مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الهندسية المدنية والمعمارية

مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 48 . العدد 2

1448 هـ - 2026 م

الأستاذ الدكتور طارق حسام الدين رئيس جامعة حمص **المدير المسؤول عن المجلة**

أ. د. وليد حمادة	**رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الإنسانية**
د.نعيمة عجيب	**رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية**

د.محمد فراس رمضان	عضو هيئة التحرير
د. مضر سعود	عضو هيئة التحرير
د. ممدوح عبارة	عضو هيئة التحرير
د. موفق تلاوي	عضو هيئة التحرير
د. طلال رزوق	عضو هيئة التحرير
د. أحمد الجاعور	عضو هيئة التحرير
د. الياس خلف	عضو هيئة التحرير
د. روعة الفقس	عضو هيئة التحرير
د. محمد الجاسم	عضو هيئة التحرير
د. خليل الحسن	عضو هيئة التحرير
د. هيثم حسن	عضو هيئة التحرير
د. أحمد حاج موسى	عضو هيئة التحرير

تهدف المجلة إلى نشر البحوث العلمية الأصيلة، ويمكن للراغبين في طلبها الاتصال بالعنوان التالي:

رئيس تحرير مجلة جامعة حمص

سورية . حمص . جامعة حمص . الإدارة المركزية . ص . ب (77)

. هاتف / فاكس : 2138071 31 963 ++

. موقع الإنترنت : www.homs-univ.edu.sy

. البريد الالكتروني : journal.homs-univ.edu.sy

ISSN: 1022-467X

شروط النشر في مجلة جامعة حمص

الأوراق المطلوبة:

- 2 نسخة ورقية من البحث بدون اسم الباحث / الكلية / الجامعة) + CD / word من البحث منسق حسب شروط المجلة.
- طابع بحث علمي + طابع نقابة معلمين.
- **اذا كان الباحث طالب دراسات عليا:**

يجب إرفاق قرار تسجيل الدكتوراه / ماجستير + كتاب من الدكتور المشرف بموافقته على النشر في المجلة.

- **اذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية:**

يجب إرفاق قرار المجلس المختص بإنجاز البحث أو قرار قسم بالموافقة على اعتماده حسب الحال.

- **اذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية من خارج جامعة البعث :**

يجب إحضار كتاب من عمادة كليته تثبت أنه عضو بالهيئة التدريسية و على رأس عمله حتى تاريخه.

- **اذا كان الباحث عضواً في الهيئة الفنية :**

يجب إرفاق كتاب يحدد فيه مكان و زمان إجراء البحث ، وما يثبت صفته وأنه على رأس عمله.

- **يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (العلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية):**

عنوان البحث . . ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).

1- مقدمة

2- هدف البحث

3- مواد وطرق البحث

4- النتائج ومناقشتها .

5- الاستنتاجات والتوصيات .

6- المراجع.

- **يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسـبة لكليات (الآداب – الاقتصـاد– التربية – الحقوق – السياحة – التربية الموسيقية وجميع العلوم الإنسانية):**
- عنوان البحث . . ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).

1. مقدمة.
2. مشكلة البحث وأهميته والجديد فيه.
3. أهداف البحث و أسئلته.
4. فرضيات البحث و حدوده.
5. مصطلحات البحث و تعريفاته الإجرائية.
6. الإطار النظري و الدراسات السابقة.
7. منهج البحث و إجراءاته.
8. عرض البحث و المناقشة والتحليل
9. نتائج البحث.
10. مقترحات البحث إن وجدت.
11. قائمة المصادر والمراجع.

7- يجب اعتماد الإعدادات الآتية أثناء طباعة البحث على الكمبيوتر:

أ- قياس الورق 17.5×25 B5.

ب- هوامش الصفحة: أعلى 2.54- أسفل 2.54 – يمين 2.5- يسار 2.5 سم

ت- رأس الصفحة 1.6 / تذييل الصفحة 1.8

ث- نوع الخط وقياسه: العنوان . Monotype Koufi قياس 20

ـ كتابة النص Simplified Arabic قياس 13 عادي ـ العناوين الفرعية Simplified Arabic قياس 13 عريض.

ج . يجب مراعاة أن يكون قياس الصور والجداول المدرجة في البحث لا يتعدى 12سم.

8- في حال عدم إجراء البحث وفقاً لما ورد أعلاه من إشارات فإن البحث سيهمل ولا يرد البحث إلى صاحبه.

9- تقديم أي بحث للنشـر في المجلة يدل ضـمناً على عدم نشـره في أي مكان آخر، وفي حال قبول البحث للنشر في مجلة جامعة البعث يجب عدم نشره في أي مجلة أخرى.

10- الناشر غير مسؤول عن محتوى ما ينشر من مادة الموضوعات التي تنشر في المجلة

11- تكتب المراجع ضمن النص على الشكل التالي: [1] ثم رقم الصفحة ويفضل استخدام التهميش الإلكتروني المعمول به في نظام وورد WORD حيث يشير الرقم إلى رقم المرجع الوارد في قائمة المراجع.

تكتب جميع المراجع باللغة الانكليزية (الأحرف الرومانية) وفق التالي:

آ . إذا كان المرجع أجنبياً:

الكنية بالأحرف الكبيرة ـ الحرف الأول من الاسم تتبعه فاصلة ـ سنة النشر ـ وتتبعها معترضة (–) عنوان الكتاب ويوضع تحته خط وتتبعه نقطة ـ دار النشر وتتبعها فاصلة ـ الطبعة (ثانية . ثالثة) . بلد النشر وتتبعها فاصلة . عدد صفحات الكتاب وتتبعها نقطة.

وفيما يلي مثال على ذلك:

–MAVRODEANUS, R1986– **Flame Spectroscopy**. Willy, New York, 373p.

ب . إذا كان المرجع بحثاً منشوراً في مجلة باللغة الأجنبية:

ـــ بعد الكنية والاسم وسنة النشر يضاف عنوان البحث وتتبعه فاصلة، اسم المجلد ويوضع تحته خط وتتبعه فاصلة ـــ المجلد والعدد (كتابة مختزلة) وبعدها فاصلة ـــ أرقام الصفحات الخاصة بالبحث ضمن المجلة.

مثال على ذلك:

BUSSE,E 1980 Organic Brain Diseases **Clinical Psychiatry News** , Vol. 4. 20 – 60

ج. إذا كان المرجع أو البحث منشوراً باللغة العربية فيجب تحويله إلى اللغة الإنكليزية و التقيد بالبنود (أ و ب) ويكتب في نهاية المراجع العربية: (المراجع In Arabic)

رسوم النشر في مجلة جامعة حمص

1. **دفع رسم نشر (50000) ل.س أربعون ألف ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة البعث.**
2. **دفع رسم نشر (200000) ل.س مئة الف ليرة سورية عن كل بحث للباحثين من الجامعة الخاصة والافتراضية .**
3. **دفع رسم نشر (200) مئتا دولار أمريكي فقط للباحثين من خارج القطر العربي السوري .**
4. **دفع مبلغ (15000) ل.س ستة آلاف ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.**

المحتوى

اسم البحث	اسم الباحث	الصفحة
نمذجة رقمية ثنائية البعد بطريقة العناصر المنتهية للتشوهات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق ضمن المدن باستخدام الآلة الدرعية.	د. ريم بوبو	54-11
إدارة المياه لمشروع ري طار العلا والعشارنة	د.م. كنان الاحمد	72-55
دراسة الحدائق الشاطئية ضمن الواجهات الساحلية والبحرية (تجارب ودروس مُستفَادة)	أ.م.د. سامي شيخ ديب	106-73
التحقيق التجريبي في تأثير الركام الخرساني المعاد تدويره على مقاومة الضغط للخرسانة	م. محمد نور العمر د.م منيب العلاف د.م. عصام ملحم	130-107

نمذجة رقمية ثنائية البعد بطريقة العناصر المنتهية للتشوهات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق ضمن المدن باستخدام الآلة الدرعية.

د. ريم بوبو*

ملخص

يتناول هذا البحث تحليل لتشوهات التربة الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية باستخدام الآلة الدرعية. الغاية من البحث دراسة تأثير الضغوط المطبقة من قبل الآلة الدرعية بالإضافة لخصائص الوسط المحفور وذلك على كل من الانتقالات الشاقولية متمثلة بحوض الهبوط السطحي وعلى الانتقالات الأفقية في كتلة التربة المحيطة بالنفق. تضمن البحث اقتراح طريقة نمذجة عددية ثنائية البعد لعملية تنفيذ النفق مع التركيز على دور كل من الضغط المطبق من قبل الآلة الدرعية لتدعيم واجهة الحفر وضغط حقن الملاط خلف كسوة النفق، وذلك في دراسة لمعطيات مشروع امتداد نفق Milan المنفذ ضمن تربة رملية باستخدام آلة درعية مدعمة بضغط التربة. تمت مقارنة نتائج النمذجة العددية مع كلٍ من نتائج القياسات الحقلية ونتائج الطرق التحليلية والتجريبية المقترحة لحساب الهبوطات السطحية أعلى الأنفاق. تم توظيف النموذج العددي (2D–FE Model) لإجراء دراسة بارامترية مع التركيز على دور معامل دفع التربة الجانبي k_0 في تطور تشوهات التربة المحيطة بالنفق.

كلمات مفتاحية: نفق سطحي، آلة درعية، تشوهات التربة، حوض الهبوط، طرق تجريبية، طريقة العناصر المنتهية.

* أستاذ مساعد ـ قسم الجيوتكنيك ـ كلية الهندسة المدنية ـ جامعة حمص.

Two-dimensional numerical modeling using finite elements method of deformations resulting from TBM tunnelling in urban area.

Abstract

This research analyses soil deformations resulting from TBM tunnelling. The objective of this research is to study the effect of the pressures applied by the TBM, along with the characteristics of the excavated soil, on both vertical and horizontal displacements in the soil mass surrounding the tunnel. The research suggests a two-dimensional numerical modeling for the tunneling process, focusing on the role of both the face pressure and the grout injection pressure. The study case is the Milan Underground Line 1 Extension excavated in sandy soil using earth pressure machine (EPB). The results of the numerical analysis were compared with the field measurements data, as well as with the results of the proposed empirical and analytical methods. A 2D-FE numerical model was employed to realize a parametric study, focusing on the role of k_0 in the development of soil deformations around the tunnel.

Keywords: Shallow tunnel, TBM, soil deformations, settlement trough, empirical methods, Finite elements method.

مقدمة

يتسبب تنفيذ الأنفاق السطحية ضمن الأوساط الترابية بحدوث تشوهات في كتلة التربة المحيطة بالنفق في الاتجاهين الأفقي والشاقولي. تتجلى الانتقالات الشاقولية في هبوط الطبقات التي تعلو النفق حيث تظهر الهبوطات على سطح الأرض الطبيعية على شكل حوض هبوط. أما الانتقالات الأفقية في كتلة التربة المحيطة بالنفق فتأخذ قيمتها الأعظمية في مستوي محور النفق وتتناقص باتجاه السطح. إن اعتماد التقنيات الحديثة لتنفيذ الأنفاق ومنها الآلات الدرعية قد ساهم في الحد من قيم هذه التشوهات بشكل كبير، حيث نتناول اليوم حالات أنفاق لا تتجاوز قيم الهبوطات السطحية أعلاها بضعة ميلمترات. إن التحكم بموضوع التشوهات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية مرتبط بشكل أساسي باختيار الآلة الدرعية الملائمة للوسط المحفور وبالمقدرة على الإدارة الدقيقة لبارامترات هذه الآلة أثناء تقدمها وذلك حسب طبيعة التربة وأبعاد النفق وغيرها من ظروف موقع العمل. من أهم الصعوبات التي تواجه تناول هذه العوامل في دراسة التشوهات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق هو عدم توفر قياسات حقلية كافية لها، كما أن بعض هذه العوامل تتطلب نمذجة ثلاثية الأبعاد لتحليلها بشكل دقيق حيث أهملت معظم النماذج ثنائية الأبعاد بارامترات الآلة الدرعية واقتصرت على دراسة الخصائص الجيوتكنيكية والجيومترية للمشروع قيد الدراسة.

أهمية وأهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى التنبؤ بالتشوهات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق باستخدام الآلة الدرعية ذات الواجهة المدعمة، حيث يتناول كلاً من الهبوطات الشاقولية والانتقالات الأفقية الناتجة عن أعمال تنفيذ النفق. يعتمد البحث نمذجة عددية ثنائية الأبعاد بطريقة العناصر المنتهية لتحليل دور كلٍ من الضغط المطبق من قبل الآلة الدرعية لتدعيم واجهة الحفر والضغط المطبق لحقن الملاط خلف كسوة النفق المنفذة حديثاً.

إن الهدف الأساسي لهذا البحث هو اقتراح طريقة مبسطة لنمذجة ثنائية الأبعاد تتضمن تأثير هذه الضغوط التي غالباً ما أهملت في النماذج ثنائية الأبعاد التقليدية. كما يهدف البحث لدراسة تأثير معامل دفع التربة الجانبي k_0 على قيم الانتقالات الشاقولية والأفقية الناتجة عن تنفيذ النفق.

تتجلى أهمية هذا البحث في تحليل العوامل المؤثرة على التشوهات الناتجة عن حفر وتنفيذ الأنفاق السطحية باستخدام الآلة الدرعية، والتوصل إلى فهم أعمق لتأثير طبيعة الوسط المحفور والضغوط المطبقة من الآلة الدرعية على التشوهات الناتجة عن تنفيذ الانفاق السطحية، الأمر الذي يمكن أن يساعد على اقتراح حلول مساعدة لتقليل قيم هذه التشوهات.

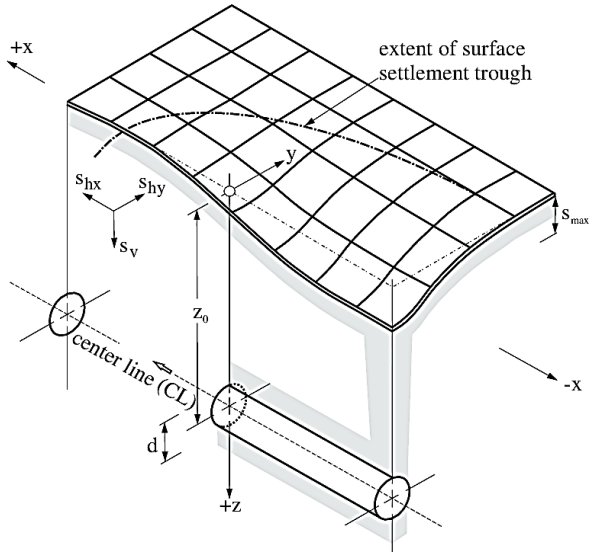
1. تشوهات التربة الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية

يسبب حفر التربة تغيير حالة الاجهادات الأولية السائدة في الوسط المحفور مما يخلق تشوهات في كتلة التربة المحيطة بالنفق، حيث تنتقل هذه التشوهات باتجاه سطح الأرض بحسب طبيعة التربة وعمق النفق وطريقة تنفيذه. إن التحكم بقيم هذه الانتقالات يتطلب المعرفة الجيدة بكافة العوامل المؤثرة والمتعلقة سواءً بطريقة تنفيذ النفق أو بطبيعة وخصائص الوسط المحفور.

تناول العديد من الباحثين دراسة التشوهات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية ضمن المدن حيث غالباً ما تم ربط تطور التشوهات قصيرة وبعيدة الأمد بخصائص الوسط المحفور وبعوامل تشغيل الآلة الدرعية [1, 2, 3].

1.1 الانتقالات الشاقولية السطحية أعلى حفريات الأنفاق

يمكن دراسة الانتقالات الشاقولية الناتجة عن أعمال تنفيذ النفق باتجاهين طولاني وعرضي كما يبين الشكل 1:

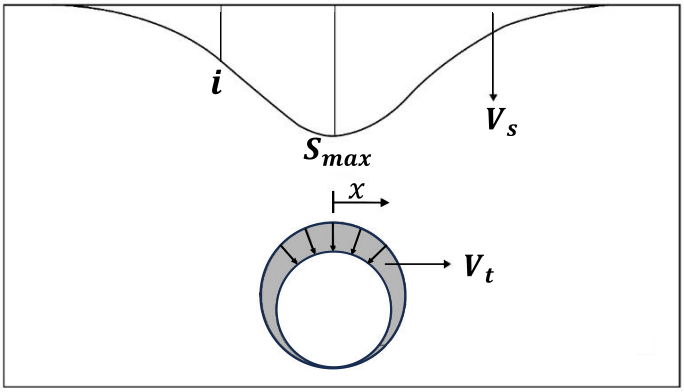


الشكل 1: حوض هبوط ثلاثي الأبعاد أعلى حفريات الأنفاق.

يدرس تطور الانتقالات مع تقدم أعمال حفر النفق إما في مقطع طولي موازي لمحور النفق [4, 5] (الهبوط معبراً عنه بدلالة الزمن أو بحسب البعد عن واجهة الحفر)، أو في مقطع عرضي معامد لمحور النفق وهو الأكثر شيوعاً في الدراسات ثنائية الأبعاد [6, 7, 56] [8].

أظهرت المراقبة الحقلية للعديد من مشاريع الأنفاق المنفذة بالآلة الدرعية [9, 10] أن الانتقالات الشاقولية في مقطع طولاني تتجلى على شكل منحني هبوط يبدي نقطة انعطاف تعبر عن ميله الأعظمي وذلك في لحظة مرور الآلة الدرعية في واجهة الحفر.

أكدت الدراسات المرجعية التي اعتمدت الطرق التجريبية والتحليلية [1, 11, 12, 13] لدراسة التشوهات في محيط الأنفاق أن الانتقالات الشاقولية في مقطع عرضي معامد لمحور النفق تأخذ شكل حوض هبوط يعبر عنه بمنحني غوصي يأخذ قيمته الأعظمية S_{max} أعلى محور النفق كما يبين الشكل 2.



الشكل 2: حوض الهبوط السطحي في مقطع عرضي معامد لمحور النفق.

من القيم الهامة المستخدمة لتوصيف حوض الهبوط: قيمة i التي تمثل احداثي نقطة الانعطاف لمنحني حوض الهبوط (شكل 2) وقيمة الهبوط السطحي الأعظمي S_{max}.
يمكن ربط قيم المتغيرين i, S_{max} مع العوامل الجيومترية C, D, H بحسب طبيعة الوسط المحفور حيث أن: D هو قطر النفق، C: سماكة التغطية أعلى النفق، H: عمق محور النفق.

تم اقتراح العديد من العلاقات التجريبية من أجل تقدير قيمة i في مختلف أنواع الترب. يبين الجدول 1 بعض هذه العلاقات وأكثرها استخداماً بحسب نوع التربة المدروسة.

جدول 1: علاقات تجريبية اقترحت لحساب قيمة i.

العلاقة	مجال التطبيق	المرجع
$i = 0.4H + 1.92$	غضار ورمل	Schmidt [14]
$i = 0.386H + 2.84$	غضار ورمل	Ariglu [15]
$i = R.\left(\frac{H}{D}\right)^{0.8}$	غضار ورمل	Clough and Schmidt [16]
$i = k * H$	$k = 0.2 - 0.3$ للرمل	O'Reilly and New [12]

	$k = 0.4 - 0.7$ للغضار	
$i = 0.4H + 0.6$	غضار	Herzog [17]
$i = \frac{D}{2} \times 1.15 \left(\frac{H}{D}\right)^{0.9}$	غضار	Loganathan *et al.* [18]
$\frac{i_x}{R} = \left(\frac{H}{2R}\right)^n$	غضار ورمل $n = 0.8 - 1.0$	Peck [1]

أما قيمة هبوط سطح الأرض الأعظمي أعلى النفق S_{max} فقد تم حسابه في معظم المعادلات المقترحة كنسبة من حجم حوض الهبوط V_S المحسوب لمتر طولي من مسار النفق [19]. إن العلاقات المقترحة لحساب V_Sهي في الغالب علاقات تجريبية تختلف بحسب الظروف الجيولوجية والجيومترية للنفق المدروس.

اقترح في العديد من المراجع [13, 14, 20] استخدام القيمة V_L أو ما يدعى بفاقد الحجم Volume Loss وتحسب كنسبة مئوية تعطى بالعلاقة $V_L = V_S/V_t$ حيث أن V_t هو حجم المقطع العرضي للنفق المحفور وذلك في المتر الطولي.

يبين الجدول 2 بعض العلاقات التجريبية والتحليلية المقترحة لحساب قيمة S_{max} في مختلف أنواع الترب.

جدول 2: علاقات رياضية اقترحت لحساب S_{max}الهبوط السطحي الأعظمي أعلى الأنفاق.

العلاقة	المرجع
$S_{max} = 0.785[\gamma_n \times H + \sigma_s] \times \frac{D^2}{i \times E}$	Herzog [17]
$S_{max} = 0.0125 \times \frac{V_L}{i} \times \left(\frac{D}{2}\right)^2$	Schmidt [14]

$S_{max} = \frac{\gamma D^2}{E}(0.85 - \nu)$	Sagaseta [21]
$S_{max} = 0.313(\frac{V_L * D^2}{i})$	Mair and Taylor [13]
$S_{max} = 384\, V_L/105\pi R$	Wang *et al.* [22]
$S_{max} = \frac{(1+\upsilon^2)P_v}{E}\frac{4HR^2}{H^2-R^2}$	Atwell *et al.* [23]
$S_{max} = \frac{V_s}{i\sqrt{2\pi}} = \frac{V_s}{2.5i}$	Peck [1]

نلاحظ من الجداول 2 أن الطرق التجريبية والتحليلية اختلفت في المعادلات المقترحة لحساب الهبوط الأعظمي أعلى الأنفاق وأن هناك تبايناً واضحاً في نتائج هذه الطرق.

نستعرض فيما يلي أهم طرق حساب الانتقالات الشاقولية (أعلى حفريات الأنفاق) المعتمدة في الدراسات المرجعية والتي تم توظيفها في هذا البحث:

طريقة Peck [1]:

اقترح Peck [1] المعادلة التجريبية التالية لحساب الانتقالات الشاقولية السطحية أعلى النفق:

$$S(x) = S_{max} \,.\, exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \qquad (1)$$

حيث أن:

$S(x)$: الهبوط في نقطة تبعد مسافة x عن محور النفق الشاقولي كما يبين الشكل 2.

S_{max}: الهبوط السطحي الأعظمي أعلى محور النفق.

i: إحداثي نقطة الانعطاف لمنحني حوض الهبوط كما يوضح شكل 2.

طريقة Oteo [24]

وهي طريقة نصف تجريبية انطلقت من علاقة Peck لحساب الانتقالات الشاقولية أعلى الأنفاق حيث أضاف Oteo معاملين تجريبيين هما Ψ, η. تحدد قيمة Ψ من تحليل قيم الانتقالات المقاسة

حقلياً، أما قيمة η فتحدد بحسب طبيعة التربة المحفورة [25]. اقترح Oteo المعادلة التالية لحساب الانتقالات الشاقولية السطحية أعلى النفق:

$$S(x) = \Psi \frac{\gamma D^2}{E}(0.85 - \nu)e^{\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right)} \quad (2)$$

كما اقترح العلاقة التالية لحساب قيمة i:

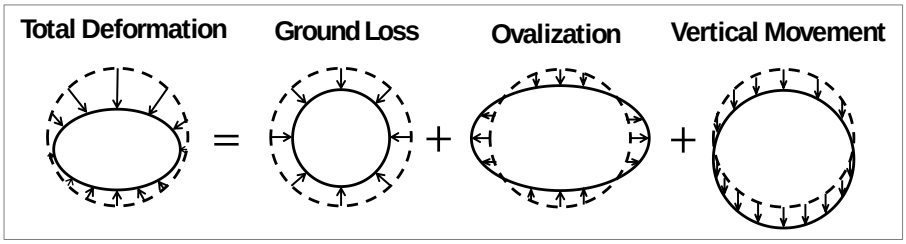
$$i = R.\eta.\left(1.05\frac{H}{D} - 0.42\right) \quad (3)$$

أما قيمة الهبوط S_{max} فتعطى بالعلاقة التالية، حيث أن υ هو معامل بواسون:

$$S_{max} = \Psi \frac{\gamma D^2}{E}(0.85 - \nu) \quad (4)$$

طريقة González & Sagaseta [26]

اقترحت هذه الطريقة بدايةً من قبل Sagaseta [27] حيث سمحت بتقييم مجال الإجهادات في التربة المتجانسة متماثلة الخواص غير القابلة للانضغاط. اعتمدت الطريقة أن التشوهات الكلية في محيط النفق تنتج كمحصلة مكونة من ثلاث مركبات هي: التقلص بالاتجاه القطري Radial contraction الناتج عن فاقد الحجم، والتوسع الجانبي (البيضوي) ovalisation الذي يحدث في مستوي القطر الأفقي للنفق، بالإضافة للانتقالات الشاقولية، كما يوضح الشكل 3:



الشكل 3: مركبات التشوهات الكلية في محيط حفريات الأنفاق وفق Sagaseta [27]

تم تطوير هذه الطريقة عام 2001 من قبل González and Sagaseta [26] بإضافة معامل الانضغاط الحجمي للتربة α وهو معامل تجريبي يأخذ قيمة مساوية للواحد في الترب الغضارية أما في الترب الحبيبية فتكون قيمة α أكبر من 1 وقد تصل قيمته إلى 2 حيث تعتمد قيمة هذا الثابت على عمق النفق وفق الحالات التالية:

$$if\ H/D < 2 \quad \Longrightarrow \quad \alpha = 2$$
$$if\ H/D > 4 \quad \Longrightarrow \quad \alpha = 1$$

وظفت المعادلة التالية لحساب الانتقالات الشاقولية السطحية أعلى النفق [26]:

$$S(x) = 2.\varepsilon.R\left(\frac{R}{H}\right)^{2\alpha-1}.\frac{1}{(1+\bar{x}^2)^{\alpha}}\left(1+\rho.\frac{1-\bar{x}^2}{1+\bar{x}^2}\right) \qquad (5)$$

حيث أن:

$$\bar{x} = \frac{x}{H} \ , \quad \varepsilon = \frac{V_L}{2} \quad , \quad \rho = \frac{\delta}{\varepsilon}$$

ε : معامل يعبر عن التقلص القطري radial contraction ويمثل قيمة الانتقال القطري منسوباً إلى نصف قطر النفق.

δ : معامل يعبر عن التوسع الجانبي (البيضوي) ويمثل نسبة التوسع الجانبي الأعظمي المقاس في مستوي محور النفق الأفقي منسوباً إلى نصف قطر النفق.

وبالتالي يمكن حساب القيمة ρ التي تعبر عن التوسع البيضوي النسبي من العلاقة $\frac{\delta}{\varepsilon}$.

ومنه نجد أن التشوهات في هذه الطريقة محكومة بثلاثة عوامل هي $\alpha, \delta, \varepsilon$ تعتمد على طبيعة التربة وأعمال الحفر، حيث أن تقدير هذه القيم مرتبط بطبيعة التربة وبالقياسات الحقلية ويتأثر بدقتها ويؤثر بنفس الوقت بشكل كبير على القيم المحسوبة وفق المعادلة [5].

طريقة Verruijt–Booker [28]

وهي من الطرق التحليلية التي اعتمدت بشكل مشابه لطريقة González and Sagaseta توظيف الثوابت δ, ε حيث تعتبر هذه الطريقة تعميماً لطريقة Sagaseta صالحاً للترب المنضغطة (مهما كانت قيمة معامل بواسون).

تحسب الانتقالات السطحية الشاقولية في هذه الطريقة من العلاقة التالية:

$$S(x) = 4\varepsilon.R^2\,(1-\upsilon)\frac{H}{x^2+H^2} - 2\delta.R^2.H.\frac{x^2-H^2}{(x^2+H^2)^2} \qquad (6)$$

حيث يحسب ε بدلالة V_L من العلاقة التالية:

$$\varepsilon = \frac{V_L}{4(1-\upsilon)} \qquad (7)$$

2.1 انتقالات التربة الأفقية الناتجة عن تنفيذ الأنفاق:

درس العديد من الباحثين [4, 29, 30] تشوهات التربة الأفقية الناشئة في جوار الأنفاق حيث يسبب تقدم الآلة الدرعية نشوء تشوهات أفقية في كتلة التربة بالاتجاهين الطولاني والعرضي. اتفقت الدراسات [31, 32] على أن مقدار واتجاه هذه التشوهات يعتمد بشكل أساسي على طبيعة التربة وظروف تقدم الحفر وعلى ارتفاع الحفرية.

بينت دراسة الانتقالات الأفقية في مقطع عرضي على نفق مترو ليون [33] نشوء انتقالات محدودة باتجاه النفق على سطح الأرض واندفاع التربة باتجاه الخارج في مستوي محور النفق الأفقي بينما تكون التربة شبه ثابتة لا تتحرك أسفل قاع النفق.

وجدت نفس الملاحظات الحقلية من قبل [4, 30] في العديد من ورشات الأنفاق المنفذة في اليابان حيث ترافق مرور الآلة الدرعية مع تشوهات أفقية باتجاه الخارج في مستوي محور النفق الأفقي ثم تعود التربة للتحرك باتجاه الداخل لاحقاً.

بشكل مشابه لانتشار التشوهات الشاقولية في التربة فإن التشوهات الأفقية التي تنشآ في مستوي محور النفق الأفقي تنتقل لسطح الأرض. إنما نجد القليل من الدراسات [34] تناولت حساب هذه الانتقالات السطحية بسبب صعوبة تحديدها حقلياً بدقة [35].

اقترح Lake [34] طريقة مبسطة لرسم منحني الانتقالات الأفقية بناءً على الانتقالات الشاقولية وعلى بعض العوامل الجيومترية (عمق محور النفق H والمسافة الأفقية x عن محور النفق)، حيث اعطى العلاقة التالية لحساب الانتقالات الأفقية $S_h(x)$ في مستوي سطح الأرض بناءً على قيمة الانتقالات الشاقولية $S(x)$:

$$S_h(x) = S(x).\frac{x}{H} \qquad (8)$$

إن هذا المبدأ المشابه لذلك المقترح من قبل [1] Peck يبين أن حقل الانتقالات في التربة أعلى النفق متمركز حول النفق حيث تخلق الانتقالات الأفقية على السطح منطقة مضغوطة في مستوي محور النفق ومنطقة مشدودة بعيداً قليلاً عن هذا المحور. إن وجود مناطق الشد والضغط هذه له تأثير كبير على الأبنية المجاورة، الأمر الذي يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار عند دراسة التشوهات الناتجة عن الحفر.

2. عوامل تشغيل الآلة الدرعية

إن معظم العلاقات التجريبية والتحليلية المقترحة لدراسة الانتقالات الشاقولية والأفقية في محيط حفريات الأنفاق لم تأخذ بعين الاعتبار العوامل المتعلقة بتكنولوجيا تنفيذ النفق [36 ,25].

نركز هنا بشكل خاص على التنفيذ بالآلات الدرعية كونه يتم عبر عدة مراحل يوظف في كل منها عدد كبير من العوامل التقنية التي يمكن تسجيلها ضمن الآلة أثناء تقدمها [38 ,37]. من أهم هذه العوامل الضغوط المطبقة من قبل الآلة على الوسط المحفور كونها العامل الأساسي الذي يمكن أن يقاوم تشوهات التربة وفقدان الحجم [55]. إن التحليل الدقيق لهذه العوامل تم في اغلب دراسات النمذجة الرقمية من خلال موديلات ثلاثية الأبعاد [41 ,40 ,39] تتفاوت في درجة تعقيدها وتتسم باستهلاك الوقت والجهد. أما في أعمال النمذجة ثنائية الأبعاد [43 ,42] فقد اقتصرت بعض الموديلات على إدخال الضغط المطبق من قبل الآلة الدرعية لحقن الملاط خلف كسوة النفق البيتونية مسبقة الصنع [44] بينما أهمل ضغط تدعيم واجهة الحفر باعتبار تأثيره ثلاثي الأبعاد.

في الحالة العامة، يعتبر تطبيق الضغط P_{conf} من قبل الدرع المتوضع على تماس مع واجهة الحفر لتدعيم التربة في الواجهة من العوامل الهامة جداً كونه يضمن ثبات الحفرية ويتحكم بالتشوهات في التربة.

يطبق ضغط تدعيم واجهة الحفر في الآلة الدرعية المدعمة بضغط التربة عن طريق ضغط كتلة التربة المحفورة ضمن حجرة الحفر على واجهة النفق (حفر بحجم ثابت). وجد [45] أن زيادة ضغط تدعيم واجهة الحفر يمكن أن يقلل من الهبوطات وذلك من خلال دراسته لقياسات حقلية

منفذة في «Taipei's Rapid Transit Tunnels» حيث تم تنفيذ أربعة أنفاق باستخدام آلة درعية ذات واجهة مدعمة بضغط التربة.

كما بينت المراقبة الحقلية المنفذة من قبل [46] في مشروع MRTA في بانكوك والمنفذ باستخدام آلة درعية مدعمة بضغط التربة أن زيادة ضغط تدعيم الواجهة تقلل من هبوط سطح الأرض، حتى أنه لوحظ في بعض الحالات حدوث ارتفاع لسطح الأرض عند تطبيق قيم كبيرة لضغط تدعيم الواجهة.

اقترح [47] Lee *et al.* التعبير عن ضغط تدعيم واجهة الحفر منسوباً إلى ضغط التربة الأولي الأفقي في مستوي محور النفق وهو ما سمي بالقيمة EPR. حيث بينت القياسات المنفذة في ورشة نفق المترو 2 في شنغهاي أنه إذا كنت النسبة EPR >1 تبدي التربة سلوك ارتفاع بدلاً من الهبوط الذي يتطلب ان تكون النسبة EPR<1، كما اعتبر أن الانتفالات الشاقولية السطحية تكون معدومة عندما EPR=1.

بينما اقترح [40] Mollon *et al.* بناءً على نمذجة ثلاثية الأبعاد أن قيمة ضغط التدعيم المطبق على واجهة الحفر يجب أن يساوي قيمة دفع التربة الجانبي المحسوب في مستوي مركز النفق.

بينت [37] Vanoudheusden أن قيمة ضغط تدعيم واجهة الحفر المطبق من قبل الآلة الدرعية المدعمة بضغط التربة التي نفذت نفق المترو B في مدينة تولوز الفرنسية كانت مساوية $0.6\sigma_{v0}$ (حيث أن σ_{v0} هو الاجهاد الشاقولي المؤثر في مستوي قمة النفق).

تتضمن المرحلة التالية من مراحل تقدم الآلة الدرعية تنفيذ كسوة النفق تحت حماية غلاف الآلة Shield، يلي ذلك الحقن بملاط اسمنتي خلف كسوة النفق المنفذة وذلك لملء الفراغ الناتج عن انسحاب غلاف الآلة. تمت نمذجة هذه المرحلة بطرق عديدة فالبعض اعتمد على دراسة تغيير خصائص طبقة الملاط المحقون نتيجة تصلبها آخذين بعين الاعتبار كثافة الملاط وخصائص تصلبه [47]، بينما اتجه آخرون [48, 49] لنمذجة الضغط المطبق لحقن الملاط P_{inj} ودراسة تأثيره على التشوهات الناتجة عن هذه المرحلة من تنفيذ النفق.

في العموم، يرافق عملية الحقن تحرك التربة مبتعدةً عن محيط النفق حيث اعتبر Oota *et al.* [30] أن زيادة الفرق الجبري بين قيمة ضغط الحقن والاجهاد الأولي السائد في التربة يزيد من الهبوطات الشاقولية أعلى النفق.

يجب أن يطبق ضغط الحقن بقيمة كافية تضمن سيلان الملاط المحقون ومقاومة تشوهات التربة. بحسب Suwansawat et Einstein [50] إن تطبيق قيم كبيرة لضغط الحقن والملء الجيد للفراغات بالملاط يمكن أن يقلل بشكل كبير من هبوطات سطح الأرض.

بين Komiya *et al.* [51] أن حقن الملاط يمكن أن يؤثر على تشوهات التربة قصيرة الأمد، بينما تنشأ التشوهات طويلة الأمد بسبب تصلب الملاط المحقون ونتيجة انخفاض ضغط الماء المسامي الذي يرتفع عند حقن الملاط. بينت تجارب الحقن المنفذة خلال حفر نفق Koto-ku [51] حدوث ارتفاع في التربة الغضارية المحيطة بالنفق بلغ 15mm في لحظة الحقن على بعد حوالي 5m من نقطة تنفيذ الحقن (في مقطع عرضاني). يتزايد الهبوط الناتج عن التشديد مع مرور الزمن حتى يصل إلى 33mm بعد ثلاثة شهور من تنفيذ الحقن.

نسعى في هذا البحث إلى اقتراح منهجية للأخذ بعين الاعتبار قيمتي كلاً من ضغط تدعيم واجهة الحفر P_{conf} وضغط الحقن P_{inj} في نمذجة عددية ثنائية الأبعاد ودراسة تأثير هذه الضغوط على التشوهات المقاسة حقلياً في الحالة المدروسة لنفق سطحي منفذ باستخدام آلة درعية مدعمة بضغط التربة.

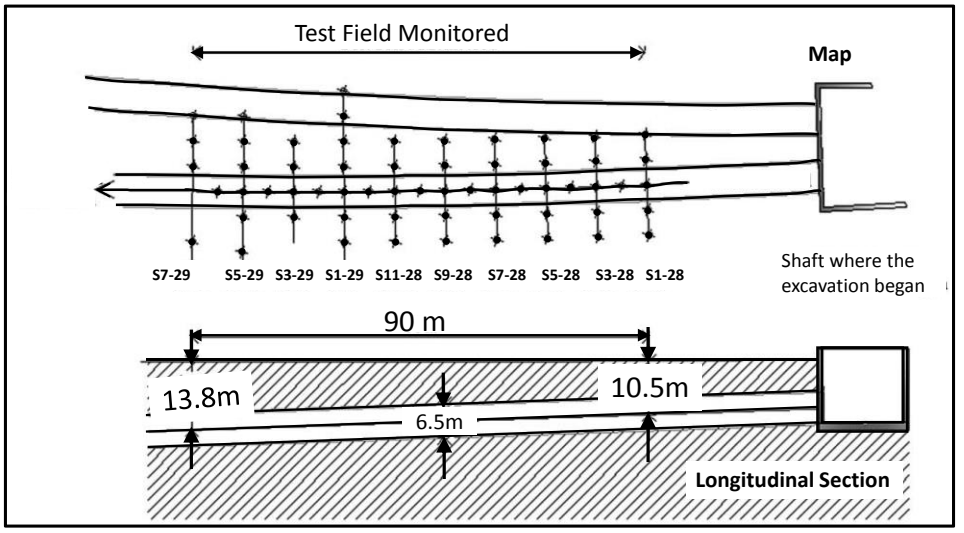
3. معطيات الدراسة – Case Study

يتناول البحث دراسة لمعطيات مأخوذة من مشروع Milan underground line 1 extension وهو امتداد لنفق المترو رقم 1 المنفذ في مدينة ميلانو في إيطاليا [52, 53]. تتراوح سماكة التغطية أعلى النفق بين 8-19m على كامل امتداد النفق حيث يبلغ قطر النفق 6.5m. منسوب المياه الجوفية يقع على عمق 10m أسفل سطح الأرض الطبيعية. الوسط المحيط بالنفق هو تربة رملية خصائصها الميكانيكية موضحة في الجدول 3.

جدول 3: خصائص التربة في مشروع Milan underground line 1 extension.

خصائص التربة	القيمة
الوزن الحجمي γ_b	$18\ KN/m^3$
الوزن الحجمي γ_{sat}	$22\ KN/m^3$
زاوية الاحتكاك الداخلي φ	$30°$
معامل المرونة E للتربة السطحية حتى عمق 15m	$75MPa$
معامل المرونة E للتربة المتوضعة على عمق أكبر من 15m	$100MPa$
معامل بواسون υ	0.3

نفذ النفق بواسطة آلة درعية مدعمة بضغط التربة، كسوة النفق بيتونية مسلحة مسبقة الصنع تبلغ سماكتها 30cm مؤلفة من حلقات متتالية يبلغ طول الحلقة الواحدة 1.4m. رافق المراحل المختلفة لإنشاء النفق تنفيذ حملة قياسات حقلية عبر نقاط ومقاطع قياس موزعة على كامل امتداد النفق كما يبين الشكل 4.



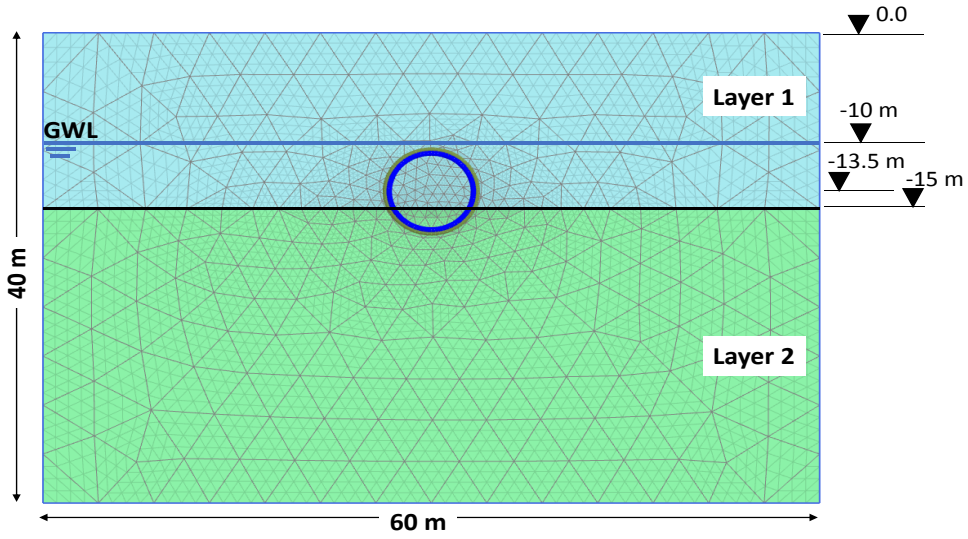
الشكل 4: مسقط ومقطع طولي يبين عمق النفق وتوزع مقاطع القياس على امتداد النفق [52].

استمرت مراقبة القياسات الحقلية لتشوهات التربة وبشكل خاص هبوط سطح الأرض منذ بدء أعمال الحفر وحتى انتهاء المشروع.

4. نمذجة رقمية FE-2D

تمت نمذجة الحالة المدروسة باعتماد موديل ثنائي الأبعاد لمقطع عرضي للنفق المدروس بطريقة العناصر المنتهية باستخدام برنامج Plaxis 2D.

تمت نمذجة المقطع S-5-29 المبين في الشكل 4 حيث يتوضع النفق في وسط النموذج ويبلغ عمق مركز النفق 13.5m أسفل سطح الأرض الطبيعية. تم اعتماد موديل كامل (شكل 5) بالرغم من تناظر المسألة قيد الدراسة وذلك من أجل المقارنة مع القياسات الحقلية في المقطع المدروس، حيث أن نقاط القياس المتاحة في هذا المقطع لم توزع بشكل متناظر بالنسبة لمحور النفق (كما يظهر لاحقاً في الشكل 6). عرض النموذج المقترح 60m وارتفاعه 40m، يتكون النموذج من عناصر مثلثية ذات 15 عقدة. الشروط الطرفية تقليدية: تم تقييد الحركة الأفقية على الحواف الجانبية للنموذج، وتقييد الحركة الشاقولية في أسفل النموذج.



الشكل 5: مقطع عرضي يبين أبعاد النموذج وشبكة العناصر المنتهية المعتمدة في النمذجة.

يبين الجدول 4 معطيات النمذجة من خصائص طبقتي التربة المدروسة ومواصفات كسوة النفق البيتونية، حيث تمت دراسة السلوك المصرف للتربة باعتماد معيار مور كولومب كما تمت نمذجة الكسوة باعتبارها ذات سلوك مرن.

جدول 4: الخصائص الميكانيكية للطبقات المستخدمة في النمذجة.

الخصائص	طبقة التربة 1	طبقة التربة 2	كسوة النفق البيتونية
$\gamma\ (KN/m^3)$	18 & 22	22	25
$E\ (Mpa)$	100	75	25000
υ	0.3	0.3	0.2
$\varphi°$	30	30	
$\Psi°$	0	0	

إن نمذجة مراحل الحفر وتنفيذ كسوة النفق تمت بعد تحليل واسع للعديد من النماذج ثنائية البعد المقترحة في الدراسات المرجعية حيث تم التركيز على نقطتين أساسيتين:
بدايةً اقتصرت معظم النماذج ثنائية الأبعاد على الاكتفاء بنمذجة ضغط الحقن وأهملت ضغط تدعيم واجهة الحفر ولم يتم إدخاله في مراحل النمذجة ثنائية البعد بالرغم من أهمية هذا العامل حيث أنه يؤخذ بالحسبان في الموديلات ثلاثية الأبعاد فقط. قد يعود ذلك إلى صعوبة نمذجة هذا الضغط المطبق بالاتجاه Z في موديل ثنائي الأبعاد متوضع في جملة إحداثيات XY.

النقطة الثانية التي تم التركيز عليها في النموذج المقترح هو نمذجة التشوهات الناتجة عن فاقد الحجم Volume Loss: حيث اقترحت بعض النماذج تمثيل عملية تصلب الملاط المحقون من خلال تغيير خصائص طبقة الملاط في مراحل النمذجة (اعتماد طبقة ذات صلابة منخفضة لتمثيل الملاط الطري ومن ثم رفع قيمة صلابة هذه الطبقة في المرحلة التالية). بينما اقترح في العديد من النماذج الأخرى الاعتماد على تطبيق معامل التقلص (المتاح في برنامج Plaxis) وذلك في المرحلة الثانية من النمذجة أي بعد حفر النفق وقبل تنفيذ الكسوة البيتونية معتبرين أن الحفر هو المسبب الرئيسي لفاقد الحجم (وهي الطريقة المقترحة في دليل البرنامج [54]).

في الواقع إن عملية الحفر تترافق مع تدعيم طولاني يؤمنه غلاف الآلة المعدني Shield الذي تتم تحت حمايته تركيب وتثبيت حلقات الكسوة البيتونية مسبقة الصنع، ومن ثم يتسبب انسحاب الغلاف المعدني مع تقدم الآلة بترك فراغات محيطية بين كسوة النفق المنفذة ومحيط الحفرية. يتم ملء هذه الفراغات بالملاط المحقون الذي يتصلب لاحقاً، إذاً هنا وبعد هذه المرحلة أي بعد تصلب الملاط المحقون يتجلى فاقد الحجم وهبوط التربة المرافق له.

ولذلك تم في هذا البحث تطبيق معامل التقلص في المرحلة الأخيرة من النمذجة لتمثيل السلوك طويل الأمد للوسط المحفور الذي يترافق مع قيم الهبوطات النهائية. إذاً يمكن تلخيص مراحل النمذجة المقترحة كالتالي:

المرحلة 1: عملية الحفر بإلغاء تفعيل التربة في مقطع النفق مع تطبيق ضغط تدعيم موزع بانتظام على محيط الحفرية.

المرحلة 2: تفعيل كسوة النفق البيتونية.

المرحلة 3: تطبيق ضغط حقن الملاط خلف الكسوة، حيث يطبق كضغط موزع بانتظام على كامل محيط الحفرية.

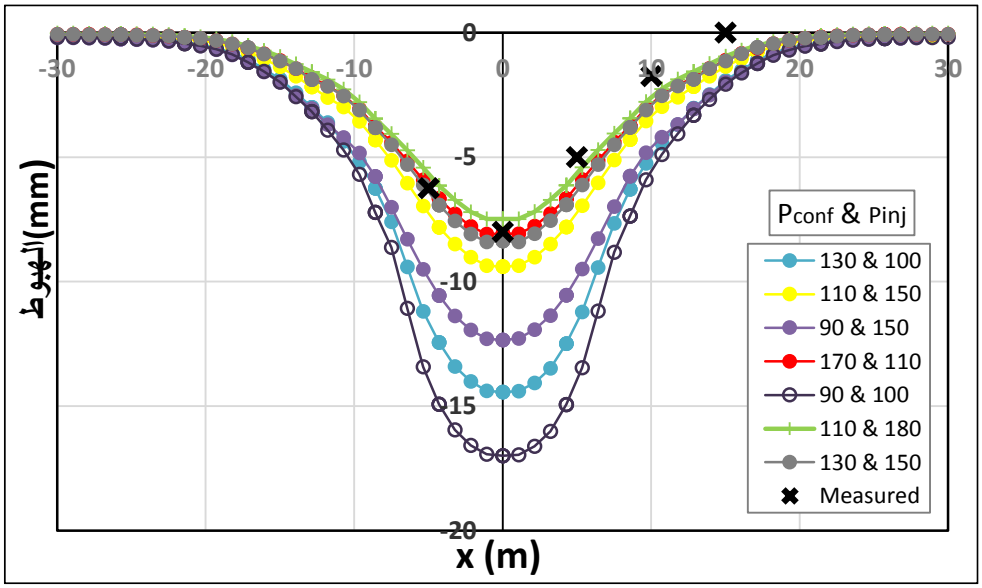
المرحلة 4: تطبيق معامل التقلص وهو نسبة تخفيض تمثل التقلص أو الانكماش الحاصل في التربة المحيطة بالنفق نتيجة تصلب طبقة الملاط المحقون وبالتالي هبوط التربة المحيطة بها.

تمت مقارنة نتائج النمذجة العددية مع قيم الهبوطات النهائية المقاسة في المقطع المدروس، كذلك مع النتائج التي تعطيها الطرق التجريبية والتحليلية ونستعرض النتائج فيما يلي.

5. النتائج والمناقشة

تم في البدء معايرة النموذج المقترح من خلال مقارنة الانتقالات الشاقولية السطحية (حوض الهبوط) في مقطع عرضي على محور النفق وهو مقطع القياس S–5–29. لم تتوفر قيم مرجعية مقاسة للضغوط المطبقة من قبل الآلة الدرعية خلال مراحل تقدمها ولذلك تم اختبار عدد كبير جداً من أزواج القيم P_{conf} & P_{inj} في الموديل المقترح ومقارنة قيم الهبوط الناتج مع القيم المقاسة حقلياً في المشروع.

نظراً لأن المقارنة تتم مع قيم الهبوط النهائي المقاس بعد انتهاء أعمال تنفيذ النفق فقد كان هناك صعوبة في معايرة قيم الضغوط المطبقة من قبل الآلة الدرعية في مرحلتين مختلفتين بوقت واحد معاً. يبين الشكل 6 مقارنة بين قيم الهبوطات النهائية المقاسة حقلياً ونتائج النمذجة الناتجة عن تطبيق قيم مختلفة للضغوط P_{conf} & P_{inj} (مقدرة بـ kPa)، حيث تم إجراء المعايرة السابقة باعتبار قيمة معامل تقلص مساوية 0.5.



الشكل 6: قيم الانتقالات الشاقولية المقاسة والمحسوبة من أجل قيم مختلفة لـ P_{conf} & P_{inj}.

يبين الجدول 5 قيم الهبوط السطحي الأعظمي الموافقة لتطبيق قيم مختلفة لـ P_{conf} & P_{inj} مع العلم أن القيمة المقاسة حقلياً للهبوط السطحي الأعظمي تبلغ 8 mm في المقطع المدروس.

جدول 5: قيم S_{max} المحسوبة من أجل قيم مختلفة للضغوط المطبقة من الآلة الدرعية.

P_{conf}	80	90	100	110	120	130	110	90	110	110	120	120	130
P_{inj}	150	150	150	150	150	150	180	100	170	130	130	160	160
S_{max}	24.5	12.3	10.5	9.39	8.8	8.4	7.49	17.0	8.08	10.8	10.20	8.10	7.70

بناءً على نتائج المعايرة والمقارنة مع القيم الحقلية تم اعتماد قيمة ضغط تدعيم واجهة الحفر P_{conf} مساوية 110kPa.عادةً ما يتم ربط هذه القيمة بقيمة الاجهاد الشاقولي المحسوب في مستوي مركز النفق كما ذكر أعلاه في الدراسة المرجعية [37, 40]، حيث تعطى في حالتنا المدروسة العلاقة بين هاتين القيمتين بالنسبة التالية:

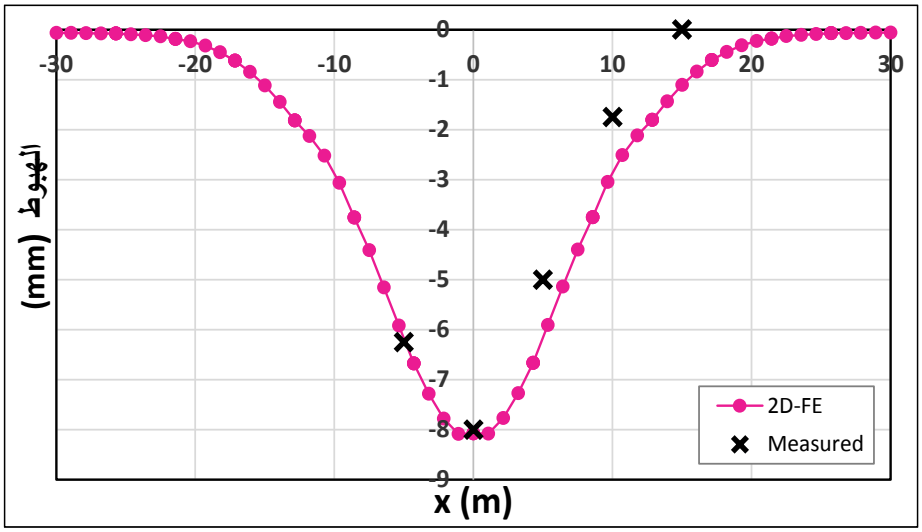
$$\frac{P_{conf}}{\sigma_{v0}} = \frac{110}{18 * 10 + 22 * 3.5} = 0.43$$

وهي قيمة مقاربة للقيمة التي اقترحها Mollon [40] والمساوية $k_0 . \sigma_{v0}$ حيث تبلغ قيمة k_0 في الحالة المدروسة 0.5.

كما تم اعتماد القيمة 170KPa لضغط الحقن حيث تم ربط هذه القيمة بقيمة الإجهاد الشاقولي المحسوب في مستوي قمة النفق (موضع تنفيذ الحقن) فكانت النسبة: 0.92 أي تساوي $1.8k_0$ وهي قيمة أكبر من القيم المقترحة في الدراسات المرجعية [40]، يعود ذلك إلى أن النفق منفذ تحت منسوب الماء الجوفي الأمر الذي تطلب تطبيق ضغط حقن مرتفع للتغلب على ضغط الماء الهيدروستاتيكي.

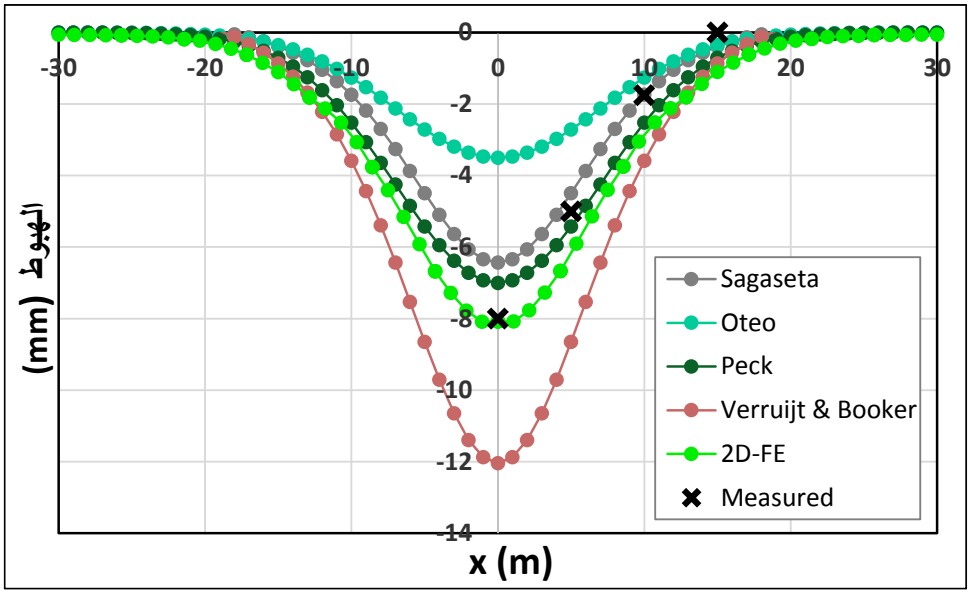
يبين الشكل 7 نتائج النمذجة باستخدام القيمتين P_{conf} =110 kPa، P_{inj} =170 kPa والتي تبدي تقارباً واضحاً مع القيم المقاسة حقلياً خاصة فيما يتعلق بقيمة الهبوط الأعظمي الذي بلغ

8.08 mm في نتائج النمذجة مقابل القيمة المقاسة حقلياً والتي بلغت 8. mm إلا أن عرض حوض الهبوط المحسوب بالنمذجة كان أكبر من عرض حوض الهبوط المقاس حقلياً.



الشكل 7: حوض الهبوط النهائي المحسوب بالنمذجة بالنسبة للقيم المقاسة حقلياً.

تمت في المرحلة التالية مقارنة قيم الانتقالات الشاقولية المحسوبة بالنمذجة (باعتماد القيم P_{conf} & P_{inj} المذكورة أعلاه) مع قيم الانتقالات التي تعطيها العلاقات الرياضية التجريبية والتحليلية المذكورة سابقاً. كما يبين الشكل 8:



الشكل 8: الانتقالات الشاقولية المحسوبة بالنمذجة وبالطرق النظرية نسبةً للقيم المقاسة حقلياً.

نلاحظ أن طريقة Verruijt & Booker لم تكن موفقة في التنبؤ بحوض الهبوط حيث أعطت قيمة 12mm للهبوط السطحي الأعظمي وهي أكبر بكثير من القيمة المقاسة حقلياً. بينما بالمقابل أعطت طريقة Oteo حوض هبوط قليل العمق بلغت فيه قيمة الهبوط الأعظمي 3.5mm وهي قيمة أقل بكثير من القيمة الحقلية.

نجحت طريقة Sagaseta في تمثيل الهبوطات السطحية في نقاط القياس الطرفية فأعطت شكل صحيح وعرض لحوض الهبوط يقارب حوض الهبوط المقاس حقلياً، في حين لم تعطي قيمة دقيقة للهبوط الأعظمي الذي بلغ وفق هذه الطريقة 6.4mm.

يمكن القول إن طريقة Peck أعطت التقريب الأمثل (بالمقارنة مع باقي الطرق النظرية) لحوض الهبوط المقاس حقلياً وللقيم التي تم الحصول عليها من خلال النمذجة المقترحة، حيث بلغت قيمة الهبوط الأعظمي 7mm بالمقارنة مع قيمة 8mm مقاسة حقلياً.

إن السبب الرئيسي للفروقات بين نتائج الطرق النظرية الأربعة يعود إلى اختلاف الفرضيات والمعادلات المعتمدة وقيم الثوابت التي وظفت في كل طريقة. وهنا نذكر بعض الملاحظات التي لا بد من التنويه لها فيما يتعلق بالطرق التجريبية والتحليلية:

- بدايةً إن جميع الطرق التحليلية والتجريبية تعتمد بشكل أساسي على قيمتي S_{max}, i حيث تم اقتراح الكثير من العلاقات الرياضية التي تعطي نتائج متفاوتة وتؤثر بشكل كبير على النتائج. كثير من العلاقات المذكورة في الجدولين 1, 2 أعلاه اعتمدت لحساب هذه القيم على توظيف قيمة V_L وهي قيمة غير معلومة دائماً في حال لم تتوفر القياسات المرتبطة بها.
- فيما يتعلق بطريقة Oteo: نلاحظ أنه وظف الثابت Ψ الذي بينت الحسابات أنه عامل مسيطر على النتائج. كما أن استخدام قيمة Ψ في المعادلة رقم 4 التي اقترحها لحساب الهبوط السطحي الأعظمي أعطى قيمة $S_{max} = 2.8mm$ وهي قيمة أقل بكثير من الهبوط الأعظمي المقاس حقلياً أو المحسوب بالنمذجة. ولهذا السبب لم يتم استخدام هذه العلاقة في الحسابات وتم توظيف قيمة S_{max} المقاسة حقلياً. يمكن الاستنتاج أن المعادلة 4 المقترحة من قبل Oteo غير دقيقة ولا ينصح باستخدامها.
- اعتمدت كلاً من طريقتي Sagaseta و Verruijt & Booker على الثوابت $\alpha, \varepsilon, \delta$ والتي تتطلب معرفة قيم التشوهات القطرية والجانبية (التوسع البيضوي) للنفق حيث أن قيمتي ε, δ ثابتة في كلا الطريقتين. كما تبين أن طريقة Sagaseta محكومة إلى حدٍ كبير بقيمة المعامل α المعبر عن الانضغاطية النسبية للتربة، وهو ما تسبب في الفارق الكبير بقيم الانتقالات بين هاتين الطريقتين بالرغم من ثبات قيمتي ε, δ. في الواقع، لم يعطي Sagaseta توصيات دقيقة لحساب قيمة α، حيث ميز بين حالتين لعمق النفق (2D, 4D) كما ذكر أعلاه مما يترك مجالاً كبيراً لم يوضح فيه كيفية تحديد قيمة α بدقة وذلك عندما يتراوح عمق النفق بين 2D−4D.
- يمكن الوصول إلى نتيجة مفادها أن طريقة Peck أعطت المعادلة الأكثر دقة لحساب الانتقالات الشاقولية دون أن تتطلب استخدام ثوابت تجريبية يصعب تحديدها بدقة وتسيطر على النتائج كما في باقي الطرق التجريبية والتحليلية.

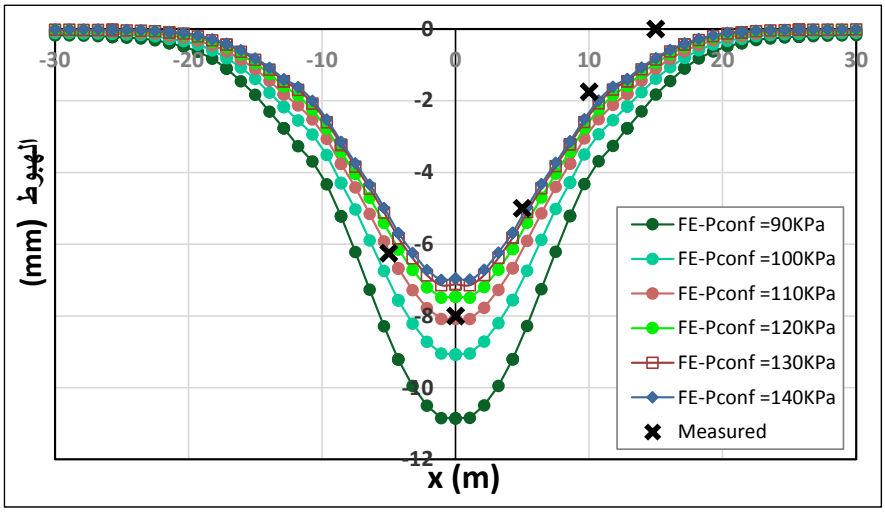
تبين من خلال الدراسة السابقة أن النموذج العددي ثنائي البعد المقترح في هذا البحث يعطي قيماً مقاربة للانتقالات المقاسة حقلياً وللقيم المحسوبة وفق طريقة Peck، وبناء عليه سيتم توظيفه لإجراء دراسة بارامترية لتأثير بعض العوامل على كلٍ من الانتقالات الشاقولية والأفقية الناتجة عن تنفيذ النفق.

6. تحليل متغيرات الدراسة Sensitivity Analysis

ركزت طريقة النمذجة المقترحة في هذا البحث على الضغوط المطبقة من قبل الآلة الدرعية أثناء تقدمها، ونظراً لتأثير كلاً من فاقد الحجم ومعامل دفع التربة الجانبي k_0 على سلوك التربة والانتقالات التي تبديها تم تحليل المتغيرات التالية:

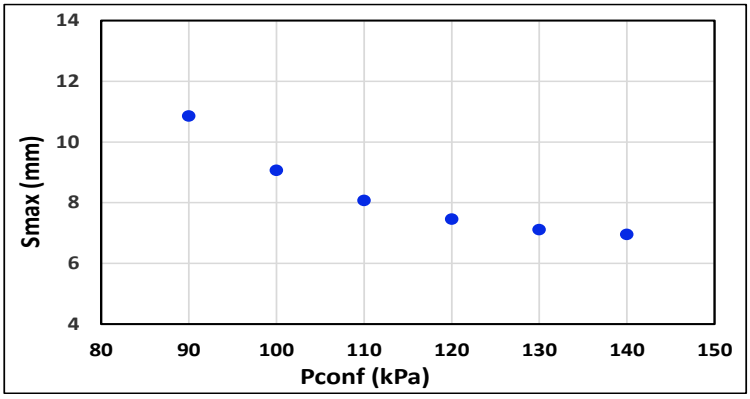
6.1 دراسة تأثير ضغط تدعيم واجهة الحفر P_{conf}

اعتبرت الدراسات المرجعية هذا العامل من أهم العوامل ذات الصلة الوثيقة بالانتقالات الشاقولية الناتجة عن أعمال تنفيذ الانفاق، ولهذا السبب تم دراسة تأثيره في الحالة المدروسة في هذا البحث. لدراسة تأثير ضغط تدعيم واجهة الحفر على الهبوط السطحي أعلى النفق تم تغيير قيمته بين 90−140 kPa مع تثبيت باقي العوامل معامل التقلص c وضغط حقن الملاط Pinj (P_{inj}=170KPa, c=0.5) كما يبين الشكل 9. إن القيمة الأصغرية المقترحة لضغط تدعيم واجهة الحفر في هذه الدراسة البارامترية هي القيمة الحدية التي تضمن عدم انهيار واجهة الحفر في الحالة المدروسة، حيث تبين أن تطبيق القيمة 70kPa يترافق مع انهيار واجهة الحفر في المرحلة الأولى من النمذجة. حتى أن تطبيق القيمة 80kPa ترافق مع قيم هبوط كبيرة تزيد عن 20mm أعلى محور النفق ولذلك لم تؤخذ في الدراسة.



الشكل 9: تأثير قيمة P_{conf} على الانتقالات الشاقولية الناتجة عن تنفيذ النفق.

يبين الشكل 10 العلاقة بين الهبوط الأعظمي S_{max} وضغط تدعيم واجهة الحفر P_{conf}، حيث نجد أن زيادة P_{conf} من 90−140kPa أدى إلى انخفاض S_{max} من 10.9−7mm. يكون هذا الانخفاض واضحاً عند القيم الصغيرة للضغط ويميل للاستقرار من أجل القيم الأكبر اعتباراً من 120kPa. وهنا نجد أن تطبيق قيم كبيرة لضغط تدعيم واجهة الحفر يصبح غير فعال أكبر من حد معين بلغ في الحالة المدروسة 120kPa.

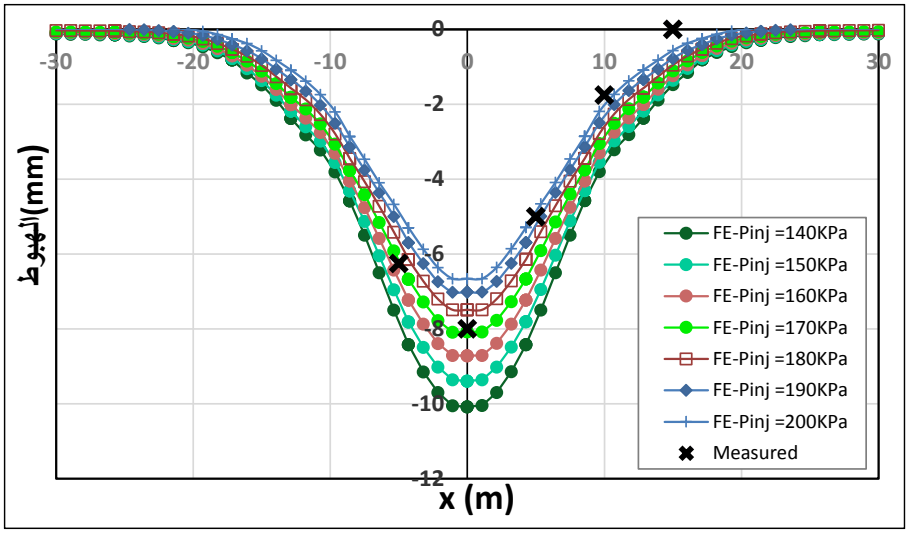


الشكل 10: تأثير ضغط تدعيم الواجهة P_{conf} على الهبوط السطحي الأعظمي أعلى النفق.

نستنتج إذاً أن ازدياد ضغط تدعيم واجهة الحفر يترافق مع انخفاض قيم الهبوط السطحي المحسوب أعلى النفق وتقليل عرض حوض الهبوط وهو ما أكدته الدراسات المرجعية.

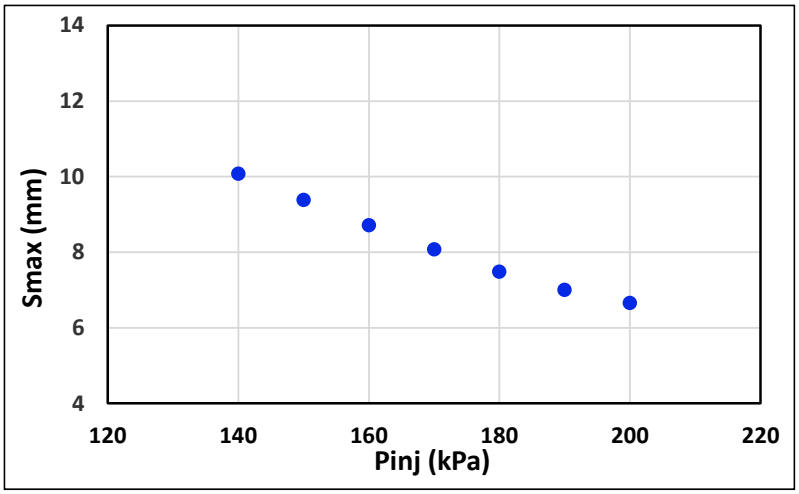
6.2 دراسة تأثير ضغط الحقن P_{inj}

تم في هذه المرحلة تثبيت القيمة 110kPa لضغط تدعيم واجهة الحفر وتغيير قيمة ضغط الحقن بين 140–200KPa. أظهرت النتائج أن ازدياد قيمة ضغط الحقن أدى إلى تخفيض قيم الهبوط السطحي كما يبين الشكل 11.



الشكل 11: تأثير ضغط الحقن P_{inj} على الهبوطات السطحية الناتجة عن تنفيذ النفق.

يبين الشكل 12 أن ازدياد قيمة ضغط الحقن P_{inj} من 140kPa إلى 200kPa أدى إلى تناقص قيمة الهبوط السطحي الأعظمي المقاس أعلى محور النفق من 10mm إلى 6.7mm.

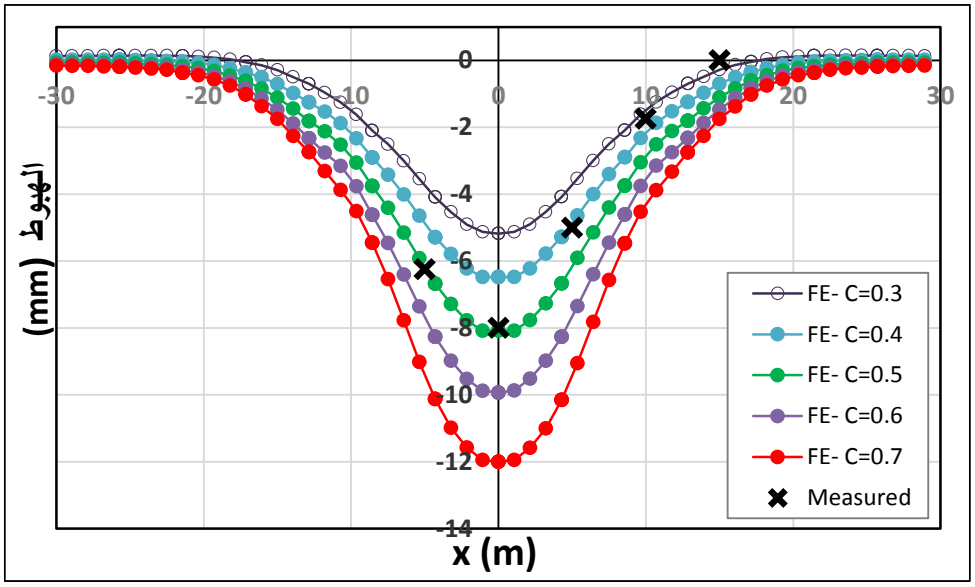


الشكل 12: تأثير ضغط الحقن P_{inj} على الهبوط السطحي الأعظمي أعلى النفق.

6.3 دراسة تأثير معامل التقلص c

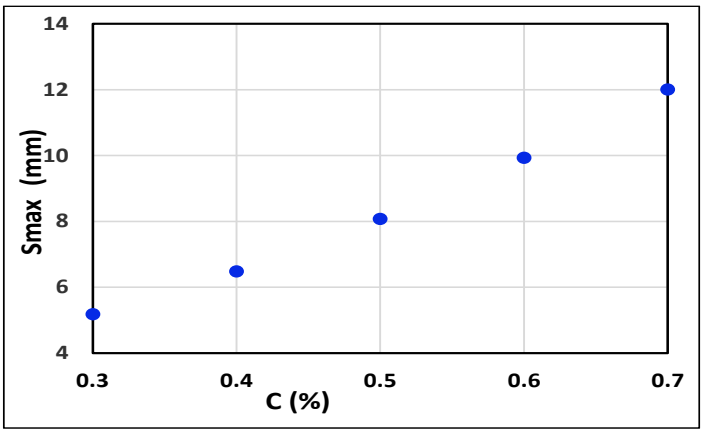
يعتبر هذا العامل كما ذكر سابقاً أحد العوامل الهامة في النمذجة لأنه يعبر عن فاقد الحجم في التربة أحد المسببات الأساسية للهبوط أعلى النفق، ونظراً لأن هذا البحث اقترح إدخاله في المرحلة الأخيرة من النمذجة بعد مرحلتي الحفر والحقن قمنا بدراسة تأثيره على النتائج.

يعبر معامل التقلص c عن نسبة حجم حوض الهبوط منسوباً إلى حجم المقطع العرضي للنفق المحفور في المتر الطولي. لدراسة تأثير هذا المعامل تم تغيير قيمته من 0.3 إلى 0.7 مع تثبيت قيمتي كل من ضغط تدعيم الواجهة (110 KPa) وضغط حقن الملاط (170k kPa) واعتماد نفس مراحل النمذجة السابقة (شكل 13).



الشكل 13: تأثير معامل التقلص على الانتقالات الشاقولية السطحية الناتجة عن تنفيذ النفق.

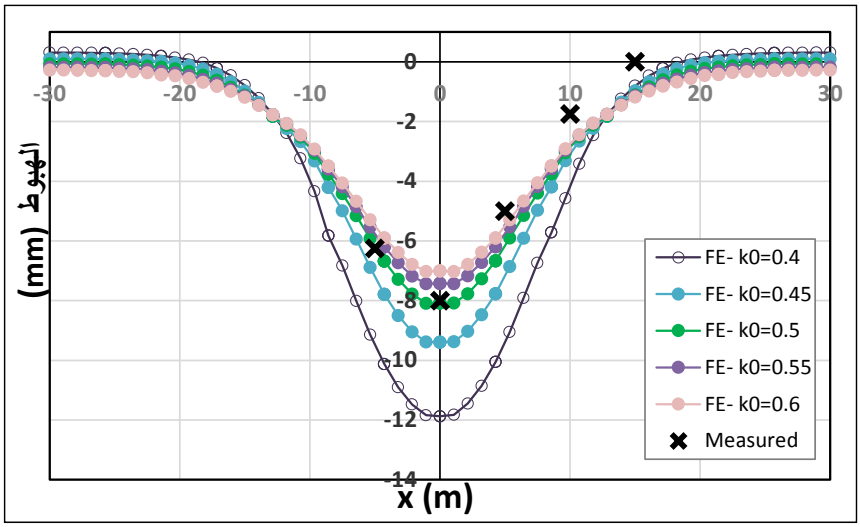
بينت الدراسة أن زيادة قيمة هذا العامل من 0.3 إلى 0.7 ترافقت مع ازدياد قيمة الهبوط السطحي الأعظمي أعلى النفق من 5.2mm إلى 12mm كما يبين الشكل 14.



الشكل 14: تأثير معامل التقلص c على الهبوط السطحي الأعظمي أعلى النفق.

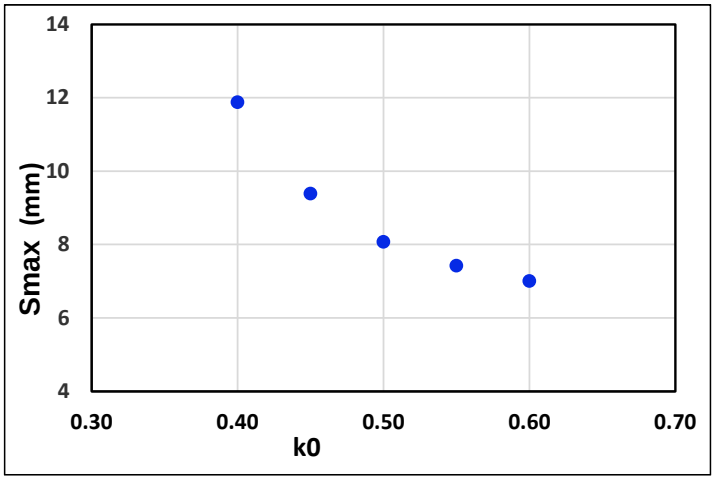
6.4 دراسة تأثير معامل دفع التربة الجانبي k_0

نظراً لأهمية هذا العامل تم دراسة تأثيره على كلٍ من التشوهات الشاقولية والأفقية، حيث تم تغيير قيمته من 0.6–0.4 مع تثبيت باقي العوامل فكانت النتائج كما يبين الشكل 15.



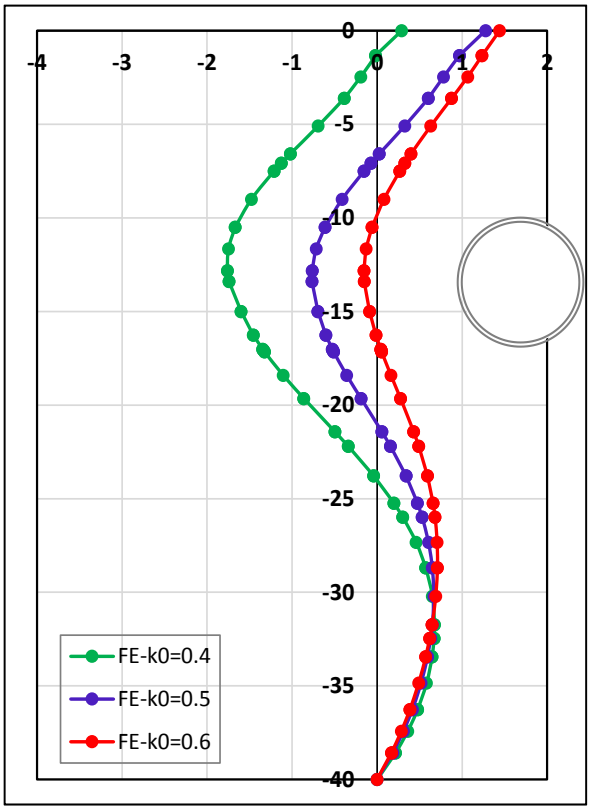
الشكل 15: تأثير معامل دفع التربة الجانبي k_0 على الهبوط السطحي الناتج عن تنفيذ النفق.

نلاحظ من الشكل 16 أن ازدياد قيمة k_0 تترافق مع تناقص الهبوط السطحي الأعظمي، حيث بلغت قيمة الهبوط الأعظمي 12mm من أجل k_0 مساوية 0.4 وانخفضت إلى 7mm عندما كانت قيمة k_0 مساوية 0.6 في حين أن هذا العامل لم يكن له أي تأثير على عرض حوض الهبوط كما بين الشكل 15.



الشكل 16: تأثير قيمة k_0 على الهبوط السطحي الأعظمي أعلى النفق.

من أجل فهم تأثير هذا العامل على تطور التشوهات الكلية في محيط النفق تمت مراقبة تأثيره على التشوهات الأفقية النهائية الناتجة عن تنفيذ النفق كما يبين الشكل 17.



الشكل 17: تأثير قيمة k_0 على الانتقالات الأفقية الناتجة عن تنفيذ النفق.

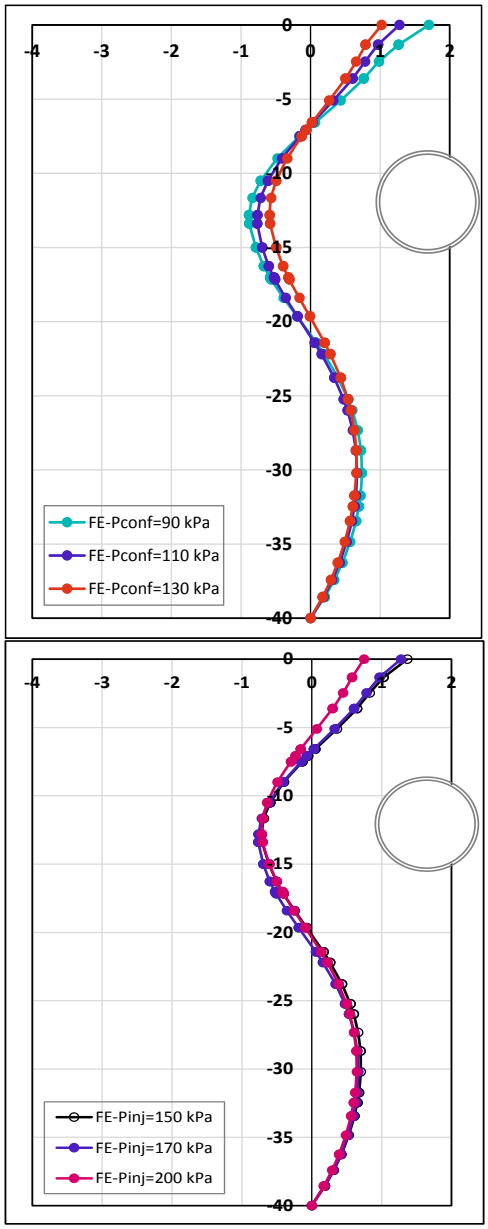
بينت الدراسة أن ازدياد قيمة k_0 من 0.6-0.4 ترافقت مع تناقص التشوهات الأفقية الأعظمية في مستوي محور النفق من 1.74mm-0.15.

إن النتائج السابقة تشرح سلوك التربة في محيط حفرية النفق، حيث أن ازدياد قيمة k_0 تعني ازدياد الاجهاد الأفقي في محيط النفق حيث يلعب هذا الاجهاد دور مقاومة ذاتية للتشوهات confining pressure. وبالتالي يترافق ازدياد هذه المقاومة الذاتية مع تناقص كلاً من التشوهات الأفقية في مستوي محور النفق والهبوط السطحي أعلى النفق.

6.5 دراسة تأثير الضغوط المطبقة من الآلة الدرعية على الانتقالات الأفقية

وجدنا اعلاه أن التشوهات الأفقية الناتجة عن أعمال تنفيذ النفق مرتبطة بقيمة k_0، تم التحري عن تأثير كلاً من ضغط تدعيم واجهة الحفر وضغط الحقن على هذه التشوهات الأفقية من خلال دراسة بارامترية تضمنت تطبيق كلاً من القيمتين الأصغرية والأعظمية لهذه الضغوط.

بين هذا التحليل أن الضغوط المطبقة من قبل الآلة الدرعية تؤثر بشكل طفيف على التشوهات الأفقية في مستوي سطح الأرض الطبيعية بينما لا تؤثر على التشوهات الأفقية الأعظمية في مستوي محور النفق كما يبين الشكل 18.



الشكل 18: تأثير الضغوط المطبقة من الآلة الدرعية على التشوهات الأفقية في جوار النفق.

يمكن تفسير ذلك بأن سطح الأرض الطبيعية الحر يكون عرضة للهبوط والتشوه الأفقي نتيجة عدم وجود أبنية أو منشآت سطحية في الحالة المدروسة، في حين أن التربة المحيطة بالنفق تلعب دور مقاوم للتشوهات تحت تأثير الضغوط المطبقة من الآلة الدرعية.

يمكن القول كخلاصة أن العامل الأساسي الذي يحدد قابلية التشوه/المقاومة في الوسط المحيط بحفرية النفق هو معامل دفع التربة الجانبي.

الاستنتاجات والتوصيات

تضمن هذا البحث نمذجة عددية ثنائية البعد لنفق منفذ باستخدام آلة درعية مدعمة بضغط التربة حيث بنيت الدراسة على معطيات مأخوذة من مشروع Milan underground line 1 extension وهو امتداد لنفق المترو رقم 1 المنفذ في مدينة ميلانو في إيطاليا. اقترح في هذا البحث إدخال تأثير الضغط المطبق من قبل الآلة الدرعية لتدعيم واجهة الحفر في النموذج ثنائي البعد المعتمد، كما اقترح تمثيل فاذ الحجم Volume Loss عن طريق توظيف معامل التقلص المتاح في برنامج Plaxis وذلك في المرحلة الأخيرة من النمذجة لتمثيل تصلب الملاط المحقون والسلوك طويل الأمد للوسط المحفور. وبناءً عليه تم التوصل للنتائج التالية:

- أعطت منهجية النمذجة المقترحة توافق جيد مع قيم الانتقالات الشاقولية السطحية المقاسة حقلياً، كما أعطت النمذجة العددية نتائج أكثر دقة من نتائج الطرق النظرية التحليلية والتجريبية التي وظفت في هذا البحث.
- بمقارنة نتائج الطرق النظرية التي تم توظيفها في هذا البحث كانت نتائج كلاً من طريقتي Verruijt & Booker و Oteo غير مرضية أبداً. كما تبين أن كلاً من طريقتي Peck, González & Sagaseta تعطي شكلاً صحيحاً لحوض الهبوط يقارب شكل وعرض الحوض المقاس حقلياً. فيما يتعلق بقيمة الهبوط الأعظمي، أعطت طريقة Peck القيمة الأقرب للقيم المقاسة حقلياً. يعود السبب في هذه الاختلافات إلى أن هذه الطرق سواء التحليلية أو التجريبية تعتمد على ثوابت عديدة يتم تحديدها بناءً على خصائص التربة المحفورة وعمق النفق بشكل أساسي. هذه الثوابت لا تأخذ بعين الاعتبار تكنولوجيا التنفيذ المستخدمة وهي ذات تأثير كبير على النتائج وبنفس الوقت يصعب تحديدها بدقة.

- بينت الدراسة البارامترية أن عوامل تشغيل الآلة الدرعية تؤثر بشكل أساسي على الانتقالات السطحية الشاقولية أعلى النفق وليس لها تأثير على الانتقالات الأفقية الناشئة في جوار النفق. حيث تبين أن ازدياد ضغط تدعيم الواجهة يترافق مع انخفاض قيم الهبوط أعلى النفق وتقليل عرض حوض الهبوط، في حين لم يؤثر ازدياد قيم ضغط الحقن على شكل أو عرض حوض الهبوط واقتصر تأثيره على تخفيض قيمة الهبوط الاعظمي أعلى النفق.
- بينت الدراسة أهمية معامل التقلص المعبر عن فاقد الحجم وتأثيره الكبير على الهبوطات الناتجة عن تنفيذ النفق حيث أن ازدياد قيمة هذا العامل ترافقت مع ازدياد الهبوط أعلى النفق.
- أظهرت الدراسة أن معامل الدفع الجانبي k_0 ذو تأثير هام على كل من الانتقالات الشاقولية والأفقية الناتجة في محيط النفق. إن ازدياد قيمة هذا المعامل ترافقت مع تناقص كلاً من الهبوط الاعظمي أعلى النفق والانزياحات الأفقية في جوار النفق. حيث تبين أن الانتقالات الأفقية محكومة بشكل أساسي بقيمة معامل دفع التربة الجانبي ولا تتأثر بالضغوط المطبقة من قبل الآلة الدرعية.

بناءً على النتائج التي تم التوصل إليها في هذا البحث لا بد أن نشير إلى التوصيات التالية:

- دراسة تأثير الضغوط المطبقة من قبل الآلة الدرعية على الانتقالات الشاقولية والأفقية في حال وجود منشآت على سطح الأرض الطبيعية والمقارنة مع النتائج التي تم التوصل إليها في هذا البحث.
- تطبيق منهجية النمذجة المقترحة على مشاريع أخرى منفذة في تربة مختلفة أو باستخدام نوع آخر من الآلات الدرعية.
- إجراء نمذجة ثلاثية الأبعاد لدراسة التأثير ثلاثي الأبعاد للضغوط المطبقة من قبل الآلة الدرعية.

المراجع:

[1] Peck R.B. (1969). Deep excavations and tunneling in soft ground. State-of-the-Art report. In: Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 3, Mexico City, p. 225-290.

[2] Cording E.J., Hansmire W.H. (1975). Displacements around soft ground tunnels. General Report of Session IV: Tunnels in soil, In: Proceedings of 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, p. 571-633.

[3] Attwell P.B., Farmer L.W. (1974). Ground disturbance caused by shield tunnelling in a stiff, overconsolidated clay. Engineering geology, vol. 8, 1974, p.361-381.

[4] Hashimoto T., Hayakawa K., Mizuhara K. Konda T. (2000). Investigation on successive settlement due to shield tunneling. In: Geotechnical aspects of underground construction in soft ground, Tokyo, p. 233-238.

[5] Litsas D., Sitarenios P., Kavvadas M. (2017). Parametric investigation of tunnelling induced ground movement due to geometrical and operational TBM complexities. Italian Geotechnical Journal-Rivista Italiana Di Geotecnica, 51(4), 22-34.

[6] Maynar M. M., Rodriguez L. M. (2005). Predicted versus measured soil movements induced by shield tunnelling in the Madrid Metro extension. Canadian geotechnical journal, 42(4), 1160-1172.

[7] Boubou R., Emeriault F., Kastner R. (2010). Artificial neural network application for the prediction of ground surface movements induced by shield tunnelling. Canadian Geotechnical Journal, 47(11), 1214-1233.

[8] Mazek S. A., Almannaei H. A. (2013). Finite element model of Cairo metro tunnel-Line 3 performance. Ain Shams Engineering Journal, 4(4), 709-716.

[9] Hwang R.N., Fan C.B., Yang G.R. (1995) Consolidation settlements due to tunneling. In: Proceedings of South East Asian Symposium on Tunneling and Underground Space Development, Bangkok, p. 79-86.

[10] Ou C.Y., Hwang R. N., Lai W.J. (1998). Surface settlement during shield tunnelling at CH218 in Taipei. Canadian Geotechnical Journal, vol. 35, n°1, p. 159-168.

[11] Clough G.W., Schmidt, B. (1981). Design and performance of excavations and tunnels in soft clay. In: Soft Clay Engineering, Amsterdam, p. 569-636.

[12] O'Reilly M.P., New B.M. (1982). Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction. In: Proceedings of the International Symposium on Tunnelling, London, p. 173-181.

[13] Mair R.J., Taylor R.N., (1993). Bracegirdle A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clay. Géotechnique, vol. 43, p. 315-320.

[14] Schmidt B., (1969). A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft ground. Can. Geotech. J. 11-22.

[15] Arioglu E., (1992). Surface Movements Due to Tunnelling Activities in Urban Areas and Minimization of Building Damages. Short Course, Istanbul Technical University, Mining Engineering Department.

[16] Clough G.W., Schmidt B., (1981). In: Brand, E.W., Brenner, R.P. (Eds.), Design and Performance of Excavations and Tunnels in Soft Clay. Elsevier.

[17] Herzog M., (1985). Surface subsidence above shallow tunnels. Bautechnik 62, 375–377.

[18] Loganathan N., Poulos H. G., Stewart D. P. (2000). Centrifuge model testing of tunnelling-induced ground and pile deformations. Geotechnique, 50(3), 283-294.

[19] Tikhoniuk I. A. (2024). Overview of analytical and empirical methods for calculating the settlements of the soil surface during of tunneling. Construction and Geotechnics, 15(4), 78-101.

[20] Möller S. C. (2006). Tunnel induced settlements and structural forces in linings. Stuttgart, Germany: Univ. Stuttgart, Inst. f. Geotechnik, pp. 108-125.

[21] Sagaseta C. and Moya J.F. (1980). Estimation of ground subsidence over urban tunnels, 2nd int. conf. «ground movements and structure». Cardiff, pp. 331-345.

[22] Wang J., Zhou P., Song Z., Li S., Zhang Q. (2022). A new calculation method for tunneling-caused stratum settlement. KSCE J. Civ. Eng. 26 (6), 2624–2640.

[23] Attewell P.B., Yeates J., Selby A.R., (1986). Soil Movement Induced by Tunnelling and Their Effects on Pipelines and Structures. London.

[24] Oteo C, Moya JF. (1979). Estimation of the soil parameters of Madrid in relation to the tunnel construction. Proc 7th Euro conf. on soil mechanics and foundation engineering, vol. 3, Brighton. pp 239–47.

[25] Melis M., Medina L., Rodríguez J. M. (2002). Prediction and analysis of subsidence induced by shield tunnelling in the Madrid Metro extension. Canadian Geotechnical Journal, 39(6), 1273-1287.

[26] González C., Sagaseta C. (2001). Patterns of soil deformations around tunnels. Application to the extension of Madrid Metro. Computers and Geotechnics, 28(6-7), 445-468.

[27] Sagaseta C. (1987). Analysis of undrained soil deformation due to ground loss. Géotechnique, 37(3): 301–20.

[28] Verruijt A, Booker JR. (1996). Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane. Géotechnique, 46(4):753–6.

[29] Ahmed N. Z., El-Shourbagy M., Akl A., Metwally K. (2021). Field monitoring and numerical analysis of ground deformation induced by tunnelling beneath an existing tunnel. Cogent Engineering, 8(1).

[30] Oota H., Nishizawa K., Hashimoto T., Nagaya J. (2006). Prediction of shield tunnelling influences on ground deformation based on the construction process. In: Geotechnical aspects of underground construction in soft ground, Amsterdam, p. 275-281.

[31] Mroueh H., Shahrour I. (1999). Modélisation tridimensionnelle du creusement de tunnels en site urbain. Revue française de génie civil, 3(1), 7-23.

[32] Adachi T. (1985). Some supporting methods for tunnelling in Japon and their analytical studies. In: 5th International Conference on numerical methods in geomecanics, Nagoya, vol. 4, p.747-1754.

[33] Ollier C. (1997). Étude expérimentale de l'interaction sol–machine lors du creusement d'un tunnel peu profond par un tunnelier à pression de boue. Thèse de Doctorat. INSA de Lyon, 323 p.

[34] Lake L., Rankin W., Hawley J. (1992). Prediction and effects of the ground mouvements caused by tunneling in soft ground beneath urbain areas. Construction industry research and information association, London, CIRIA Project Report 30.

[35] Demagh R., Emeriault F., Hammoud F. A. R. I. D. (2013). 3D modelling of tunnel excavation using pressurized tunnel boring machine in overconsolidated soils. Studia geotechnica et mechanica, 35(2), 3-17.

[36] Niu G., He X., Xu H., Dai S. (2024). Tunnelling-induced ground surface settlement: A comprehensive review with particular attention to artificial intelligence technologies. Natural Hazards Research, 4(1), 148-168.

[37] Vanoudheusden E., Petit G., Robert J., Emeriault F., Kastner R., Lamballerie J. Y., Reynaud B. (2006). Analysis of movements induced by tunnelling with an earth-pressure balance machine and correlation with excavating parameters. Proceedings of the Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Bakker *et al.*(eds.), Taylor & Francis Group, London, 81-86.

[38] Likitlersuang S., Surarak C., Suwansawat S., Wanatowski D., Oh E., Balasubramaniam A. (2014). Simplified finite-element modelling for tunnelling-induced settlements. Geotechnical Research, 1(4), 133-152.

[39] Kasper T., Meschke G. (2006). On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling. Tunnelling and underground space technology, 21(2), 160-171.

[40] Mollon G., Dias D., Soubra A. H. (2013). Probabilistic analyses of tunneling-induced ground movements. Acta Geotechnica, 8(2), 181-199.

[41] Dias D., Kastner R. (2013). Movements caused by the excavation of tunnels using face pressurized shields—Analysis of monitoring and numerical modeling results. Engineering Geology, 152(1), 17-25.

[42] Alsirawan R., Sheble A., Alnmr A. (2023). Two-dimensional numerical analysis for TBM tunneling-induced structure settlement: A proposed modeling method and parametric study. Infrastructures, 8(5), 88.

[43] Lei-Kilany M. E., El-Sayed T. A., Mohab R. A. (2017). Numerical analysis of tunnel boring machine in soft ground. Jokull Journal, 67(5).

[44] Liu C., Cui J., Zhang Z., Liu H., Huang X., Zhang C. (2021). The role of TBM asymmetric tail-grouting on surface settlement in coarse-grained soils of urban area: Field tests and FEA modelling. Tunnelling and Underground Space Technology, 111, 103857.

[45] Chang C.T., Wang J.J., Chen Y.W. (2000). Factors influencing the ground loss due to tunnels driven by EPB shield. In: Geotechnical aspects of underground construction in soft ground, Tokyo, p. 209-212.

[46] Suwansawat S., Einstein H.H. (2006). Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunnelling. Tunnelling and underground space technology, vol. 21, p. 133-150.

[47] Lee K.M., Ji H.W., Shen C.K., Liu J.H., Bai T.H. (2000). A case study of ground control mechanisms of EPB shield tunneling in soft clay. In: Geotechnical aspects of underground construction in soft ground, Tokyo, p.251-256.

[48] Chakeri, H., Ozcelik, Y., & Unver, B. (2013). Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB. Tunnelling and Underground Space Technology, 36, 14-23.

[49] He S., Li C., Wang D., Liu X. (2021). Surface settlement induced by slurry shield tunnelling in sandy cobble strata—A case study. Indian Geotechnical Journal, 51(6), 1349-1363.

[50] Suwansawat S., Einstein H.H. (2007). Describing settlement troughs over twin tunnels using a superposition technique. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, vol. 133, n°4, p. 445-468.

[51] Komiya K., Soga K., Agaki H., Jafari M.R., Bolton M.D. (2001). Soil consolidation associated with grouting during shield tunneling in soft clayey ground. Géotechnique, vol. 51, n°10, p. 835-846.

[52] Falco, L. (2022). A real time passengers flow prediction with an empirical assignment model and train run simulation in underground lines of Milan.

[53] Lagulli G., Silvestri M., Messineo L., Antiga A. (2020). An application of the Observational Method to deal with sudden water level changes: the 4 tunnels for the extension of the line 1 of the Milan subway. TA-AITES World Tunnel Congress, WTC2020 and 46th General assembly, Malaysia.

[54] Brinkgreve R., Vermeer P. A. (2019). PLAXIS 2D reference manual CONNECT edition V20. Delft University: Delft, The Netherlands.

[55] بوبو ريم (2018). التنبؤ بهبوطات سطح الأرض الناتجة عن حفر الأنفاق السطحية باستخدام منهجية شعاع الدعم الآلي Support Vector Machin، مجلة جامعة البعث، المجلد 40، العدد 24، 176-153.

[56] بوبو ريم (2025). تحليل باستخدام الشبكات العصبونية الاصطناعية للهبوط السطحي الأعظمي أعلى الأنفاق المنفذة بالطريقة النمساوية الحديثة. مجلة جامعة حمص، المجلد 47، العدد 6، 118-87.

إدارة المياه لمشروع ري طار العلا والعشارنة

د.م. كنان الاحمد: عضو هيئة تعليمية بكلية الهندسة المدنية - جامعة حمص

الملخص

يهدف هذا البحث إلى تطوير نموذج متكامل لإدارة الموارد المائية في مشروع ري طار العلا والعشارنة ضمن حوض العاصي الأوسط وذلك نظراً لما يشهده الحوض من ضغوط متزايدة ناتجة عن اتساع الفجوة بين الموارد المائية ومواقع الاحتياج المائي ويغطي مساحة مروية تبلغ 23640 هكتار تروى من قناتي الري الرئيسيتين PN وPS ولتحليل الواقع الهيدرولوجي تم بناء نموذج محاكاة باستخدام برنامج WEAP21.

وتم إعداد عدة سيناريوهات مستقبلية تمتد حتى عام 2030 وقد أظهرت نتائج المحاكاة أن تحسين كفاءة الري من 75% إلى 85% أسهم في خفض متطلبات التزويد المائي للأراضي الزراعية من 239.6 إلى 211.3 مليون متر مكعب محققاً وفراً مائياً قدره 28.3 مليون متر مكعب يمكن استثماره في التوسع الزراعي أو في مواجهة حالات العجز المستقبلية. كما بيّنت دراسة أثر النمو السكاني أن زيادة عدد السكان من 50 ألفاً إلى 70 ألف نسمة رفعت الاحتياج المائي الصافي لدى التجمعات السكانية من 2.0 إلى 2.8 مليون متر مكعب بارتفاع نسبته 40% مما أدى إلى اتساع العجز المائي نتيجة ضياعات شبكات مياه الشرب التي تبلغ نحو 50% من المياه المنقولة. أما سيناريو دورة الجفاف الذي يفترض انخفاض الإيرادات الواردة إلى سد محردة بنسبة 10% سنوياً لمدة ثلاث سنوات فقد أظهر حساسية النظام المائي للجفاف حيث ارتفع العجز من 96.6 إلى 129.5 مليون متر مكعب بنهاية الدورة .

الكلمات المفتاحية: إدارة الموارد المائية ، نهر العاصي، برنامج weap21 .

Water management for the irrigation project Of Tar_Aloula And Al_Asharna

Dr.Kinan Alahmad: Faculty Member at the Faculty of Civil Engineering, Homs University

Abstract

This study aims to develop an integrated model for water resources management in the Tar Al-Ula and Al-Asharna Irrigation Project within the Middle Orontes Basin, in response to the increasing pressures resulting from the widening gap between available water resources and areas of water demand. The project covers an irrigated area of 23,640 hectares, supplied by the two main irrigation canals, PN and PS.

To analyze the hydrological conditions, a simulation model was developed using the WEAP21 software. Several future scenarios extending to the year 2030 were prepared. The simulation results indicated that improving irrigation efficiency from 75% to 85% reduced the water supply requirements for agricultural lands from 239.6 to 211.3 million cubic meters, achieving a water saving of 28.3 million cubic meters. This conserved water could be utilized for agricultural expansion or to mitigate potential future shortages.

The analysis of population growth impact showed that increasing the population from 50,000 to 70,000 inhabitants raised the net water demand of residential communities from 2.0 to 2.8 million cubic meters, representing a 40% increase. This exacerbated the water deficit, primarily due to drinking water network losses, which account for approximately 50% of the conveyed water.

Regarding the drought cycle scenario, which assumes a 10% annual reduction in inflows to the Mhardeh Dam over a three-year period, the results revealed the system's high sensitivity to drought conditions. The water deficit increased from 96.6 to 129.5 million cubic meters by the end of the cycle.

Key Words: Water Resources Management, Orontes River, WEAP21.

1- المقدمة:

تعد ادارة الموارد المائية من التحديات الأساسية التي تواجه قطاع الزراعة في سورية ولا سيما سهل الغاب في حوض العاصي الأوسط. فقد أدت الزيادة المستمرة في الطلب على المياه إلى جانب تقلبات الهطول المطري وتكرار موجات الجفاف إلى فرض ضغوط كبيرة على الموارد المائية المتاحة الأمر الذي يستدعي اعتماد أدوات تخطيط وتقييم قادرة على تمثيل الواقع الهيدرولوجي بدقة وتقديم خيارات عملية لصنّاع القرار.

انطلاقاً من أهمية مشروع ري طار العلا والعشارنة الذي يروي مساحة واسعة من الأراضي الزراعية عبر قناتي PN و PS جاءت هذه الدراسة لتقييم واقع الموارد المائية في المشروع وتحليل كفاءتها الحالية وبناء نموذج متكامل باستخدام برنامج WEAP21 بهدف دراسة مجموعة من السيناريوهات المستقبلية حتى عام 2030. ويهدف النموذج إلى الربط بين الموارد المائية المتاحة والاحتياجات الزراعية والسكانية وتحليل تأثير التغيرات المحتملة في كفاءة الري والنمو السكاني والجفاف على الوضع المائي مما يساهم في وضع حلول عملية لتحسين استدامة النظام المائي وتخفيف العجز المتوقع.

2- مبررات البحث:

تحسين ادارة مياه الري بشكل علمي صحيح لتأمين الأمن الغذائي والاستقرار الاجتماعي في المنطقة من خلال استخدام نظم دعم اتخاذ القرار.

3- هدف البحث:

دراسة الحلول الممكنة لتأمين الاحتياجات المائية من الواردات باستخدام برنامج WEAP21 من خلال الربط بين الموارد المائية وبين الطلب الحالي والمستقبلي عليها في منطقة المشروع ، بحيث تضمن احتياج مناطق الري وحاجة الفرد من الموارد المائية بناء على سيناريوهات مختلفة.

4- طرائق البحث والمنهجية:

اعتمد هذا البحث منهجًا علميًا تطبيقيًا لتقييم الموارد المائية ضمن الإطار المكاني والزماني لدراسة الوضع الراهن للموارد المائية وتقدير كفاءتها وإدارتها من خلال تحليل البيانات المناخية والهيدرولوجية المتاحة وربطها بالاحتياجات المائية القطاعية.

تمت الاستعانة ببرنامج تقييم وتخطيط المياه (WEAP21) كأداة تحليلية رئيسية في هذا البحث وهو أحد البرمجيات الحديثة التي طُوِّرت لتقييم وإدارة الموارد المائية بشكل متكامل. يقوم نموذج WEAP21 على مبدأ الموازنة المائية بين الموارد المتاحة والاحتياجات المائية لمختلف القطاعات مما يجعله أداة فعالة لمحاكاة وتخطيط الأنظمة المائية على المستويات المحلية والإقليمية.

كما تم في هذا البحث بناء قاعدة بيانات تتضمن عناصر النظام المائي المدروس مثل مصادر المياه السطحية والجوفية ومتطلبات الاستخدام المنزلي والزراعي وبعد إدخال البيانات إلى بيئة WEAP21 جرى إعداد سيناريوهات متعددة لتمثيل الأوضاع الحالية والمستقبلية بهدف تحليل كفاءة توزيع الموارد المائية وتحديد مدى كفايتها لتلبية الطلب المتزايد. اعتمدت عملية التقييم على مخرجات النموذج المتمثلة في كميات العرض والطلب ومؤشرات العجز المائي وبذلك مكّن استخدام WEAP21 من تقديم تحليل شامل ومتوازن للموارد المائية.(1)

5- الدراسات المرجعية :

5-1- تم تقييم الموارد المائية على حوض الديديسّا (Dawit,etc,2024)غرب إثيوبيا وهو أحد أهم روافد حوض أبيي في النيل الأزرق واعتمدت الدراسة على بيانات مناخية وهيدرولوجية طويلة المدى ونمذجة مائية باستخدام WEAP21 .أظهرت النتائج أن الطلب المائي سيزداد تحت سيناريوهات النمو السكاني وسيناريوهات التوسع الزراعي ويرافقه ازدياد الفجوة بين العرض والطلب خصوصاً في السيناريو الطويل المدى. كما كشفت الدراسة أن بعض مقاطع النهر خصوصاً قرب محطة Dembi أكثر حساسية لتقلبات الجريان الناتجة عن الأنشطة البشرية ، وبينت الدراسة أن تخصيص حصة منتظمة للجريان البيئي يحسن استدامة الحوض كما توصي الدراسة بتبنّي إدارة مائية متكاملة تشمل تحسين كفاءة الري وحماية الجريان البيئي لضمان استدامة موارد حوض الديديسّا.(3)

5-2- تتناول هذه الدراسة (Duque,2017) تقييماً مائياً لحوض نهر لونكين في المنطقة شبه القاحلة من وسط-جنوب تشيلي باستخدام نموذج WEAP21 القائم على محاكاة الموازنة المائية تحت ظروف مناخية متغيرة.

كما تم دراسة عدة سيناريوهات اهمها تغير المناخ وتخلص الدراسة إلى أن السيناريوهات المناخية المستقبلية ستؤدي إلى انخفاض الإمداد المائي وارتفاع الطلب نتيجة زيادة التبخر–نتح مما يستدعي تبني إدارة مائية أكثر تكاملاً ومرونة. (4)

5–3– بدراسة تأثير تغيّر المناخ (Cacal,2024) وتطوّر العمران وانخفاض مساحة الأراضي الزراعية على الموارد المائية في حوض نهر بيكول في الفلبين وذلك من خلال استخدام نموذج التقييم والتخطيط المائي. حيث ركزت الدراسة على حوضي ليبانان–بولانتونا وكوينالي وهما أكثر مناطق الحوض حساسية للتغيرات الهيدرولوجية بهدف فهم كيفية تغير التوازن المائي فيهما تحت ظروف مناخية واجتماعية متباينة.

أظهرت نتائج المحاكاة في مجال الزراعة أن تراجع مساحات الأراضي الزراعية يُعتبر العامل الأكثر تأثيراً في تغيير الموازنة المائية، فمع انخفاض المساحات المزروعة ينخفض الطلب الزراعي على المياه بشكل واضح الأمر الذي يحوّل الحوضين تدريجياً نحو حالة من الفائض المائي مع نهاية القرن وخاصة في ليبانان–بولانتونا الذي يتمتع أصلاً بجريان مائي أعلى.

لكن هذا التحسن الناتج عن تراجع الزراعة لا يلغي التحديات التي يفرضها النمو السكاني والتمدّن والصناعة. فقد بيّنت السيناريوهات الحضرية أن الاحتياجات المائية المنزلية تتضاعف إلى أربعة أضعاف بينما يتزايد الطلب الصناعي حتى ثمانية أضعاف مقارنة بالقيم الحالية. وهذا يجعل حوض كوينالي أكثر المناطق تعرضاً للعجز المائي المستقبلي فيما يقترب ليبانان–بولانتونا من تحقيق توازن مائي أفضل بفضل موارده المائية الأكثر غزارة وتراجع الطلب الزراعي.

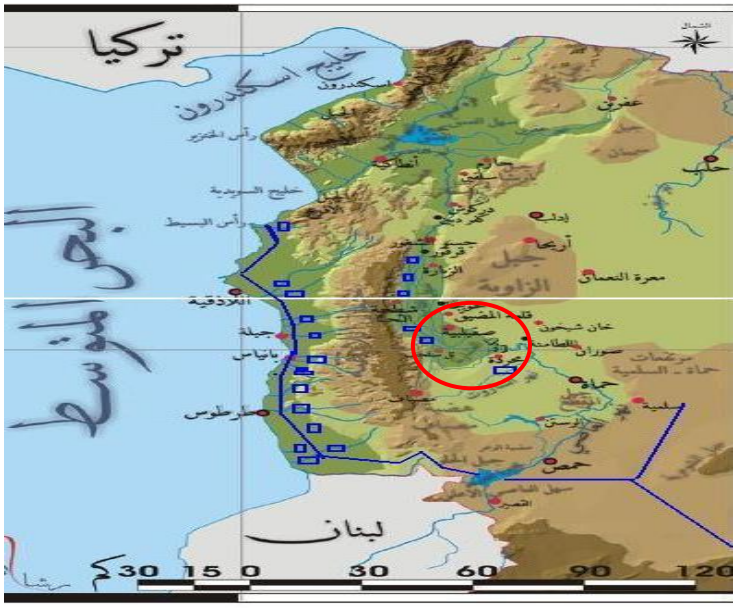
وتشير النتائج أيضا أن التحضر السريع وتغير استخدامات الأرض يؤثران في الميزان المائي أكثر من تغير المناخ نفسه.(2)

5–4– تم تقييم الوضعين الحالي والمستقبلي للموارد المائية (اليسوف ،2016) في حوض الساحل عبر تطبيق نموذج WEAP21 كأداة تحليلية لدعم القرار وقد ركزت على بناء ميزان مائي متكامل يعكس علاقة العرض المائي المحدود بالطلب المتزايد نتيجة النمو السكاني المستمر واعتماد المنطقة على مصادر جوفية ذات قدرة تجديد محدودة. أظهرت نتائج النمذجة في السيناريو المرجعي اتجاهاً واضحاً نحو انخفاض حصة الفرد من المياه واتساع الفجوة بين

الموارد والاحتياجات حتى عام 2040 مما يشير إلى تزايد الضغط على النظام المائي، كما درست السيناريوهات البديلة وخاصة سيناريو تخفيض الضياعات وسيناريو رفع كفاءة الاستهلاك وبينت المحاكاة أن تخفيض الفاقد بنسبة 10–15% يساهم في تحسين نسبي للتوازن المائي إلا أنه غير كافٍ لتعويض أثر النمو السكاني المتسارع. (9)

6- منطقة البحث:

تقع منطقة الدراسة ضمن اراضي حوض العاصي الأوسط في الشمال الغربي للجمهورية العربية السورية في محافظة حماة ضمن أراضي طار العلا والعشارنة في سهل الغاب، الشكل(1) يبين منطقة تواجد المشروع.



الشكل (1) : خريطة حوض العاصي (منطقة وجود المشروع)

7–الية توزيع المياه في منطقة المشروع :

المصدر الأساسي من المياه هو سد محردة الواقع على نهر العاصي والينابيع والابار المغذية لمنطقة الدراسة.

وبمتابعه مجرى نهر العاصي نجد عدة قنوات ري رئيسية في منطقة الدراسة وهي :

القناة PN : يبلغ التدفق التصميمي لهذه القناة $4.4m^3/\sec$ وتروي الأراضي الزراعية الواقعة في زمام القناة وتبلغ مساحتها (8800 hec) وتساهم المياه الجوفية بري (3520 hec) منها.

القناة PS: يبلغ التدفق التصميمي لهذه القناة $6.78m^3/\sec$ ويروي الأراضي الزراعية الواقعة في زمام القناة وتبلغ مساحتها (14840 hec) وتساهم المياه الجوفية بري (5936 hec) منها.(6)

كما يوضح الجدول (1) تدفقات نهر العاصي الوسطية خلال اشهر السنة عند مدخل سد محردة .

الجدول (1): تدفقات نهر العاصي بواحدة m3 /sec (5) :

الشهر	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
التصريف /sec m3	4.7	5.15	5.64	6.66	19.11	13.12	10.14	5.48	6.23	8.08	6.6	4.95

8- بناء النموذج في برنامج (WEAP21) :

تم في البداية وضع النموذج الاعتباري لمنطقة الدراسة وادخال مكونات المشروع لسنة الأساس والتي تضمنت تمثيل كامل لمنطقة الدراسة حيث تصنف منطقة مشروع الري

إلى المناخ المتوسطي المتصف بشتاء بارد وماطر وصيف حار وجاف مع فصلين انتقاليين يتصفان باعتدالهما وعدم استقرار الطقس فيهما.

استناداً إلى البيانات التفصيلية للعناصر المناخية في منطقة الدراسة نلاحظ التالي تغير درجة الحرارة للمتوسط السنوي يتراوح بين17.9 درجة مئوية في محطة حماة g و 18.7 في حماة الزراعية وأما متوسط أدنى درجة حرارة سنوي يتراوح بين 10.9 درجة مئوية في حماة الزراعية وصولاً إلى 11.7 درجة مئوية في محطة محردة ، أما متوسط أعظم درجة حرارة سنوية فتتراوح بين 24.3 درجة مئوية في محطة حماة g و 24.7 درجة مئوية في محطة محردة كما تؤدي

الرطوبة النسبية دوراً كبيراً عند حساب الاحتياجات المائية وتبلغ قيمة المتوسط السنوي للرطوبة النسبية 58% في محطة حماة الزراعية لتصل الى 60% في محطة محردة وحماة g.
وتعد الامطار من أهم العوامل المناخية التي تؤثر على الاحتياجات المائية للمحصول وتتراوح قيمة متوسط الهطول المطري السنوي باحتمال (75%) 264.8 مم في محطة حماة g لتصل الى 299 مم في محطة محردة . ولا يعتمد نمو المحصول فقط على الهطول المطري فقط بل على عوامل مناخية أخرى وبالأخص على فترة السطوع الشمسي حيث نجد أن المتوسط السنوي لساعات السطوع الشمسي تبلغ 8.4 ساعة.(5)

نتيجةً لضعف الميل العام والواسع لسطح الرقعة الزراعية الذي يأتي بعد الانحدار الشديد لجوانب الحوض وانعكاس ذلك على مسار الجريان العام و نقل وترسيب مواد التربة تكون في الحوض الزراعي التدرّج التالي للتربة :
–تربة رسوبية حُطامية قوامها خشن ومادتها غير متجانسة نشأت بفعل عوامل الحت والترسيب السريع عند أقدام المصدر الصخري الأم القريب. تنتشر هذه التربة على الشريط الطرفي للمساحة الزراعية من الحوض وتملأ نهايات الأودية والمسيلات المائية بالمواد السيلية.
–تربة رسوبية مارلية مادتها الغضارية حمراء منشأها بركاني محلي. تنتشر هذه التربة لتغطي معظم المساحة الواقعة على ارتفاع طبوغرافي بين 200 و 300 م.
–تربة رسوبية غضارية– رملية ناعمة قليلة الغمر رمادية المظهر تنتشر على محيط الجزء المحوري من الحوض والمادة الرملية (Silt) منشأها كلسي قليل الدلمتة من المرتفعات المحيطة بالحوض .
–تربة رسوبية لحقية مغمورة غضارية داكنة (عضوية) تشكل مصاطب مجرى العاصي في الأجزاء المحورية من الحوض الزراعي .
يفسر لنا هذا التدرج في قوام التربة من الأطراف باتجاه الأجزاء المركزية سبب الحاجة إلى عدد ريات أكثر في الأجزاء الطرفية والمواقع التلالية الناهضة من أراضي طار العلا والعشارنة بالمقارنة مع أراضي الأجزاء المحورية من الغاب.(8)

تتوفر في المنطقة الكثير من المحاصيل الزراعية وحسب الخطة الزراعية فإن الانتاج الجيد في منطقة الدراسة من المحاصيل الزراعية التالية أهمها (قمح_بقوليات _كمون_شعير_ذرة_خضار صيفية).

وبالنسبة لكميات مياه الري تم وضع التركيب المحصولي للمساحات المزروعة والدورة الزراعية المقترحة للأراضي بالتوزيع الموضح بالجدول(2) .(6)

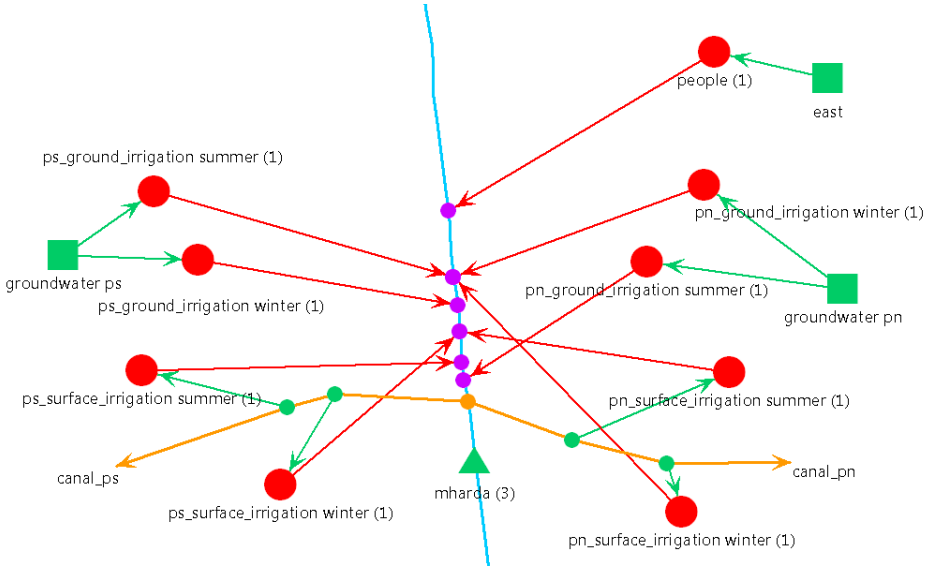
الجدول (2): التركيب المحصولي للأراضي المروية

محاصيل صيفية	المساحة %	محاصيل شتوية	المساحة %
فول سوداني	60	قمح	60
خضار صيفية	20	بقوليات	20
ذرة	10	كمون	5
عباد الشمس	10	يانسون	5
		شعير	10

يوضح الجدول (3) والشكل (2) التمثيل التخطيطي للمشروع في واجهة الرسم

الجدول (3) : الشكل ومايمثله من استخدام في البرنامج المذكور

الشكل	الوظيفة
	منطقة تمثل أراضي زراعية أو تجمعات سكانية
	قناة جر مياه رئيسية
	خط استجرار مياه من قناة الري الرئيسية
	نهر العاصي
	الرواجع من مواقع الاحتياج المائي
	مياه جوفية
	سد محردة



الشكل (2) : المخطط العام لمنطقة الدراسة

نجد من الشكل (2) أن نهر العاصي يعبر منطقة الدراسة من الجنوب باتجاه الشمال والممثل بالعنصر التخطيطي ( ) وبتتبع مسار النهر نجد عليه سد محردة الممثل بالعنصر التخطيطي ( ) و نجد قنوات ري رئيسية على مجرى نهر العاصي في منطقة طار العلا والعشارنة تقوم بسحب المياه وهي قنوات الري الرئيسية ps و pn والممثلة بالعنصر التخطيطي ( ) والتي تروي الأراضي الزراعية في زمامها بمساحات تقدر ب (14840 ، 8800) هكتار أراضي زراعية على التوالي والمتمثلة بالعنصر ( ) أما العنصر التخطيطي ( ) فيمثل خط استجرار مياه من قناة الجر الرئيسية وبالإضافة للمياه السطحية يتم ري هذه المساحات من المياه الجوفية المتمثلة بالعنصر ( ) .كما تم مراعاة تأمين مياه الشرب للتجمعات السكانية والممثلة بالعنصر التخطيطي (people) من عقدة المياه الجوفية (east) ويتم تصريف رواجع التجمعات السكانية والزراعية الى نهر العاصي عن طريق العنصر الرسومي ( ) .

9-السيناريوهات :

هي وصف لمجموعة من الأحداث المستقبلية الممكنة على أساس شروط أو مواصفات أولية والمسارات التي يمكن أن تؤدي إلى ذلك ، كما يعتبر بناء السيناريوهات من الأدوات الهامة لفحص تأثير الخطط الاستثمارية المختلفة على واقع المشروع الحالي من الناحية الاقتصادية والمائية ويتيح برنامج (WEAP21) أدوات متطورة لبناء وتشغيل السيناريوهات والمقارنة بينها ، كما يقدم تقييما للمشاكل المائية الخاصة في نظام شامل ومتكامل بين الاحتياج والتزويد وبين نوعية المياه وكميتها وبين اهداف التطوير الاقتصادي والقيود البيئية .

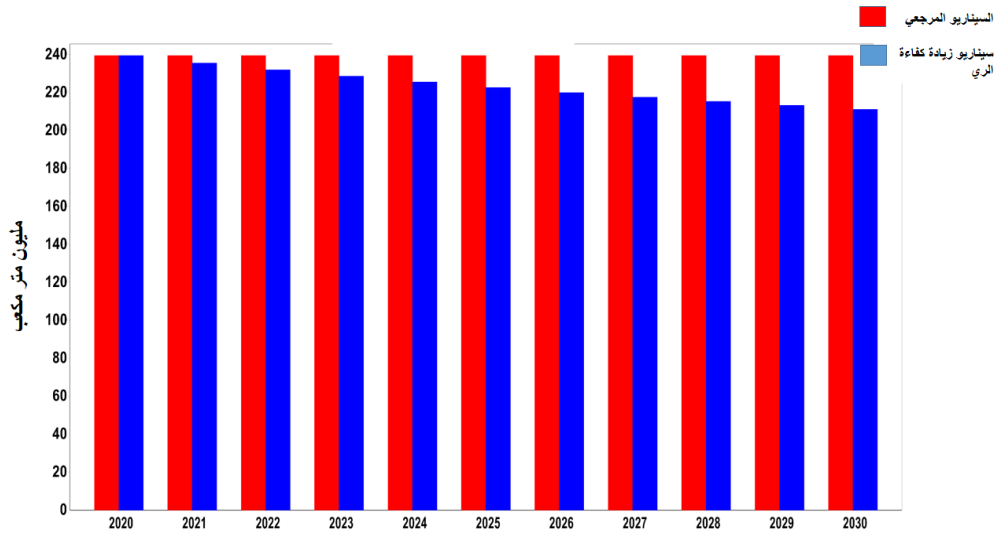
9-1- السيناريو المرجعي :

يمثل استمرار بيانات سنة الأساس (دون أي تغيير او تدخل خارجي) نحو المستقبل ويمثل سيناريو لمقارنة التغييرات التي تحصل على السيناريوهات الأخرى .

9-2- سيناريو زيادة كفاءة الري :

تم بهذا السيناريو زيادة كفاءة شبكة الري حيث تم زيادة الكفاءة الحالية (وهي 75%) بمعدل سنوي ثابت ليصل في عام 2030 لقيمة (85%).

بلغت متطلبات التزويد عبر خطوط النقل في بداية الدراسة /239.6/ مليون متر مكعب وفي السنة الأخيرة بلغت الكمية /211.3/ مليون متر مكعب أي انه تم توفير مايقارب /28.3/ مليون متر مكعب من المياه بنتيجة تطبيق هذا السيناريو الشكل (3) .

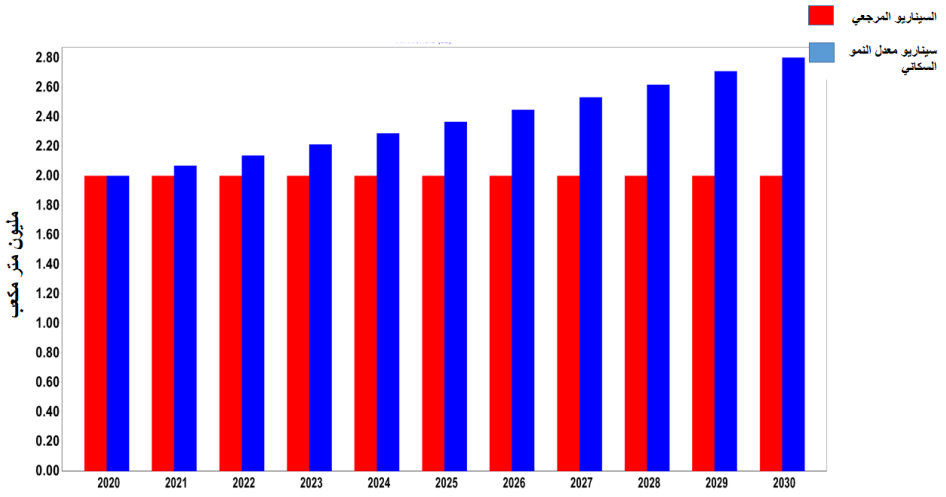


الشكل (3) : مقارنة بين السيناريو المرجعي وسيناريو زيادة كفاءة الري من حيث التغير بمتطلبات التزويد نحو الأراضي الزراعية(بواحدة مليون متر مكعب)

9-3- سيناريو معدل النمو السكاني:

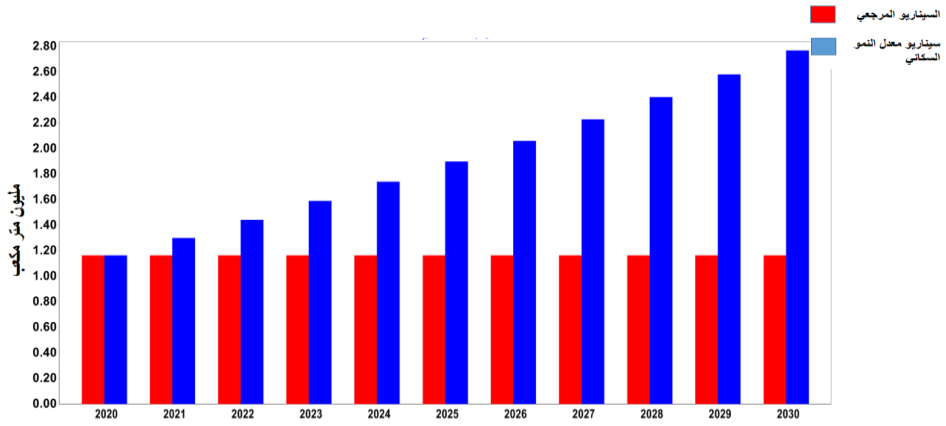
تم في هذا السيناريو دراسة تأثير زيادة عدد السكان على الواقع المائي الحالي حيث يقدر عدد السكان الحالي في منطقة الدراسة نحو (50000) نسمة ليصل بنهاية فترة الدراسة لـ(70000) نسمة بمعدل نمو سكاني (3.43%).(7)

حيث بلغت قيمة الاحتياج المائي الصافي للتجمعات السكانية في السنة الأولى /2/ مليون متر مكعب وفي السنة الأخيرة بلغت الكمية /2.8/ مليون متر مكعب الشكل (4).

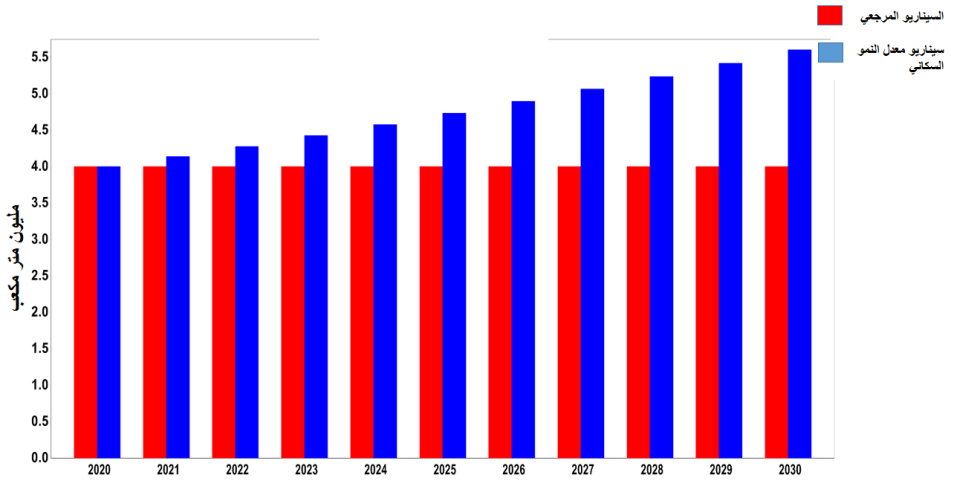


الشكل (4): التغير في الاحتياج المائي الصافي للتجمعات السكانية بين السيناريو المرجعي ومعدل النمو السكاني

نجد أنه بتطبيق هذا السيناريو ازداد قيمة العجز المائي في مناطق التجمعات السكانية حيث بلغ في في السنة الأولى /1.2/ مليون متر مكعب وفي السنة الأخيرة /2.8/ مليون متر مكعب كما هو موضح في الشكل (5).



الشكل(5): التغير في العجز المائي للتجمعات السكانية بين السيناريو المرجعي ومعدل النمو السكاني

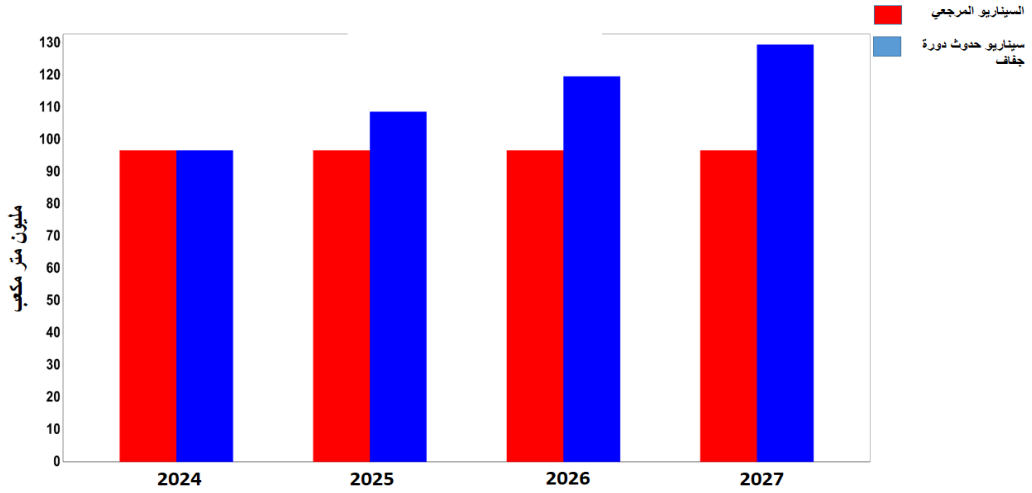


الشكل(6): مقارنة بين السيناريو المرجعي وسيناريو معدل النمو السكاني من حيث متطلبات التزويد

بتطبيق هذا السيناريو ازدادت قيم متطلبات التزويد في مناطق التجمعات السكانية حيث بلغت في في السنة الأولى /4/ مليون متر مكعب وفي السنة الأخيرة /5.6/ مليون متر مكعب وذلك مع الاخذ بعين الاعتبار الضياعات بشبكات مياه الشرب بنحو(50%) كما هو موضح في الشكل (6).

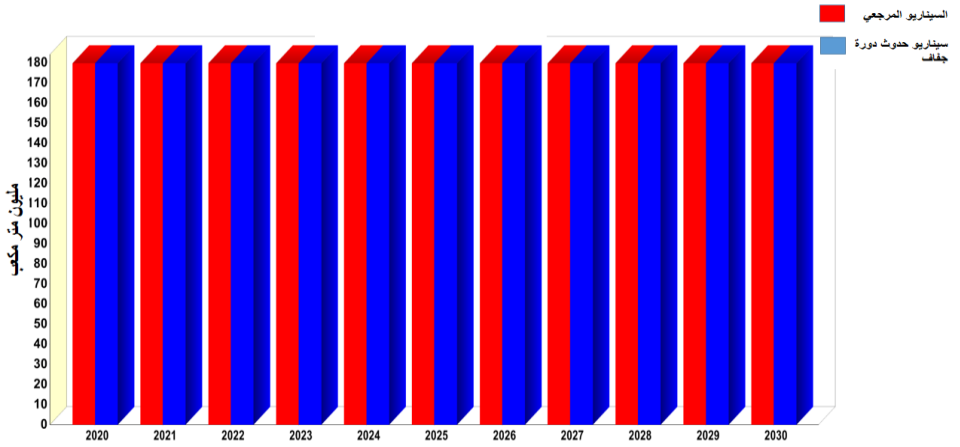
9-4- سيناريو حدوث دورة جفاف:

قمنا بهذا السيناريو بدراسة انخفاض كمية المياه الواردة لسد محردة من سد الرستن بمقدار (10%) سنويا ولمدة 3 سنوات نتيجة حدوث جفاف ودراسة تأثير ذلك على مواقع الاحتياج الزراعي.



الشكل (7) : مقارنة بحجم العجز المائي بين السيناريو المرجعي وحدوث دورة جفاف

نلاحظ من الشكل (7) أن قيمة العجز المائي ازدادت نتيجة انخفاض قيمة التصريف لنهر العاصي واصبحت (129.5) مليون متر مكعب في نهاية دورة الجفاف بينما كانت في السنوات العادية (96.6) مليون متر مكعب .



الشكل (8) : مقارنة الاحتياج المائي الصافي للأراضي الزراعية بين السيناريو المرجعي وحدوث دورة جفاف

باستعراض الشكل (8) نجد أن قيمة الاحتياج المائي الصافي للأراضي الزراعية (179.7) مليون متر مكعب .

10- النتائج :

1. تم تقليل متطلبات التزويد للأراضي الزراعية مايقارب /28.3/ مليون متر مكعب من المياه بنتيجة زيادة كفاء الري وتقليل الضياعات في الشبكة.
2. ان زيادة عدد السكان بنسبة (3.43%) سنويا أدى الى ازدياد الاحتياج المائي الصافي للتجمعات السكانية في السنة الأخيرة لـ (40%) مقارنة بالسنة المرجعية.
3. ان تتالي ثلاث سنوات جافة بحيث ينخفض الوارد المائي سنويا من سد الرستن لسد محردة بمقدار (10%) يؤدي الى زيادة العجز المائي بنهاية دورة الجفاف بمقدار (32.9) مليون متر مكعب عن السنة المرجعية.

11- المراجع:

المواقع الالكترونية:

WWW.WEAP21.ORG−1

المراجع الأجنبية :

2-Cacal, Mehboob Projecting hydrological response to climate change and urbanization using WEAP model: A case study for the main watersheds of Bicol River Basin, Philippines, Journal of Hydrology: Regional Studies 54 ,2024.

3-Dawit, Olumana, Assessing the impact of Water Resource Development: The Case of Dhidhessa River Basin, Ethiopia , E3S Web of Conferences 590,2024

4-Duque, WEAP21 based modelling under climate change considerations for a semiarid region in southern-central Chile , MASKANA, Vol. 8, No. 2,2017

المراجع العربية:

5- الشركة العامة للدراسات المائية، مشروع تحديث دراسة حوض العاصي ،مرحلة ثانية ،2016.

6- المؤسسة العامة لادارة وتنظيم استثمار الغاب ، وزارة الزراعة، 1998 .

7- خزام ، بشرى . ترشيد استخدام الموارد المائية في حوض العاصي الأعلى ، رسالة دكتوراه في الهندسة المائية ، جامعة حمص، 2008

8- مشروع اغروبوليس. وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي. 2007

9-اليسوف ،باسل . استخدام نظم دعم القرار في دراسة الوضع الحالي والمستقبلي للموارد المائية في حوض الساحل ، رسالة ماجستير ، جامعة حمص، 2016

دراسة الحدائق الشاطئية ضمن الواجهات الساحلية والبحرية (تجارب ودروس مُستفَادة)

*أ.م.د. سامي شيخ ديب

الملخص:

تعتمد الدراسات الحديثة على البنية التحتية الخضراء كجزء من تنفيذ الخطط، لتحقيق أهداف التنمية المستدامة في حماية البيئة وتحسين جودة الحياة للإنسان وتكوين مدن عمرانية مستدامة، ولأن الحدائق الشاطئية هي جزء من البنى التحتية الخضراء للمدن الساحلية، فهي من أهم المكونات التي يجب الاعتناء بتخطيطها وتصميمها. إلا أن بعض المشاريع والدراسات لم تُعنى بالتخطيط وفق معايير شاملة عمرانياً وبيئياً واجتماعياً، لتمكين الحدائق الشاطئية من القيام بدورها في التنمية المستدامة وتفعيلها ضمن الواجهات البحرية والساحلية.

لذلك تم تحليل ودراسة بعض التجارب العالمية والعربية والمحلية ضمن إطار زمني لها ضمن آخر عقد من الزمن، ومن ثم المقارنة فيما بينها من حيث المعايير التخطيطية للحدائق الشاطئية، واستنتاج الدروس منها في كيفية تحسين تلك الحدائق كونها جزء من البنية التحتية الخضراء في التفاعل ضمن الواجهات البحرية لتحقيق التنمية العمرانية والبيئية والمستدامة. كما توصل البحث إلى دراسة التجارب المحلية في محافظتي اللاذقية وطرطوس وخاصة ضمن أماكن متفرقة من ساحل اللاذقية وضمن منطقة الكورنيش البحري في طرطوس، ومدى التغير الحاصل في الساحل ضمن آخر عقد زمني.

الكلمات المفتاحية: الحدائق الشاطئية، معايير تخطيط الحدائق الشاطئية، الواجهات البحرية والساحلية، البنية التحتية الخضراء.

* أستاذ مساعد في قسم تخطيط المدن والبيئة في كلية الهندسة المعمارية/ جامعة اللاذقية.

Studying Beach Gardens within Coastal and Marine Fronts (Useful Lessons and Experiments)

*Dr. Sami Cheikh Dib

Abstract:

Modern studies rely on green infrastructure as a key component in implementing plans to achieve sustainable development goals, including environmental protection, improving human quality of life, and creating sustainable urban cities. Since beach parks are an integral part of the green infrastructure of coastal cities, they are among the most important elements that require careful planning and design. However, some projects and studies have not addressed planning according to comprehensive urban, environmental, and social standards to enable beach parks to fulfill their role in sustainable development and be effectively integrated into waterfronts and coastal areas.

Therefore, several international, Arab, and local experiences were analyzed and studied within a timeframe of the last decade. These experiences were then compared in terms of planning standards for coastal parks, and lessons were drawn on how to improve these parks as part of the green infrastructure interacting with waterfronts to achieve sustainable urban and environmental development. The research also examined local experiences in the governorates of Latakia and Tartous, particularly in various locations along the Latakia coast and the Tartous Corniche, and the extent of changes that have occurred along the coast over the last decade.

Key Words: Beach Garden; Standards of Beach Garden Planning; Coastal and marine Fronts; Green Infrastructure.

* Associate Professor, Department of Urban Planning and Environment, Faculty of Architecture, Latakia University.

1- المقدمة:

توجّهت الدراسات الحديثة إلى تخطيط البنى التحتية الخضراء في البيئة العمرانية من أجل تحقيق التنمية المستدامة وتحسين الجودة المعيشية، لما لها من أهمية في مقاومة التغييرات المناخية وتخفيف حدة الحرارة في البيئة العمرانية وبالتالي تنعكس الأهمية البيئية في جعل البنية التحتية الخضراء كمكون أساسي لزيادة القيم الإيجابية لتفاعل البنية التحتية الخضراء مع البيئة العمرانية من أجل تحقيق أهداف التنمية المستدامة وتحسين جودة الحياة.

ولأن الحدائق بشكل عام والحدائق الشاطئية بشكل خاص هي إحدى نماذج البنى التحتية الخضراء فإنّ تخطيطها وفق أسس ومعايير تخطيطية عملية أساسية للقيام بدورها ضمن البيئة العمرانية وتحقيق الأهداف التنموية والجمالية ضمن الواجهات البحرية والساحلية التي تعتبر المنفذ البري / البحري للمدن الساحلية والوجهة الدولية نحو الدول والبلدان الأخرى.

لذلك يجب معرفة تلك المعايير التخطيطية من خلال البحث ودراسة الحدائق الشاطئية لبعض التجارب العربية الدولية والمحلية ومدى تفاعلها ضمن الواجهات البحرية.

2- أهمية البحث:

يقدم البحث أهمية الحدائق الشاطئية في الواجهات البحرية والساحلية لما تقدمه من أهمية بيئية وجمالية في إدماجها ضمن البنية التحتية الخضراء للخط البحري وما لها من أهمية في مقاومة تغييرات المناخ، كما يبيّن البحث مدى أهمية الحدائق الشاطئية في التنمية العمرانية والاقتصادية والبيئية ضمن أسس ومعايير تخطيطية من أجل تقديم أفضل الأداء لهذه الحدائق في رفع مستوى المعيشة والتنمية وجودة الحياة.

3- المشكلة البحثية:

تعتبر البنية التحتية الخضراء من أهم المكونات ضمن البيئة العمرانية للمدن بشكل عام لما لها من دور بيئي وعمراني واجتماعي في تحسين التنمية وجودة الحياة، وبما أن الحدائق الشاطئية هي جزء من البنية الخضراء للمدن البحرية فتعتبر هامة ضمن تكوينها وتخطيطها لتحقيق أهداف التنمية المستدامة، إلا أن دراسة تخطيطها ومكوناتها يكاد يكون غير شامل ولا يوضح الأهمية العمرانية والبيئية لها من جهة، ومن جهة أخرى لم يدرس تفعيلها ضمن الواجهات

البحرية بيئياً أو عمرانياً وهنا تكمن المشـــكلة البحثية في دراســـة الحدائق الشـــاطئية كجزء من الواجهات البحرية والساحلية ضمن تخطيط شامل يعتمد على معايير تخطيطية.

4- هدف البحث:

يهدف البحث إلى بيان دور الحدائق الشـــاطئية كجزء من البنية التحتية الخضـــراء في التنمية العمرانية والبيئية والاقتصادية وتفاعلها ضمن الحيز المكاني في الواجهات الساحلية والبحرية وفق مجموعة من المعايير التخطيطية والتصميمية المعتمدة. ومنه يتم وضع الأهداف التالية:

1- تحديد مفهوم الحدائق الشاطئية ومعايير تخطيطها المعتمدة.
2- تفاعل الحدائق الشاطئية مع البيئة العمرانية ضمن الواجهات البحرية والساحلية، ومدى دورها في حماية البيئة والمناخ.
3- بيان مدى فاعلية الحدائق الشاطئية ضمن الواجهات البحرية في سوريا ضمن محافظتي اللاذقية وطرطوس، ومدى اعتمادها للمعايير اللازمة ونسبة اعتمادها إن وُجِدَت، ومدى المساهمة في التغير المناخي.

5- منهجية البحث:

تمّ اتباع منهجية وصفية لوصف الإطار النظري للحدائق الشاطئية وتصنيفاتها، ومنهجية تحليلية لأهم المعايير التخطيطية للحدائق الشاطئية ومدى تفاعلها ضمن الواجهات الساحلية والبحرية.

أمّا في القســـم التطبيقي فقد تم اعتماد منهجية تحليلية في دراســـة التجارب العالمية والعربية والمحلية، ومقارنة فيما بينها لمعرفة مدى التفاعل ضـــمن البيئة العمرانية، ثمّ منهجية اســـتنتاجية لأهم الدروس المتبعة من أجل وضع التوصيات لتحقيق أهداف البحث.

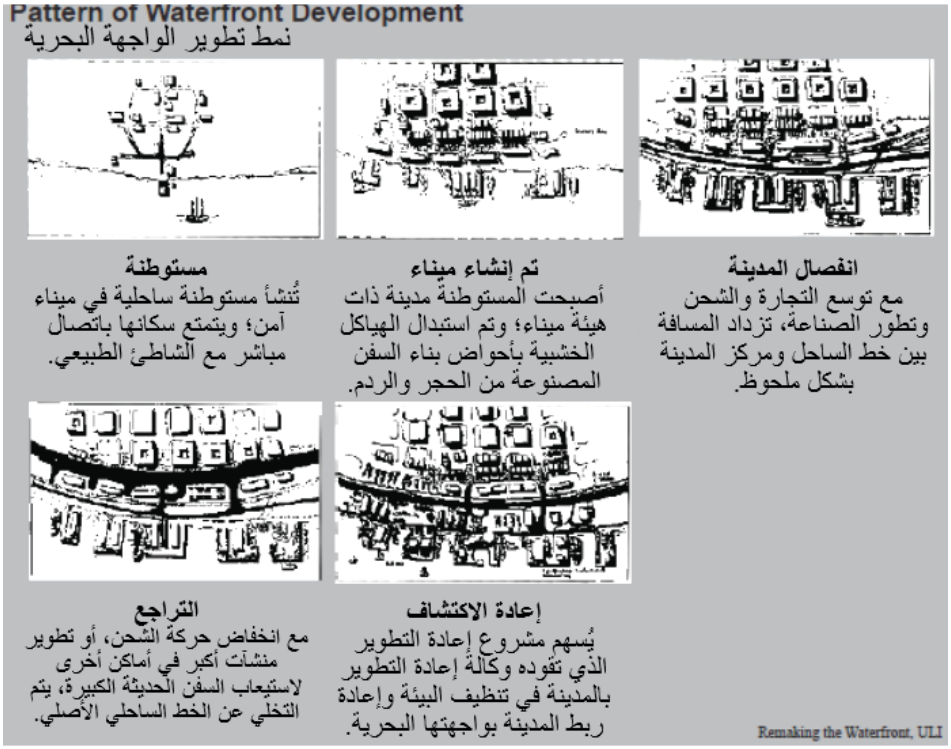
6- تعريف الواجهة البحرية والحدائق الشاطئية:

لقد عُرِّفَت الواجهات التي تقع بجانب مناطق مائية عموماً كالبحيرة أو النهر أو البحر أو المحيط كواجهات مائية water fronts وهي: 'a part of a town that is next to an area of water such as a river,a lake, or the sea or ocean"[1]. [8]

وللواجهات المائية تاريخاً طويلاً من حيث اســـتخداماتها المتعددة والتنوّع في مســـتويات الاســـتعمالات، انتهاءً بشـــكلها الحالي من الاســـتخدام العام والمتعدد الطبقات. فقد كانت موقعاً

[1] https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/waterfront [8]

لموانئ النقل وبوابة للممرات ثم تعددت لتصـــبح مراكز للتجارة ومراكز للســـفر وأماكن ترفيهية وسياحية. مما اكسبها أهمية في السفر والتجارة والترفيه والمتعة العامة [6] [1]. الشكل (1).



الشكل (1): نماذج من تطور الواجهات المائية – المصدر: [6]

وتعتبر الواجهات البحرية أو الساحلية كنموذج من الواجهات المائية التي تلعب دوراً هاماً ضمن البيئة العمرانية والبيئية، إلا أنها بحاجة للتخطيط وفق معايير وأســـس تضـــمن قيامها بدورها التنموي، من خلال تفاعل العمران مع البيئة المائية. الأمر الذي يقتضـي الاهتمام بالبنية التحتية الخضـراء كمكون أسـاسـي من الواجهات المائية بشـكل عام والبحرية والسـاحلية بشـكل خاص، وتلعب الدور الوسيط في علاقة التفاعل بين البر والبحر ضمن الواجهات العمرانية والبيئية.

يمكن تعريف الحدائق الشاطئية وفق عدة نقاط كالتالي:

[11] Seattle Department of Planning and Design- Seattle Open Space 2100 Waterfront Typology, "Waterfronts- open spaces and interfaces of edge environments", pp.7. https://www.academia.edu/5809806/Waterfronts [6]

- تعد مكون أساسي ضمن الواجهات البحرية والساحلية، والتي تعتبر كمنفذ ومدخل للمدن الساحلية، ولها أهمية تنموية هامة.
- هي جزء من البنى التحتية الخضـــراء وتعتمد على حلول ونماذج قائمة على الطبيعية، وتتفاعل بين البر والبحر.
- الحدائق الشـاطئية هي نهج متميز لتصـميم المناظر الطبيعية، يُجسّـد جوهر شـاطئ البحر ويعكس الفلسفة التصميمية الفريدة لروح الحياة الساحلية، وتضيف جواً من الهدوء والجمال والتواصل مع الطبيعة[1]. [10]

يوجد عدة نماذج للحدائق الشـاطئية فيمكن أن تكون حديقة خضـراء كمناطق مفتوحة، أو حدائق تتضمن ألعاب مائية، أو حدائق ترفيهية ذات نشاطات متعددة للسكان. الشكل (2).

الشكل (2): نماذج الحدائق الشاطئية – المصدر: الباحث

وتعكس الحدائق الشاطئية الأبعاد الاقتصادية والبيئية والعمرانية حيث تكمن أهميتها من حيث:

- أن الحدائق الشـاطئية لها أهمية جمالية في دعم البنية الخضـراء، وتحسـين المشـهد للواجهات الساحلية والبحرية.
- تدعم الحدائق الشاطئية النواحي الصحية للإنسان وتحسن المزاج وتزوّد بخدمات للهدوء والراحة. [1]
- لها أهمية اقتصـادية واسـتثمارية من حيث توفير فرص العمل ضـمنها، وتدعم أنشـطة الاستثمار السياحي.

[1] https://www.gardenia.net/gardens/garden-styles/coastal-garden [10]

- تساهم الحدائق الشاطئية في الحد من تغييرات المناخ والتلوث، إذا تم التخطيط الملائم لها.
- لها فوائد في دعم التنمية العمرانية، والتفاعل ضمن الواجهات الساحلية والبحرية.
- تسهم الحدائق الشاطئية في تحقيق أهداف التنمية المستدامة.

7- معايير تخطيط الحدائق الشاطئية:

تتضمن مبادئ تخطيط المناظر الطبيعية [1]بشكل عام سبعة مبادئ رئيسية هي:

1- المظهر والتركيب.

2- الجودة البيئية والحفاظ عليها.

3- توفير المياه.

4- الحفاظ على النباتات المحلية الموجودة وإزالة الأنواع النباتية المحظورة.

5- التوافق.

6- بيئة للمشاة عالية الجودة.

7- تحسين الهندسة المعمارية.

كما أنّه تشمل الحدائق عناصر عدة، مثل العناصر الطبيعية كالنباتات الخضراء والأشجار والمياه، عناصر فرش الموقع، العناصر الاصطناعية للحماية من العوامل المناخية، العناصر الانشائية وغيرها[2].

إلا أن البحث يتضمن معايير مشابهة لكل ما سبق. وقد تمّ إضافة مدى التفاعل ضمن الواجهات البحرية مع البيئة البرية والبحرية، ومدى الملاءمة للعوامل المناخية وكيفية التفاعل مع التغييرات المناخية. لذلك يجب تحديد أولاً قبل البدء بعملية تخطيط الحدائق الشاطئية أهداف التنمية المستدامة التي ستحققها، وتحديد فئات المجتمع المُستفادة من الحدائق، وتصنيف الحديقة

[1] Palm Beach County, "ARTICLE 7 – LANDSCAPING", Unified Land Development Code Supplement No. 32 (Printed 10/25), pp. 58. http://www.pbcgov.com/uldc/ [5]

[2] ندوة سابقة للباحث حول معايير تخطيط الحدائق بشكل عام وحدائق الأطفال بشكل خاص ومدى تخطيطها في مدينة اللاذقية وتصميم فراغات للأطفال بتاريخ 2009م. [2]

والهدف والغرض منها ومن تخطيطها. ومن ثم تعيين فئات المعايير الأساسية لتخطيطها والتي تشمل: (الباحث)

1- تخطيط وتصميم الحديقة وكل ما تحويه من عناصر.

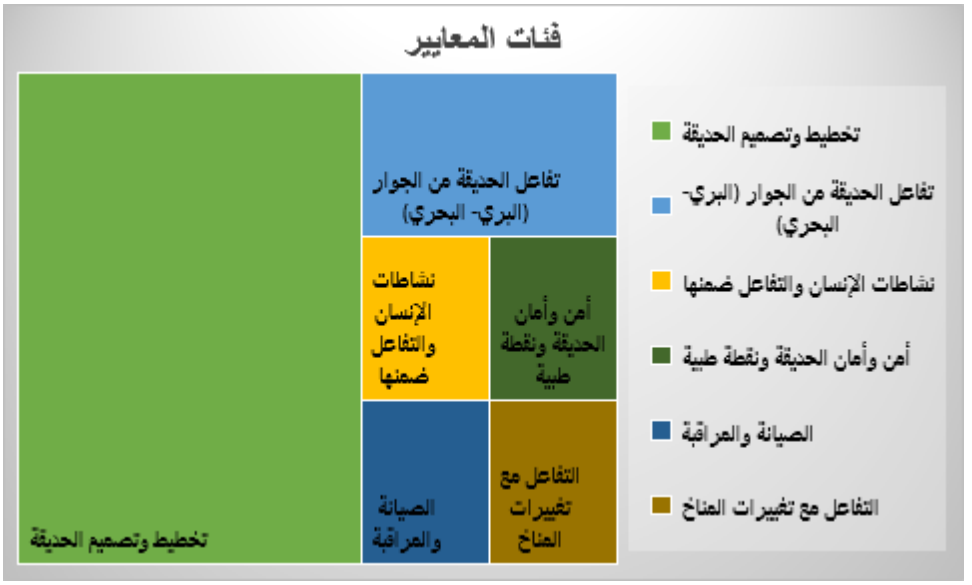
2- تفاعل الحديقة من الجوار (البري- البحري).

3- نشاطات الإنسان والتفاعل ضمنها.

4- أمن وأمان الحديقة ووجود نقطة طبية. [1]

5- الصيانة والمراقبة.

6- التفاعل مع تغييرات المناخ. الشكل (3)



الشكل (3): الفئات العامة للمعايير المعتمدة- المصدر: الباحث

بعد تحديد الفئات العامة التي هي بمثابة الخطوط العريضة للحدائق الشاطئية، لا بد من تعيين المعايير التفصيلية التي تتضمنها والتي تساعد في عملية تقييم الحدائق بعد تنفيذها من أجل تحقيق أهدافها، فلو تبين نقص أحدها استوجب ذلك تدارك العنصر المفقود وفقاً للمعايير التفصيلية المبينة في الشكل (4)، حيث أن فئة تخطيط وتصميم الحديقة يتضمن فكرة الحديقة ومداخلها وعناصرها ومساحاتها الخضراء والعناصر المائية وممرات المشاة ومناطق لعب

الأطفال والملاعب، كما أن مدى التفاعل ضمن الواجهة البحرية يشمل التفاعل مع البر والبحر. (الباحث)

الشكل (4): المعايير العامة والتفصيلية المعتمدة في البحث– المصدر: الباحث

8– دراسة وتحليل التجارب العالمية والعربية والمحلية:

تم دراسة وتحليل الحدائق الشاطئية في الولايات المتحدة الأميركية والصين ضمن التجارب العالمية. وتجربة الحدائق الشاطئية في الإمارات العربية المتحدة، وفي مصر عربياً. ومحلياً تمّ التعرض بالدراسة للحدائق في مدينة اللاذقية، والكورنيش البحري في طرطوس.

8-1- تحليل منتزه موكلي الشاطئي في بوسطن في الولايات المتحدة الأميركية Moakley Park:

يقع المنتزه على ساحل الميناء القديم في موقع مقابل للجزر في بوسطن في الولايات المتحدة الاميركية، وتعد ذات أهمية بيئية وترفيهية نظراً للموقع الهام لها على الواجهة البحرية لمدينة بوسطن. يبين الجدول (1) المميزات العامة. ويوضح الشكل (5) موقع ومخطط المنتزه.

الجدول (1): مميزات منتزه موكلي الشاطئي- المصدر: الباحث

الموقع	مطل على ميناء بوسطن القديم والجزر في بوسطن في الولايات المتحدة الأميركية
التصنيف	منتزه شاطئي ترفيهي ورياضي
الهدف العام للحديقة	دور ترفيهي واقتصادي وجمالي وبيئي ولها دور في الواجهة البحرية على الميناء والجزر، لها دور متوسط نسبياً في مقاومة المناخ.
أهداف التنمية المستدامة	الأهداف 3-8- 11 – 13- 15.
فئات المجتمع المستهدفة	كل فئات المجتمع (أطفال، الشباب، الشيوخ، النساء، ذوي الاحتياجات الخاصة)

تبلغ مساحة الحديقة 60 فدان، وتضم الحديقة المكونات التالية:

- قسم من الشاطئ.
- الساحات وممرات للمشاة.
- المداخل مع الجوار.
- ملاعب التنس وملعب السلة وكرة القدم.
- أماكن للاحتفالات والتجمعات.
- عناصر مائية.
- المسطحات الخضراء.

– أماكن لألعاب الأطفال.

– أكشاك لبيع المنتجات.

– عناصر فرش الموقع.

وتم اقتراح تحسينات إضافية وهي كما موضحة في الشكل (5). كالآتي:

مثل تطوير الملاعب الرياضـــية، وإضـــافة مســـاحات جديدة للتجمعات المجتمعية، وزيادة المســـاحات المزروعة. بحيث يتم التهيئة لآثار تغير المناخ. حيث صُـــممت المناظر الطبيعية للحديقة وفق الآتي:

– منع مياه الفيضانات الساحلية من دخول الحي.

– إدارة مياه الأمطار الناتجة عن زيادة هطول الأمطار.

– إضافة النباتات والمسطحات المائية، واستخدام مواد للحفاظ على برودة الحديقة في الأيام ذات الحرارة العالية [1]. [7]

[1] https://www.boston.gov/departments/parks-and-recreation/moakley-park-initiatives [7]

الشكل (5): منتزه موكلي في بوسطن (الواقع على الخريطة ومخطط التطوير المستقبلي)-

المصدر: google earth و[9] https://dirt.asla.org/2021/05/20/moakley-park-the-inclusive-resilient-park-of-the-future/

وبالتالي فإنّ المنتزه قد استوفى مجمل المعايير التخطيطية سواء في وضعه الحالي أو بإضافة التحسينات.

8-2- تحليل الحدائق الشاطئية في منتزه خليج هوانغشي الساحلي الشريطي في الصين Huangshi Bay Coastal Park:

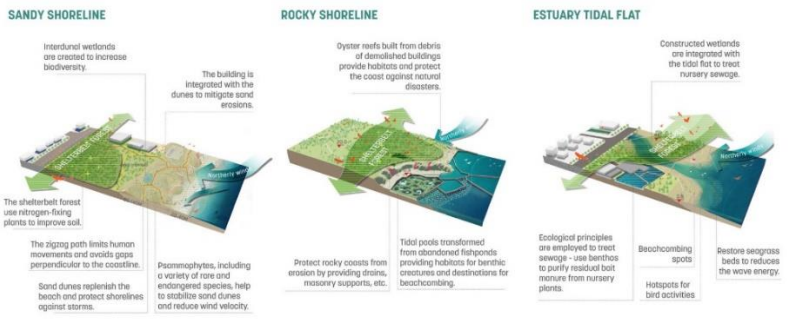
إن تطوير الحدائق الشاطئية على طول الخط الساحلي لخليج هوانغشي في مقاطعة شاندونغ في الصين، ذو أهمية كبيرة في دعم التنمية بسبب الفوائد البيئية والترفيهية، نظراً للموقع الهام لها على الواجهة البحرية، ومدة الإسهام في استعادة النظم البيئية البحرية، مع تطوير صناعات تربية الأحياء المائية وإدخال برامج ترفيهية في نظام متعدد الطبقات. يعد حديقة خليج هوانغشي الساحلية كنموذج مبتكر لإعادة تأهيل السواحل في الصين. يبين الجدول (2) المميزات العامة. ويوضح الشكل (6) الموقع والمخطط.

الجدول (2): مميزات منتزه خليج هوانغشي الساحلي الشريطي – المصدر: الباحث

الموقع	مطـل على خط الشـــريط لخليج هوانغشـــي Yantai, Shandong Province, China
التصنيف	منتزه شاطئي ترفيهي – ومنتزه بيئي
الهدف العام للحديقة	دور ترفيهي واقتصـــادي وجمالي وبيئي ولها دور في الواجهة البحرية للخليج، ويدعم مقاومة التغييرات المناخية.
أهداف التنمية المستدامة	الأهداف 3-8- 11 – 13- 15.
فئات المجتمع المستهدفة	كل فئات المجتمع (أطفال، الشـباب، الشـيوخ، النسـاء، ذوي الاحتياجات الخاصة)

تبلغ مســـاحة المشـــروع 670 فداناً من الأرض و309 فداناً من البحر، ويمتاز بالغنى البيئي وتخطيطه المميز لكافة العناصـــر التخطيطية، وبالتالي له دور جمالي وبيئي مهم في الواجهة الشريطية للخليج. الشكل (6).

BUILD OYSTER REEFS TO CREATE HABITAT AND RESIST EROSION
2.4 KM
PRESERVE THE ROCKY COAST
2.3 KM
RESTORE THE SHELTERBELT FOREST
814,972 M²
RESTORE DUNES AND PSAMMOPHYTE COMMUNITIES
119,292 M²
RESTORE AND CONSERVE BEACHES
5 KM


SANDY SHORELINE
Interdunal wetlands are created to increase biodiversity.
The building is integrated with the dunes to mitigate sand erosions.
The shelterbelt forest use nitrogen-fixing plants to improve soil.
The zigzag path limits human movements and avoids gaps perpendicular to the coastline.
Sand dunes replenish the beach and protect shorelines against storms.
Psammophytes, including a variety of rare and endangered species, help to stabilize sand dunes and reduce wind velocity.
ROCKY SHORELINE
Oyster reefs built from debris of demolished buildings provide habitats and protect the coast against natural disasters.
Protect rocky coasts from erosion by providing drains, masonry supports, etc.
Tidal pools transformed from abandoned fishponds providing habitats for benthic creatures and destinations for beachcombing.
ESTUARY TIDAL FLAT
Constructed wetlands are integrated with the tidal flat to treat nursery sewage.
Ecological principles are employed to treat sewage - use benthos to purify residual bait manure from nursery plants.
Beachcombing spots
Hotspots for bird activities
Restore seagrass beds to reduces the wave energy.

الشكل (6): مخططات منتزه خليج هوانغشي الساحلي الشريطي في الصين Huangshi Bay Coastal Park – المصدر: [12]

https://www.sasaki.com/projects/huangshi-bay-coastal-park-master-plan/

ويضم المنتزه الساحلي المكونات التالية:

- محميات بيئية وغابة صغيرة فيها أنواع تساهم في احتجاز الكربون.
- أحواض وبرك للأسماك.
- المشاتل البحرية.
- الرصيف الصخري.
- المراسي للقوارب.
- الساحات وممرات للمشاة.
- مسارات بيئية مفتوحة ضمن البيئة المائية والخضراء بهدف أغراض التعلم والترفيه.
- المداخل.
- المسطحات الخضراء.
- أماكن لألعاب الأطفال.
- وحدات البيع بالتجزئة للتجارة ذات الطابع البحري. والاستثمار السياحي في منشآت فندقية.
- عناصر فرش الموقع.

تم الحفاظ على البيئة الساحلية وإعادة تأهيلها واتخاذ إجراءات لمقاومة المناخ وفق الآتي:

– تم ترميم منطقة غابات الحزام الواقي على طول الســـاحل الرملي، التي تمتد بين الشـــاطئ والكثبان الرملية كنظام حماية متعدد الطبقات، ويوفر موائل متنوعة ويحافظ على الأنواع المهددة بالانقراض.

– سيتم إنشاء شعاب المحار لمقاومة التعرية على طول الساحل الصخري، وسيتم تحويل برك الأسماك القائمة إلى موائل مدية لمجموعة متنوعة من الكائنات البحرية .

– ترميم أحواض الأعشاب البحرية لتقليل طاقة الأمواج في مسطحات المد والجزر عند مصب النهر، وإنشاء أراضٍ رطبة جديدة لتنقية المياه من المشاتل[1]. [12]

يلاحظ أنّ الخط الشـــريطي للحدائق قد تم تخطيطه وتصـــميمه بحيث يحوي مجمل المعايير التخطيطية، حيث يقترح التصـميم إعادة تأهيل النظام البيئي الطبيعي للشـاطئ لتحسـين مرونة الموقع والتخفيف من آثار تغير المناخ.

8-3- تحليل حديقة الممزر الشـاطئية في دبي في الإمارات العربية المتحدة Al Mamzar Beach Park:

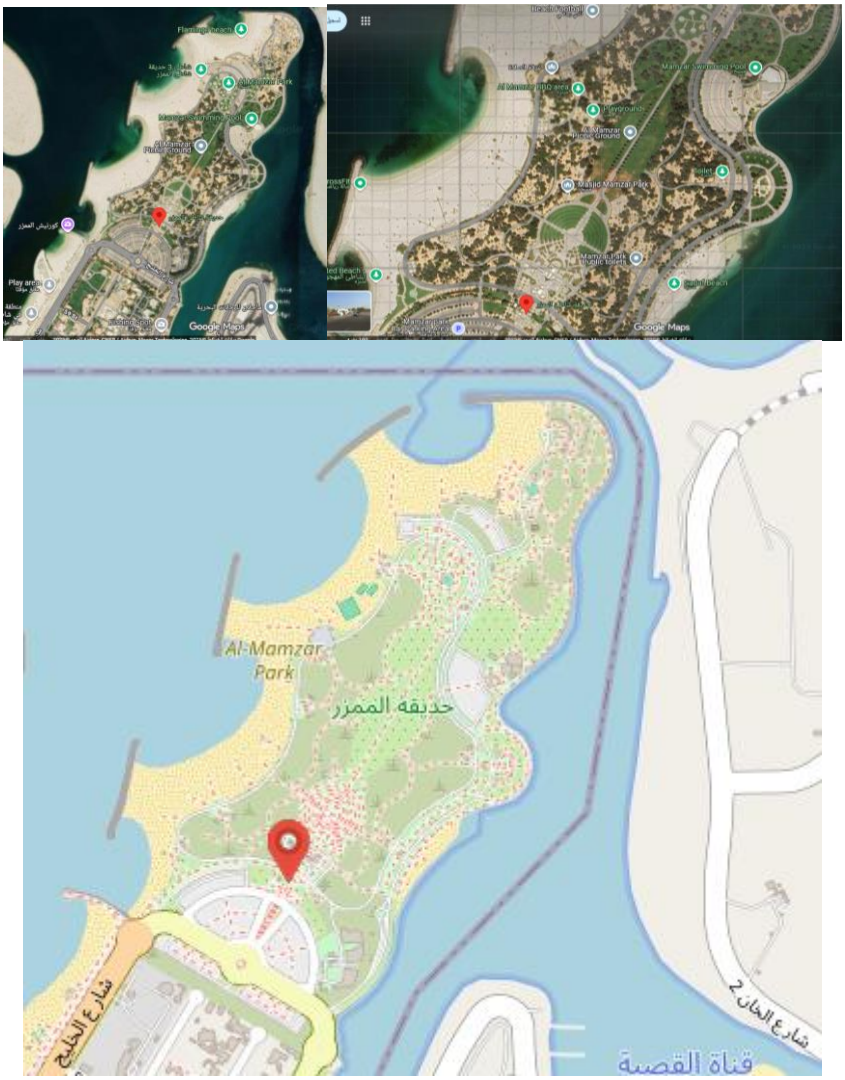
تقع في موقع شـمال شـرق جزيرة النخيل وجزيرة العالم وتطل بشـكل مباشـر على الخليج العربي، تعتبر ذات موقع اســـتراتيجي على الواجهة البحرية لمدينة دبي، وهي بذلك وجهة ترفيهية مميزة. يبين الجدول (3) المميزات العامة للحديقة. ويوضح الشكل (7) موقع ومخطط الحديقة.

الجدول (3): مميزات حديقة الممزر الشاطئية- المصدر: الباحث

الموقع	على الساحل الشمالي الشرقي لمدينة دبي
التصنيف	حديقة شاطئية ترفيهية ومائية
الهدف العام للحديقة	دور ترفيهي واقتصـــادي وجمالي وبيئي ولها دور في الواجهة البحرية للساحل، لها دور هام في مقاومة المناخ.
أهداف التنمية المستدامة	الأهداف 3-8- 11 – 13- 15.

[1] https://www.sasaki.com/projects/huangshi-bay-coastal-park-master-plan / [12]

فئات المجتمع المستهدفة	كل فئات المجتمع (أطفال، الشـباب، الشـيوخ، النسـاء، ذوي الاحتياجات الخاصة)



الشكل (7): حديقة الممزر في دبي– المصدر: google earth و [11]

تبلغ مســـاحة الحديقة 106 هكتارات[1] [11] ، وهي غنية ومتنوعة بالنباتات حيث تحوي الحديقة أكثر من 6000 شـــجرة نخيل و300 شـــجرة جوز الهند وبالتالي لها دور جمالي وبيئي مهم في الواجهة البحرية للساحل. وتضم الحديقة المكونات التالية:

- خمسة شواطئ مميزة
- المراسي للقوارب.
- الســاحات وممرات للمشــاة الواســعة، مما يتيح الحركة لكافة الفئات العمرية وذوي الاحتياجات الخاصة.
- المداخل ومواقف السيارات.
- ثلاثة مناطق مائية للسباحة
- المسطحات الخضراء.
- أماكن لألعاب الأطفال (لكن لا يوجد تقسيم للفئات العمرية).
- مناطق شاليهات للإيجار والتخييم ومناطق للشواء.
- أكشاك لبيع المنتجات.
- قطار في الحديقة.
- ملاعب لكرة القدم والسلة والطائرة.
- عناصر فرش الموقع.

يلاحظ أنّ الحديقة استوفت مجمل المعايير التخطيطية.

8-4- تحليل حديقة الشاطئ في بورسعيد في مصر:

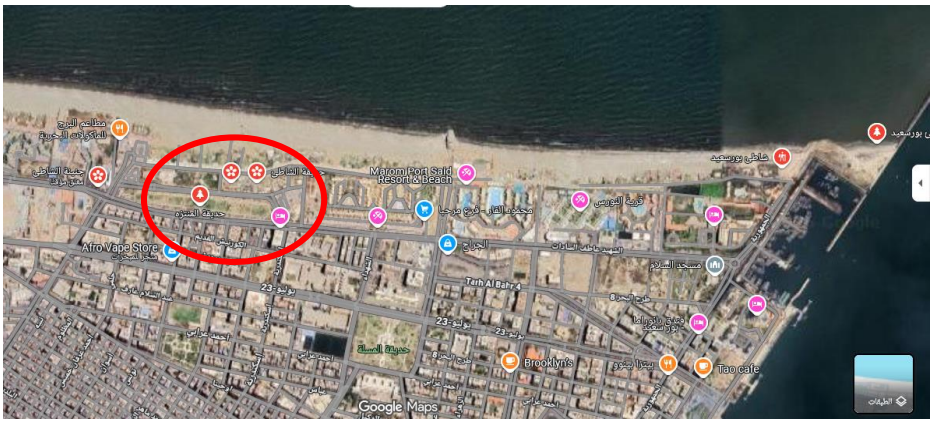
تقع حديقة الشـاطئ في موقع شـمال مدينة بور سـعيد. وتطل بشـكل مباشـر على البحر الأبيض المتوسـط، وبذلك تعتبر ذات موقع هام على الواجهة البحرية للمدينة. يبين الجدول (4) المميزات العامة للحديقة. ويوضح الشكل (8) موقع ومخطط الحديقة.

[1] https://jo.maptons.com/p/120977231 [11]

الجدول (4): مميزات حديقة الشاطئ في بور سعيد – المصدر: الباحث

الموقع	على الساحل الشمالي لمدينة بور سعيد (على الجهة الجنوبية للبحر الأبيض المتوسط)
التصنيف	حديقة شاطئية ترفيهية
الهدف العام للحديقة	دور ترفيهي واقتصادي وجمالي وبيئي ولها دور في الواجهة البحرية للساحل، لها دور متوسط نسبياً في مقاومة المناخ.
أهداف التنمية المستدامة	الأهداف 3-8- 11 – (الهدف 13 و15 بشكل متوسط نسبياً).
فئات المجتمع المستهدفة	كل فئات المجتمع (أطفال، الشباب، الشيوخ، النساء، تحتاج للعناية بممرات ذوي الاحتياجات الخاصة)

وتبلغ مساحة الحديقة حوالي 11550.00م2 وتحتوي على العناصر التخطيطية للحدائق بشكل عام، الشكل (9).



الشكل (8): حديقة الشاطئ في بورسعيد– المصدر: google earth

ومن مكونات الحديقة مايلي:

- المسطحات الخضراء
- الساحات وممرات للمشاة
- ممرات للرياضة والجري
- أماكن لألعاب الأطفال.
- أكشاك لبيع المنتجات.
- بعض عناصر فرش الموقع.

يلاحظ أنّ عامل الصيانة والأمان فيها متوسط نسبياً، كما لا يوجد تفاعل مع البحر بشكل مباشر، ولم تتم دراسة مقاومة تغييرات المناخ باستثناء وجود بعض النباتات. لذلك تحتاج لتكامل العوامل والمعايير التخطيطية بشكلٍ أكبر.

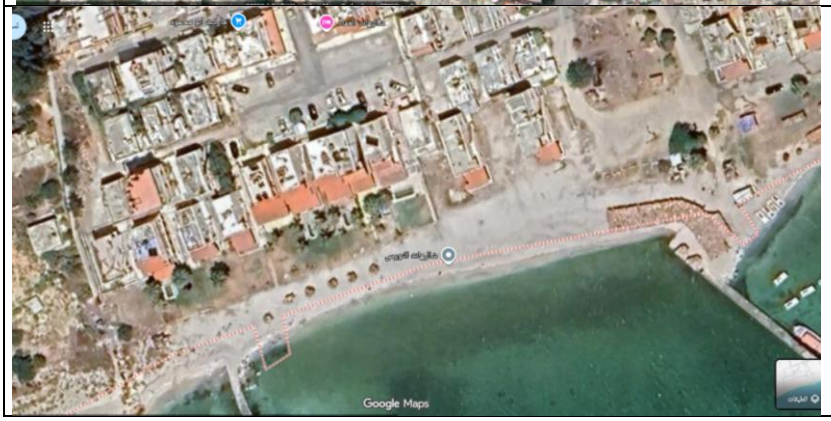
8-5- تحليل ودراسة الحدائق الشاطئية في اللاذقية:

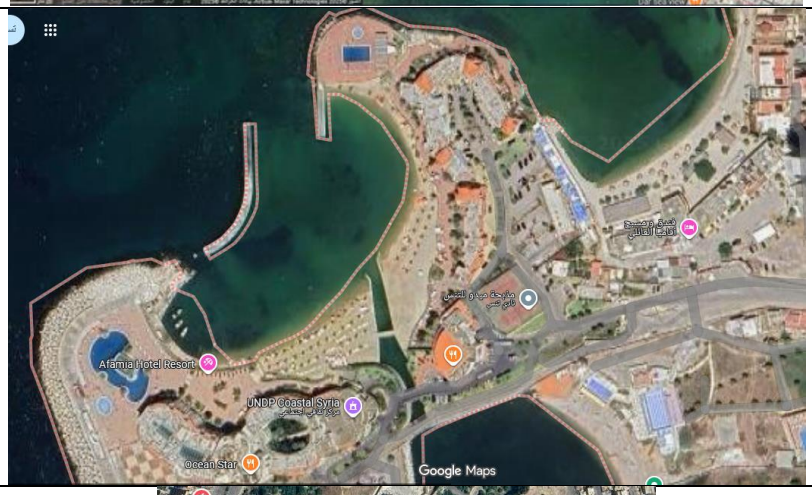
تعتبر مدينة اللاذقية من المدن ذات الأهمية التاريخية والسياحية المهمة على شواطئ البحر المتوسط، كما أن لها العديد من نماذج البيئة الطبيعية التي تعتبر مقاصد سياحية هامة كالشواطئ والخلجان والرؤوس البحرية، وقد أُقيمت عليها المنتجعات السياحية مثل الشاطئ الأزرق وأفاميا، وغيرها. ويغلب على الواجهة البحرية لمدينة اللاذقية نموذجين، إما واجهة ذات

طبيعة عمرانية أو واجهة بيئية طبيعية. حيث يُلحظ قلة الحدائق الشاطئية فيها، فيما عدا الحدائق الموجودة ضمن تخطيط المنتجعات السياحية وضمن اللاندسكيب الخاص بها، أو بعض البساتين الخاصـــة، لذا ســيتم تقييم بعضــاً منها في تفاعلها كمكون من الواجهة البحرية للمدينة. يوضـــح الجدول (5) بعض المنتجعات في مدينة اللاذقية.

الجدول (5): بعض الحدائق المتفرقة على طول الواجهة البحرية لمدينة اللاذقية

– المصدر: الباحث (الصور من google map)

منتجع الشاطئ الأزرق	
شاليها ت النورس	

منتجع لاميرا	
منتجع أفاميا	
بستان الاختيار	

الاستنتاجات الهامة من الجدول (5) السابق:

– تعتبر الحدائق الموجودة ضمن منتجع الشاطئ الأزرق وشاليهات النورس ومنتجع أفاميا من ضمن تخطيط المنتجعات، ولا تستوفي معايير الحدائق الشاطئية بمجملها رغم اعتبارها جزء من طول الواجهة البحرية لمدينة اللاذقية.

– إن الحديقة الموجودة ضمن منتجع لاميرا تعتبر من أكثر الحدائق تخطيطاً وفقاً للمعايير ومدة التفاعل بين البر والبحر، كما أن هناك جزءاً بيئياً ضمنها، ورغم ذلك تحتاج الحدائق لمزيد من التطوير.

– تعتبر الحدائق في بستان الاختيار جزء من الواجهة البحرية المطلة مباشرة على البحر الأبيض المتوسط، ولكن تحتاج للتخطيط بشكل أكثر.

– لم يلحظ حديقة شاطئية أو منتزه مطل على الكورنيش ضمن مدينة اللاذقية، وهو يحتاج للتخطيط لإنشاء حديقة شاطئية نموذجية تستوفي المعايير والأسس التخطيطية.

8-6- الحدائق الشاطئية في الكورنيش البحري في طرطوس:

تقع الحديقة ضمن الكورنيش البحري لمدينة طرطوس وتطل بشكل مباشر على البحر الأبيض المتوسط، وبذلك تعتبر ذات موقع هام جداً على الواجهة البحرية للمدينة. يبين الجدول (6) المميزات العامة للحديقة. يوضح الشكل (9) موقع ومخطط الحديقة.

الجدول (6): مميزات الحديقة في الكورنيش البحري في طرطوس – المصدر: الباحث

الموقع	مطل على الساحل بشكل مباشر لمدينة طرطوس (الجهر الشرقية للبحر الأبيض المتوسط)
التصنيف	حديقة شاطئية ترفيهية متعددة الأنشطة ضمن الكورنيش البحري
الهدف العام للحديقة	دور ترفيهي واقتصادي وجمالي وبيئي ولها دور في الواجهة البحرية للساحل، لها دور متوسط نسبياً في مقاومة المناخ.
أهداف التنمية المستدامة	الأهداف 3-8- 11 – (الهدف 13 و 15 بشكل متوسط نسبياً).

فئات المجتمع المستهدفة	كل فئات المجتمع (أطفال، الشـباب، الشـيوخ، النسـاء، ذوي الاحتياجات الخاصة)

كما أنها تحتوي على العناصـر التخطيطية التي تسـمح بنشـاطات الإنسـان كالممرات ومسـارات المشاة والجري ومراسي للقوارب البحرية. الشكل (9).

الشكل (9): مخطط مدينة طرطوس والحديقة الشاطئية في الكورنيش البحري – المصدر: [4 و google earth]

ومن مكونات الحديقة مايلي:

– الكورنيش الصخري وبعض المراسي للقوارب.

– الساحات وممرات للمشاة الواسعة مما يتيح الحركة لكافة الفئات العمرية وذوي الاحتياجات الخاصة.

– المسطحات الخضراء.

– أماكن لألعاب الأطفال (لكن لا يوجد تقسيم للفئات العمرية).

– أكشاك لبيع المنتجات.

– كافتيريات متفرقة حولها.

– بعض عناصر فرش الموقع.

يلاحظ أنّ عامل الصيانة والأمان فيها متوسط نسبياً كما لا يوجد عناصر المياه ضمن الموقع، ولم تتم دراسة مقاومة تغييرات المناخ باستثناء وجود حواجز للأمواج وبعض النباتات. لذلك تحتاج لتكامل العوامل والمعايير التخطيطية أكثر.

9– مقارنة بين التجارب العالمية والعربية والمحلية:

تعتمد الحدائق السابقة على عدة أسس ومعايير عند تخطيطها وتنفيذها وهو ما أدى إلى اختلاف الأفكار والتخطيط العام لها، وبتطبيق فئات المعايير المعتمدة في البحث والمقارنة وفق المعايير التفصيلية لكل منها تبين أن هناك حدائق متكاملة في اتباعها للمعايير وهناك حدائق لم تتبعها كما يبين الجدول (7).

الجدول (7): مقارنة بين التجارب العالمية والعربية والمحلية – المصدر: الباحث

فئات المعايير	المعايير المعتمدة	منتزه موكلي الشاطئي في بوسطن	منتزه خليج هوانغشي الساحلي الشريطي	حديقة الممزر في دبي	حديقة الشاطئ في بور سعيد	تقييم ونقد لبعض حدائق المنتجعات	الحديقة الشاطئية في الكورنيش البحري	المجموع

		في طرطوس	في اللاذقية*			في الصين			
تخطيط وتصميم الحديقة	النباتات والمناطق الخضراء	متوفر	جزئي	متوفر	متوفر	متوفر	متوفر		5.5
	العناصر المائية	لا يوجد	جزئي	لا يوجد	متوفر	متوفر	متوفر		3.5
	مسارات المشي	متوفر	جزئي	متوفر	متوفر	متوفر	متوفر		5.5
	اماكن لعب الاطفال	متوفر	جزئي	متوفر	متوفر	متوفر	متوفر		5.5
	العناصر الانشائية	متوفر	جزئي	متوفر	متوفر	متوفر	متوفر		5
	عناصر فرش الموقع	متوفر	جزئي	جزئي	متوفر	متوفر	متوفر		5
	المداخل والمخارج	متوفر	جزئي	متوفر	متوفر	متوفر	متوفر		5.5
	نظام الإنارة والري	متوفر	جزئي	متوفر	متوفر	متوفر	متوفر		5.5
تفاعل الحديقة من الجوار	التفاعل مع البر	متوفر	لا يوجد إلا في لاندسكيب المنتجعات	متوفر	متوفر	متوفر	متوفر		5

(البري- البحري)	التفاعل مع البحر	متوفر	متوفر	متوفر	لا يوجد	لا يوجد إلا في لاندسكيب المنتجعات	متوفر	4
نشاطات الإنسان والتفاعل ضمنها	نشاطات الإنسان	متوفر	متوفر	متوفر	متوفر	جزئي	متوفر	5.5
أمن وأمان الحديقة ونقطة طبية	مراعاة الأمن والأمان	متوفر	متوفر	متوفر	جزئي	جزئي	جزئي	4.5
الصيانة والمراقبة	الصيانة والمراقبة	متوفر	متوفر	متوفر	متوفر	جزئي	جزئي	5
التفاعل مع تغييرات المناخ	وجود نباتات لمواجهة المناخ ووجود مصدات للرياح والامواج	متوفر	متوفر	متوفر	لا يوجد/ بعض النباتات	لا يوجد إلا مصدات للأمواج	جزئي/ فقط مصدات للأمواج وبعض النباتات	3
المجموع		14	14	14	10	5.5	10.5	

* تم اعتماد بعض تخطيط الحدائق في المنتجعات في اللاذقية نظراً لعدم توافر حدائق شاطئية في المدينة

اعتمدت هذه المعايير على تحقيق أفضل مستوى لتخطيط الحدائق الشاطئية وتفاعلها ضمن الواجهات البحرية وبذلك تحقق أهداف التنمية المستدامة وخاصة الأهداف (مدن وتجمعات محلية مستدامة هدف 11–العمل المناخي هدف 13– الحياة في البر هدف 15– الحياة تحت الماء هدف 14– الصحة الجيدة والرفاه هدف 3)

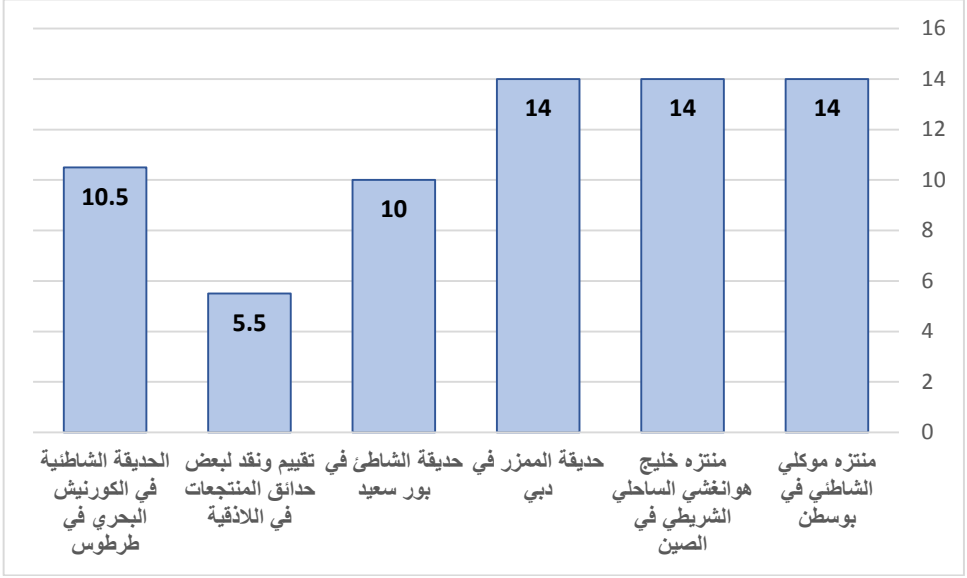
بينت المقارنة بين التجارب، أنّ الحدائق المدروسة اعتمدت بنسبة أكثر من النصف بكامل المعايير وبتجربتين بمجمل المعايير (وليست كلها)، وتجربة واحدة لم تعتمد إلا بعض المعايير الجزئية بمعدل أقل من النصف 40% من مجمل المعايير الشكل (10)، وبالتالي يمكن استنتاج الآتي:

– في الصين وأميركا ودبي هي الأكثر تخطيطاً وفقاً للمعايير المعتمدة، وبالتالي تظهر تفاعلاً إيجابياً ضمن الواجهة البحرية.

– تحتل تجربة الحدائق ضمن الكورنيش البحري في طرطوس المرتبة الثانية، من خلال تخطيطها وفقاً للمعايير المعتمدة.

– تعتبر تجربة حديقة الشاطئ في بور سعيد بعد تجربة الحدائق في طرطوس من حيث المعايير المطبقة.

– تعتبر الحدائق في اللاذقية من أضعف التجارب فلم تحقق إلا 40% من المعايير، حيث تواجدت جزئياً في المنتجعات السياحية مما يظهر ضعف التفاعل مع البيئة، واقتصار الواجهة البحرية على المنشآت السياحية حيث يكاد يكون تخطيط الحدائق الشاطئية ضعيفاً. الشكل (10).



الشكل (10): تقييم التجارب بحسب المعايير التخطيطية – المصدر: الباحث

تعتبر معايير تخطيط الحدائق من أهم المعايير التي يجب توافرها – وبالمجمل تم اعتمادها – ولم تولى النباتات الاهتمام اللازم، وخاصة من البيئة المحلية كون المنطقة شاطئية [3] تحتاج مناخ وبيئة معينة. كما أن الاهتمام بالصيانة، وعوامل الأمان والتفاعل مع البيئة البحرية، وتوفر العناصر المائية لم تكن ضمن مجمل التجارب. أمّا أضعف المعايير كانت الإجراءات المتبعة للحد من المناخ وحركة البحر والأمواج. حيث يبيّن الشكل (11) نسبة تطبيق المعايير التي يمكن تبويبها وفق الآتي:

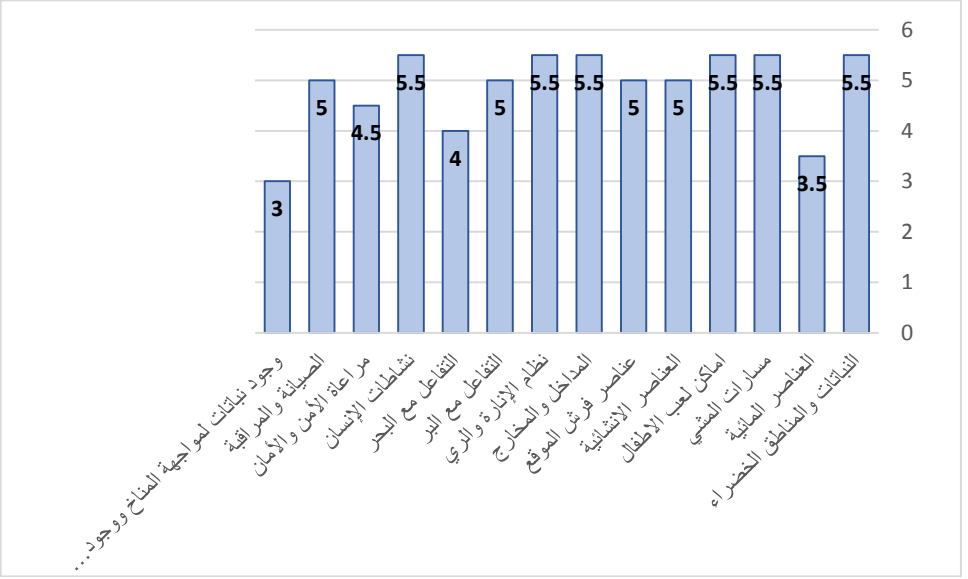
– بلغت معايير التخطيط للحدائق النسبة الأكبر وقد تم الاعتماد على معظمها، لكن لم يتم استخدام العناصر المائية، كما أن الاهتمام بعناصر فرش الموقع والعناصر الانشائية كان في المرتبة الثانية.

– تم الأخذ بالاعتبار بمعيار التفاعل بين البر والبحر ضمن الواجهات البحرية، لكن تمت دراسة التفاعل مع البر أكثر من التفاعل مع البحر. وقد استفادت بعض التجارب من التفاعل مع البحر، وهو ما يجب العمل على الاستفادة منه ضمن الحدائق الشاطئية.

– تحتاج الحدائق إلى الاهتمام بالأمن والأمان من الناحية الصحية والبيئية وتفادي الحوادث، حيث يجب الاهتمام أكثر بهذا المعيار.

– يحتاج معيار الصيانة والمراقبة إلى العمل على تطويره أكثر.

– إن التفاعل مع التغييرات المناخية بلغت أقل نسبة من حيث مقارنة المعايير بين التجارب، فلم يتم استخدام إلا بعض الحواجز كمصدات للأمواج وقلة من أنواع النبات لمقاومة التغييرات المناخية، وهذا الأمر يجب تداركه والعمل على إيجاد الحلول لمقاومة المناخ من خلال الحدائق الشاطئية. الشكل (11).



الشكل (11): تقييم كل معيار من المعايير التخطيطية ضمن ومجموعها ضمن تجارب البحث

– المصدر: الباحث

10– النتائج والتوصيات:

1– تعتبر الحدائق الشاطئية كجزء من البنية التحتية الخضراء، والتي لها أهمية تنموية بيئية واقتصادية وعمرانية وجمالية.

2– إن الحدائق الشاطئية هي من المكونات الهامة ضمن الواجهات البحرية والساحلية كمدخل ومنفذ للمدن الساحلية، وبالتالي من المهم الاعتناء بها وتخطيطها لضمان التفاعل البري والبحري ضمن الواجهة البحرية.

3– تعتبر المعايير التخطيطية المعتمدة في البحث وفق فئاتها العامة والتفصيلية، من أهم المعايير التي تساهم في رفع أداء الحدائق الشاطئية، وتفاعلها ضمن الواجهات البحرية.

4- إن مقاومة تآكل الشـــاطئ بفعل المد والجزر من الأمور المهمة، التي يجب تخطيطها في الحدائق الشاطئية.

5- يعتبر معيار التفاعل ومواجهة التغييرات المناخية من أهم المعايير التي يجب تداركها في البيئة، واتخاذ الأساليب التخطيطية وفقاً لذلك.

6- تعتبر التجارب في الصـــين والولايات المتحدة الأميركية والإمارات العربية المتحدة من التجارب النموذجية التي استوفت مجمل المعايير التخطيطية.

7- تعد تجربة الكورنيش البحري في طرطوس وتجربة الحديقة في بور ســـعيد من التجارب التي استوفت المعايير بنسبة متوسطة ويجب الاهتمام بالمعايير الأخرى.

8- تعتبر الحدائق في مدينة اللاذقية من التجارب التي تحتاج للكثير من التطوير، كما أنه لم يلحظ وجود حديقة شـاطئ ضـمن الواجهات البحرية باسـتثناء تلك الموجودة ضـمن المنتجعات السياحية، وبالتالي يجب التخطيط لحدائق شاطئية أو منتزه كورنيش في مدينة اللاذقية.

- التوصيات:

1- العمل على دعم البنية التحتية الخضـــراء ودراســـتها ضـــمن الواجهات البحرية، وبما يحقق التفاعل بين البر والبحر، من أجل التنمية البيئية والعمرانية والاقتصادية والمستدامة.

2- يوصـــي البحث بتخطيط وتصـــميم الحدائق الشـــاطئية وفق المعايير المتبعة ضـــمن البحث، وإيلاء الاهتمام لكل تلك المعايير الموضحة سابقاً وتحقيقها ضمن الحدائق الشاطئية.

3- يوصـي البحث بالاهتمام بالنواحي البيئية التعليمية، وجعل زون بيئي ضـمن الحدائق لتنشـيط السياحة البيئية واستكشاف الأنواع، ولدورها في مقاومة التغييرات المناخية.

4- يوصـــي البحث بالاهتمام بجانب مقاومة المناخ عبر الحدائق الشـــاطئية، لما لها من أهمية بيئية بالإضافة للدور في التفاعل بين البر والبحر وضمن الواجهات البحرية، وذلك عبر الآتي:

أ- الاهتمام بالنباتات المناسبة للبيئة الشاطئية وخصوصاً الأنواع المحلية منها.

ب- الاعتناء بوجود نباتات خاصـة مثل المانغروف وتخصـيص زون لها ضـمن الحديقة، بسـبب أهميتها البيئية في تخفيف عوامل المناخ، واعتبارها منطقة بيئية ويمكن اســـتخدامها لأغراض الترفيه البيئي واستكشاف الأنواع، كما أن لها دوراً جمالياً ضمن الواجهة البحرية.

ج- الاعتناء بمصـــدات الرياح والأمواج، مثل الحواجز الصـــخرية لمنع تآكل الشـــاطئ وحماية الحدائق.

د- الاهتمام بالشاطئ وبحركة المد والجزر واتخاذ الإجراءات المناسبة.

هـ- العمل على وجود زون مخصـص للبرك البيئية كمسـمكة للأنواع المحلية، بسـبب دورها في تنشيط السياحة البيئية ومقاومة تغييرات المناخ.

11- المراجع:

11-1- المراجع العربية:

1- الجفان، محمد علاء بسام (2025). "السياسات الحضرية الاكثر فاعلية في التحول نحو مدن إنسانية –دراسة تحليلية لتجارب عالمية"، المجلد 47، العدد 5 ، مجلة جامعة حمص (سلسلة العلوم الهندسية المدنية والمعمارية)، حمص، سوريا، ص ص 11-40.

2- شيخ ديب، سامي (2009). ندوة حول الحدائق وتصميم حدائق الأطفال.

3- ليلى، جميلة علي؛ صقر، إبراهيم حمدان & سليمان، حيان إبراهيم (2025). "دور الأساليب الزراعية الذكية في تحقيق الاستدامة الزراعية في محافظة اللاذقية"، المجلد 47، العدد 7، مجلة جامعة حمص (سلسلة العلوم الزراعية والتقانة الحيوية)، حمص، سوريا، ص ص 111-136.

4- مديرية الخدمات الفنية في محافظة طرطوس (2020)، مخطط مدينة طرطوس.

11-2- المراجع الأجنبية:

5- Palm Beach County, "ARTICLE 7 – LANDSCAPING", Unified Land Development Code Supplement No. 32 (Printed 10/25), pp. 58. http://www.pbcgov.com/uldc/ . Research on internet on (September, 2025).

6- Seattle Department of Planning and Design- Seattle Open Space 2100 Waterfront Typology, "Waterfronts- open spaces and interfaces of edge environments", pp.7. https://www.academia.edu/5809806/Waterfronts . Research on internet on (August, 2025).

7- https://www.boston.gov/departments/parks-and-recreation/moakley-park-initiatives (12/10/25, last update). Research on internet on (October, 2025)

8- https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/waterfront (June, 2025).

9- https://dirt.asla.org/2021/05/20/moakley-park-the-inclusive-resilient-park-of-the-future/ (May 20, 2021). Research on internet on (September, 2025).

10- https://www.gardenia.net/gardens/garden-styles/coastal-garden (July, 2025).

11- https://jo.maptons.com/p/120977231 (July, 2025).
12- https://www.sasaki.com/projects/huangshi-bay-coastal-park-master-plan / (September, 2025).

Experimental Investigation on the Impact of Recycled Concrete Aggregate on Concrete's Compressive Strength

Eng. Mohammed Nour Alomar[1] Dr. Eng. Muneeb Alallaf[2]
Dr. Eng. Issam Melhem[3]

Highlights

Recycled aggregate RCA from demolished buildings are utilized in this study to create sustainable, eco-friendly concrete that reduces pollution from construction waste.
The study examines how recycled aggregate affects concrete's qualities, particularly its compressive strength.
Analyzed the effect of RCA percentage on the compressive strength in the concrete mixes.

Abstract: Natural concrete aggregate (NCA) and recycled concrete aggregate (RCA) from demolished buildings were used in this study to produce sustainable concrete that reduces construction waste. Replacement ratios of NCA with RCA ranged from 0% to 100%. The study evaluates the effect of RCA on concrete properties, particularly compressive strength, to assess its viability compared with conventional concrete. Results showed that compressive strength decreases as the replacement ratio increases. At 50% RCA, the reduction was only 3.96%, while at 75% and 100% the reductions were 28.6% and 29.06%, respectively. RCA can therefore be used up to 50% without significant compromise in strength or ductility, while higher ratios may require mix design optimization.
Regarding durability, RCA mixes exhibited higher water absorption and porosity compared to NCA mixes, which may affect long-term performance. The use of supplementary cementitious materials and plasticizers can mitigate these effects and enhance durability.
The relative value of recycled concrete aggregate (RCA) depends on several factors, including density, shock resistance, and internal structural characteristics, all of which influence its suitability for industrial specialization and sustainable construction applications. These properties highlight the potential of RCA as an effective

material when properly processed and incorporated into well-designed concrete mixes.

Keywords: Concrete; Recycled Concrete Aggregate; Sustainability; Compressive Strength; Natural Concrete Aggregate; Reconstruction

[1] Ph.D. Graduate Student in the Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Homs, Syria
[2] Professor, Structural Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Homs University, Homs, Syria.
[3] Professor, Structural Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Homs University, Homs, Syria.

التحقيق التجريبي في تأثير الركام الخرساني المعاد تدويره على مقاومة الضغط للخرسانة

م. محمد نور العمر[1] د.م منيب العلاف[2] د.م. عصام ملحم[3]

الملخص:

تم استخدام الركام الخرساني الطبيعي (NCA) والركام الخرساني المعاد تدويره (RCA) من المباني المهدمة في هذه الدراسة لإنتاج خرسانة مستدامة تقلل من نفايات البناء. تراوحت نسب الاستبدال بين الركام الطبيعي والمعاد تدويره من 0% إلى 100%. تهدف الدراسة إلى تقييم تأثير الركام المعاد تدويره على خصائص الخرسانة، وخاصة مقاومة الضغط، وذلك لمقارنة جدواه مع الخرسانة التقليدية. أظهرت النتائج أن مقاومة الضغط

[1]طالب دراسات عليا (دكتوراه) في قسم الهندسة الإنشائيّة- كليّة الهندسة المدنيّة- جامعة حمص- سوريا
[2]أستاذ في قسم الهندسة الإنشائيّة- كلّيّة الهندسة المدنيّة- جامعة حمص- حمص- سوريا
[3]مدرس في قسم الهندسة الإنشائيّة- كليّة الهندسة المدنيّة- جامعة حمص-حمص- سوريا

تنخفض مع زيادة نسبة الاستبدال. عند نسبة 50 RCA %كان الانخفاض 3.96% فقط، بينما عند 75% و100% بلغت الانخفاضات 28.6% و29.06% على التوالي. لذلك يمكن استخدام RCA بنسبة تصل إلى 50% دون تأثير كبير على المقاومة أو اللدونة، في حين أن النسب الأعلى قد تتطلب تحسين تصميم الخلطة.

فيما يتعلق بالديمومة، أظهرت الخلطات المحتوية على RCA معدلات امتصاص ماء ونفاذية أعلى مقارنة بالخلطات المحتوية على الركام الطبيعي، مما قد يؤثر على الأداء طويل الأمد. ومع ذلك، فإن استخدام المواد الإسمنتية الإضافية والملدنات يمكن أن يخفف من هذه التأثيرات ويحسن من ديمومة الخرسانة.

تعتمد القيمة النسبية للركام الخرساني المعاد تدويره (RCA) على مجموعة من العوامل مثل الكثافة، ومقاومة الصدمات، وطبيعة البنية الداخلية، وهي عناصر تؤثر في مدى ملاءمته للتخصص الصناعي وتطبيقات البناء المستدام. وتُبرز هذه الخصائص إمكانية اعتماد RCA كمادة فعّالة عند معالجته واستخدامه ضمن خلطات خرسانية مصممة بشكل مناسب.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، الركام الخرساني العاد تدويره، الاستدامة، مقاومة الضفط، الركام الخرساني الطبيعي، إعادة الإعمار.

1. Introduction:

Recent decades have witnessed an increase in environmental awareness and a growing tendency to utilize recycled materials in engineering to achieve sustainability in construction, particularly in the building sector due to its significant consumption of resources and environmental impact. Recycling construction waste resulting from demolitions and armed conflicts has emerged as a crucial approach to reducing waste and promoting sustainability (1,2). Wars have posed major challenges to infrastructure, causing widespread destruction and accumulation of debris, necessitating the pursuit of innovative and sustainable solutions for managing it (3).

In light of the environmental and economic challenges facing the world today, it has become imperative to seek innovative and sustainable solutions in all areas of life. Among these sectors, the construction sector occupies a prominent position due to its high consumption of natural resources and significant environmental impact. In this context, recycling construction waste and rubble resulting from demolition and armed conflicts is one of the leading solutions that contribute to achieving environmental and economic sustainability. Recurring crises and wars in regions such as Kosovo, Serbia, Gaza, Libya, Iraq, and Syria, are among the greatest challenges facing infrastructure and construction projects (4). These conflicts have caused widespread destruction of infrastructure, resulting in the accumulation of massive amounts of rubble. Hence, the need to find effective solutions to manage this rubble and utilize it in innovative and sustainable ways. Demolition debris management is a complex problem that requires integrated solutions that include collection, transportation, treatment, and disposal (5). With the increasing volume of rubble resulting from conflicts and destruction, it has become imperative to find new ways to utilize this material in a way that achieves environmental and economic benefits. Among these solutions, the idea of recycling concrete from demolished buildings and reusing it in construction processes has emerged.

In light of the environmental and economic challenges facing developing countries and the world today, it has become imperative to seek innovative and sustainable solutions in all areas of life. Among these sectors, the construction sector occupies a prominent position due to its high consumption of natural resources and significant environmental impact. In this context, recycling construction waste and rubble resulting from demolition and armed conflicts is one of the leading solutions that contribute to achieving environmental and economic sustainability (6,7).

Recurring crises and wars in regions are among the greatest challenges facing infrastructure and construction projects. These conflicts have caused widespread destruction of infrastructure, resulting in the accumulation of massive amounts of rubble. Finding effective solutions to manage this rubble and utilize it in innovative and sustainable ways.

Demolition debris management is a complex problem that requires integrated solutions that include collection, transportation, treatment, and disposal. With the increasing volume of rubble resulting from conflicts and destruction (8,9), it has become imperative to find new ways to utilize this material in a way that achieves environmental and economic benefits. Among these solutions, the idea of recycling concrete from demolished buildings and reusing it in construction processes has emerged (10,11).

Due to the current environmental and economic challenges, finding sustainable solutions like recycling demolition and construction debris to reduce waste and reuse available resources is important, as it can contribute to reducing environmental impact and achieving sustainability in the construction industry. This experimental test aims to investigate the effect of using RCA on concrete properties and the compressive strength of the specimen (12–16).

The methodology of this research seeks to achieve the following:

1. Evaluating the effectiveness of RCA: Primarily is to evaluate the effectiveness of using recycled aggregate RCA as a substitute for natural aggregate NCA in concrete production. This will be done by comparing the properties of compressive strength of concrete using RCA with those constructed by NCA

2. Analyzing the impact of RCA ratios: By analyzing the effect of different ratios of NCA with RCA (0-50-75-100%) on concrete properties, compression tests conducted on samples to assess the impact of the different ratios on concrete strength.

3. Finding the optimal ratio of RCA: Using the results of experimental and statistical analysis, we will determine the optimal replacement ratio that achieves a balance between environmental and economic benefits and improved concrete properties.

Promoting sustainability by providing innovative solutions that contribute to enhancing sustainability in the construction sector. Throughout using RCA, waste reduction and local resource conservation, thus contributing to environmental and economic sustainability aims.

2. Materials and Methods:

2.1 Review of Literature:

The Higher Institute of Engineering in Lisbon, Portugal, published an article titled "Evaluation of the Durability of Concrete Mixtures Made from Recycled Aggregates (17). The researchers obtained the aggregate by crushing samples of original concrete prepared in the laboratory specifically for this purpose. Capillary and immersion absorption tests were conducted on two concrete mixes. The first was a concrete mix that did not contain recycled aggregate (RCA), and the second was a concrete mix in which the concrete was replaced 100% with recycled aggregate (R100C). They reached the following results: The R100C concrete mix produced a immersion water absorption rate approximately 46% higher. They concluded a correlation between the immersion absorption rate and the replacement rate of natural concrete with recycled aggregate in the concrete mix. The reason for the increase in the percentage of water absorption by immersion in the concrete mixture containing aggregate is due to its structure with greater porosity, which generally leads to an increase in open pores in the concrete mixture. In the water absorption test, the results were presented in graphic curves shown in Fig. 1.

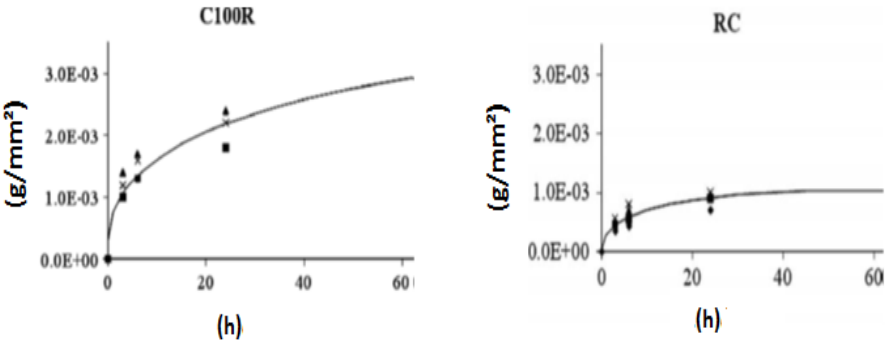


Fig. 1 Water absorption rate

The results showed that R100C mix had an increased absorption rate of 70.3%, this rate was closely related to the amount and percentage of recycled concrete in the mix, which made the mix more porous. R100C mix had a more porous structure and a higher absorption rate, which depended on the amount of aggregates present in the mix. They suggested adding cementations additives instead of ordinary Portland cement, such as silica (carbon dioxide fumes), fly ash, and blast furnace slag, to improve the absorption performance of the resulting mix.

Researchers in The Delhi Technological College, India conducted experiments on the possibility of using RCA extracted from construction and demolition operations to produce concrete (18).

Size classification: All sizes of aggregates, whether good or poor quality, are accepted. They are prepared through primary and secondary crushing to purify and remove impurities, resulting in aggregates with a diameter of 50 mm. These aggregates are then subjected to a second series of crushers to reach diameters ranging from 14 to 20 mm.

Water absorption: The water absorption rate in the recycled mix ranged from 3-12% of the mix. This value was observed to be higher than that of the natural mix, which ranges from 0.5-1%. This is due to the high porosity resulting from sediment adhering to the recycled concrete. Compressive Strength: A decrease in compressive

strength, depending on variables such as the type of aggregate used (low or high), the percentage of replacement of natural concrete with recycled concrete in the mix, and the water-to-cement ratio (W/C). In one study, it was found that a high W/C ratio (ranging from 0.75–0.6) in the mix resulted in greater compressive strength and did not differ from the strength of the natural mix, even when the percentage of concrete replacement with aggregate reached approximately 75%. Another study found that the compressive strength of the recycled mix was the same as the natural mix when a W/C ratio higher than 0.55% was used in the mix. However, with a W/C ratio lower than 0.40, the compressive strength value reached up to 75% compared to the value of the natural mix.

Frost and Thaw Resistance: Studies have found that suspended sediments in recycled aggregate do not negatively affect frost and thaw resistance, provided that high-quality recycled aggregates are used.

The Department of Transportation, Washington, D.C., published a special report titled "Using Recycled Aggregates in the Production of Hydraulic Cement Mortar for Use in Pavements." The report examined research on concrete mixes using recycled aggregate and reached the following conclusions (19):

Compressive Strength: The compressive strength of mixes using recycled aggregate was slightly lower than mixes containing natural aggregate, but was generally acceptable. Studies have shown this reduction to be approximately 20% below natural compressive strength, while other studies have shown different results depending on the water-to-cement ratio (W/C) of the mix. Higher air content in the mix also results in lower compressive strength values.

Flexural Strength: The report indicated that the use of recycled coarse aggregate reduces flexural strength by approximately 8% for the same W/C ratio in the mix. The report confirmed that the quality of the aggregate used significantly affects flexural strength and modulus of elasticity.

Modulus of Elasticity: The report found that the modulus of elasticity of mixes containing recycled aggregate was approximately 20-40% lower than that of conventional mixes with the same W/C ratio. This

decrease is attributed to the fact that recycled aggregate has a lower modulus of elasticity compared to natural aggregate.

2.2 Research Methodology:

The experimental tests' scope about the impact of RCA on concrete's compressive strength involves many serial stages.

- Selection of RCA and NCA and construction materials. Conducting the lab tests for all materials to verifying it's applied to the required condition and link to sustainability requirements (20).
- Design of concrete specimens containing of RCA and NCA, cylinder samples of (30, 15) cm and Cubes of (10, 10, 10) cm.
- Conduct the compression test on the concrete specimens.
- Analysis of the lab results of specified compression strength.

2.2.1 Selection of RCA and NCA and construction materials:

2.2.1.1 Natural concrete aggregate NCA: is a construction material and a key component used in ordinary concrete mixes. This aggregate is obtained from the crushing of natural rocks, such as granite and basalt Fig. 2. In this research, high quality, graded, crushed, and sharp-edged pebbles with a surface of medium roughness were adopted, taken from the quarries of Hasya area in the rural Homs, conformity to the Syrian Standard Specifications No. (332). year 2007. The maximum size of coarse aggregates 25 mm was used.

Fig. 2 Coarse Aggregate used NCA and RCA

The size range is normally from a few millimeters to several centimeters. Aggregates must be uniform in size and shape and characterized by high strength. NCA must be free of impurities and organic matter that could affect the concrete's properties. The origin of the NCA source is local industry quarries.

2.2.1.2 Recycled concrete aggregate RCA: is produced through recycling demolition and construction debris. This debris is being used as aggregate in concrete mixes.

Use of RCA promotes environmental sustainability by reducing construction waste and reusing local resources. RCA must pass the crushing, cleaning, and screening to have a uniform size and shape and be graded before being used in concrete mixes. Apply the lab test and sieve analysis has been conducted. The maximum size of coarse aggregates 25 mm was used Fig. 3, to ensure the quality of RCA and free impurities and save the concrete performance.

Fig. 3 Lab Test and Sieve Analysis

2.2.1.3 Fine aggregate and Cement: Two type of Local fine aggregate crushed and Natural sand were used. The Ordinary Portland cement (OPC) has been used, corresponding to standard specification-1 No. 3800 in 2015, grade 400 Kg/m3. Free of lumps and moisture. OPC reacts with water to form a strong solid that binds aggregate particles together, contributing to the high strength of concrete.

2.2.1.4 Plasticizer: Type of high-quality chemical plasticizers were used, three proportions (0.5, 1.0, and 1.5) % of cement weight to achieve the required functionality in RCA mixes.

2.2.1.5 Water: must be clean and free of harmful chemicals and impurities. Concrete mixes responded at the ratio W/C = 0.5.

2.2.2 Design of concrete specimens:

Designing concrete mixes throughout using different replacement ratios of NCA and RCA, two steps of preparation:

1. Construction Material Preparation: Prepare and test NCA and RCA, fine aggregate, cement, and water according to the specified mix ratios Fig. 4 . Hand mixing was used thoroughly to ensure a homogeneous mixture. Table 1 shows the proportions of used NCA materials.

Fig. 4 Prepare of NCA and RCA mixes

Table 1 NCA mixes properties

Material	Coarse Aggregate	Fine Aggregate 1	Fine Aggregate 2	Sand
% 0f m3	0.37	0.21	0.27	0.15
Volume of m3	259.37	147.21	189.27	105.15

Specific Weight	2.784	2.811	2.756	2.568
Weight of m3	722.09	413.81	521.63	270.03

Different replacement ratios of RCA were used: 0%, 50%, 75%, and 100%. Table 2 shows the proportions of used RCA materials.

Table 2 RCA mixes properties

Material	Coarse Aggregate	Fine Aggregate 1	Fine Aggregate 2	Sand
% 0f m3	0.28	0.16	0.16	0.21
Volume of m3	196.28	112.16	112.16	147.21
Specific Weight	2.7	2.7	2.7	2.653
Weight of m3	529.96	302.83	302.83	390.55

1. Casting of Concrete Specimens: Casting cylindrical (30, 15) cm and cubic (10, 10, 10) cm samples under laboratory conditions at temperatures up to 25°C Fig. 5. The treated samples are left to cure for 24 hours, and then samples are removed from the molds. Finally, samples are placed in potable water for 28 days.

Fig. 5 Casting Cylindrical and Cubic Samples

2.2.3 Conduct the compression test:

Conducting an axial compression strength test after 28 days of casting Fig. 6. The hydraulic oil machine and the load velocity V=1 kN/s have been used. Recording the maximum capacity of specimens' compression strength and (σ-ε) behavior.

Fig. 6 Compression Strength Test on Concrete Cylindrical

3. Results:

The experimental results of compression strength tests indicate the concrete specimens' capacity, which were designed with different replacement ratios of NCA and RCA (0, 50, 75, and 100%). Descriptive statistics and graphical models were used to illustrate the results. Results in Table 3 below:

The results of laboratory tests of cylindrical and cubic specimens produced of RCA and NCA under axial compression show the contribution of plasticizer on the workability, thus improving the RCA concrete mixes in terms of stress-strain behavior.

By fracture testing of specimens of RCA, the compressive strength of concrete is related to the shape, and the percentage of RCA in the mix composition with the type of plasticizer, where the compressive

strength increases with a low percentage of RCA compared to the reference sample without RCA.

The plasticizer in the concrete mixes contributed to an increase in workability and a decrease in W/C ratio, but the percentage increase in strength was due to the type and percentage of RCA. The decrease in compressive strength was observed due to the use of a higher percentage of RCA and W/C as well. This can be explained by the change in the molecular structure of RCA mixtures when the W/C ratio is stable, so it is better to use a lower ratio of RCA and a lower plasticizer percentage and stability by a ratio of W/C.

Table 3 Experimental Results of Lab Tests

% RCA	Specimens Age (days)	Specimens Shape	W/C	% of plasticizer/ Cement	Shape Factor	Compression Strength (MPa)	Average Compression Strength (MPa)	Slump Test cm
%0	28	Cylindrical	0.5	0.5	1	27.30	24.26	11.00
		Cylindrical			1	26.45		
		Cubic(15 cm)			0.8	19.02		
50 %	28	Cylindrical	0.5	0.5	1	21.33	23.26	9.50
		Cylindrical			1	27.30		
		Cubic(10 cm)			0.78	21.16		
75 %	28	Cylindrical	0.5	1.0	1	17.06	17.32	8.50
		Cubic(10 cm)			0.78	18.81		
		Cubic			0.8	16.07		
100 %	28	Cylindrical	0.5	1.5	1	11.52	17.21	7.00
		Cylindrical			1	17.06		
		Cubic(15 cm)			0.8	23.04		

The results clearly demonstrate a progressive decline in compressive strength as the percentage of RCA increases. While the 50% RCA mix showed only a marginal reduction of 3.96% compared to the

control mix, the 75% and 100% mixes exhibited significant drops of 28.6% and 29.06%, respectively. This trend aligns with the hypothesis that higher RCA content introduces more porosity and weaker interfacial transition zones (ITZ) due to residual mortar and microcracks in recycled particles.

Moreover, the slump test results indicate a consistent decrease in workability with increasing RCA content. The slump value dropped from 11 cm in the control mix to 7 cm in the 100% RCA mix, reflecting the higher water absorption capacity of RCA. This behavior necessitates the use of plasticizers or water-reducing agents to maintain workability in high-RCA mixes.

The stress-strain behavior also revealed that RCA mixes exhibit a more brittle failure mode, especially at 75% and 100% replacement levels. The peak strain values were lower, and the descending branch of the curve was steeper, indicating reduced ductility. These findings suggest that while RCA can be used up to 50% without major compromise in strength or ductility, higher replacement ratios may require structural compensation or mix design optimization.

Additionally, the variation between cylindrical and cubic specimens was consistent across all mixes, with cylindrical samples showing higher compressive strength. This confirms the influence of specimen geometry on test results and supports the use of standardized cylindrical molds for comparative analysis.

4. Discussion:

The average of the experimental results of compressive strength for samples with 0% of RCA is 24.26 MPa and slump test is 11 cm in fresh status. This value used as a reference for other samples that contain different ratios of RCA.

The average strength of samples with 50% of RCA is 23.27 MPa and slump test is 9.5 cm. A slight decrease in compressive strength by 3.96%, compared to the reference compressive strength. This indicates that using 50% RCA doesn't have a significant negative impact on performance and can be acceptable in some applications.

Decrease in slump test about 13.63% this indicate the additional sloping in workability of sample.

Samples with 75% and 100% of RCA showed an average strength of 17.32 MPa and 17.21 MPa. Noticeable decrease 28.6% and 29.06% respectively compared to the reference sample. A significant fall in compressive strength was observed compared to the reference sample (0%) and to the samples of 50% RCA. This indicates using of 75% and 100% of RCA may have a negative impact on concrete mixes properties.

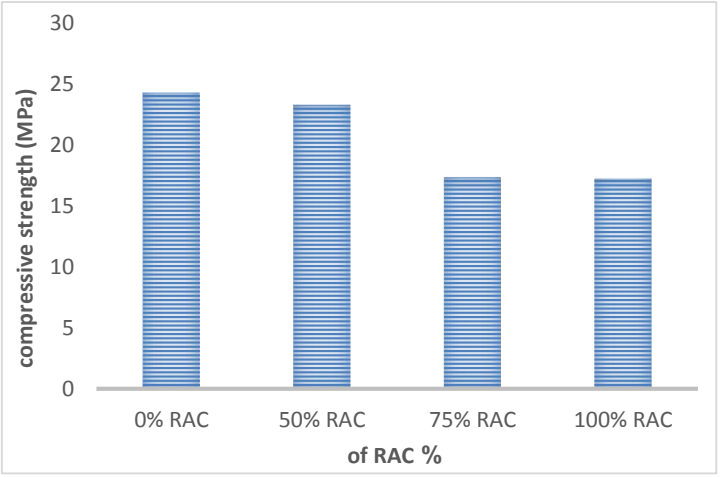


Fig. 7 Descriptive Statistics of Compressive Strength

Results indicate that increasing the RCA percentage caused lower compressive strength of concrete that was clarity in (σ-ε) behavior. That is attributed to the physically changed properties of RCA compared to NCA. So, it is preferable to use an RCA ratio of not more than 50% in the construction applications' high compressive strength requirement.

The shape of the tested specimen had a significant impact on the compressive strength. The cubic specimens have lower strength than the cylindrical specimens. Another perspective: the concrete performance could be affected by the quality of RCA that is related to the treatment methods, as high quality reduces the negative effects on compressive strength.

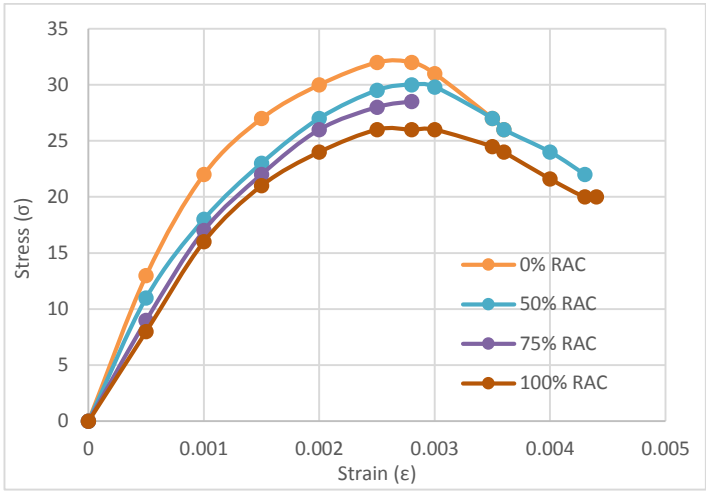


Fig. 8 Stress- Strain (σ-ε) behaviour of Sample

The behavior (σ,ε) of experimental samples is very close to the EURO-CEB standard, and comparing the experimental results of the (σ,ε) with the references curves (21), it was as possible to the EURO-CEB curve. The European Code EN 1992-1-1 presented a mathematical formula. Equation /1/ describing the stress-strain behavior of concrete as a function of the relative strain $\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}$, and related to the elasticity factor of the material. According to the following:

$$\frac{f_c}{f'_c} = \left[\frac{k\eta - \eta^2}{1+(k-2)\eta}\right] \quad (7)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}$$

$$k = 1.05.E_c\frac{\varepsilon_{co}}{f'_c}$$

The behavior of experimental samples with a convergence of up to 95%. It can also verify the conformity of the behaviour experimental samples with the references graphically. Fig. 9 Below are the stress-strain curves of the proposed formula and the experimental sample.

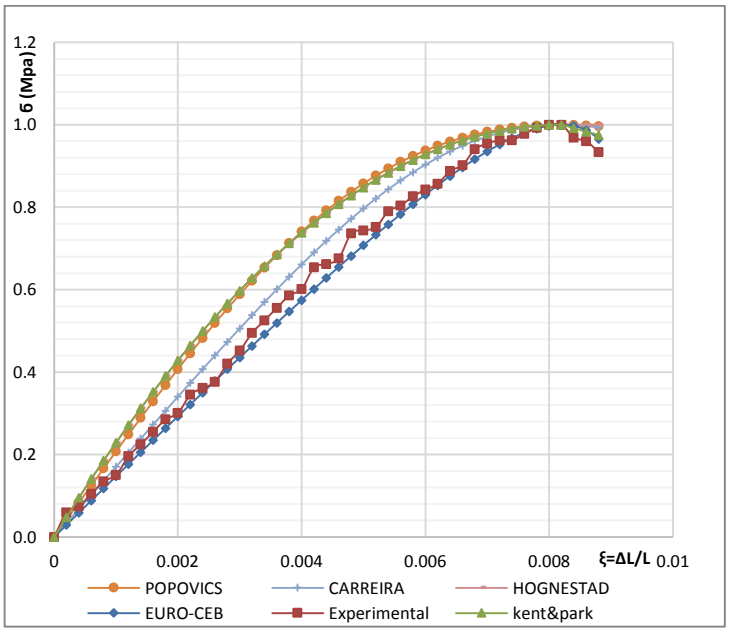


Fig. 9 Stress-Strain Curves of Experimental Samples and References

These findings are consistent with several recent studies. For instance, Khan et al. (2021) reported a similar decline in compressive strength with increasing RCA content, noting a 25–30% reduction at full replacement[22] . Likewise, Ridho et al. (2021) used artificial neural networks to predict compressive strength and confirmed that mixes with over 50% RCA showed significant strength loss due to increased porosity and weaker bonding[23] .

In another study, Shamsoon et al. (2021) observed that RCA mixes exhibited lower modulus of elasticity and flexural strength, aligning with the current study's stress-strain behavior findings[24]. Furthermore, a 2022 study by Zhang et al. demonstrated that the use of supplementary cementitious materials like fly ash can partially mitigate the strength loss in high-RCA mixes, a strategy worth exploring in future work.

These comparisons reinforce the conclusion that RCA can be safely used up to 50% replacement in structural concrete, while higher ratios require careful mix design and performance evaluation.

5. Conclusions and recommendations:

This study analysed the effect of RCA percentage on the compressive strength in the concrete mixes. The recycled aggregate can be used in moderate proportions without significant negative impact on concrete performance. By improving recycling techniques, including the crushing and sorting process of RCA, to ensure particle homogeneity and remove impurities of RCA. Thus, quality control and technical details could be secured to ensure optimal performance. The use of RCA in construction applications can be enhanced to achieve environmental and economic sustainability.

Based on experimental results, it is recommended to use RCA with a percentage not more than 50% in applications with high compressive strength requirements.

The behavior (σ,ε) of experimental samples is very close to the EURO-CEB standard with a convergence of up to 95%.

Acknowledgments: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

References:

1. Najmadeen S, Esmail B, Soran R, Mustafa G. Engineering properties of pervious concretes produced with recycled aggregate at different aggregate-to-cement ratio. Advances in concrete construction. 2024 Jul 1;17:13–26.

2. Subhash C. Y, Dumpati C. T, Mohammed S. Performance studies on concrete with recycled coarse aggregates. Advances in Concrete Construction. 2016 Apr 4;4(4):263–81.

3. Tawashi A, Alamoudi S, Aljundi A. Numerical simulation on the square column's strengthening characteristics utilizing the SCC jacketing. Structural Monitoring and Maintenance [Internet]. 2023 Dec 31 [cited 2024 May 11];10(4):283–97. Available from: http://www.techno-press.org/content/?page=article&journal=smm&volume=10&num=4&ordernum=1

4. Tawashi A, Alamoudi S, Salem A. Field and Experimental Study for the Repair of Ribbed Slabs Partially Damaged by Containing Gaps. Journal of Hama University [Internet]. 2019 Dec 29 [cited 2024 May 11];2(6):33–52. Available from: https://hama-univ.edu.sy/ojs/index.php/huj/article/view/221

5. Shatarat NK, Katkhuda HN, Hyari KH, Asi I. Effect of using recycled coarse aggregate and recycled asphalt pavement on the properties of pervious concrete. Structural Engineering and Mechanics. 2018 Aug 10;67(3):283–90.

6. Tawashi A, Alamoudi S, Akkash M. Environmental risks and the impact of rehabilitation on the sustainability of affected buildings in urban communities. Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies [Internet]. 2025;10(1):22–38. Available from: https://doi.org/10.47481/jscmt.1667452

7. Verma SK, Ashish DK. Mechanical behavior of concrete comprising successively recycled concrete aggregates. Advances in Concrete Construction. 2017 May 4;5(4):303–11.

8. Li X. Recycling and reuse of waste concrete in China: Part II. Structural behaviour of recycled aggregate concrete and engineering applications. Resources, Conservation and Recycling. 2009 Jan 31;53:107–112.

9. Park S. Recycled concrete construction rubble as aggregate for new concrete. Vol. 86. Building Research Association of New Zealand: Porirua [N.Z.] : BRANZ, c1999; 1999. 1–20 p.

10. Corinaldesi V. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. Construction and Building Materials [Internet]. 2010;24(9):1616–20. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810000747

11. Tsoumani A, Barkoula NM, Matikas T. Recycled aggregate as structural material. Waste and Biomass Valorization. 2015 Jun 4;6.

12. Fathifazl G, Razaqpur G, Isgor O, Abbas A, Fournier B, Foo S. Flexural Performance of Steel-Reinforced Recycled Concrete Beams. ACI Structural Journal. 2009 Nov 1;106.

13. Han BC, Yun HD, Chung SY. Shear capacity of reinforced concrete beams made with recycled aggregate. ACI Special Publications. 2001 Jan 1;200:503–16.

14. Hassanean YA, Rashwan MM, Assaf KA, el Samee K. IMPROVEMENT OF CONCRETE PROPERTIES MADE FROM RECYCLEDCONCRETE AGGREGATE USING NON-TRADITIONAL ADMIXTURE. JES Journal of Engineering Sciences [Internet]. 2014;42(No 2):303–16. Available from: https://jesaun.journals.ekb.eg/article_114715.html

15. Maruyama I, Sogo M, Sogabe T, Sato R, Kawai K. Flexural properties of reinforced recycled concrete beams. Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures. 2004 Jan 1;

16. Sato R, Maruyama I, Sogabe T, Sogo M. Flexural Behavior of Reinforced Recycled Concrete Beams. Journal of Advanced Concrete Technology. 2007 Mar 1;5:43–61.

17. Evangelista L, de Brito J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites [Internet]. 2010;32(1):9–14. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946509001474

18. Khergamwala PC, Singh J, Kumar R. Experimental study on shear behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams. 2016 Jan 1;7:128–39.

19. Arezoumandi M, Smith A, Volz JS, Khayat KH. An experimental study on shear strength of reinforced concrete beams with 100% recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials [Internet]. 2014;53:612–20. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813

011756

20. Tawashi A, Alamoudi S. The Mechanical Behavior of Self-Compacting Concrete SCC Samples Locally Produce. Journal of Engineering Sciences and Information Technology. 2022;6(2):148–69.

21. Tawashi A, Almoudi S. Mathematical Modeling of the Self-Compacting Concrete Samples Behavior Produced from the Syrian Raw Materials. Syrian Journal for Science and Innovation [Internet]. 2023 Jul;1(1). Available from: https://doi.org/10.5281/zenodo.8121227

22. Khan, A., Masood, S., & Fareed, S. (2021). Dynamic Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete. International Journal of Materials, 8(7), 56–61.

23. Ridho, M. A. R., Ngamkhanong, C., Wu, Y., & Kaewunruen, S. (2021). Recycled Aggregates Concrete Compressive Strength Prediction Using Artificial Neural Networks (ANNs). Infrastructures, 6(2), 17.

24. Shamsoon, F., Khan, A., & Masood, S. (2021). Dynamic Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete. ScienceGate.

25. Shang, M., Li, H., Ahmad, A., et al. (2022). Predicting the Mechanical Properties of RCA-Based Concrete Using Supervised Machine Learning Algorithms. Materials, 15(2), 647.

26. Motlagh, M. H. (2022). Mechanical Properties of Concrete with 100 Percent Coarse Recycled Concrete Aggregate (RCA). Rowan University Thesis.

27. Vaidya, O. V., Malviya, K., & Bhirud, Y. L. (2022). The Strength Characteristics of Concrete Using Recycled Concrete Aggregates. Research on Engineering Structures and Materials, 8(4), 853–860.

28. Folorunso, O. (2023). Optimization of Recycled Aggregate Replacement Rates for Sustainable Concrete: A Comprehensive Review. World Journal of Advanced Research and Reviews, 20(3), 2277–2284.

29. Alibeigibeni, A., Stochino, F., Zucca, M., & Gayarre, F. L. (2023). Enhancing Concrete Sustainability: A Critical Review of the Performance of Recycled Concrete Aggregates (RCAs) in Structural Concrete. Buildings, 15(8), 1361.

30. Mardani, A., Bui, N. K., & Noguchi, T. (2024). Hybrid Environmentally Friendly Method for RCA Concrete Quality Improvement. International Journal of Concrete Structures and Materials, 18, Article 29.

31. Padmakar, T., Badgujar, R., Chaudhari, P., et al. (2024). Comprehensive Analysis of Recycled Coarse Aggregate in Concrete. IJCRT, 12(5).

32. Qasim, O. A., Hilal, N., Al Biajawi, M. I., et al. (2024). Studying the Usability of Recycled Aggregate to Produce New Concrete. Journal of Engineering and Applied Science, 71, Article 129.

33. Shukla, B. K., Yadav, H., Singh, S., et al. (2025). Sustainable Engineering of Recycled Aggregate Concrete: Structural Performance and Environmental Benefits. Construction Materials, 5(3), Article 67.

34. Hapendi, N. H., Ali, D. S. H. (2025). Exploring the Potential of Recycled Aggregates in Modern Construction. IJAERS, 12(4).

35. SpringerLink Editors. (2025). Recycled Aggregate Concrete. Dictionary of Concrete Technology.

36. Zhang, Y., Li, X., & Wang, J. (2022). Effect of Fly Ash on the Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete. Construction and Building Materials, 314, 125678.

Abbreviations:
NCA: Natural Concrete Aggregate
RCA: Recycled Concrete Aggregate
σ-ε: Stress - Strain

Funding:

If there is no fund allocated to the research just use the statement: **No Fund**

Author contributions:

[1*a, 1b] Made the methodology and substantial contribution to the design of the article. The acquisition, analysis, interpretation, and investigation of data. Managed and funded the work. Originally drafted the article, revised it, and edited it critically for important intellectual content.

[1c,1d] Conceived and designed the analysis. Support in the contributed data and analysis tools. Approved the version to be published, Contribution to the design of the article. Support in the contributed data and tools.

Competing interests:

Authors declare that they have no competing interests.

Data and materials availability:

All data are available in the main text or the supplementary materials.