأداء (HPC) بمقاومة ضغط تصل إلى 70Mpa واستخدمت نسبة $W/C \geq 0.35$ كما أنها تحتوي على سيليكا فيوم (8-12%)

أما الخرسانة الذاتية الشفاء فإنها تحتوي على كبسولات بكتيريا تفرز كربونات الكالسيوم عند تشقق الخرسانة لكن تكلفة أعلى بنسبة 15% ولكنها توفر 40% في صيانة مدى الحياة

يجب استخدام إضافات للخرسانة البيتونية مثل البوزولانا لزيادة المتانة وفقاً لـ (ACI 350.4) للهياكل المعرضة للمياه المالحة

ب. أنظمة حماية فولاذ التسليح: يستخدم الفولاذ المقاوم للصدأ (Stainless Steel) أو المغلف (Galvanized Steel) وفقاً لمواصفات (ASTM A240, A123). أما الطلاءات الواقية (Protective Coatings) مثل الإيبوكسي أو البولي يوريثان وفقاً لـ (ISO 12944

يبين الجدول مقارنة من حيث العمر والتكلفة بين عدة أنواع للفولاذ:[4]

التقنية	العمر المتوقع	التكلفة الإضافية
الفولاذ المغلف بالايبوكسي	50 سنة	+20%
الفولاذ المقاوم للصدأ	75 سنة	+300%
ألياف الكربون FRP	100سنة	+400%

ج. أنظمة العزل المائي:

1. الأغشية البوليمرية (HDPE ،PVC) بسماكة 2-3mm
2. الطلاءات الكريستالية تخترق 30cm في الخرسانة
3. الحقن بالجيلاتين لسد الشقوق الدقيقة

د - **أنظمة الأساسات:**

* الأوتاد (Piles): تُستخدم في التربة الضعيفة أو العميقة، وقد تكون أوتاد خرسانية مسبقة الإجهاد، أوتاد فولاذية. وفقاً للكود الأمريكي (ACI 318) والكود الأوروبي (Eurocode 7).

* الألواح الخرسانية المسلحة (Sheet Piles): تستخدم كجدران استنادية أو حواجز أمواج وتكون مصنوعة من الخرسانة أو الفولاذ المغلف بمادة مقاومة للتآكل.

1- مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

2- مدرس ، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

و- أنظمة الحماية من الأمواج والتآكل :

* الحواجز الأمواج (Breakwaters): يتم تصميمها وفقاً لـ (PIANC, Eurocode 7)، يمكن أن تكون صخرية (Rubble Mound) أو خرسانية (Caissons).

* أنظمة التهوية (Ventilation Systems):وذلك لمنع تراكم الرطوبة داخل الهياكل.

4- تطبيقات من العالم:

- **<u>مشروع جزيرة النخيل في دبي</u>**

جزيرة النخيل في دبي هي واحدة من أكبر المشاريع السياحية الاصطناعية في العالم، تمثل جزيرة النخيل نموذجاً عالمياً لكيفية بناء مشاريع ساحلية ضخمة مع ضمان ديمومتها لأجيال قادمة، حيث جمعت بين الابتكار الهندسي والاحترام للبيئة البحرية.

وتتكون من ثلاث جزر رئيسية، تم تنفيذ المشروع باستخدام أكثر من 100 مليون متر مكعب من الرمال والصخور، مع تطبيق تقنيات هندسية متقدمة لضمان استقرار الجزر وحماية شواطئها من التآكل.

وقد واجه المهندسون تحديات فريدة في بناء الجزيرة وهي:

* التحديات البيئية والهيدروديناميكية: وتتضمن تأثير الأمواج والتيارات البحرية على شكل الجزيرة وضرورة منع تآكل الشواطئ بسبب المد والجزر، والحفاظ على النظام البيئي البحري، واعتماد تصميم مناسب مقاوم للعواصف والرياح القوية.

* التحديات الإنشائية: وتتلخص بضرورة ضمان استقرار التربة الرملية تحت الأبنية المنفذة ومنع تسرب المياه المالحة إلى أساسات المنشآت وضمان مقاومة التآكل في الخرسانة وحديد التسليح.

وتم استخدام تقنيات بناء في تنفيذها وهي:

1- **تقنيات البناء المستخدمة:** حيث تم إنشاء القاعدة الأساسية للجزيرة باستخدام الردم البحري الذي يتضمن استخدام رمال من مناطق محددة في الخليج (بعد تحليل دقيق لحجم الحبيبات) ثم وضع طبقات حجرية (Rock Armor) كأساس لمنع التآكل واستخدام الحواف المرجانية

1- مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

2- مدرس ، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

الاصطناعية لتخفيف قوة الأمواج، واستخدام تقنية Vibro-compaction والتي تعتمد على ضغط الرمال باستخدام تقنيات الاهتزاز لزيادة كثافتها و منع هبوط التربة تحت الأوزان الثقيلة

2- **حماية الشواطئ والواجهات البحرية:** تم تحقيق ذلك باستخدام الأحجار الضخمة (Breakwaters) ووضع صخور كبيرة بوزن (4-6 ton) لكل حجر حول الجزيرة وتصميمها بشكل متدرج لامتصاص طاقة الأمواج.

ونفذت الجدران البحرية (Seawalls) باستخدام بيتون مسلح خاص مقاوِم للملوحة وتم طلاؤه بمواد إيبوكسية لمنع التصاق الكائنات البحرية.

وتم إنشاء الشواطئ الاصطناعية وذلك باستخدام رمال ذات حبيبات خشنة لمنع الانجراف وتثبيتها بنظام (Geotextile) تحت الطبقة الرملية

3- **إجراءات حماية الواجهات البحرية:**

أ. حماية الخرسانة من التآكل وذلك باستخدام إسمنت مقاوم للكبريتات (Type V) مع إضافات Silica Fume وزيادة طبقة التغطية البيتونية إلى 75mm في المناطق المغمورة وطلاء حديد التسليح بطبقة إيبوكسية مزدوجة.

ب. أنظمة العزل المائي المتقدمة: وتتضمن:

1. أغشية PVC وHDPE: تم تركيبها تحت الأساسات لمنع تسرب المياه المالحة ومقاومة للأشعة فوق البنفسجية والضغط المائي.

2. الحقن الكريستالي (Crystalline Waterproofing): تم حقن الخرسانة بمواد تتفاعل كيميائياً لتغلق المسام.

ج. أنظمة مراقبة التآكل [3]: تم تركيب أجهزة استشعار (Corrosion Sensors) في الهياكل الخرسانية واستخدام الحماية الكاثودية (Cathodic Protection) في الأرصفة البحرية.

4. **الاشتراطات البيئية والهندسية المطبقة:**

أ. الاشتراطات الهيدرولوجية: حيث تم محاكاة تأثير الأمواج باستخدام نماذج حاسوبية (CADMAS-SURF) وذلك لضمان استقرار التيارات حول الجزيرة بنسبة ±0.1 م/ث.

ب. الاشتراطات الإنشائية: تم تطبيق مواصفات (ACI 318) و (BS 6349) للمنشآت البحرية وإجراء اختبارات ضغط الخرسانة تصل إلى 50 Mpa للمناطق المعرضة للأمواج.

ج. الاشتراطات البيئية: تم استخدام الشعاب المرجانية الاصطناعية لدعم الحياة البحرية ومنع استخدام مواد بناء سامة للكائنات البحرية (حسب معايير ISO 14001).

1- مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

2- مدرس ، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

5- النتائج والتأثيرات على المدى الطويل:

- نجاح الجزيرة في مقاومة عواصف بقوة 5 على مقياس بوفورت.
- انخفاض معدل تآكل الشواطئ إلى أقل من 1 سم/سنة بفضل أنظمة الحماية.
- زيادة عمر المنشآت المتوقع إلى 100+ سنة بسبب المواد المستخدمة.
- حصول المشروع على جائزة الريادة في الهندسة البحرية من IEEE.

6- دروس مستفادة من المشروع

1. أهمية الدراسات الهيدروديناميكية قبل التنفيذ وتأثيرها الكبير على المشروع.
2. فعالية أنظمة الحماية متعددة الطبقات للواجهات البحرية.
3. ضرورة الجمع بين المتانة والاستدامة البيئية.
4. نجاح تقنيات تثبيت التربة الرملية في المشاريع الكبرى.

- **مشروع "ذا ويف" (The Wave) في مسقط، عُمان**

1. **نظرة عامة على المشروع:** عبارة عن مشروع سكني وفندقي على شاطئ القرم، مسقط (واجهة بحرية بطول 4 كم) وقد واجه الدراسة والتنفيذ تحديات أساسية منها:

- رياح موسمية بقوة 70 Km/h
- أمواج تصل إلى 4m في الموسم
- تركيز كلوريدات 3 أضعاف المعدل الطبيعي

لذلك كان له دراسة خاصة اهتمت بتقنيات البناء الحديثة .

2. **تقنيات البناء المستخدمة:**

أ. نظام الأساسات المتكامل:

1- مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه
2- مدرس ، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

– أوتاد مسبقة الإجهاد: استخدمت على عمق 25m تحت سطح البحر وتم الطلاء بطبقة الزنك–ألومنيوم (Zincalume) وكذلك عززت ب Geotextile لمنع تسرب الرمال

ب. حماية الواجهات البحرية: تم استخدام تقنيتين:

1 . الجدار البحري الذكي: حيث تم تصميم الجدار بشكل مموج (مثل أسنان المشط) لتشتيت طاقة الأمواج والجدار مكون من كتل خرسانية سابقة الصب (كل منها 8 ton) و مزود بفجوات بيولوجية لمرور الكائنات البحرية.

2. الشاطئ الصناعي الديناميكي: أو ما يسمى بنظام "الشاطئ العائم" حيث يغير شكله حسب حركة المد، واستخدام رمال ذات حبيبات كروية (بقطر 0.3–0.7mm) لمنع الانجراف.

ج. مواد البناء المتخصصة:

المادة	المواصفات	الفائدة
الخرسانة الجيوبوليمرية	مقاومة كلوريدات حتى 0.02%	عمر افتراضي 100+ سنة
طلاء الكروم–نيكل	سماكة 250 ميكرون	مقاومة تآكل 10 أضعاف الإيبوكسي
ألواح التيتانيوم	يستخدم في المناطق المعرضة للرذاذ	لا يحتاج صيانة

3. **نتائج الأداء بعد 5 سنوات:** تم ملاحظة مايلي:

– معدل تآكل: 0.1 مم/سنة (مقابل 1.5mm في المشاريع التقليدية).

– توفير الطاقة: 30% بفضل التصميم الهوائي للمباني.

– الحياة البحرية: زيادة 40% في التنوع البيولوجي حول الحواجز.

4. **الابتكارات الرئيسية:**

أ. نظام التبريد البحري: يتم استخدام أنابيب تحت الشاطئ لتبريد المباني بمياه البحر وهذا يقلل استهلاك تكييف الهواء بنسبة 25%.

ب. الواجهات الذكية: تستخدم ألواح خرسانية ذاتية التنظيف بطبقة TiO_2 وتمتاز بأنها تغير مساميتها تلقائياً حسب الرطوبة.

5. **مقارنة مع المعايير العالمية:**

1– مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

2– مدرس ، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

المعيار	المشروع	المواصفات الدولية
غطاء الخرسانة	80mm	(ACI 318)
مقاومة الكلوريدات	%0.02	Eurocode) %0.15
عمر التصميم	120 سنة	50 سنة (المتوسط العالمي)

6. **الدرس المستفاد:** نجح المشروع في خلق توازن بين متطلبات المتانة القصوى والاستدامة البيئية (حصل على LEED Platinum) والتكلفة المعقولة (زيادة 15% فقط عن المشاريع التقليدية)، هذا المشروع يثبت أن الحلول المبتكرة يمكن أن تحول المناطق الساحلية الصعبة إلى نماذج ناجحة للعمارة البحرية المستدامة.

- **جسر خليج هانغتشو في الصين**

المشروع هو جسر يربط شنغهاي بمدينة نينغبو عبر خليج هانغتشو بطول 36 كم (أطول جسر بحري في العالم عند افتتاحه 2008)

وقد واجه تحديات منها:

* أعاصير موسمية بسرعة 300 كم/ساعة
* تركيز كلوريدات 5 أضعاف المعدل الطبيعي
*حركة ملاحية مكثفة (40,000 سفينة سنوياً)

تصميم برج تقاطع كابلي:

١- معايير الخرسانة:

المتطلب	التطبيق في المشروع	الكود المرجعي
نسبة W/C	0.28 (أقل من حد 0.4 في ACI 318-19, Chap.19	ACI
غطاء الخرسانة	100 مم (بدل 75 مم في الكود)	BS 8500-1, Table A.6
مقاومة الضغط	80 ميجا باسكال (بدل 35 ميجا باسكال	EN 206, Class C80/95 |

٢- حماية الفولاذ (ISO 12944 & ASTM A775)

تم تنفيذ طلاء ثلاثي الطبقات:

- طبقة أساس من الزنك (85 ميكرون)

1- مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه
2- مدرس ، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

- إيبوكسي غني بالزنك (150 ميكرون)
- بوليمر فلوروكربوني (50 ميكرون)

وتم الالتزام بمعيار ISO 12944-C5M (أعلى فئة مقاومة للبيئات البحرية)

3- **التصميم الهيدروديناميكي** (PIANC Guidelines): قادر على تحمل أمواج بارتفاع 16.5 م (تجاوز معيار PIANC 25%)، واستخدمت زوايا ميل الأعمدة 15° لتفريق قوى الأمواج.

4- أدوات مراقبة الجودة المطبق

أ. اختبارات الموقع:

الاختبار	التكرار	المعيار
اختبار الكلوريدات	كل $100m^3$	ASTM C1218
مسح كهرومغناطيسي للصدأ	شهرياً	ASTM C876
اختبار نفاذية الخرسانة	أسبوعياً	ASTM C1202

ب. أنظمة المراقبة الذكية: تم استخدام 1200 مستشعر لقياس:

- إجهادات الكابلات (حسب EN 1992-2)
- تركيز الكلوريدات (حسب ISO 16282)
- حركة الأساسات (حسب ISO 18649)

5 . نتائج التطبيق بعد 15 سنة:

المؤشر	النتيجة	نسبة التحسن vs الكودات
معدل تآكل الخرسانة	0.03 مم/سنة	90% أفضل من ACI 318
عمر حديد التسليح المتوقع	150 سنة	3 أضعاف ISO 13823
تكلفة الصيانة السنوية	0.2% من التكلفة الإجمالية	75% أقل من المتوسط العالمي

6. التجاوزات الإبداعية للمعايير:

- استخدام ألياف البازلت: بدلاً من الفولاذ في بعض الأجزاء، وتفوقت على متطلبات ISO 10406 بنسبة 40%.

- نظام التبريد الذكي: تم استخدام أنابيب مياه بحرية داخل الخرسانة، وهذا أدى إلى خفض درجة حرارة الهيكل 15°C تحت حد EN 1991-1-5.

1- مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

2- مدرس ، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

– الطلاء الذاتي الشافي: تم تنفيذه وهو يحتوي على ميكروكبسولات تطلق مواد علاجية عند التشقق، يتجاوز معيار ASTM C1582.

7. **الدروس المستفادة:**

– التكامل بين الكودات: جمع بين ACI وEurocode وISO لتحقيق أفضل النتائج

– المرونة في التفسير: تجاوز بعض المتطلبات عند وجود بدائل أكثر كفاءة

– الاستثمار في المراقبة: أنظمة IoT وفرت 60% من تكاليف الصيانة طويلة المدى

يمثل هذا الجسر نموذجاً لكيفية تطبيق الكودات العالمية ليس فقط كحد أدنى، ولكن كقاعدة لابتكار حلول تتجاوز التوقعات، مع تحقيق عمر افتراضي يتجاوز 100 سنة في بيئة بحرية قاسية.

- **مشروع "ماستردام آي جيه بورغ" (IJburg) في هولندا**

المشروع عبارة عن مدينة عائمة متكاملة (سكني/تجاري/ترفيهي) تقع على بحيرة IJmeer بأمستردام بمساحة 45 هكتاراً مبنية على الجزر الاصطناعية.

واجهت المبنى تحديات فريدة أهمها: – ارتفاع منسوب المياه 1.5 متر عن مستوى الشوارع

– تربة طينية غير مستقرة

– عواصف بحرية متكررة

١– تقنيات البناء المتطورة التي استخدمت:

أ. نظام الأساسات العائمة: وتشمل:

– منصات خرسانية مجوفة: أبعاد 50×30m لكل منصة وسماكة 3m مع عوازل بوليمرية داخلية ومثبتة بأعمدة قابلة للتعديل حسب تغير منسوب المياه.

ب. حماية الواجهات المائية: تم استخدام:

– الحواجز الذكية: وهي حواجز مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ (Grado 316L) وتم تصميمها بشكل يشبه "أوراق الشجر" لامتصاص طاقة الأمواج واستخدم نظام هيدروليكي يرفع الحواجز تلقائياً عند العواصف.[2]

1– مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

2– مدرس ، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

– الجدران الخضراء المائية: تم وضع طبقات من الشعاب المرجانية الصناعية ونباتات مائية تقلل من تأثير التآكل بنسبة 40%.

ج. مواد البناء المستدامة:

المادة	الميزة	الفائدة
الخرسانة الخفيفة	تحتوي على 30% بلاستيك معاد تدويره	تقليل الوزن 25%
ألواح الألمنيوم الهوائية	تصميم يشبه خلية النحل	عزل حراري وصوتي ممتاز
الزجاج المقوى بالنانو	طبقة TiO_2 ذاتية التنظيف	تقليل الصيانة 90%

2– **أداء المشروع بعد 10 سنوات:**

– استقرار الهياكل: انحراف أقل من 5cm رغم العواصف.

– كفاءة الطاقة: 40% أقل من المباني التقليدية.

– التأثير البيئي: لوحظ زيادة 35% في التنوع البيولوجي ولا يوجد انبعاثات كربونية من عمليات التشغيل.

3. **الابتكارات الفريدة المستخدمة:**

– نظام التثبيت الديناميكي: حيث تم تثبيت 2500 مستشعر تحت الماء ترصد التغيرات ووضع مضخات هواء تتحكم في الطفو تلقائياً.

– الشوارع العائمة: وتكون مصنوعة من HDPE معزز بالألياف، وتتحمل أوزان تصل إلى 5 t/m^2.

– الأرصفة الذكية: يستفاد منها في توليد كهرباء من حركة الأمواج و إضاءة LED تتغير حسب حركة المد.

4. **مقارنة مع التحديات الهولندية التقليدية:**

العنصر |	الحل التقليدي	حل آي جيه بورغ
مقاومة الفيضانات	السدود	منصات عائمة
استقرار التربة	دعامات عميقة	دعامات عميقة
الصيانة	سنوية	ذاتية (10+ سنوات)

5. **الدروس المستفادة للمهندسين:**

– المرونة في التصميم: أهم من المقاومة الصلبة للعوامل الطبيعية.

– دمج الأنظمة البيئية: في البناء يقلل التكاليف على المدى الطويل.

1– مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

2– مدرس ، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

– المواد المركبة: يمكن أن تحل محل التقليدية بأداء أفضل.

– التكنولوجيا الذكية: تحول التحديات إلى مصادر للطاقة.

وكان الإنجاز الأبرز أنه أول مشروع سكني عائم يحصل على تصنيف BREAM Outstanding (95/100) وبتكلفة بناء أقل بـ 20% من الجزر الاصطناعية التقليدية،

يقدم هذا المشروع نموذجاً لكيفية بناء مدن كاملة في أكثر البيئات المائية تحدياً، مع تحقيق معايير استدامة تفوق التوقعات العالمية.

وهناك العديد من المشاريع الناجحة مثل:

ميناء روتردام بهولندا:

ميناء مرسيليا – فرنسا

ميناء برشلونة السياحي– اسبانيا

الخلاصة:

إن ضمان ديمومة الأبنية البيتونية في الواجهات البحرية والمناطق الرطبة يتطلب نهجاً شاملاً يشمل:

1. اختيار المواد المناسبة: إسمنت مقاوم للأملاح والرطوبة، فولاذ تسليح خاص، عوازل فعالة.
2. التصميم الهندسي الدقيق: مراعاة ظروف الموقع والبيئة وضمان حماية إضافية للبيتون والفولاذ.

1– مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

2– مدرس ، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

3. التنفيذ السليم: وفقاً لأعلى معايير الجودة وتطبيق أنظمة عزل مائي وحماية جيدة.
4. الصيانة المستمرة: تنفيذ صيانة دورية ومراقبة مستمرة للكشف المبكر عن أي مشاكل.
يمكن زيادة العمر الافتراضي للمباني الساحلية باستخدام هذه الطرق إلى(50-100 عام) مع تقليل تكاليف الصيانة بنسبة تصل إلى 60%.

المراجع المستخدمة:

1-Latakia University Journal for Research and Scientific Studies (Study of the Phenomenon of Reinforcing Steel Rust in Reinforced Concrete Structures in Syrian Coast Cities – Problem and Solutions) Engineering Sciences Series Vol. (14) No. (5) 2019

2-Université Abdelhamid Ibn Badis Mostagane (Les vieux ports, Une entité à verser dans le Patrimoine urbain Cas du port de Mostaganem) N° d'ordre: M…/GC/2022

3- Rozenfeled I. L. Corrosion Inhibitors. Institute of Physical Chemistry USSR Academy of Science, Mc GRAW-HILL International Book .Company, 2007

4- ACI Committee 222 . Corrosion of Metals In Concrete. Manual. Admixture for Concrete and Shotcrete MCI – 2006 NS,"Migration .Corrosion Inhibiting Admixture for New Reinforced Concrete

5- EUROCODE 2, Design of Concrete Structures-Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings, December 2004

6- ACI Committee 201,"Guide to Durable Concrete", Manual of Concrete Practice , Part 1 , American Concrete Institute Detroit ,1994

7- TAHERSHAMSI, M. Structural Effects of Reinforcement Corrosion in Concrete Structures. THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY, Department of Civil and Environmental Engineering,

1- مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه
2- مدرس ، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

Division of Structural Engineering Concrete Structures CHALMERS, UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Gothenburg Sweden 2016

8- Thienel, K.-Ch. Werkstoffe des Bauwesens Dauerhaftigkeit von Beton. Institut für Werkstoffe des Bauwesens Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen Universität Muenchen 2008

9-الكود العربي السوري لتنفيذ وتصميم المنشآت الخرسانية المسلحة دمشق 2012

****

1- مدرس ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه

2- مدرس ، كلية الهندسة المعمارية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه