مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الهندسية والمعمارية

مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 48 . العدد 1

1447 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 بالنسبة لكليات (الآداب – الاقتصاد– 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 للنشر في المجلة يدل ضمناً على عدم نشره 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
تطور التعبير عن الهوية والوظيفة الثقافية في دور الأوبرا العربية	م. رشا علي صالح	56-11
دراسة في الطرق التخطيطية لتصميم الأقواس والركائز الحجرية	د.م. تراث غريب	88-57
تأثير الانحدار الطبوغرافي على الدقة الرأسية لنموذج FABDEM في البيئات الجبلية الساحلية: دراسة حالة في سورية	د.م. فادي عز الدين شعبان	102-89
دراسة تأثير درجات الحرارة على كفاءة إزالة COD, N, P في المعالجة البيولوجية	م. هناء جرجس	122-103

تطور التعبير عن الهوية والوظيفة الثقافية في دور الأوبرا العربية

م. رشا علي صالح، عضو الهيئة الفنية لدى الجامعة العربية الخاصة للعلوم والتكنولوجيا

الملخص:

تتناول هذه الدراسة تحولات الخطاب المعماري والثقافي في دور الأوبرا العربية بوصفها رموزاً ثقافية وحضارية من خلال منهج سيميولوجي تحليلي. وتسعى إلى الكشف عن الآليات المتطورة التي استخدمتها العمارة العربية للتعبير عن الذات، وكيف انتقل هذا التعبير من مرحلة إلى أخرى، عاكساً بذلك تطوراً في الرؤى والطموحات على امتداد العالم العربي. وتظهر الدراسة من خلال تحليل معمّق لنماذج دور الأوبرا، تحولات لغة التصميم وتطورها، من مرحلة الاقتباس من العمارة العالمية إلى استلهام التراث بشكل مباشر ومحاكاته، إلى مراحل أكثر تعقيداً ونضجاً تحاول فيها المزاوجة بين الحداثة العالمية والهوية المحلية بطريقة إبداعية، وصولاً إلى توجهات جديدة تسعى لخلق عالمية ذات مرجعية خليجية معاصرة ومميزة. هذا التطور لا يعكس فقط تغيراً في الذائقة الجمالية أو التقنيات المعمارية، بل يعكس في جوهره تحولاً عميقاً في فهم الهوية وكيفية التعبير عنها في مواجهة تحديات العولمة والبحث عن مكانة تحت الشمس.

كلمات مفتاحية: دور الأوبرا– الهوية المعمارية– الوظيفة الثقافية– الرمزية المعمارية– التحليل السيميولوجي.

The Evolution of Identity Expression and Cultural Function in Arab Opera Houses

Abstract:

This study examines the transformations in the architectural and cultural discourse of Arab opera houses as cultural and civilizational symbols through an analytical semiological approach. It seeks to uncover the evolving mechanisms employed by Arab architecture to express identity, tracing how this expression has transitioned across different phases, reflecting evolving visions and aspirations throughout the Arab world. Through an in-depth analysis of selected opera house models, the study reveals shifts in design language and its development—from stages characterized by direct heritage inspiration and imitation, to more complex and mature phases that creatively synthesize global modernity with local identity, culminating in new directions aimed at establishing a globalism with a contemporary Gulf frame of reference. This evolution reflects not only changes in aesthetic taste or architectural techniques but, fundamentally, a profound transformation in the understanding of identity and its expression in the face of globalization challenges and the quest for a distinct place on the world stage.

Keywords: Opera Houses; Architectural Identity; Cultural Function; Architectural Symbolism; Semiological Analysis.

المقدمة:

تأخذ دور الأوبرا في العالم العربي مكانةً تفوق بكثير كونها مجرد مسارح للفنون، فهي تتجاوز وظيفتها التقليدية كفضاءات للعروض الموسيقية والغنائية، لتتحول إلى نصوص بصرية معمّقة تجسد روايات الأمم عن هوياتها وتطلعاتها الحضارية في حقبة تاريخية مفصلية. لا تمثل هذه الصروح الفنية مجرد إنجازات معمارية أو ثقافية منعزلة، بل هي انعكاسات حية للتحولات الاجتماعية والسياسية والاقتصادية التي تشهدها المجتمعات العربية، وسعيها الدؤوب لترسيخ مكانتها على الخريطة الثقافية العالمية. ففي كل حجر من حجارتها، وفي كل تفصيلة من تفاصيل تصميمها، تتجلى فلسفة جيل أو رؤية دولة، مما يجعلها مواداً خصبة للدراسة والتحليل.

أهمية البحث: تستمد هذه الدراسة أهميتها من الدور المحوري الذي تلعبه دور الأوبرا كمنصات للحوار الثقافي والتعريف بالهويات المحلية في السياق العربي، فشكل وتكوين هذه المراكز هي أول ما يواجه المتلقي، وهي ما يشكل انطباعه الأولي ويدعوه للدخول في حوار مع المبنى ومحتواه الثقافي، وبالتالي فإن فهم لغة التصميم للمبنى يعدّ أمراً بالغ الأهمية لفهم كيفية تمثيل الثقافات لنفسها في المشهد العربي المعاصر.

وعليه فإن ذلك بتم من خلال الإجابة على التساؤل المحوري: كيف تطور هذا الخطاب المعماري في دور الأوبرا العربية عبر الزمن؟ وكيف انتقلت آليات التعبير عن الهوية والوظيفة الثقافية من نموذج إلى آخر؟

هدف البحث: يهدف البحث إلى دراسة تطور لغة التعبير المعمارية في دور الأوبرا العربية، للتوصل إلى تحديد تحولات مفهوم الهوية والوظيفة الثقافية فيها، والتي تساعد في إبراز مكانتها كرموز ثقافية في المجتمعات العربية المعاصرة.

منهجية البحث: يتبع البحث المنهجيات البحثية التالية:

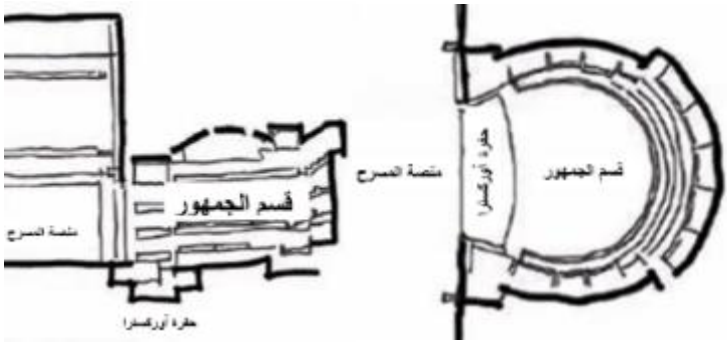
- منهج نظري: من خلال تعريف ورصد المبادئ الأساسية للبحث (دور الأوبرا ودورها الثقافي، والهوية والرمزية في العمارة، والمفهوم السيميولوجي في العمارة).
- منهج وصفي تحليلي مقارن: من خلال تحليل عدد من دور الأوبرا العربية لاستكشاف أساليب التعبير عن الهوية الثقافية وتغيراتها.

أولاً: دور الأوبرا كمشروع ثقافي:

1. **تعريف دار الأوبرا:** دار الأوبرا، كما تعرفها الأدبيات المعمارية، ليست مجرد مبنى، بل هي "منشأة متخصصة" لتقديم العروض الأوبرالية، تتكون هيكلياً من نظام أدائي متكامل ودقيق. هذا النظام يضم عناصر أساسية تشكل في مجموعها ما يمكن وصفه بـ "الآلة الأدائية المعقدة" (Complex Performance Machine)، وهي فكرة بالغة الأهمية تطرحها المراجع المعمارية المتخصصة [13]. تتضمن هذه الآلة المنصة (Stage) التي تمثل المحور البصري والفضائي للأداء، وحفرة الأوركسترا (Orchestra Pit) المصممة بدقة لاستيعاب العازفين تحت مستوى المنصة لتحقيق التوازن الصوتي المثالي، ومنطقة جلوس الجمهور (Auditorium) التي تصمم بعناية فائقة لمراعاة اعتبارات الصوتيات والرؤية لكل متفرج (شكل–1)، بالإضافة إلى مرافق الخلفية الضخمة وغير المرئية للجمهور والتي تدعم العملية الأدائية بكامل تعقيداتها، مثل مساحات صناعة الديكور وتخزين الأزياء وورش العمل الفنية. وتجدر الإشارة إلى أن بعض دور الأوبرا تُنشأ كمباني قائمة بذاتها بينما يُدمج البعض الآخر منها ضمن مجمعات أو مراكز فنية أدائية أوسع نطاقاً. [13]

2. **التطور التاريخي لتخطيط وتصميم دور الأوبرا:**

يصنف التطور التاريخي لتخطيط وتصميم دور الأوبرا عالمياً في ثلاث نماذج أساسية:



الشكل (1): قسم الجمهور في دار الأوبرا (المسقط على اليمين/المقطع على اليسار)

1.3. النموذج الإيطالي الباروكي: "هيمنة التصميم على شكل حدوة الفرس":

تُعتبر البدايات التصميمية لصالات الأوبرا امتداداً للمسارح التي نشأت في قصور البلاط الإيطالي. وقد تبلور في تلك الفترة نموذج "المسرح على شكل حدوة الفرس"، والذي ارتكز على توفير عدة

طبقات من الشرفات أو المقصورات (Lodges) المنفصلة. ويتجلى ذلك في مسرح "تياترو أولمبيكو" (شكل-2)، فلم يكن الهم التصميمي موجهاً بالأولوية نحو تحقيق تجربة بصرية-سمعية مثلى، بل كان يعكس في المقام الأول طبيعة الحدث الاجتماعي القائم على "الرؤية والظهور"، حيث يكون المجتمعون جزءاً من المشهد الاجتماعي ذاته. [13]

الشكل (2): مسرح تياترو أولمبيكو

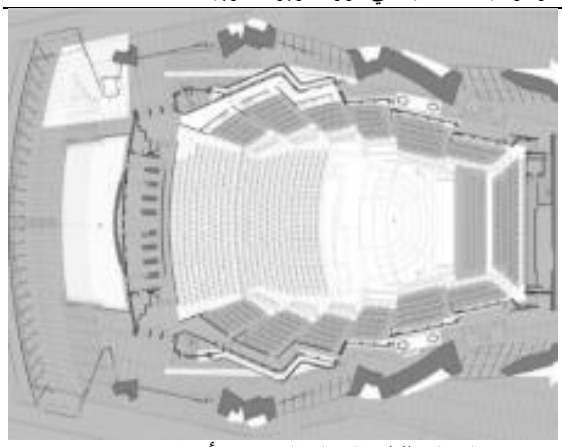
2.3. العصر الكلاسيكي والرومانسي: "صعود مركزية الصوتيات وتقسيم الجمهور":

مع تطور الأعمال الموسيقية وتضخم حجم الأوركسترا، برزت جودة الاستماع كمعيار تصميمي أساسي. وتُعد قبة دار أوبرا غارنييه (Opéra Garnier) في باريس (عام 1875) الذروة المعمارية التي تجسدت فيها إنجازات تلك الحقبة (شكل-3)، حيث جمعت بين:

- تجسيد واضح للتسلسل الهرمي الاجتماعي من خلال توزيع مقاعد المشاهدين.
- تخطيط circulator معقد يهدف إلى الفصل بين شرائح الجمهور المختلفة.
- إضفاء أهمية معمارية مساوية للقاعة الرئيسية على مساحات الاستقبال والاحتفال (الفوييه)، التي صُممت بفخامة عالية لتكون مجالات للتفاعل الاجتماعي. [22]

الشكل (3): قبة أوبرا غارنييه.

3.3. الحقبة الحديثة وما بعدها: "نحو الديمقراطية والمرونة الوظيفية":



الشكل (4): الشكل المروحي أوبرا سيدني.

شهد القرن العشرون تحولاً جذرياً في التصميم، حيث حل نموذج "القاعة المروحية الشكل" (Fan-shaped Auditorium) محل النموذج التقليدي لحدوة الفرس، وذلك سعياً وراء توفير مدى رؤية أفضل وتحسين الأداء الصوتي لجميع المقاعد. كما أصبحت المرونة الوظيفية سمة محورية، تجلت في تصميم مجمعات ثقافية تضم عدة قاعات أدائية تحت سقف واحد، مثل دار أوبرا سيدني (1973). وامتد هذا التوجه ليشمل التكامل مع الهوية المحلية (شكل-4). [8]

3. دور الأوبرا في التشكيل الحضري والهوية:

تتجاوز دور الأوبرا وظيفتها الفنية لتصبح لاعباً رئيسياً في التشكيل الحضري وتعزيز الهوية. فغالباً ما تُصمم هذه الصروح لتصير "معالم حضرية" (Urban Landmarks) ورموزاً لمدينتها (شكل-5). وتعتبر "دار أوبرا سيدني" بتصميم يورن أوتزون هي المثال الأبرز على ذلك، حيث لم تكن مجرد مبنى، بل أصبحت الصورة الأيقونية للمدينة ولأستراليا كلها، وهو ما أكد عليه المعماري نفسه في كتاباته [33]. وفي العالم

الشكل (5): دور الأوبرا كمعالم حضارية.

العربي، تسعى دور أوبرا مثل "دار أوبرا السلطان قابوس" في مسقط لأن تكون معالم بصرية وحضارية تعبر عن هوية متجددة للدولة [3]. علاوة على ذلك، تُوضع دور الأوبرا في قلب مشاريع "إعادة التطوير الحضري" (Urban Regeneration)، فوجودها يرفع من القيمة العقارية للمناطق المحيطة بها ويجذب استثمارات ثقافية وتجارية جديدة. وتعتبر دار أوبرا دبي في منطقة أوبرا دبي مثال واضح على ذلك، حيث تمثل نواة لتطوير حي سكني وثقافي متكامل [24، 31]. والأهم من ذلك كله، أن تصميم دار الأوبرا يصبح "بياناً" عن الهوية الثقافية، حيث تبحث الأمم عن صيغ معمارية معاصرة تعبر عن تراثها وتطلعاتها. هذا الصراع بين المحلي والعالمي، وبين الأصالة والحداثة، هو ما يجعل العمارة الثقافية ساحة حيوية للتجريب والإبداع، خاصة في السياق العربي الذي يسعى لتأكيد هويته في وجه العولمة [3، 16، 4].

4. الاتجاهات المعاصرة في تصميم دور الأوبرا:

تشهد الاتجاهات المعاصرة في تصميم دور الأوبرا تحولات إضافية تعكس المتغيرات الاجتماعية والثقافية، مثل تفكيك النخبوية من خلال كسر الحواجز بين الأداء والجمهور، واعتماد التعددية الوظيفية لتحويلها إلى "مراكز فنون أدائية" متعددة الأغراض، ودمج معايير الاستدامة والتكامل التكنولوجي المتقدم [22]. وهكذا، تتحول دار الأوبرا من مجرد منشأة أدائية إلى نص ثقافي واجتماعي، يشكل علامة فارقة في نسيج المدينة الثقافي والبصري.

5. دخول دور الأوبرا في العالم العربي وتطورها:

لم تكن ولادة دور الأوبرا في العالم العربي حدثاً معمارياً معزولاً، بل كانت جزءاً لا يتجزأ من رحلات تحول سياسية واجتماعية وثقافية عميقة مرت بها المنطقة. ويمكن تتبع دخول وتطور هذه الصروح الفنية من خلال تتبع تاريخ إنشائها والسمات التي ميزت كلاً منها [20,29]، ويمكن ترتيب مراحل إنشائها ضمن ثلاث فترات زمنية شكلت نقاط تحول جوهرية في العالم العربي (شكل-6)، وهي:

- المرحلة الأولى: كانت خلال النصف الثاني من القرن التاسع عشر (من 1869 إلى أوائل القرن العشرين)، وهي فترة التحديث والانفتاح على أوروبا، حيث شكلت دار الأوبرا الخديوية المصرية انطلاقة دور الأوبرا في العالم العربي.
- المرحلة الثانية: جاءت بعد الاستقلال، في منتصف القرن العشرين (من 1950-2000)، عندما سعت الدول العربية الجديدة، التي خرجت تواً من ربقة الاستعمار، إلى تأسيس مؤسسات

ثقافية وطنية تعبر عن هويتها المستقلة ودورها الجديد كدول قومية. من أهم دور هذه المرحلة: مسرح أوبرا القاهرة (الدار الجديدة)، ودار الأوبرا السورية.

- المرحلة الثالثة: وهي "الطفرة المعاصرة والبحث عن الأيقونة"، والتي تمتد من بداية القرن الحادي العشرين حتى يومنا هذا، تتزامن هذه المرحلة مع الطفرة الاقتصادية والعمرانية الهائلة، خاصة في دول الخليج العربي. ومن أهم دور الأوبرا في هذه المرحلة: دار أوبرا السلطان قابوس– عُمان، وقاعة خليفة بن سلمان للأوبرا –البحرين، الأوبرا الوطنية بالجزائر– الجزائر، مسرح أوبرا تونس– تونس، أوبرا دبي– الإمارات. [20].

دار الأوبرا الخديوية

دار الأوبرا المصرية

دار أوبرا البحرين

الشكل (6): المراحل الثلاث لتطور دور الأوبرا العربية.

ثانيا: الهوية والرمزية في العمارة:

1. العلاقة بين العمارة والهوية الوطنية:

تتجلى أهمية العمارة في قدرتها على تجسيد الهوية الجماعية للأمم، فهي ليست مجرد مبانٍ تؤوي وظائفها، بل هي نصوص صامتة تتحدث بلغة الشكل والمادة والفراغ. تلعب العمارة، وخاصة المباني الثقافية الرمزية مثل دور الأوبرا، دوراً حيوياً في التعبير عن الهوية الثقافية وتجسيدها في صورة ملموسة. وتسعى الدول، خاصة حديثة التأسيس أو تلك التي تمر بمراحل تحول جوهري، إلى خلق "أسلوب قومي" في العمارة يعبر عن هويتها الجديدة. لكن هذه العملية ليست بسيطة أو

مباشرة، بل هي عملية معقدة تنطوي على اختيار واعٍ وإعادة صياغة للعناصر التراثية. حيث يشير المؤرخ إريك هوبسباوم في كتابه المؤثر "اختراع التقاليد" إلى أن العديد من التقاليد التي تبدو قديمة وعريقة هي في الحقيقة مبتكرة حديثاً، ولدت لدعم الهويات الوطنية والأيديولوجيات السياسية. وتنطبق هذه الفكرة بشكل دقيق على العمارة، حيث يتم استعارة عناصر من التراث المحلي وإعادة صياغتها بطرق حديثة لخلق رمزية وطنية جديدة ومتفردة [17]. لذلك، غالباً ما تعكس العمارة صراع الهويات بين المحلي والعالمي، وبين الأصالة والحداثة. ويصبح هذا الصراع أكثر حدة في المباني الثقافية في العواصم العربية، حيث يحاول المعماريون الموازنة بين الانتماء إلى عالمية التصميم (غالباً عبر استدعاء نجوم العمارة العالميين) والتعبير عن خصوصية المكان وهويته [34].

2. الهوية الثقافية والتعبير المعماري:

تمثل الهوية الثقافية مجموعة السمات والقيم والمعتقدات والتقاليد التي تميز مجتمعاً ما. حيث تلعب العمارة، وخاصة المباني الثقافية ودور الأوبرا، دوراً حيوياً في التعبير عن هذه الهوية وتجسيدها. فيمكن للمبنى أن يكون مرآة تعكس التراث المحلي، أو نافذة تطل على التطلعات المستقبلية، أو مزيجاً جدلياً بين الماضي والحاضر. يتطلب تحليله فهماً عميقاً للسياق الاجتماعي والتاريخي الذي نشأ فيه، وكيفية توظيف عناصره لترجمة مفاهيم مجردة كالانتماء والأصالة والمعاصرة وتجسيدها في لغة بصرية ملموسة. حيث تحث المقاربات مثل "الإقليمية النقدية" (Critical Regionalism) التي أطلقها فرامبتون (1983) على ابتكار صيغ تصميمية تستوعب تقنيات العصر دون أن تقع في شمولية العولمة، عبر الانتباه إلى الخصوصيات المحلية كالمناخ والطبوغرافيا والثقافة البصرية. ومن جهة أخرى، يواجه هذا المبدأ تحدياً عملياً في السياق العربي، حيث يسعى المعماريون للتعبير عن الهوية في مواجهة ضغوط العولمة، مما يفرض عليهم تجاوز النقل الحرفي للتراث نحو إعادة تفسيره بشكل معاصر وخلاق [3]. وبذلك، يصبح تصميم دار الأوبرا ساحة للتجريب وبياناً عن رؤية المجتمع لهويته وتطلعاته المستقبلية. [14]

3. الرمزية المعمارية كأداة سردية (الرموز المباشرة والرموز المجردة):

تتواصل العمارة مع الجمهور وتنقل قيماً ثقافية عميقة من خلال آليات الرمزية المعقدة، ويمكن تقسيم هذه الرموز إلى نوعين رئيسيين، يخلقان لغة بصرية متعددة المستويات:

- النوع الأول هو "الرموز المباشرة" أو "التمثيلية" (Denotative Symbols)، وهي التي تشير بشكل واضح ومباشر إلى مرجعية محددة ومتعارف عليها، مثل استخدام القباب في العمارة الإسلامية التي ترمز بشكل مباشر إلى التراث الإسلامي، أو الأعمدة الكلاسيكية التي ترمز لقيم الحضارة الغربية مثل العقلانية والديمقراطية. هذه الرموز سهلة القراءة وتواصل رسالة واضحة ومباشرة، مثل استخدام الإكليل في تسقيف دار أوبرا شنغهاي– الصين (Shanghai Grand Theatre) والذي يرتبط بشكل مباشر بالتراث الصيني (شكل–7).

- أما النوع الثاني فهو "الرموز المجردة" أو "غير التمثيلية" (Connotative Symbols)، وهي التي تنقل المعنى من خلال الشكل والإحساس بشكل غير حرفي وأكثر غموضاً. فالمباني ذات الخطوط المنحنية والانسيابية قد ترمز مجرداً للانفتاح والديناميكية والحركة، بينما قد ترمز الكتل الضخمة والمتناظرة إلى الاستقرار والقوة والسلطة.

الشكل (8): دار أوبرا أوسلو

وتعتمد هذه الرموز بشكل أكبر على تأويل المتلقي وخلفيته الثقافية [9]. مثل دار أوسلو بالنرويج (شكل–8)، حيث تمثل كتلة المبنى الجبل الجليدي أو المنصة المنحدرة، إذ تم تصميم المبنى على شكل منحدر كبير من الرخام الأبيض يبدو كما لو كان ينبثق من مياه الميناء.

وتكتمل حلقة التواصل هذه مع "نظرية الاستقبال" التي تؤكد على الدور المحوري للمتلقي في تفسير الرمزية. فحسب هذه النظرية، قد تُفهم الرموز بشكل مختلف جذرياً اعتماداً على الخلفية الثقافية

والتاريخية والاجتماعية للمشاهد. حيث أنه ما يبدو رمزاً للحداثة لدى البعض، قد يراه البعض الآخر رمزاً للاغتراب. وهذا يجعل عملية التصميم المعماري عملية حوارية معقدة مع الجمهور المستقبلي [18].

4. العمارة كوسيط للحوار بين الحضارات:

في عصر العولمة الذي نعيشه، لم تعد العمارة حكراً على هوية واحدة أو ثقافة واحدة، بل أصبحت وسيطاً فعالاً للحوار بين الثقافات وساحة لخلق هويات جديدة ومختلطة. يقدم المنظّر النقدي "هومي ك. بهابها" (Homi K. Bhabha) إطاراً نظرياً حيوياً لهذه الظاهرة من خلال مفهومي "الفضاء الثالث" (Third Space) و"التهجين" (Hybridity).

فالفضاء الثالث هو فضاء نظري وثقافي ينشأ من التقاطع واللقاء بين ثقافتين مختلفتين، وفي هذا الفضاء تختلط الهويات وتتفاعل لتنتج شيئاً جديداً ومختلفاً، ليس هو الأول ولا الثاني، بل مزيج فريد منهما. ويمكن رؤية تجسيد هذا المبدأ بشكل عملي في أعمال "النجوم المعماريين" العالميين عندما يصممون في سياقات ثقافية مغايرة لثقافاتهم الأصلية. فبدلاً من أن يفرضوا لغتهم الجمالية بحرفية على المكان، أو يقلدوا التراث المحلي بشكل سطحي، يحاولون خلق أعمال "هجينة" تدمج بين تقنيات العصر وروح المكان وخصوصيته. ومن أبرز الأمثلة على ذلك، هو دار أوبرا غوانزو في الصين (شكل–9)، التي صممتها الراحلة زها حديد. حيث أن تصميمها الانسيابي والمستوحى من منحدرات الأنهار والطبيعة في جنوب الصين، لا ينقل التراث المحلي بشكل حرفي ومباشر، بل يعيد صياغته برؤية مستقبلية عالمية، منتجاً بذلك "فضاءاً ثالثاً" بين الثقافة الصينية والعالمية [7، 19]. هذا النهج يفتح آفاقاً جديدة للعمارة العربية، حيث يمكنها تجاوز ثنائية الأصالة والحداثة نحو خلق لغة معمارية عربية معاصرة وفريدة.

الشكل (9): أوبرا غوانزو–مثال للفضاء الثالث.

ويُعدّ مفهوم التهجين مكمّلاً لمفهوم الفضاء الثالث، إذ يمثّل العملية الثقافية التي تجري داخل هذا الفضاء وتُنتج من خلالها أشكالاً جديدة من المعنى والهوية. وفي المجال المعماري، يمكن فهم التهجين بوصفه عملية تصميمية يتم من خلالها دمج العناصر المحلية والعالمية ضمن إطار إبداعي واحد، دون أن يهيمن أحد الطرفين على الآخر. وبهذا المعنى، يصبح "الفضاء الثالث" هو الإطار المفاهيمي الذي يسمح بحدوث عملية التهجين، فتغدو العمارة نتاجاً لهوية ثقافية جديدة تتجاوز الثنائية التقليدية بين الأصالة والحداثة، وتعبّر عن تلاقي الثقافات عبر الممارسة المادية للمكان والمعنى [7].

ثالثاً: المفهوم السيميولوجي في العمارة:

1. العمارة كنظام علاماتي (Semiotic System):

لم تعد العمارة تُفهم حصرياً كفن هندسي أو مجرد مأوى وظيفي، بل أصبح يُنظر إليها كـ "نص" ثقافي معقد يحمل شفرات ودلالات متعددة تحتاج إلى فك وتأويل. وتعرّف العمارة هنا على أنها "خطاب بصري–مكاني" (Visual–Spatial Discourse) يعبر عن قيم المجتمعات وهُوياتها وتصوراتها بطريقة صامتة ولكنها مؤثرة [12، 18].

2. التيارات النظرية للتحليل السيميولوجي:

1.2. "السيميائيات البنيوية" (Structural Semiotics): الخاصة بالعالِم فرديناند دو سوسير (Ferdinand de Saussure)، الذي يقسم العلامة اللغوية (والمعمارية) إلى جزأين: "الدال" (Signifier) – وهو الشكل المادي للعلامة (مثل شكل النافذة، أو مادة الإكساء المستخدمة)، و"المدلول" (Signified) – وهو المفهوم أو الفكرة الذهنية التي يثيرها هذا الشكل (مثل الخصوصية، الانفتاح، أو الحداثة). هذا النموذج يساعد على تحليل العلاقات بين الأشكال المعمارية وما تحيل إليه من معانٍ [11].

2.2. "سيميائيات تشارلز ساندرز بيرس" (Charles Sanders Peirce): الذي يوسع التحليل بتقديمه تصنيفاً ثلاثياً للعلامة: "الأيقونة" (Icon) التي تشبه مدلولها شكلاً (كأن يحاكي المبنى شكل جبل أو سفينة)، و"الرمز" (Symbol) الذي ترتبط بمدلوله باتفاق ثقافي واجتماعي (كأن ترمز القبة في سياق معين للقدسية)، و"الدليل" (Index) الذي ترتبط بمدلوله بعلاقة سببية أو مباشرة (كأن يدل استخدام المشربيات بشكل واضح على المناخ الحار). هذا التصنيف يثري التحليل الدلالي للعناصر المعمارية [28].

3.2. "سيميائيات الفضاء" (Spatial Semiotics): التي طورها علماء مثل أمبرتو إيكو (Umberto Eco) ورولان بارت (Roland Barthes)، واللذان أكدا على أن للمباني "قواعد نحوية" (Grammar) خاصة بها تتحكم في تركيب العناصر المعمارية (كتوزيع الفتحات، وعلاقات الكتل، والمواد)، مما يشكل أساساً لفهم "نحو" العمارة [12، 6].

4.2. "نظرية الحوارية" (Dialogism): لميخائيل باختين (Mikhail Bakhtin)، التي تنظر إلى الواجهة المعمارية على أنها ساحة "للحوار" بين الأصوات المتعددة والمتقاطعة: صوت (التراث المحلي، والحداثة العالمية، والمستخدم، والسياق العمراني). ففكرة "الحوار بين الماضي والحاضر" هي محور أساسي في فهم الهوية المعمارية المعاصرة [5].

5.2. "الدراسات النقدية في العمارة": وخاصة أعمال كريستيان نوربرغ–شولز (Christian Norberg–Schul) حول "روح المكان" (Genius Loci) التي تؤكد على أن العمارة الحقيقية هي التي تعبر عن هوية المكان الفريدة، وكتابات كينيث فرامبتون (Kenneth Frampton) حول "العمارة الطابعية" (Tectonics) التي تؤكد على أهمية التعبير الصادق عن البنية الإنشائية والمواد المستخدمة [15,16,27].

مسطرة قياس الدراسة التحليلية:

من خلال دراسة النظريات المتعددة السابقة، يتضح أنه للوصول لـ "مسطرة قياس" تحليلية علمية ومتوازنة، لا يمكن الاعتماد أو الارتكاز على نظرية سيميولوجية واحدة، بل يجب أن تنتج من التوليف النظري (Theoretical Synthesis) الذي يدمج بين عدة تيارات نظرية رئيسية لخلق أداة تحليلية شاملة من خلال ثلاث مستويات متكاملة يمكن توظيفها لتحليل الواجهات والتشكيلات المعمارية المراد دراستها كنماذج بحثية، والتي تم تبويبها كما يلي:

- **المستوى الأول: المستوى التركيبي–الدلالي** (Syntactic–Semantic Level):

يهتم بتحليل "كيف" تم بناء المبنى و"ماذا" يقول من خلال أشكاله ومواده.[1] ويتضمن:

I. البنية التشكيلية والهيكلية:

- النظام الإنشائي: درجة ظهور العناصر الإنشائية (ظاهرة/مخفية) ونوع التقنيات المستخدمة (تقليدية/معاصرة). يعكس الموقف من التكنولوجيا، والقدرة الهندسية.

[1] يمزج بين تحليل "النحو" المعماري (كما عند سوسير وإيكو) وتحليل "المعنى" (كما عند بيرس).

- التكوين الكتلي والشكلي: تحليل طبيعة الكتل (متجانسة/غير متجانسة) وهيمنة الأشكال (هندسية/عضوية/حرة) وعلاقة الكتلة بالفراغ (مصمتة/شفافة). هذا المزيج يعبر عن قيم مثل النظام، الديناميكية، الانفتاح، أو الانغلاق.
- العلاقات التشكيلية: تحليل التوازن (متماثل/غير متماثل) والتناسب بين العناصر، والتكرار والتنوع. يخلق هذا الإيقاع البصري والإحساس بالانسجام أو الحركة.

II. المعاني والرموز والاستعارات:

- المحتوى الرمزي: تحليل الرموز المستخدمة، سواء كانت تراثية تقليدية (أقواس، مشربيات، زخارف) أو معاصرة (مستوحاة من التكنولوجيا أو المفاهيم العلمية). يحدد هذا هوية المبنى الثقافية ومدى ارتباطه بالماضي أو انفتاحه على المستقبل.
- الاستعارات البصرية: تحديد نوع الاستعارة المسيطرة (تراثية، طبيعية، تقنية) مثل تشبيه المبنى بالجبل، الزهرة، أو الآلة. تكشف عن المصدر الملهم للمصمم والرسالة التي ينوي إيصالها.
- الحوار الزمني: تقييم درجة الحوار بين الماضي والحاضر. هل المبنى يقلد التراث بحرفية، يقطع معه تماماً، أم يحاوره بإعادة صياغة روحه بلغة معاصرة؟ هذا هو المقياس الأهم للتعبير عن الهوية في العصر الحديث.

- **المستوى الثاني:** المستوى التداولي–الوظيفي (Pragmatic–Functional Level):

الذي يركز على تفاعل المبنى مع سياقه المادي والاجتماعي وأدائه الوظيفي.[2] وينحصر في النقاط التالية:

I. العلاقة مع المحيط:

- السياق العمراني: تحليل درجة الانسجام أو التنافر مع النسيج العمراني المحيط. يمكن أن يكون التنافر المتعمد لخلق معلم مميز (Landmark).
- الاستجابة البيئية: كيف يتفاعل التصميم مع المناخ (الشمس، الرياح) من خلال أنظمة التظليل والعزل والتهوية الطبيعية. يعكس الكفاءة الوظيفية والاستدامة كمسؤولية ثقافية.
- التفاعل مع الفضاء العام: كيف يتعامل المبنى مع الشارع أو الساحة المجاورة؟ هل يشجع على التفاعل الاجتماعي أم يخلق حافة منفرة؟

[2] التحليل من مجال النص إلى مجال التلقي والتأثير، مستفيداً من حقل السيميائيات التداولية (Pragmatics) الذي يدرس كيف يُنتج المتلقي المعنى.

II. الأداء الوظيفي والتقني:

- الوظيفة والكفاءة: تقييم مدى استجابة التصميم للمتطلبات الداخلية (كفاءة الإضاءة والتهوية) وتحقيق الراحة الحرارية والبصرية للمستخدمين.
- المواد والتقنيات: تحليل نوع المواد المستخدمة (محلية تقليدية/مصنعة معاصرة) ودرجة التكنولوجيا في التنفيذ (حرفية يدوية/تصنيع رقمي). يعكس هذا الموقف من العولمة، التراث، والاستدامة.

- **المستوى الثالث:** المستوى التكاملي–النقدي (Integrative–Critical Level):

وهو المستوى التجميعي الذي يقدم حكماً على القيمة الجمالية الفنية والرمزية الإبداعية الشاملة للمبنى ككل. [3]

I. القيم الجمالية والتعبيرية:

- التناغم البصري: تقييم مدى تحقيق الوحدة والانسجام بين جميع العناصر، والتوازن بين الوحدة والتنوع.
- قوة التعبير: هل للمبنى حضور قوي وشخصية فريدة؟ هل تثير استجابة عاطفية (كالسمو، الهدوء، القوة)؟
- الخصوصية والأصالة: هل التعبير مرتبط بخصوصية المكان والزمان والثقافة، أم أنه عام يمكن تطبيقه في أي مكان؟

II. الهوية البصرية والرمزية:

- التميز والأيقونية: هل المبنى فريد وسهل التذكر؟ هل نجح في أن تتحول من مبنى عادي إلى رمز بصري للمدينة أو المؤسسة التي تمثلها؟
- الرسالة الشاملة: تقييم وضوح أو غموض الرسالة الكلية للمبنى، والتي هي نتاج تكامل جميع المستويات التحليلية السابقة.
- تعددية التأويل: هل يسمح المبنى بتفسيرات متعددة أم يفرض معنى واحداً؟ الغنى المعماري يكمن في قدرته على التحدث بلغات متعددة.

رابعاً: الدراسة التحليلية:

[3] يستند إلى نظريات التلقي في الجماليات والنقد المعماري.

1. أسس اختيار نماذج الدراسة التحليلية:

تم اعتماد الأسس التالية لاختيار نماذج الدراسة التحليلية، بحيث:

- تغطي المراحل التاريخية المختلفة لدور الأوبرا في الوطن العربي، منذ نشأتها وحتى يومنا هذا، دار الأوبرا الخديوية (المرحلة الأولى)، دار الأوبرا السورية (المرحلة الثانية)، دار الأوبرا الجزائرية – دار الأوبرا الكويتية (المرحلة الثالثة).
- تغطي المنطقة الجغرافية والمناخية للوطن العربي بكافة أقاليمه، مصر (إقليم وادي النيل)، سوريا (إقليم المشرق العربي)، الجزائر (إقليم المغرب العربي)، الكويت (إقليم شبه الجزيرة العربية).

2. تحليل النماذج حقل الدراسة:

1.2. المثال الأول: دار الأوبرا الخديوية– مصر : [1,10,26,32]

دار الأوبرا الخديوية		
الموقع	القاهرة–مصر	
تاريخ التصميم	1869 م	
تاريخ الافتتاح	1869 م	
المرحلة	الأولى	
المعماري	الإيطالي بيترو أفوسكاني (Pietro Avoscani)	

- **ظروف النشأة:** بُنيت دار الأوبرا الخديوية في القاهرة عام 1869 بأمر من الخديوي إسماعيل لتكون درة تاج احتفالات افتتاح قناة السويس، حيث مثلت بياناً سياسياً وثقافياً يرمز لطموح مصر للانخراط في العالم الحديث ومضاهاة العواصم الأوروبية. شُيد المبنى الخشبي في وقت قياسي لم يتجاوز ستة أشهر، وظل منارة ثقافية طوال 102 عام يستضيف أبرز العروض العالمية، حتى اندلع حريق هائل في 28 أكتوبر 1971 التهم المبنى بالكامل محولاً هذا الصرح إلى رماد في ساعات و تاركاً فراغاً ثقافياً في ذاكرة المدينة. جاء بناء الدار جزءاً من مشروع الخديوي إسماعيل الشامل لتحديث مصر وتحويل القاهرة إلى "قطعة من أوروبا"، حيث أراد من خلالها إبهار ضيوفه من ملوك وأمراء أوروبا وإظهار مصر كدولة متحضرة، فكانت الأوبرا رمزاً لطموح الدولة السياسي وتحولها الثقافي نحو الغرب.

- **التحليل التركيبي –الدلالي للمبنى:**

أولاً: البنية التشكيلية والهيكلية: اتسمت دار الأوبرا الخديوية بتكوين كتلي متجانس يتبع النموذج الإيطالي الكلاسيكي، مع هيمنة التناظر المحوري والأشكال الهندسية المنتظمة الذي حقق توازناً معمارياً مثالياً، كما يظهر (شكل–10). واعتمد التصميم على نظام إنشائي من الهيكل الخشبي المخفي خلف طبقات الجص والزخارف، مستورداً أحدث تقنيات بناء المسارح الأوروبية في تلك الفترة، وتعد التقنيات المستخدمة في إنشائه معاصرة بالنسبة لمصر في القرن التاسع عشر. كما تميزت العلاقات التشكيلية بالتناظر الصارم والتناسب والتكرار في العناصر المعمارية والتزيينية، مع إثراء الواجهات بزخارف وفرت خفة بصرية ضد صرامة الكتلة الرئيسية.

الشكل (10): التكوين المتجانس المتناظر لدار الأوبرا الخديوية.

ثانياً: المعاني والرموز والاستعارات: استمدت الرموز الزخرفية (التيجان، الأكاليل، الزخارف النباتية) من التراث الأوروبي (الباروك والروكوكو) كتعبير عن تبني هوية ثقافية جديدة، (شكل–11). وقد مثّل التصميم قطيعة مع الماضي المعماري المحلي، حيث تجاهلت تماماً العناصر الإسلامية والمملوكية، معبرة عن حوار مباشر مع الحاضر الأوروبي وسعياً للالتحاق بركب الحداثة.

الشكل (11): الأكاليل والزخارف النباتية المستخدمة في الواجهة لدار الأوبرا الخديوية.

- **التحليل التداولي– الوظيفي للمبنى:**

أولا: العلاقة مع المحيط: تميزت علاقة دار الأوبرا الخديوية بمحيطها بالازدواجية؛ حيث انسجمت كلياً مع "القاهرة الخديوية" الحديثة التي صُممت كجزء منها، بينما شكلت تنافراً صارخاً مع الأحياء التاريخية المجاورة. هذا التنافر المُتعمَد جعل منها معلماً بارزاً (Landmark) يرمز لمرحلة التحديث. كما نجح المبنى في خلق "ميدان الأوبرا" الذي أصبح نواة للفضاء العام والحيوية الاجتماعية، رغم إخفاقه في الاستجابة البيئية للمناخ الحار بسبب اعتماده على حلول مستوردة غير ملائمة.

ثانياً: الأداء الوظيفي والتقني: أدى المبنى وظيفته بكفاءة من خلال تصميم داخلي ذكي يضمن تجربة مشاهدة مثلى وجودة صوتية متميزة لجميع المشاهدين، مستفيداً من الخصائص الصوتية المتميزة للخشب. يظهر (شكل-12) الصالة الداخلية للدار. إلا أن هذه الكفاءة الوظيفية كانت مقترنة بإهمال معايير الأمان والاستدامة، حيث أدى الاعتماد المفرط على الخشب في البناء إلى عواقب كارثية لاحقاً. كما يجدر الإشارة إلى أن الخشب كان مستورداً بالكامل دون استخدام أي مواد محلية في الإنشاء، واعتمدت تقنيات التنفيذ على المهارات الحرفية المتاحة آنذاك.

الشكل (12): صالة الأوبرا والمقصورات.

- **التحليل النقدي- التكاملي للمبنى:**

أولاً: القيم الجمالية والتعبيرية: تمتع مبنى دار الأوبرا الخديوية بوحدة بصرية عالية تحققت من خلال تبنيّه الكامل للنموذج الكلاسيكي الإيطالي مما خلق إيقاعاً متناسقاً. وقد تحقق تنوع جزئي ضمن هذا الإطار الموحد من خلال الزخارف الغنية المستمدة من التراث الأوروبي (الباروك والروكوكو) والتي كسرت رتابة الكتلة وأضفت حيوية بصرية على الواجهات. كما امتلك المبنى قوة تعبيرية لافتة، جسدتها فخامته واحتفاليته التي تناسب مكانته كأول دار أوبرا في أفريقيا والشرق الأوسط، حيث مثل بياناً بصرياً لطموح الخديوي إسماعيل في تحويل القاهرة إلى "قطعة من أوروبا"

ومضاهاة العواصم الأوروبية . غير أن هذه القوة التعبيرية اقترنت بافتقاد الخصوصية والأصالة المحلية.

ثانياً: الهوية البصرية والرمزية: رغم افتقاده للأصالة التصميمية، نجح المبنى في التحول إلى أيقونة بصرية ورمز ثقافي لمصر الحديثة، حيث أصبح جزءاً من هوية القاهرة المرئية لأكثر من قرن. كما حمل رسالة شاملة واضحة عبر تجسيده لمشروع التحديث على النمط الأوروبي. وقد فرض هذا الوضوح قراءةً واحدة جعلت منه رمزاً للتقدم والتحضر، دون أن تتيح مجالاً للتأويلات الأخرى حول التبعية الثقافية أو الانفصال عن الهوية المحلية.

الجدول 1. الدراسة التحليلية لدار الأوبرا الخديوية في مصر

	مستويات الدراسة				محقق	بشكل جزئي	غير محقق
المستوى التركيبي الدلالي	البنية التشكيلية والهيكلية	التكوين الكتلي والشكلي	تجانس الكتل		■		
			هيمنة الأشكال	هندسية	■		
				عضوية			□
				حرة			□
			شفافية الكتلة			◘	
		النظام الإنشائي	درجة ظهور العناصر الإنشائية				□
			التقنيات المستخدمة	تقليدية		◘	
				معاصرة		◘	
المستوى التركيبي	البنية التشكيلية والهيكلية	العلاقات التشكيلية	التوازن		■		
			التناسب		■		
			التكرار		■		
			التنوع				□

	مستويات الدراسة				محقق	بشكل جزئي	غير محقق
	المعاني والرموز والاستعارات	المحتوى الرمزي	الرموز المستخدمة	تراثية محلية			☐
				معاصرة		◘	
		الاستعارات البصرية	تراثية				☐
			طبيعية				☐
			تقنية				☐
		الحوار الزمني	تقليد التراث بحرفية				☐
			قطيعة مع التراث		■		
			إعادة صياغة بلغة معاصرة				☐
المستوى التداولي الوظيفي	العلاقة مع المحيط	الانسجام مع السياق العمراني					☐
		الاستجابة البيئية					☐
		التفاعل مع الفضاء العام			■		
	الأداء الوظيفي والتقني	الوظيفة والكفاءة				◘	
		المواد والتقنيات	نوع المواد	تقليدية			
				معاصرة		◘	
			تكنولوجيا التنفيذ	يدوية	■		
				تصنيع رقمي			☐
المستوى التكاملي	القيم الجمالية والتعبيرية	التناغم البصري	الوحدة والانسجام		■		
			الوحدة والتنوع			◘	
		قوة التعبير			■		
		الخصوصية والأصالة					☐
		التميز والأيقونية			■		

	مستويات الدراسة		محقق	بشكل جزئي	غير محقق
	الهوية البصرية والرمزية	وضوح الرسالة الشاملة	■		
		تعددية التأويل			☐
الرموز الدلالية:	■ محقق	◘ بشكل جزئي	☐ غير محقق		

2.2. المثال الثاني: دار أوبرا دمشق– سوريا: [2,23,29]

دار أوبرا دمشق	
الموقع	دمشق–سورية
تاريخ التصميم	1987 م
تاريخ الافتتاح	2004 م
المرحلة	الثانية
المعماري	شركة أوفا (OVA)

- **ظروف النشأة:** لم تكن ولادة دار أوبرا دمشق حدثاً عابراً، بل كانت مشروعاً طال انتظاره، محملاً بدلالات سياسية وثقافية عميقة. على الرغم من أن فكرة إنشائها تعود إلى بداية فترة الاستقلال، إلا أن حجر الأساس لم يوضع إلا في عام 1987 م، ليبقى المشروع بعدها في حالة من التعثر لسنوات طويلة. لم يستأنف العمل بجدية إلا في مطلع الألفية الجديدة، ليتم افتتاح الصرح رسمياً في 7 مايو 2004 م.
- **التحليل التركيبي –الدلالي للمبنى:**

أولاً: البنية التشكيلية والهيكلية: يتميز المبنى بتكوينه الكتلي الضخم والمترابط المستوحى من العمارة القلاعية، حيث تخلق واجهاته الحجرية ذات الفتحات الرأسية المنتظمة انطباعاً بالصلابة والثبات. يعتمد الهيكل الإنشائي على نظام تقليدي من الخرسانة المسلحة (أعمدة، جسور، بلاطات)، إلا أن التصميم يتعمد إخفاءه خلف كسوة حجرية سميكة، مما يضعف التعبير عن منطق البناء. كما تعكس العلاقات التشكيلية خياراً جمالياً ، حيث يتجلى التوازن والتكرار في انتظام الفتحات، والتناسب بين الكتل. وبذلك، يتحقق الجمال من خلال قوة التكوين الكتلي وجودة المواد. يظهر (الشكل-13) الموقع العام للمبنى مبيناً فيه الكتل المتراصة وتناسبها.

الشكل (13): الكتل المتجانسة لأوبرا دمشق ونسبها.

ثانياً: المعاني والرموز والاستعارات: تجسّد دار أوبرا دمشق حواراً بين التراث والحداثة من خلال رموز معمارية مستوحاة من العمارة المحلية. يظهر ذلك في استعارة القلعة عبر الواجهات الحجرية الصلبة المنغلقة التي ترمز للحماية والديمومة، وتجريد المشربيات التقليدية في الفتحات الرأسية الضيقة والأقواس المبسطة. كما يعيد الفناء الداخلي إنتاج مفهوم الفناء الدمشقي التقليدي مما يعزز الشعور بالأصالة والانتماء، (الشكل-14). أما على مستوى الاستعارات البصرية المهيمنة، فتسيطر استعارة "القلعة الثقافية" على التصميم، حيث لا

الشكل (14): النوافذ الرأسية الضيقة لأوبرا دمشق.

يقتصر الأمر على التشبيه الشكلي بل يتعداه إلى تجسيد معماري كامل للفكرة، فتظهر الاستعارة التراثية/العسكرية في الواجهات الحجرية السميكة والمغلقة التي تعمل كجدار حصن رمزي لا يحمي من الأعداء الماديين بل يحمي الفن والثقافة الرفيعة من "ضجيج" العالم الخارجي، مما يخلق تجربة بصرية مجازية للانتقال من حصن خارجي إلى كنز ثقافي داخلي ثمين.

- **التحليل التداولي– الوظيفي للمبنى:**

أولا: العلاقة مع المحيط: تُحقِّق دار أوبرا دمشق مفارقةً مع محيطها عبر ازدواجية التنافر والانسجام؛ فمن ناحية تبرز ضخامتها الهائلة بتنافر واضح مع النسيج العمراني المحيط في ساحة الأمويين، مما يجعلها تبدو كعنصر دخيل ومفروض لكنه مقصود لإنشاء معلم بارز (Landmark) يؤكد أهمية المبنى الرمزية. بينما تتحقق الانسجام العميق مع السياق الثقافي من خلال استلهام عناصر العمارة الدمشقية كالقلعة والنوافذ والفناء، (الشكل–15)، مما يدمج المبنى في الذاكرة البصرية للمدينة. كما يتفاعل المبنى مع الفضاء العام من خلال توفير مداخل متعددة وساحات انتقالية تشجع الجمهور على التجمّع والتفاعل. أما أداؤه البيئي فيعتمد على استراتيجيات التصميم المستدام من خلال الواجهات الحجرية السميكة التي توفر كتلة حرارية تنظم درجة الحرارة داخلياً، والفتحات الرأسية الضيقة التي تحد من اكتساب الحرارة المباشرة مع السماح بدخول الضوء غير المباشر، إضافة إلى الفناء الداخلي الذي يعمل كمنظم مناخي طبيعي.

الشكل (15): الانسجام والتنافر مع المحيط.

ثانياً: الأداء الوظيفي والتقني: تُلخِّص الجوانب الوظيفية والتقنية لدار أوبرا دمشق في تصميمها المتكامل الذي يجمع بين الكفاءة الوظيفية والأداء التقني المتطور. يضم المجمع ثلاث قاعات

رئيسية متعددة الأحجام: المسرح الكبير (1331 مقعداً) للعروض الضخمة، ومسرح الدراما (662 مقعداً)، وقاعة متعددة الاستخدامات (237 مقعداً) ذات مرونة عالية حيث يمكن إعادة تشكيل مقاعدها بست ترتيبات مختلفة. ويعتمد التصميم على العزل الصوتي الفعال عبر الكتلة المتراصة والمواد الثقيلة، مع تجهيزات تقنية متطورة تشمل أحد أنظمة الأورغن النادرة عالمياً. كما يجمع المبنى بين المواد التقليدية كالحجر الكلسي المحلي والمواد الحديثة كالخرسانة المسلحة، مع استخدام الرخام والخشب في التجهيزات الداخلية لربط التصميم بالحرف التقليدية. تميز التنفيذ بالدقة العالية في التشطيبات والكسوة الحجرية، مؤكداً على أولوية الجودة والتحمل في التصميم.

- **التحليل النقدي– التكاملي للمبنى:**

أولاً: القيم الجمالية والتعبيرية: تُحقق دار أوبرا دمشق تميزاً في القيم الجمالية والتعبيرية من خلال عدة جوانب، إذ تتحقق الوحدة البصرية عبر التكرار المنتظم للفتحات والتناسب الدقيق بين الكتل، (الشكل–16)، مع استخدام مواد متجانسة (الحجر، الزجاج) تخلق إحساساً بالتماسك. كما يحافظ التصميم على هوية موحدة عبر النمط المعماري المتكرر، مع إدخال التنوع عبر تباين أحجام الكتل وتلاعب ضوئي يضيف عمقاً بصرياً. وبالتالي يتميز المبنى بتعبيرية قوية تنبع من التضاد بين الخارج الصارم والداخل الفخم، مع لغة معمارية تجمع بين الحداثة العالمية والأصالة المحلية.أي أنّ التصميم يستجيب لروح المكان الدمشقي عبر استلهام العناصر التراثية مع معاصرتها، محققاً أصالة تنفيذية متميزة.

الشكل (16): التكرار والتناسب بين الكتل والنوافذ.

ثانياً: الهوية البصرية والرمزية: تُعد دار أوبرا دمشق أيقونة معمارية متميزة تجسّد قيماً جمالية ورمزية متعددة الأبعاد، حيث تحقق التميز من خلال موقعها البارز وتصميمها الضخم الذي يجعلها عنصراً أساسياً في المشهد الحضري لدمشق. وتتميز الايقونية في فرادة واجهتها البصرية

التي تتيح التعرف الفوري عليها حتى من خلال الصور الظلية، مستندة إلى فكرة "الحصن الثقافي" البسيطة والقوية. كما يظهر وضوح الرسالة جلياً في قدرة المبنى على إيصال فكرته الجوهرية كمنصة للثقافة الرفيعة وحامٍ للتراث الفني.

الجدول 2. الدراسة التحليلية لدار أوبرا دمشق في سورية

مستويات الدراسة					محقق	بشكل جزئي	غير محقق
المستوى التركيبي الدلالي	البنية التشكيلية والهيكلية	التكوين الكتلي والشكلي	تجانس الكتل		■		
			هيمنة الأشكال	هندسية	■		
				عضوية			☐
				حرة			☐
			شفافية الكتلة				☐
		النظام الإنشائي	درجة ظهور العناصر الإنشائية				☐
			التقنيات المستخدمة	تقليدية	■		
				معاصرة			☐
المستوى التركيبي الدلالي	البنية التشكيلية والهيكلية	العلاقات التشكيلية	التوازن		■		
			التناسب		■		
			التكرار		■		
			التنوع				☐
	المعاني والرموز والاستعارات	المحتوى الرمزي	الرموز المستخدمة	تراثية محلية	■		
				معاصرة			☐
			تراثية		■		
			طبيعية				☐

	مستويات الدراسة				محقق	بشكل جزئي	غير محقق
		الاستعارات البصرية	تقنية				☐
		الحوار الزمني	تقليد التراث بحرفية				☐
			قطيعة مع التراث				☐
			إعادة صياغة بلغة معاصرة		■		
المستوى التداولي الوظيفي	العلاقة مع المحيط		الانسجام مع السياق العمراني			◘	
			الاستجابة البيئية		■		
			التفاعل مع الفضاء العام		■		
	الأداء الوظيفي والتقني		الوظيفة والكفاءة		■		
		المواد والتقنيات	نوع المواد	تقليدية		◘	
				معاصرة		◘	
			تكنولوجيا التنفيذ	يدوية		◘	
			تكنولوجيا التنفيذ	تصنيع رقمي			☐
المستوى التكاملي النقدي	القيم الجمالية والتعبيرية	التناغم البصري	الوحدة والانسجام		■		
			الوحدة والتنوع		■		
			قوة التعبير		■		
			الخصوصية والأصالة		■		
	الهوية البصرية والرمزية		التميز والأيقونية		■		
			وضوح الرسالة الشاملة		■		
			تعددية التأويل				☐

مستويات الدراسة		محقق	بشكل جزئي	غير محقق
الرموز الدلالية:	■ محقق	◘ بشكل جزئي	□ غير محقق	

3.2. المثال الثالث: دار الأوبرا الجزائرية– الجزائر : [29,30,36]

دار الأوبرا الجزائرية		
الموقع	الجزائر العاصمة–الجزائر	
تاريخ التصميم	2004 م	
تاريخ الافتتاح	2016 م	
المرحلة	الثالثة	
المعماري	مجموعة بكين / (CSCEC) مجموعة الصين الحكومية (BUCG)	

- **ظروف النشأة:** تمثل دار أوبرا الجزائر إنجازاً ثقافياً وسياسياً يجسّد عمق العلاقات الجزائرية–الصينية، حيث جاء المبنى كثمرة للعلاقات الدبلوماسية والتاريخية المتينة بين الجزائر والصين، كهدية بقيمة 30–40 مليون دولار. كمشروع ثقافي ريادي، تجسّد الدار طموح الجزائر لامتلاك بنية تحتية ثقافية عالمية، تتيح تقديم الفنون العالمية كالأوبرا مع الحفاظ على التراث المحلي كالموسيقى الأندلسية. وتؤكد تسمية الدار باسم المناضل والدبلوماسي "بوعلام بسايح" على البعد الوطني للمشروع، محوّلة إياه إلى جسر ثقافي يربط بين الأصالة والحداثة، وبين التراث الوطني والحوار العالمي.
- **التحليل التركيبي –الدلالي للمبنى:**

أولاً: البنية التشكيلية والهيكلية: يَعتمد تشكيل دار الأوبرا الجزائرية على حوار بصري واضح بين كتلة مكعبة ضخمة ترمز إلى الثبات والرسوخ، وسقف منحن ديناميكي وكأنه وشاح خفيف أو موجة حانية، ليكسر جمود الشكل الهندسي الصارم ويمنح المبنى حيوية ورشاقة. وتأتي الواجهة الزجاجية الشفافة تحت السقف المنحني كغشاء نافذ يخفف من صلابة الكتلة الرئيسية، ويدعو

الناظر لاكتشاف الفضاء الداخلي الغني من الخارج. هذا التكوين الثلاثي (المكعب– السقف المنحني– الواجهة الزجاجية) يخلق لغة معمارية معاصرة، ويشكل تناوباً بين الأجزاء المصمتة والمفرغة محققاً شفافية بشكل جزئي (الشكل–17).

الشكل (17): التكوين الثلاثي لدرا الأوبرا الجزائرية.

يُخفي التصميم المعماري نظاماً إنشائياً حديثاً يعتمد على دمج الخرسانة المسلحة والهياكل الفولاذية، حيث يشكل الهيكل الخرساني العمود الفقري للمبنى، بينما يدعم هيكل فولاذي معقد السقف المنحني البارز مما يسمح بتحقيق شكله الانسيابي. كما يحقق التصميم توازناً ديناميكياً غير متماثل، حيث يكسر السقف المنحني تماثل الكتلة الأساسية للمبنى مولداً توتراً بصرياً مثيراً للاهتمام. وتُدرس نسب العناصر بدقة، من خلال العلاقة بين ارتفاع المبنى ومساحته، والتوازن بين الكتلة المصمتة والواجهة الزجاجية، والتناسب بين حجم المبنى والفضاء المفتوح المحيط به.

ثانياً: المعاني والرموز والاستعارات: تُقدّم دار أوبرا الجزائر بياناً معمارياً حديثاً يتبنى لغة عصرية صرفة، حيث تعتمد واجهاتها الزجاجية الشفافة والهيكل الإنشائي المتطور على مفاهيم معاصرة دون استعارة مباشرة للعناصر التقليدية أو الرموز المعمارية المغاربية التقليدية. يجسّد التصميم رؤية مستقبلية من خلال توظيف مواد عصرية كالزجاج والفولاذ التي ترمز إلى الشفافية والانفتاح. وتتميز الاستعارات

الشكل (18): العناصر المستوحاة من التراث في بهو دار الأوبرا الجزائرية.

البصرية في التصميم الخارجي بالعمق والدلالة، حيث يمكن قراءة السقف المنحني الكبير كـ"خيمة عصرية" أو "غطاء حامٍ" يظلل المساحات تحته، في استعارة معاصرة لفكرة المأوى والحماية المتجذرة في الثقافة المحلية. وبشكل أكثر تجريداً، يوحي شكل المبنى بـ"سفينة ثقافية" ضخمة، حيث يشبه السقف المنحني الشراع والكتلة الرئيسية جسم السفينة، في تعبير عن رحلة الجزائر نحو آفاق فنية جديدة حاملة تراثها وحداثتها. وبالتالي يمثل المبنى انقطاعاً عن التراث بواجهاته الخارجية على الرغم من استخدام بعض العناصر المستوحاة من التراث المغاربي في البهو الداخلي (الشكل-18).

- **التحليل التداولي- الوظيفي للمبنى:**

الشكل (19): الساحة الأمامية والمسبح.

أولا: العلاقة مع المحيط: تميزت علاقة دار الأوبرا بمحيطها العمراني بالازدواجية؛ فهي تخلق تنافراً متعمداً مع محيطها المباشر، وفي الوقت نفسه تنسجم مع رؤية أوسع للتخطيط الحضري. يقع المبنى في بلدية أولاد فايت، وهي إحدى ضواحي العاصمة، وليس في قلبها التاريخي المكتظ. هذا الاختيار للموقع بحد ذاته قرار تصميمي مهم، فهو يجنب المبنى الدخول في مقارنة مباشرة أو صراع مع النسيج التاريخي للعاصمة، ويسمح له بأن يكون معلماً بارزاً (Landmark) قائماً بذاته. الساحة الواسعة والمسبح العاكس أمام المبنى، (الشكل-19)، يخلقان فضاءً عاماً جديداً، ويحولان محيط الأوبرا إلى وجهة بحد ذاتها، وليس مجرد ممر للوصول إلى المبنى. لكن من الناحية البيئية، قد يطرح تصميم الواجهة الزجاجية الكبيرة تحديات في مناخ الجزائر الحار. ففي حين أنها توفر شفافية بصرية، إلا أنها قد تساهم في زيادة الأحمال الحرارية على المبنى، مما يتطلب استهلاكاً عالياً للطاقة لتكييف الهواء.

ثانياً: الأداء الوظيفي والتقني: يؤدي المبنى وظائفه بكفاءة عالية. فالقاعة الرئيسية التي تتسع لـ 1400 شخص مصممة وفقاً لأعلى المعايير العالمية لضمان رؤية ممتازة وصوتيات نقية من كل زاوية. بالإضافة إلى القاعة الرئيسية، يضم المبنى مرافق متعددة تدعم وظيفته كمركز فني متكامل، بما في ذلك قاعات تمرينات للباليه والأوركسترا، وقاعات للكورال، ومكاتب إدارية، ومرافق للجمهور مثل الكافيتريات. هذا التكامل الوظيفي يجعله مؤسسة قادرة على الإنتاج الفني والتكوين، وليس فقط العرض.

- **التحليل النقدي– التكاملي للمبنى:**

أولاً: القيم الجمالية والتعبيرية: يتميز المبنى بتناغم بصري عالٍ يعكس توازناً دقيقاً بين البساطة والتعقيد، حيث تتعايش الصرامة الهندسية للكتلة الرئيسية مع انسيابية السقف المنحني والواجهة الزجاجية في وحدة متجانسة. وتتجلى قوة التعبير في حضوره البارز الذي ينقل رسالة ثقة وانفتاح على العالم. أما على مستوى الخصوصية والأصالة، فيعاني المبنى من ضعف واضح في الهوية المحلية. تصميمه العالمي والعام يجعل من الممكن نقله إلى أي عاصمة أخرى دون أن يفقد شيئاً من هويته، مما يجعله منفصلاً عن السياق الثقافي والجغرافي الجزائري. افتقاده للروابط المعمارية أو الرمزية المميزة للبيئة الجزائرية يحوله إلى عمل معماري "من دون هوية" واضحة.

ثانياً: الهوية البصرية والرمزية: تنجح أوبرا الجزائر في تحقيق تميز بصري عبر كتلتها الضخمة البسيطة وسقفها المنحني الذي يخلق صورة إيقونية سهلة التذكر. إلا أن هذا التميز الشكلي يقابله فشل في نقل رسالة ثقافية واضحة، حيث يفتقد المبنى لأي إشارات بصرية تربطه بوظيفه كدار أوبرا أو بسياقه الثقافي المغاربي. كما حقق المبنى تأويلات متعددة من خلال الرمزية غير الواضحة لحركة الشكل المنحني. الغياب الكامل للحوار مع التراث المحلي والتباس الهوية يجعلان من الصعب على المتلقي تمييز المبنى كدار أوبرا دون معرفة مسبقة، مما يحوّله إلى تحفة معمارية

الشكل (18): تكوين دار الأوبرا الكويتية.

جميلة لكنها منفصلة عن بيئتها الثقافية. يظهر (الشكل–20) المظهر العام لمبنى الأوبرا والتي تظهر التناقض الصارخ مع التكوينات التقليدية لدور الأوبرا عادةً.

الجدول 3. الدراسة التحليلية لدار الأوبرا الجزائرية في الجزائر

مستويات الدراسة					محقق	بشكل جزئي	غير محقق
المستوى التركيبي الدلالي	البنية التشكيلية والهيكلية	التكوين الكتلي والشكلي	تجانس الكتل		■		
			هيمنة الأشكال	هندسية		□	
				عضوية			☐
				حرة		□	
			شفافية الكتلة			□	
		النظام الإنشائي	درجة ظهور العناصر الإنشائية				☐
			التقنيات المستخدمة	تقليدية			☐
				معاصرة	■		
المستوى التركيبي الدلالي	البنية التشكيلية والهيكلية	العلاقات التشكيلية	التوازن		■		
			التناسب		■		
			التكرار				☐
			التنوع				☐
	المعاني والرموز والاستعارات	المحتوى الرمزي	الرموز المستخدمة	تراثية محلية			☐
				معاصرة	■		
		الاستعارات البصرية	تراثية			□	
			طبيعية			□	
			تقنية				☐

مستويات الدراسة						محقق	بشكل جزئي	غير محقق
		الحوار الزمني	تقليد التراث بحرفية					☐
			قطيعة مع التراث			■		
			إعادة صياغة بلغة معاصرة				◘	
المستوى التداولي الوظيفي	العلاقة مع المحيط	الانسجام مع السياق العمراني					◘	
		الاستجابة البيئية						☐
		التفاعل مع الفضاء العام				■		
	الأداء الوظيفي والتقني	الوظيفة والكفاءة				■		
		المواد والتقنيات	نوع المواد	تقليدية				☐
				معاصرة		■		
			تكنولوجيا التنفيذ	يدوية				☐
				تصنيع رقمي		■		
المستوى التكاملي النقدي	القيم الجمالية والتعبيرية	التناغم البصري	الوحدة والانسجام			■		
			الوحدة والتنوع			■		
		قوة التعبير					◘	
		الخصوصية والأصالة						☐
	الهوية البصرية والرمزية	التميز والأيقونية					◘	
		وضوح الرسالة الشاملة					◘	
		تعددية التأويل				■		

الرموز الدلالية: ■ **محقق** ◘ **بشكل جزئي** ☐ **غير محقق**

4.2. <u>المثال الرابع: دار الأوبرا الكويتية– الكويت: [25,29,35]</u>

دار الأوبرا الكويتية

الموقع	مدينة الكويت–الكويت	
تاريخ التصميم	2015 م	
تاريخ الافتتاح	2016 م	
المرحلة	الثالثة	
المعماري	SSH International	

- **ظروف النشأة:** جاء إنشاء مركز الشيخ جابر الأحمد الثقافي في سياق طفرة تنموية تهدف إلى تعزيز مكانة الكويت كمنارة ثقافية في المنطقة. صدر قرار الإنشاء عام 2015، وتم إنجاز هذا المشروع في فترة قياسية لم تتجاوز 22 شهراً، ليتم افتتاحه في أواخر عام 2016. لم يكن المشروع مجرد إضافة معمارية، بل جزءاً لا يتجزأ من "منطقة الكويت الثقافية الوطنية"، التي تهدف إلى خلق بنية تحتية متكاملة للفنون والآداب والعلوم.
- **التحليل التركيبي –الدلالي للمبنى:**

الشكل (21): الكتل غير المتجانسة لأوبرا الكويت.

أولاً: البنية التشكيلية والهيكلية: اتسم مركز الشيخ جابر الأحمد الثقافي بتكوين كتلي مركب وغير متجانس، (الشكل–21)، يتألف من أربعة مبانٍ رئيسية تبدو كـ "جواهر" متناثرة داخل حديقة واسعة. يتبع التصميم نموذجاً تركيبياً فريداً، حيث يغلف الهياكل الخرسانية الداخلية للمباني غلاف خارجي معدني ضخم مصنوع من هيكل فولاذي ومكسو بألواح التيتانيوم والزجاج المستوحى من الأنماط الهندسية المعقدة في العمارة الإسلامية. مما يوفر الحماية المناخية للمباني الداخلية، وتمنح

المشروع أيقونته البصرية المتلألئة. ويخلق حواراً بين المصمت والشفاف. التقنيات الإنشائية المستخدمة تعد من أحدث ما توصلت إليه تكنولوجيا البناء. يحقّق التصميم توازناً ديناميكياً غير متماثل، فعلى الرغم من اختلاف أشكال وأحجام المباني الأربعة، يبدو التكوين العام متوازناً ومتناغماً، يمنح هذا التوازن الديناميكي المشروع حيوية ويجنبه الجمود. كما تظهر تناسباً بين العناصر المختلفة: نسبة ارتفاع الكتل إلى مساحتها، وإيقاع تكرار الوحدات الهندسية في الواجهة.

ثانياً: المعاني والرموز والاستعارات: يستمد المركز رموزه من مصدرين رئيسيين: التراث الإسلامي والحداثة التكنولوجية. فالغلاف الخارجي بتشعباته الهندسية هو استعارة بصرية معاصرة للمشربيات والأنماط الزخرفية الإسلامية، لكنه يقدمها بلغة مادية وتقنية جديدة (التيتانيوم والزجاج). هذا يمثل إعادة صياغة للتراث بلغة معاصرة، (الشكل-22). كما أن الفضاءات الداخلية، المزينة بأكثر من 8000 متر مربع من الخط العربي، تؤكد على الرسالة الثقافية المحلية وتعزز الارتباط بالهوية الوطنية. وبذلك، يصبح المبنى حواراً بين الأصالة والمعاصرة ، كما يعبر عن استعارة من الطبيعة من خلال تشبيه الكتل بالجواهر أو الصخور.

الشكل (22): الاستعارة من التراث الإسلامي/ استخدام الزجاج والتيتانيوم المعاصر في الواجهة.

- **التحليل التداولي- الوظيفي للمبنى:**

الشكل (23): التنافر مع المحيط.

أولا: العلاقة مع المحيط: يخلق المبنى بتصميمه المستقبلي وحجمه الضخم تنافراً متعمداً مع النسيج العمراني التقليدي المحيط، ليرسخ نفسه كأيقونة للمستقبل، (الشكل-23). نجح المركز في خلق فضاء عام حيوي من خلال الحدائق والنوافير والمساحات المفتوحة التي ترحب بالزوار، مما يجعله وجهة اجتماعية وترفيهية للمجتمع. أما من ناحية الاستجابة البيئية، فإن الغلاف الخارجي الهندسي يعمل كحاجز شمسي يقلل من اكتساب الحرارة، بينما توفر الكتل الخرسانية الداخلية عزلاً حرارياً، مما يمثل استجابة جزئية للمناخ الحار، وإن كانت تعتمد بشكل كبير على أنظمة تكييف متطورة.

ثانياً: الأداء الوظيفي والتقني: يؤدي المبنى وظائفه بكفاءة عالية جداً. فالمسارح وقاعات الحفلات مجهزة بأحدث التقنيات الصوتية والضوئية لضمان تجربة مشاهدة عالمية المستوى. التصميم الداخلي يراعي التدفق السلس للجمهور، مع توفير كافة الخدمات اللازمة من مواقف سيارات تتسع لـ 3300 سيارة ومطاعم ومتاجر. لكن هذه الكفاءة الوظيفية تأتي بتكلفة عالية من حيث الاستدامة والاعتماد على التكنولوجيا المستوردة. فالمواد المستخدمة (التيتانيوم، الفولاذ) والتقنيات المعقدة تتطلب صيانة متخصصة ومكلفة. تكنولوجيا التنفيذ اعتمدت على خبرات وشركات عالمية، مما يقلل من إسهام المهارات الحرفية المحلية في عملية الإنشاء المعقدة.

- **التحليل النقدي- التكاملي للمبنى:**

أولاً: القيم الجمالية والتعبيرية: يتمتع مبنى دار الأوبرا الكويتية بقيم جمالية عالية، ينبع من التلاعب المتقن بين الكتلة والفراغ والضوء والظل، مما يخلق توازناً ديناميكياً بين الوحدة البصرية والتنوع التشكيلي. ويتميز المبنى بقوة تعبيرية فريدة، حيث يمنحه التصميم الخارجي حضوراً مؤثراً يثير إحساساً بالسمو والرهبة. يمكن القول إن المبنى يقدم تطبيقاً متقناً لنمط "العمارة

الأيقونية" العالمية التي سادت في أوائل القرن الحادي والعشرين، معتمداً على الأشكال الهندسية المعقدة والمواد البراقة. وتكمن خصوصية المبنى في قدرته على إعادة تفسير التراث الإسلامي بلغة معاصرة، رغم أن هذه الخصوصية تبدو مرتبطة بالرمزية التاريخية أكثر من ارتباطها بالثقافة المحلية المعاصرة، مما يجعله عملاً عالمياً يمكن أن يقع في أي سياق حضري مشابه، مع محاولة لتأصيله في سياقه الثقافي.

ثانياً: الهوية البصرية والرمزية:

الشكل (24): الكتل المنكسرة كاللآلئ.

يُحقق المبنى تميزاً استثنائياً بتحوله إلى أيقونة بصرية رمزية للكويت الحديثة، يشكل عنصراً جمالياً فريداً في المشهد الحضري وعلامة بارزة في الهوية البصرية للمدينة. وقد نجح في الانتقال من كونه مجرد صرح معماري إلى صورة متداولة عالمياً تعبر عن طموح الدولة. كما يقدم المبنى خطاباً ثقافياً متعدد الأبعاد، موجهاً للداخل كمصدر للفخر الوطني ودعوة للمشاركة في النهضة الثقافية، ويمثل للخارج بياناً معمارياً يعلن عن مكانة الكويت كدولة حديثة وقادرة على المنافسة في المشاريع الثقافية العالمية. يتميز التصميم بكتله الأربع المنكسرة التي تفتح آفاقاً تأويلية غنية، حيث يمكن قراءتها كـ"جواهر" تعكس الثروة الوطنية مستحضرة تراث اللآلئ في الخليج، أو كـ"صخور" ترمز إلى الصمود والتاريخ الحضاري للمنطقة، (الشكل–24). هذه التعددية تخلق خطاباً معمارياً مرناً يخاطب شرائح متعددة. يجمع المبنى بين الأصالة والحداثة، معاداً صياغة الرموز التراثية بلغة معاصرة، مما يجعله أيقونة بصرية قادرة على الحوار مع الذاكرة الجمعية والتطلعات المستقبلية في آن واحد.

الجدول 4. الدراسة التحليلية لدار الأوبرا الكويتية في الكويت

	مستويات الدراسة				محقق	بشكل جزئي	غير محقق
المستوى التركيبي الدلالي	البنية التشكيلية والهيكلية	التكوين الكتلي والشكلي	تجانس الكتل		■		
			هيمنة الأشكال	هندسية	■		
				عضوية			☐
				حرة	■		
			شفافية الكتلة			◘	
		النظام الإنشائي	درجة ظهور العناصر الإنشائية				☐
			التقنيات المستخدمة	تقليدية			☐
				معاصرة	■		
		العلاقات التشكيلية	التوازن		■		
			التناسب		■		
			التكرار			◘	
			التنوع				☐
	المعاني والرموز والاستعارات	المحتوى الرمزي	الرموز المستخدمة	تراثية محلية	■		
				معاصرة	■		
		الاستعارات البصرية	تراثية		■		
			طبيعية			◘	
			تقنية				☐
		الحوار الزمني	تقليد التراث بحرفية				☐
			قطيعة مع التراث				☐

					مستويات الدراسة	محقق	بشكل جزئي	غير محقق
					إعادة صياغة بلغة معاصرة	■		
المستوى التداولي	العلاقة مع المحيط				الانسجام مع السياق العمراني			□
					الاستجابة البيئية		◘	
					التفاعل مع الفضاء العام	■		
	الأداء الوظيفي والتقني				الوظيفة والكفاءة	■		
المستوى التداولي		المواد والتقنيات	نوع المواد	تقليدية				□
				معاصرة		■		
			تكنولوجيا التنفيذ	يدوية				□
				تصنيع رقمي		■		
المستوى التكاملي النقدي	القيم الجمالية والتعبيرية	التناغم البصري			الوحدة والانسجام	■		
					الوحدة والتنوع	■		
					قوة التعبير	■		
					الخصوصية والأصالة		◘	
	الهوية البصرية والرمزية				التميز والأيقونية	■		
					وضوح الرسالة الشاملة		◘	
					تعددية التأويل	■		

الرموز الدلالية:	■ محقق	◘ بشكل جزئي	□ غير محقق

❖ **نتائج الدراسة التحليلية:**

1. يُظهر المستوى التركيبي–الدلالي تدرجاً واضحاً في تطور لغة العمارة الأوبرالية العربية، إذ جسدت دار الأوبرا الخديوية النموذج الكلاسيكي الأوروبي القائم على التناظر المحوري والرموز الغربية دون أي إحالة إلى التراث المحلي، في حين أعادت دار أوبرا دمشق توظيف عناصر الهوية المعمارية العربية –كالأقواس والمشربيات– ضمن مقاربة حداثية متوازنة، أما دارا الأوبرا

الجزائرية والكويتية فتعكسان مرحلة النضج الرمزي التي تجمع بين التشكيل الحرّ والابتكار التكنولوجي، بما يعبر عن هوية هجينة تتجاوز ثنائية الأصالة والمعاصرة.

2. يكشف المستوى التداولي–الوظيفي عن تباين في علاقة المباني بسياقاتها المكانية والاجتماعية، حيث اقتصرت الأوبرا الخديوية على أداء نخبوي محدود بيئياً، بينما حققت دار أوبرا دمشق تكاملاً عمرانياً وانسجاماً مع المناخ المحلي، وصولاً إلى توظيف أكثر تطوراً للتقنيات والتفاعلات الحضرية في الأوبرتين الجزائرية والكويتية، ولا سيما الأخيرة التي تجسد نموذجاً معاصراً للاستدامة والمرونة التشغيلية.
3. أما على المستوى التكاملي – النقدي، يتجسد تحول جوهري في الوعي المعماري العربي، إذ عبّرت دار الأوبرا الخديوية عن خطاب أحادي الاتجاه يرتكز على نموذج التحديث الغربي، بينما حققت دار أوبرا دمشق توازناً دلالياً بين الأصالة والانفتاح المعاصر، لتتبلور في داري الأوبرا الجزائرية والكويتية ملامح ما بعد الحداثة العربية، حيث تتّسم العمارة بتعدد القراءات وبهويّة عالمية متجسدة في إطار مرجعية محلية.

❖ **النتائج والتوصيات:**

1. برزت هيمنة الأشكال الهندسية والكتل المتجانسة كتعبير عن السلطة والهيبة في دور الأوبرا العربية بشكل متعمد كدلالة عن القوة والثبات والسلطة الرمزية التي سعت دور الثقافة إلى تجسيدها، انطلاقاً من دورها كمنابر رسمية تمثل الدولة والهوية الوطنية.
2. اعتمدت دور الأوبرا على إخفاء العناصر الإنشائية خلف واجهات جمالية لإبراز البعد الرمزي والفلسفي والفني، تعبيراً عن هوية ثقافية تمجّد الجمال والفن على حساب التعبير الصريح عن البنية التقنية.
3. بالرغم من سيطرة التراث المعماري المحلي كمصدر أساسي لإلهام المصممين، فقد برز في العقود الأخيرة، وخاصة في دول الخليج، مصدر إلهام موازٍ يعتمد على الاستعارة من الطبيعة (كالكثبان الرملية، الأصداف، الزهور) لربط المبنى ببيئته المحلية وتقديم هوية إقليمية معاصرة.
4. اتسمت معظم دور الأوبرا بعلاقة التنافر والتضاد المتعمد مع المحيط العمراني المباشر. وذلك بهدف تحويل المبنى إلى معلم بارز (Landmark) ذي حضور بصري قوي، يؤكد على أهميته الرمزية.

5. اتصف العديد من دور الأوبرا العربية بعدم اهتمامها في تبني القيم البيئية ومبادئ الاستدامة. ويعزى ذلك إلى تركيز القائمين والمصممين على تحقيق الجانب الجمالي والهوية الشكلية القوية، على حساب كفاءة الطاقة والمواءمة البيئية.
6. شهدت المواد والتقنيات الإنشائية لدور الأوبرا تحولاً واضحاً لمواكبة التطور التقني وإبراز صورة الحداثة، وإن كان ذلك أحياناً على حساب البعد البيئي.
7. اتسم النهج التصميمي السائد حتى نهاية القرن العشرين بالسعي نحو رسالة أحادية تهدف إلى إيصال مغزى محدد ومتفق عليه لجميع المشاهدين، بينما تحول التوجه السائد مع مطلع القرن الحادي والعشرين ليتبنى تصميماً متعدد التأويلات، يفسرها كل متلق وفق خلفيته الثقافية وتجربته الشخصية مما يحول العمل المعماري إلى نص مفتوح على قراءات متعددة.
8. يمكن تقسيم التطور التاريخي لظهور وتطور دور الأوبرا في العالم العربي إلى ثلاث مراحل كبرى، اتسم كل منها بتحولات عميقة على المستويين التصوري والمادي:

- المرحلة الأولى (التبعية والقطيعة)/النصف الثاني من القرن التاسع عشر/:
ساد فيها النمط المستورد من أوروبا، مع قطيعة واضحة مع التراث المحلي، كتعبير عن رغبة النخب في الاندماج في النموذج الحضاري العالمي السائد آنذاك.
- المرحلة الثانية (التأسيس والتأكيد الهوياتي)/فترة ما بعد الاستقلال/:
شهدت نهضة في بناء المؤسسات الثقافية، وعودة واعية إلى التراث كأداة لتأكيد الهوية الوطنية المستقلة.
- المرحلة الثالثة (التهجين والعالمية)/القرن الحادي والعشرين/:
انتقلت العمارة إلى مرحلة أكثر نضجاً، حيث أعيدت صياغة الرموز التراثية بصورة مجردة غير حرفية.

9. يمكن تحديد التحولات في كل مرحلة وفقاً لكل مستوى من مستويات الدراسة بالشكل التالي:

- التعبير عن الهوية: انتقلت هذه الدور من مرحلة التقليد الغربي في بداياتها، إلى محاولات جادة لدمج العناصر التراثية، وصولاً إلى صياغة تعبير أصيل يعكس الهوية المحلية، مما يشير إلى تزايد الثقة في التعبير عن الذات وتطور الأساليب الإبداعية في المزج بين الأصالة والحداثة.

- الوظيفة الثقافية: لم تعد هذه الصروح تقتصر على كونها مسارح لعروض الأوبرا فقط، بل تحولت إلى مراكز ثقافية شاملة تقدم أنشطة متنوعة، وهو ما وسّع من دورها لتصبح منارات فكرية واجتماعية فاعلة.
- الاستعارات المعمارية: فقد تجاوزت النماذج الأولى الاستعارات الغربية البحتة، لتعتمد لاحقاً على استعارات مستمدة من التراث المحلي، ثم تطورت إلى استعارات مركبة تدمج بين الموروث الثقافي وأدوات التعبير المعاصر، مما يعكس تطوراً ملحوظاً في القدرة على توظيف الاستعارات بشكل إبداعي.
- الرمزية: ارتقت الرمزية من التعبير عن الفخامة والعظمة إلى تجسيد الرمزية الوطنية، ثم إلى تبني رمزية عالمية تعبر عن الطموحات الحضارية، مما يدل على نمو في الرؤية الفكرية والقدرة على تقديم الهوية في إطار عالمي.
- البنية التشكيلية والهيكلية: انتقلت من تقليد النماذج الأوروبية الكلاسيكية، إلى محاولات دمج عناصر محلية، وصولاً إلى تصاميم مبتكرة تعكس التقدم التكنولوجي مع الحفاظ على الهوية المحلية.
- الأداء الوظيفي والتقني: تطور من دور مقصور على العروض المسرحية الأساسية، إلى إضافة مرافق تعليمية، ثم التطور التقني وتعدد الاستخدامات، ليصل في مرحلته النهائية إلى صيغة مجمعات ثقافية متكاملة تجمع أحدث التقنيات.
- القيم الجمالية والتعبيرية: ارتقت من الجماليات الكلاسيكية الغربية، عبر محاولات الدمج، إلى صياغة تعبير جمالي أصيل يمزج التراث بالحداثة، وبلورة قيم جمالية مبتكرة تعبّر عن هوية معاصرة وطموحات مستقبلية.

10. انطلاقاً من النتائج السابقة يمكن صياغة التوصيات التالية للمعماريين وصناع القرار عند التخطيط للمشاريع الثقافية الكبرى في العالم العربي:

- تجاوز ثنائية الأصالة والمعاصرة نحو "الهوية الهجينة": توصي الدراسة بتبني منهج "التهجين الثقافي" ، والذي يقوم على تفكيك المفردات التراثية وإعادة صياغتها بلغة وتقنيات معاصرة، ينتج هذا النهج عمارة متجذرة في سياقها وقدرتها على مخاطبة العالم في آن واحد.

- تفعيل الرمزية متعددة الطبقات لخلق نصوص معمارية غنية: بدلاً من الاعتماد على رموز مباشرة وواضحة، مما يثري التجربة الثقافية ويحول المبنى من مجرد وعاء للفن إلى عمل فني بحد ذاته، وهذا يتطلب فهماً عميقاً للسياق الثقافي والتاريخي والاجتماعي للمكان.

❖ **المراجع:**

[1]. ABDEL SABOUR, E. M., & LUONI, S. 2013– Khedivial Cairo: An evolved metabolism. Journal of Civil Engineering and Architecture, New York, 1st ed., 10p.

[2]. ADWAN, Z. 2016– The Opera House in Damascus and the 'state of exception' in Syria, New Theatre Quarterly, Vol. 32, No. 3, 231–243.

[3]. AL–HADIDI, J. 2010– Al–Mimara wal–Hawiya fi Asr al–Awlima (Architecture and Identity in the Age of Globalization). Dar Al–Shorouk, Amman, 1st ed., 280p.

[4]. AL–QASIMI, N. 2015– Al–Mimara al–Arabiya al–Muasira: Bayn al–Asala wal–Hadatha (Contemporary Arab Architecture: Between Authenticity and Modernity). Dar Kanaan, Damascus, 1st ed., 320p.

[5]. BAKHTIN, M. M. 1981– The Dialogic Imagination. University of Texas Press, Austin, 1st ed., 444p.

[6]. BARTHES, R. 1997– Semiotics and the Urban. in Leach, N. (Ed.), Rethinking Architecture: A Reader in Cultural Theory. Routledge, London, 1st ed., 432p.

[7]. BHABHA, H. K. 1994– The Location of Culture. Routledge, London, 1st ed., 285p.

[8]. BURKOWITZ, A. 2019– Auditorium Architecture: New Conceptions, New Projects. DOM Publishers, Berlin, 1st ed., 320p.

[9]. CHING, F. D. K. 2014– Architecture: Form, space, and order. John Wiley & Sons, New Jersey, 4th ed., 448p.

[10]. CORDERY, G. 2021– The Khedive's Opera: Aida and Ismail Pasha's Cultural Europeanization of Egypt, Midwest Journal of Undergraduate Research, Vol. 12, 98–117.

[11]. DE SAUSSURE, F. 1916– Course in General Linguistics. McGraw–Hill, New York, 1st ed., 240p.

[12]. ECO, U. 1997– Function and Sign: The Semiotics of Architecture. in Leach, N. (Ed.), Rethinking Architecture: A Reader in Cultural Theory. Routledge, London, 1st ed., 432p.

[13]. FORSYTH, M. 1985– Buildings for Music: The Architect, the Musician, and the Listener from the Seventeenth Century to the Present Day. MIT Press, Cambridge, 1st ed., 356p.

[14]. FRAMPTON, K. 1983– Towards a Critical Regionalism: Six Points for an Architecture of Resistance, in Foster, H. (Ed.), The Anti–Aesthetic: Essays on Postmodern Culture. Bay Press, Seattle, 1st ed., 172p.

[15]. FRAMPTON, K. 1995– Studies in Tectonic Culture. The MIT Press, Cambridge, 1st ed., 430p.

[16]. FRAMPTON, K. 2007– Modern Architecture: A Critical History. Thames and Hudson, London, 4th ed., 376p.

[17]. HOBSBAWM, E., & RANGER, T. (Eds.). 1983– The Invention of Tradition. Cambridge University Press, Cambridge, 1st ed., 320p.

[18]. JENCKS, C. 1985– The Language of Post–Modern Architecture. Rizzoli, New York, 1st ed., 120p.

[19]. JODIDIO, P. 2015– Zaha Hadid: Complete Works 1979–Today. Taschen, Cologne, 1st ed., 664p.

[20]. KHALAF, S., & SAQQAF, A. (Eds.). 2013- Al-Madina al-Arabiya: Tabaeuha wa Turatheha al-Thaqafi al-Islami (The Arab City: Its Character and Islamic Cultural Heritage). Islamic Educational, Scientific and Cultural Organization (ISESCO), Rabat, 1st ed., 450p.

[21]. MCKINNEY, J., & PALMER, S. 2017- Scenography expanded: An introduction to contemporary performance design. Bloomsbury Publishing, London, 1st ed., 272p.

[22]. MEAD, C. C. 1991- Charles Garnier's Paris Opéra: Architectural Empathy and the Renaissance of French Classicism. Architectural History Foundation, New York, 1st ed., 240p.

[23]. MERHI, M. 2024- The Homecoming Readings on Theater inside Syria, Regards, Vol. 32, 23-103.

[24]. MILES, M., & PADDISON, R. 2005- Culture-Led Urban Regeneration. Routledge, London, 1st ed., 272p.

[25]. MOHAMED, E. G. E. D. 2018- Titanium envelope: Towards iconic projects to change the image of Kuwait City, Sheikh Jaber Alahmad Cultural Center, Journal of Engineering Sciences, Assiut University, Faculty of Engineering, Vol. 46, No. 2, 181-198.

[26]. MOHAMED, H. G. A. A. S. 2019- Problematics of recoverable missing historical buildings "Applied on Egyptian Royal Opera House", International Journal of Multidisciplinary Studies in Heritage Research, Vol. 2, No. 1, 1-8.

[27]. NORBERG-SCHULZ, C. 1980- Genius Loci: Towards a Phenomenology of Architecture. Rizzoli, New York, 1st ed., 213p.

[28]. PEIRCE, C. S. 1931–1958– The Collected Papers of Charles Sanders Peirce. Harvard University Press, Cambridge, 1st ed., 8 Volumes.

[29]. PETROCELLI, P. 2019– The evolution of opera theatre in the Middle East and North Africa. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle, 1st ed., 195p.

[30]. ROTH, A. 1967– *Le théâtre algérien de langue dialectale 1926–1954*. François Maspero, Paris, 1st ed., 220p.

[31]. SHAHEEN, I. 2019– Al-Tahawul al-Imrani fi Dubai: Min Qariya ila Madina Aalamiya (Urban Transformation in Dubai: From a Village to a Global City). Emirates Center for Studies and Research, Abu Dhabi, 1st ed., 300p.

[32]. SZVÉTEK-PALLA, A. (Series Ed.). 2022– Publications of the Office of the Hungarian Cultural Counsellor in Cairo 2020–2021: Egypt in the Current Research of Hungarian Arabists, Office of the Hungarian Cultural Counsellor in Cairo, Vol. 1, 150p.

[33]. UTZON, J. 2002– Sydney Opera House: A Personal Presentation by Jørn Utzon. Editions Blondal, Copenhagen, 1st ed., 96p.

[34]. VALE, L. J. 1992– Architecture, Power, and National Identity. Yale University Press, New Haven, 1st ed., 254p.

المواقع الإلكترونية:

[35]. JACC. (n.d.).– Home [Website]. Retrieved October 9, 2023, from https://www.jacc-kw.com/ar/

[36]. ALGIERS OPERA. (n.d.).– Home [Website]. Retrieved October 2, 2023, from https://operaalger.dz/ar/

دراسة في الطرق التخطيطية لتصميم الأقواس والركائز الحجرية

د.م تراث غريب[1]

1 : مدرس في كلية الهندسة المدنية قسم الهندسة الإنشائية

ملخص البحث

يقدم هذا البحث دراسة في الطرق التخطيطية المعتمدة في تصميم المنشآت الحجرية الحاوية على عناصر قوسية والمستندة على ركائز جانبية. تم تعريف الأقواس لأنظمة انشائية حجرية مختلفة حيث تتعرض الركائز الحاملة للأقواس الحجرية لاجهادات داخلية مختلفة. يحصل انهيار الأقواس الحجرية عندما يخرج خط الضغط من سماكة القوس و يمس سطحه الداخلي أو الخارجي مسبباً دوران أو انزلاق القطع الحجرية في المفصل. هذا الانهيار يحصل مع تشكل عدد كاف من المفاصل.

بينت الدراسة أن طريقتي حساب سماكة الأقواس في العقود تعطيان قيم متقاربة من أجل الأقواس بالسماكات الدنيا عند المستوي 30°. فبلغ الفارق قيمة وسطية تساوي 8.1%.ويزداد الفرق بين طريقتي حساب سماكة الأقواس عند مضاعفة السماكة فبلغ الفارق قيمته العظمى عند مستوي المولد ووصل إلى 60%. كما بينت الدراسة أن معظم الطرق التخطيطية المعتمدة لتحديد عرض الركائز لاتأخذ بالاعتبار أثر ارتفاع الركيزة في تحديد السماكة.

كلمات مفتاحية:

المنشآت الحجرية ، أقواس ،الركائز، الدفع الجانبي، خط الضغط، العقود الحجرية، استقرار.

A study in Geometric Methods of Designing Masonry Arches and buttresses

Dr. Turath Gharib[1]
1: doctor in structure departement, Faculty of Civil Engineering

Abstract

This research presents a study of the geometrical methods used in the design of masonry structures containing arches and supported by buttresses. A definition of arches in different structural masonry systems were studied where the buttresses are subjected to different cases of internal stresses. The failure of masonry arches happens when the thrust line goes out of the thickness and becomes tangent to the intrados or extrados causing rotation or glissement of voussoirs in the hinge. This failure is accompanied with a sufficient number of singes.

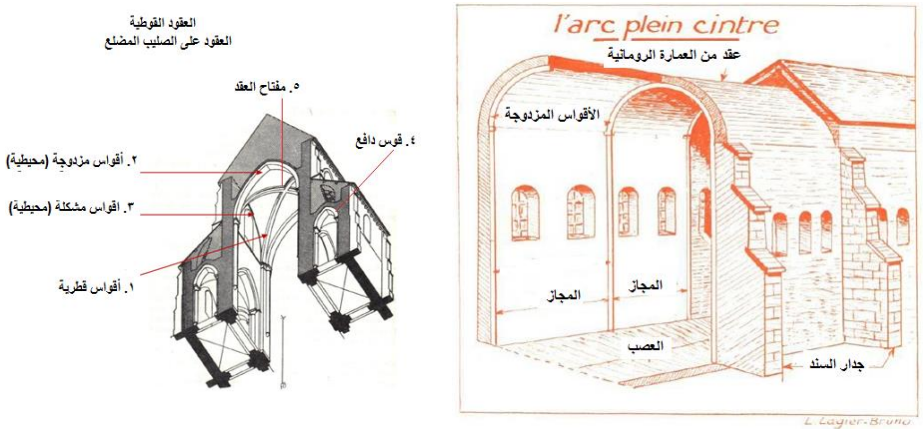
The study showed that the two methods used in determining the thickness of arches in vaults give similar results in arches with minimum thickness in the 30° of the springing line. The difference is 8.1%. This difference increase and reaches 60 % in the springing line. The study revealed that most geometric methods used in determining the large of buttresses do not take in account the height of buttresses.

Key words:
Masonry structures, Arches, buttresses, lateral forces, thrust line, vaults, stabilization.

1- مقدمة البحث:

يعرف المنشأ الحجري بأنه تجمع للقطع الحجرية مع أو بدون مادة رابطة. يتأثر السلوك الميكانيكي لهذه المنشآت بحد كبير بالخواص الفيزيائية والميكانيكية للمواد المكونة، وبهندسة الإنشاء وطبيعة الأحمال المطبقة. ميكانيكياً ، يملك المنشأ الحجري خصائص غير متساوية في كل الاتجاهات وتعتبر العناصر الانشائية الحجرية ذات مقاومة على الضغط أما مقاومتها على الشد فهي مهملة. تعتبر المنشآت الحجرية من أقدم الجمل الانشائية، في القلاع والقصور والمدارس، الكنائس، الجسور، الأسواق، وغيرها. ومع تطور العصور وتطور المعرفة الهندسية، تغير أسلوب البناء وتم الاعتماد على عناصر هندسية جديدة لم تكن تستخدم من قبل لتأمين النقل الآمن للأحمال والحفاظ على استقرار المنشآت. وهذا ما نجده على سبيل المثال بتتبع تطور العمارة الأوروبية من الرومانية الى القوطية ثم عمارة عصر النهضة .

ولكن يقابل تلك التغيرات في الطبيعة المعمارية، كازدياد ارتفاع المباني ووجود نوافذ كبيرة ومتعددة الحاجة الى استخدام القبوات المستندة على جملة من الأقواس الطرفية و القطرية والمحمولة على أعمدة حجرية أو جدران، ونظراً لنحافة هذه العناصر وتعرضها لأحمال كبيرة مائلة كان لابد من وجود عناصر سند جانبي كالأكتاف من الجدران أو الأقواس كما موضح في الشكل (1).



(b) (a)

الشكل (1): العناصر المؤلفة للعقود الحجرية الرومانية [7] و القوطية [4]

2- المشكلة العلمية ومبررات البحث:

إن أهمية المنشآت الحجرية الثقافية والتاريخية والمعمارية وضرورة استمرارية أدائها حتى يومنا هذا يثبت أهمية الحفاظ عليها نتيجة الأحمال المختلفة التي تتعرض لها.

منذ القديم استعمل البناؤون القواعد الهندسية لتصميم الأقواس. ومن أجل شكل محدد للقوس تكون السماكة متعلقة بالمجاز. هذا التصميم نسبي غير معتمد على مقياس البناء أي أن النسبة الواحدة للسماكة /المجاز تطبق للمجازات من 10 إلى 100 متراً. كما تم استخدام قواعد نسبية من النوع ذاته للمشكلات الأكثر تعقيداً مثل استخدام عناصر السند الخارجي للعقود المتقاطعة.

يتولد في القوس خط ضغط (عبارة عن الخط الواصل بين مراكز قوى الضغط التي تؤثر بها كل قطعة حجرية على التي تليها) بسبب الوزن الذاتي للأحجار مسببة قوى مائلة والتي يتم نقلها عبر القطع الحجرية أسفل نقاط استناد القوس في نقطة (Springer).

تملك هذه القوى المائلة مركبة شاقولية ومركبة أفقية. تزداد المركبة الشاقولية ابتداءً من حجر المفتاح (Key stone) في الأعلى إلى نقاط استناد القوس (Springer). ولكن المركبة الأفقية تبقى ثابتة عبر القوس محققة التوازن للقوى الأفقية. إذاً يتولد في نقطة استناد القوس قوة مائلة يجب أن يتحملها الجدار الساند. إن التصميم الانشائي للعمارة الحجرية يتعامل مع مسألتين أساسيتين : تصميم الأقواس وتصميم العناصر الساندة التي ستتحمل القوى المنقولة إليها من الأقواس.

إن محور هذا البحث هو دراسة في استقرار الأقواس الحجرية وميكانزمات انهيارها واستعراض طرق تحليلية وتخطيطية لتصميم الأقواس الحجرية وركائزها وذلك بتغير الارتفاع وقطر الأقواس.

3- هدف البحث:

دراسة إنشاء الأقواس والعقود الحجرية وطرق انهيارها والطرق التخطيطية لتصميم الأقواس والركائز الحجرية.

4- الدراسة المرجعية:

سوف نستعرض بعض الأبحاث التي اهتمت بدراسة تصميم واستقرار المنشآت الحجرية:

1- كان أول من تطرق للمسائل الانشائية بطريقة علمية Galileo عام 1638 ووجد أن الاجهادات الداخلية تزداد بشكل خطي مع المقياس ولذلك يجب أن تصبح العناصر الانشائية

أكثر سماكة بشكل متناسب مع ازدياد المقياس. ولكنه تطرق لموضوع المقاومة فقط في حين أن مسألة الاستقرار للأقواس الحجرية يتحكم بها الشكل الهندسي بشكل أساسي.[3]

2- اقترح هوك عام 1678 قوس السلسلة catenary arch وذلك بهدف الحصول على قوس يطبق دفعاً أصغرياً على الركائز. وسمي هذا القوس أيضاً بمنحني الوتر المعلق (funiculaire) وهو ذو شكل مأخوذ من سلسلة حلقات أو خيط مرن نحيف جداً متجانس وغير قابل للشد معلق بين نقطتين. يمتاز هذا القوس بأن خط الضغط يكون مركزياً تماماً فيه وهو ما لايمكن أن يتحقق في بقية الأنواع من الأقواس.

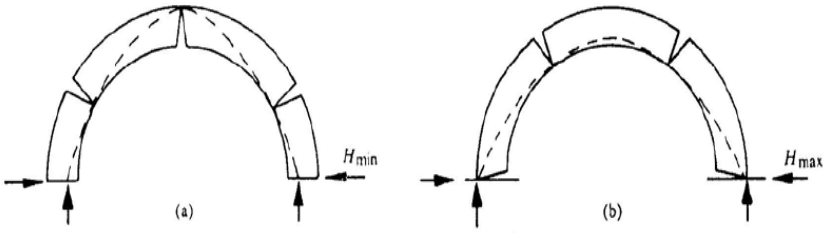
3- يعتبر التحليل المرن للأقواس منطقيا حيث يتم كتابة معادلات التوازن ومعادلات التشوه المرن التي تربط بين التشوهات والقوى الداخلية ، ويتم تعريف الشروط الطرفية.[1]

4- وفي القرن التاسع عشر بدأ البحث عن فرضيات أكثر أماناً في تصميم الأقواس، لايؤمنها التحليل المرن. [1]. وتم اعتماد الفرضيات التالية للقيام بتحليل حدي للمنشآت الحجرية. فللعنصر الحجري مقاومة ضغط لانهائية وهو لا يملك أي مقاومة للشد كما تفترض أن الانهيار لا يحصل بسبب الانزلاق بين الحجر والملاط. تعتمد نظرية التحليل الحدي بشكل أساسي على توازن وحدة البناء ضمن المنشأ الحجري عن طريق خط الضغط (Thrust line). حيث يعرف خط الضغط بأنه خط منحني يصل بين النقاط التي تكون على سطوح الارتباط بين الحجر والملاط بموقع تتحصل عنده القوى الضاغطة الداخلية الناقلة للأحمال الخارجية بحيث يتم التوازن. فقد اعتبر رانكين 1858 أنه يجب أن يمر خط الضغط في الثلث الوسطي للمقطع ليكون القوس آمناً [1].

ووفق التحليل الحدي يصل المنشأ للانهيار عندما يوجد خط ضغط واحد على الأقل يقع كلياً ضمن الحجر لكنه يسمح بتشكيل عدد كافي من المفاصل تؤدي لتشكل ميكانزم انهيار.كما في الشكل(2).

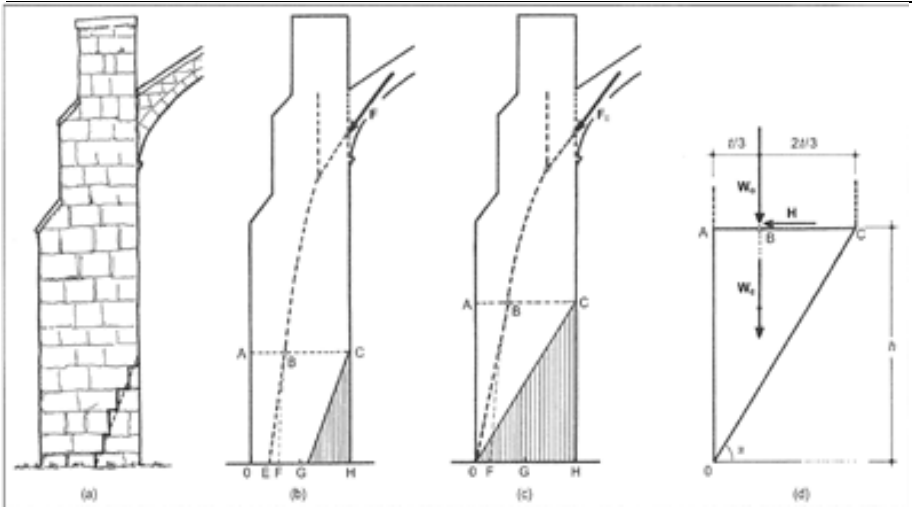
5- تم تطوير نظرية التحليل الحدي وايجاد نظرية حالة الأمان. تأخذ نظرية حالة الأمان بعين الاعتبار أن القوى الداخلية المتوازنة للقطع الحجرية والموجودة داخل القوس يجب ألا تسبب أي ضرر بمادة البناء. فلقد طور دوراند كلاي 1867 Durand-Claye طريقة لتحليل الأقواس الحجرية تسمى طريقة مناطق الاستقرار [13]. وبحسب Durand-Claye يتم

البحث عن منطقة مرور خط الضغط في المقطع والتي تتحدد بشروط التوازن والاحتكاك والمتانة للقطع الحجرية . تعتبر هذه الطريقة وسطاً بين الطريقة الحدية و المرنة وهي تتضمن بداخلها شروط الاستقرار لكل من Persy,Navier and Michon . ووفق طريقة Durand-Claye إذا لم يكن هناك منطقة مشتركة محققة لهذه الشروط فإن القوس لا يقبل بأي حل التوازن. وإذا تم اختصار هذه المنطقة إلى نقطة واحدة فهناك حل توازن وحيد أما إذا كانت المساحة المشتركة كبيرة جداً فهذا يدل على أن أبعاد القوس أكبر من اللازم.



الشكل (2):التوضع الحدي لخط الضغط في قوس نصف دائري يخضع لوزنه الذاتي 1995Heyman :a (minimum Thrustline) أو b :(Maximum thrust line). [1]

6- تجدر الإشارة إلى أنه يجب الاهتمام بانتقالات ركائز الأقواس والعقود الحجرية بشكل كبير أيضا لأنها قد تكون سبباً اخر لانهيار الأقواس عبر تغير موقع خط الضغط . بينت الدراسة [2] أن الدور الأساسي للركائز هو تحمل خط الضغط في الأقواس والعقود وتحمل أحمال الرياح. وبسبب الارتفاع الكبير لركائز المنشآت الحجرية فإن قيودا أكبر توضع على مكان مرور خط الضغط من القيود المعتمدة في تصميم الأقواس. إن اعتماد عامل الأمان الهندسي الذي يسمح لخط الضغط بالبقاء ضمن منتصف الثلث الوسطي من العنصر الحجري وذلك لتجنب الاجهادات الشادة في قواعد الركائز لا يعتبر كافيا لتحقيق الاستقرار. يبين الشكل (3) تحطم ركيزة والذي يمكن أن يحصل بشكل جزئي أو بشكل تام.



الشكل (3): صورة تحطم ركيزة بشكل جزئي أو بشكل تام. [2]

وبشكل عام عام تنهار الأقواس الحجرية بدوران جزء من القوس حول حافة المفصل أو انزلاق قسم من القوس على الآخر أو على المساند أو بالتحطم. ويوجد عاملين رئيسيين يؤثران على نمط انهيار الاقواس الأول يتعلق بصلابة الركائز والآخر يتعلق بتناظر الأحمال الخارجية المطبقة [8]. فعندما تكون الركائز قليلة الارتفاع وذات صلابة عالية (أي نسبة ارتفاعها إلى عرضها أصغر من الواحد) يكون نمط الانهيار محلياً (Local Mechanism) حيث يحصل انهيار محلي للقوس فقط بتشكل المفاصل الاربعة ضمن جسم القوس، دون ظهور أي مفصل في الركائز. أما عندما تكون الركائز نحيفة وقليلة الصلابة يكون نمط الانهيار عاماً (Global Mechanism) [9].

7- تختلف قواعد البناء بحسب تطور عصر العمارة فنجد ركائز من جدران ذات سماكة ثابتة أو متغيرة بدون عناصر سند. ففي العمارة الرومانية نجد ركائز من جدران (قد تحوي فتحات صغيرة) مع عناصر سند، ثم ظهرت ركائز تحوي فتحات كبيرة و مزودة بعناصر سند جانبي في العمارة القوطية. ففي العمارة القوطية يؤخذ عمق الجدار الساند مساويا لربع المجاز. في حين تم اعتماد عمق الجدار في عصر النهضة يتراوح من ثلث إلى نصف المجاز. وكانت العقود في عصر العمارة القوطية أقل وزنا من العقود الحجرية في عصر النهضة.

5-العناصر الحجرية Masonry:

تتصف المنشآت الحجرية باستخدام مواد طبيعية في الإنشاء فتكون كلفة المواد قليلة وذات ديمومة ومقاومة للحرارة وعازلة للصوت.إلا أن من أهم سلبياتها الوزن الذاتي المرتفع ومقاومتها الضعيفة على الشد.

الوحدة الحجرية : تختلف المواد المكونة للوحدات الحجرية فيمكن أن تكون من مواد مختلفة صخرية أومن القرميد المصنع بالشوي أووحدات بيتونية . ويؤدي هذا الاختلاف الى اختلاف في خصائصها الفيزيائية و الميكانيكية. كما يمكن أن تكون بسطوح مسواة أو غير مسواة. كما أن الأحجار الكبيرة و ذات المقاومة العالية تستخدم لأساسات المنشأ الحجري و للزوايا في المنشآت لأنها تكون عرضة للصدم. ويمكن لتجمع القطع الحجرية أن يكون منتظماً أو غير منتظم[10].

الملاط : يعتبر الكلس والجبس من المواد الرابطة التي تتصلب في الهواء والتي استعملت منذ القدم . فقد استخدم المصريون القدماء الكلس وكذلك وجد في آثار الرومان واليونان. يمتاز الكلس المائي عن الكلس الهوائي بوجود شوائب من الغضار بنسبة أعلى تتراوح بين 6_20 %. يتصلب الكلس في درجات الحرارة العادية من خلال تفاعل الكلس المطفأ $Ca(OH)_2$مع غاز ثنائي أكسيد الكربون CO_2ويساعد مزجه مع الرمل في الحصول على بنية أكثر مسامية وعلى سهولة وصول غاز CO_2 الى المزيج وبالتالي تزداد سرعة التصلب.

يستخدم الملاط الكلسي المكون من جزء كلس و 3–4 أجزاء رمل مع كمية كافية من الماء. أما الملاط الاسمنتي الكلسي فيمكن تشكيله بخلط جزء من الاسمنت مع جزء من الكلس و6–8 أجزاء من الرمل مع كمية كافية من الماء. وبالرغم أن الملاط الكلسي الاسمنتي لا يبلغ من القوة سوى ثلثي قوة الملاط الاسمنتي الا انه أكثر لدونة والعمل به أسهل. بمكن لسطوح الانهيار أن تتشكل في الملاط الرابط كما يمكن أن يحصل الانهيار بانفصال جزئي أوكلي للملاط عن الحجر أو بتحطم الحجر[10]. يسعى البناؤون لجعل أحجار البناء متلاصقة بحيث تترك بينها أقل فراغ ممكن و يتم ملؤه بالملاط وذلك لضمان أن يتشكل الانهيار في الملاط الرابط. وفي حال غياب المادة الرابطة يوصف سطح ارتباط بين الأحجار بالجاف.

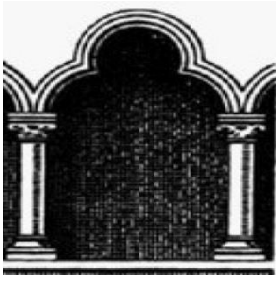
6– الأقواس في العمارة :

مهما اختلف شكل القوس معماريا فإنه يتألف من شكل منحني بسيط أو أجزاء من منحنيات أو دوائر متقاطعة. فالأقواس ثلاثية الأوراق arcs trilobés المتواجدة في الواجهة الشرقية لكنيسة

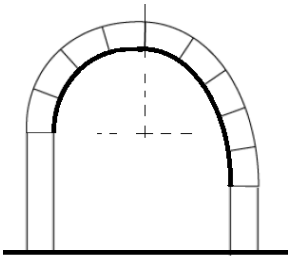
كوردو مكونة من هذا النوع من الأقواس. تتصف شكلها الهندسي بأنها مكونة من ثلاثة أقواس دائرية مراكزها هي رؤوس لمثلث متساوي الأضلاع، ونقاط تلاقي الأقواس العليا تنتمي لخطوط المتوسطات لذلك المثلث.

أما الأقواس الصاعدة arc rampant فتتولد بارتفاعين غير متساويين وتستخدم عند الربط بين عمودين غير متساويي الارتفاع بواسطة قوسين دائريين. وتتشكل هذه الأقواس بأساليب مختلفة كأن يحقق القوسان الشرط بأن يكون المماس المشترك لهما في نقطة الالتقاء أفقياً الشكل أو أن تقع نقطة الالتقاء للقوسين الدائريين على مسافة أفقية متساوية من كل عمود أو أن تتوضع مراكز كل من الدائرتين في مستوي محدد لكل منهما. كما أن بعض الأقواس المنحنية تتشكل من منحنيين لهما تقعرين متعاكسين arc en accolade. يمكن للقوس السفلي أن يكون دائريا أما العلوي فهو قوس دائري أو منحني من الدرجة الثالثة كما في الشكل (4).

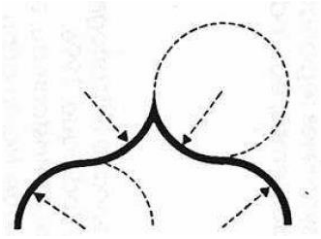
كما نذكر أيضا القوس نصف الدائري (Plein–cintre) والأقواس المدببة (Ogive)(بثلاث نقط أو اكثر ضيقاً أو أوسع) والقوس السلسلة (Catenry) والذي يشكل منحني سلسلة معلقة بين مسندين. القوس مقبض (Anse de panier) السلة يتشكل من نصف قطع ناقص وله ثلاثة مراكز .القوس المسدود يتكون من جزء مسطح يصل ربعي دائرة نصف قطر كل منها أكبر من خمس مجاز القوس. وبشكل عام نعرف القوس أو العقد الذي ارتفاعه أصغر من نصف مجازه L على أنه قوس منخفض (surbaissé) أما عندما يزيد ارتفاع القوس عن نصف مجازه يعتبر بأنه قوس مرتفع (outrepassé) . علماً أن تناقص ارتفاع القوس نسبة إلى مجازه يزيد من الدفع الأفقي للقوس على الركائز. [5]



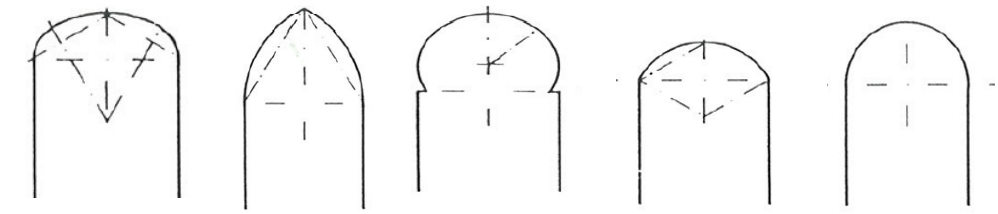
الأقواس ثلاثية الأوراق



الأقواس الصاعدة



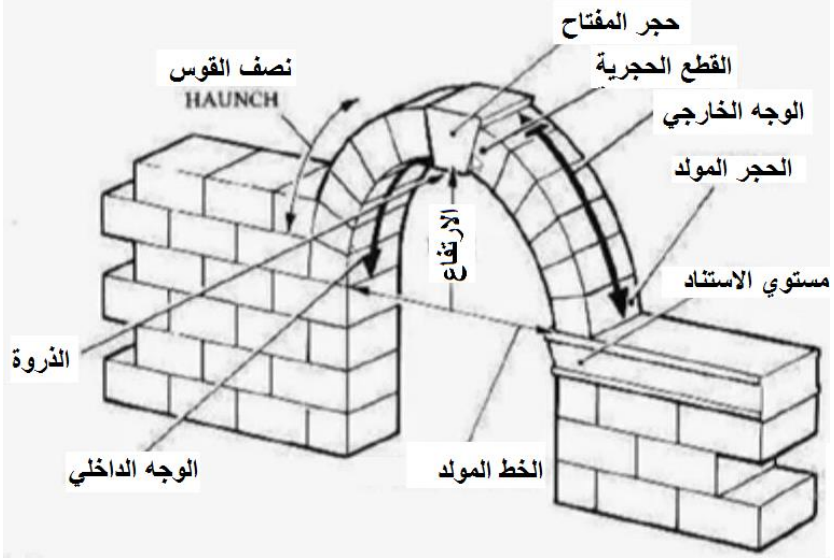
الأقواس المنحنية



الشكل (4): أشكال الأقواس الحجرية [5]

يسمى الحجر الموجود في قمة القوس بحجر المفتاح (Keystone) أما باقي الأحجار المقصوصة الحواف المكونة المشكلة لمنحني القوس (Voussoir) . يكون الحجر الأول في مستوى الاستناد للقوس(Springer) ذو سطح مائل يسمى Skewback ، أما مسقطه الأفقي عند الجزء العلوي لركيزة الاستناد فيسمى Inpost.

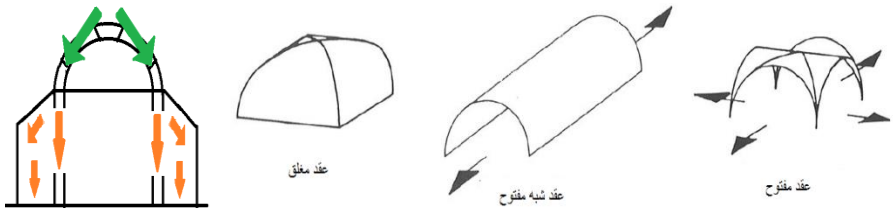
يسمى الوجه الداخلي للقوس (Intradose) أما الوجه الخارجي للقوس (Extradose) و تسمى أعلى نقطة على هذا الوجه (Crown). يعرف ارتفاع القوس (Rise) بأنه المسافة العمودية بين أعلى نقطة على الوجه الداخلي(Intradose) والخط الأفقي الواصل بين نقطتي بداية القوس المنحني المسمى خط مجاز القوس (Springing line). أما المجاز (Span): هو المسافة في الضوء بين الدعامتين. الشكل (5)



الشكل (5):عناصر الأقواس الحجرية

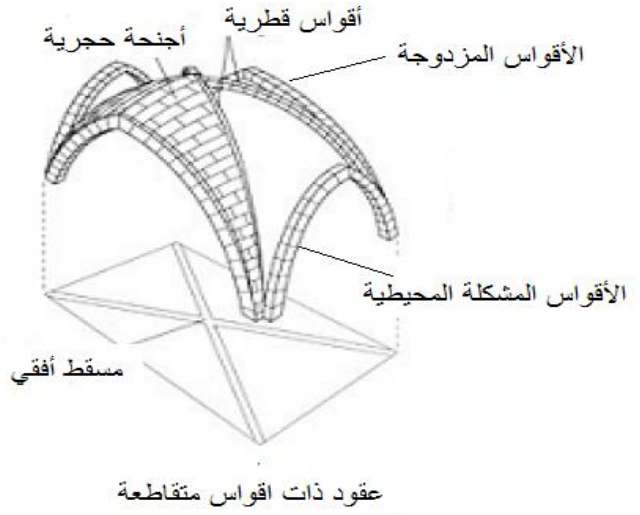
8- العقود الحجرية:

تتألف العقود الحجرية في العمارة الرومانية من الأقواس المتتالية التي تعطي الامتداد الافقي للعقد فتسمى الأقواس المزدوجة doubleau . وتستند هذه العقود بشكل أساسي على الجدران الجانبية مسببة دفعاً كبيراً في حين أن الاقواس المزدوجة تتحمل جزءً قليلا من الأحمال. وتمتاز هذه العقود بمحدودية فتحات النوافذ أسفل منها بسبب استنادها على الجدران ذات الوزن الكبير[7] كما موضح في الشكل (6).



الشكل (6): العقود الحجرية في العمارة الرومانية

أما العقود الحجرية في العمارة القوطية [6] فتتألف من أقواس حجرية يختلف دور كل منها عن غيره. فالأقواس المزدوجة المحيطية (الموجودة في أسفل الوجه الداخلي للعقد الحجري) تعطي الامتداد الافقي للعقد ولذلك تسمى المزدوجة doubleau .والأقواس المشكلة المحيطية (الموجودة على امتداد الجدران) تحدد الشكل الهندسي للعقد الحجري ولذلك تسمى المشكلة formeret . والأقواس القطرية (عبارة عن قوس أو جزء من قوس) تشكل أعصاباً تمر من مفتاح العقد وتستند على نفس المستوي الذي تتولد منه الأقواس المذكورة سابقاً كما في الشكل (7). وتمتاز هذه العقود بإمكانية وجود فتحات (نوافذ أو أبواب قوسية) أسفل الأقواس المشكلة المحيطية الموجودة على امتداد الجدران.

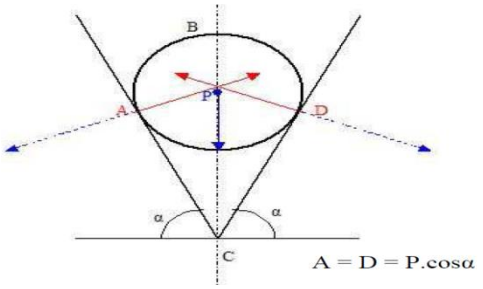


الشكل (7): عناصر العقود الحجرية القوطية [6]

9- مبدأ توازن الأحجار في العقود الحجرية :

يستند تصميم الأحجار voussoirs في العقود الحجرية إلى المبدأ الهندسي التالي : تكون ثلاث قوى متلاقية في نقطة في حالة توازن إذا كانت ذات نسبة متساوية مع أطوال أضلاع المثلث المتعامدة مع اتجاه تلك القوى الشكل (8). واستناداً إلى هذا المبدأ يتم تصميم سطوح الروابط بحيث تكون معامدة لخط الضغط. ويتم اعطاء الدعامات العرض اللازم بحيث يكون العقد في التوازن. تعتمد القوى في العقد على ميل سطوح الروابط وعلى كتلة الاحجار voussoirs .وبالتالي

يتم اختيار أوزان الاحجار voussoirs النسبة الصحيحة التي تتطلبها ميل سطوح الروابط ، لكي تبقى في حالة توازن. [3]"



الشكل (8): توازن القوى على سطوح الارتباط[3]"

10- الطرق المعتمدة في تحديد سماكة القوس:

يتم تصميم الأقواس بحيث يجب أن يبقى خط الضغط في الثلث الوسطي للقوس والدعامة وذلك لتحقيق شرط الأمان. يكون خط الضغط مركزيا فقط في حالة قوس السلسلة Inverted Cetenary Arches . وعندما يمس خط الضغط أحد حواف القوس الحجري تحصل إجهادات شادة على الحافة المقابلة من مقطع القوس تسبب تشكل مفصل انهيار.

تجدر الإشارة إلى أن سماكة الأقواس الحجرية الدائرية المحددة من أجل أقواس حرة يمكن لها أن تختلف في حال كانت القمم محملة بأحمال شاقولية فوق القوس، حيث تسبب هذه الاحمال ارتفاعا للضغط في القوس. وغالباً عند تجاور قوس كبير مع قوس صغير، يتم بناء جدار حجري ثقيل فوق الأقواس الجانبية الصغيرة لتحقق التوازن مع الضغط الكبير القادم من القوس الوسطي الكبير المجاور لها، وبالتالي تنتقل الأحمال بشكل شاقولي في الركيزة المشتركة للقوسين. مما يخفف من عرض الدعامات اللازم لمقاومة الدفع الأفقي وتأمين الاستقرار، ويجب مراعاة شرط المتانة لمقاومة الاجهاد الضاغط الناتج عن هذه الأحمال. ويعطي المرجع [12] علاقات حساب سماكة leالأقواس القرميدية نسبة للمجاز s ومن هذه العلاقات حيث يتم التمييز بين الأقواس العميقة و الرقيقة.

السماكة في القمة	المؤلف	

أقواس قرميدية عميقة	Gauthier (1765)	$e = 0.32 + s/15$
	Dupuit (1870)	$e = (0.20s)^{1/2}$
أقواس قرميدية رقيقة	Dupuit (1870)	$e = (0.15s)^{1/2}$
أقواس قرميدية رقيقة و عميقة	Gauthey (1809)	$e = 0.33 + 0.021s$ $s \in (2 - 16)m$
		$e = 0.042s$ $s \in (16 - 32)m$
		$e = 0.67 + 0.021s$ $s > (32)m$

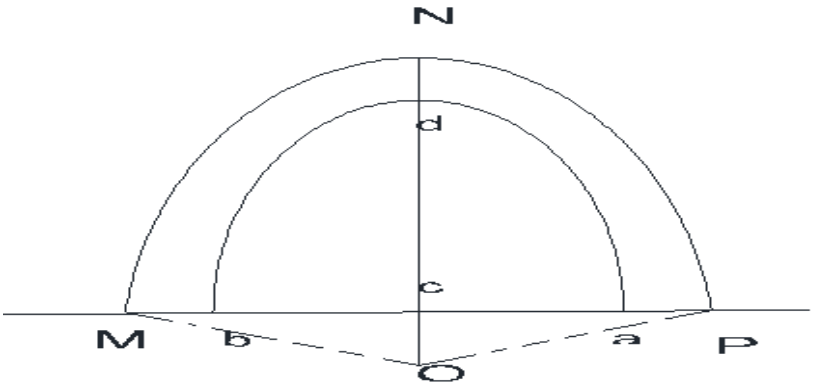
الجدول (1): علاقات حساب سماكة e الأقواس القرميدية نسبة للمجاز s [12]

11- الأقواس في العقود:

يتم اللجوء إلى زيادة سماكة الأقواس نصف الدائرية عند نقاط الارتكاز بهدف التقليل من الأحمال على المفتاح وتحميل الجوانب من أجل حصر القطع الحجرية المتتالية. ويتم هذا الاجراء بطريقتين سيتم التطرق اليهما.

- **زيادة سماكة القوس في العقود بطريقة A :**

1. يتم رسم الوجه الداخلي للقوس intradose ونسميه adb
2. نحدد سماكة القوس t على المفتاح بحيث $dN = t$
3. ابتداء من النقطة C نحدد النقطة O ممدد نصف القطر الشاقولي بحيث $co = \frac{r}{4}$
4. نرسم القوس MNP الذي مركزه النقطة O و نصف قطره ON.

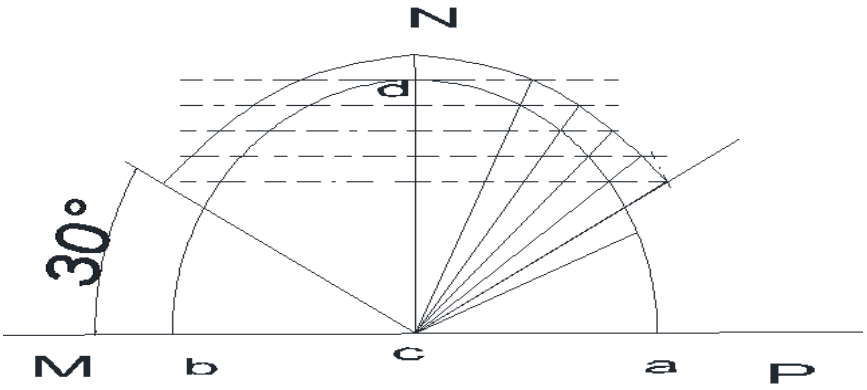


الشكل (10): **الأقواس في العقود: بطريقة A**

نلاحظ من الشكل (10) أنه وباتباع **الطريقة A** يمكن زيادة سماكة القوس البرميلي عند نقاط الاستناد

- **زيادة سماكة القوس في العقود بطريقة B :**

5. يتم رسم الوجه الداخلي للقوس intradose ونسميه adb
6. نحدد سماكة القوس t على المفتاح بحيث $dN = t$
7. نقسم الشاقول cd الى أقسام تساوي السماكة $dN = t$.
8. نمدد خطوطاً أفقيةً عبر هذه التقسيمات، فتقطع الوجه الداخلي للقوس.
9. نمرر أنصاف اقطار عبر هذه النقاط تخرج من المركز c.
10. ان نقطة التقاطع بين ممدد نصف القطر والخط الافقي للتقسيمة الأعلى تشكل النقاط التي سيمر منها منحني السطح الخارجي.
11. نحدد كافة نقاط التقاطع لرسم المنحني الخارجي ونوقف هذا المنحني على نصف القطر الذي يشكل زاوية 30 درجة مع الخط المولد ،
12. نصل نقطة التوقف بخط مائل أو بسلسلة من الاسقاطات على الدعامة والتي نحدد سماكتها تخطيطيا.



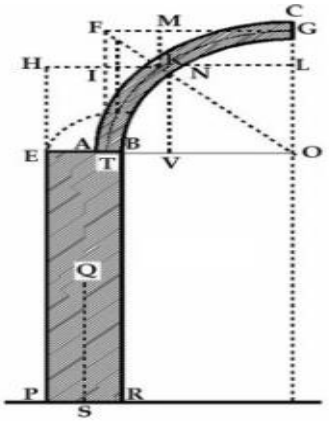
الشكل (11): **الأقواس في العقود : بطريقة B**

كما يعطي المرجع [12] طريقة Rondelet 1832 الذي أعطى علاقة تجريبية لتحديد سماكة القوس $x = EB$ عند مستوي الركيزة التي ارتفاعها a بفرض سماكة القوس في القمة e وفق العلاقة:

$$X = \sqrt{2p + \frac{2pd + ne - 2mc}{a} + \frac{b^2}{a^2}} - \frac{b}{a}$$

$$x = \sqrt{2p + \frac{2pd + ne - 2mc}{a} + \frac{bb}{aa}} - \frac{b}{a}, \quad (1)$$

being $p = mL \times AB$, $a = PE$, $d = EH$,
$x = EB$, $m = MK \times AB$, $n = IT \times AB$
$c = iK$, $e = AB$, $b = m + n$.
The bridge is assumed safe if :
- rise/span ≥ 1/5
- $e \geq s / 17$



الشكل (12): سماكة ركيزة القوس وفق المرجع [12]

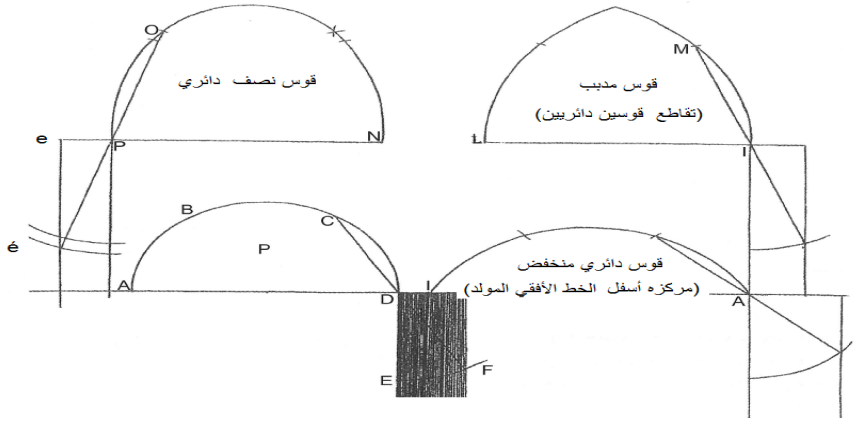
11- الطرق المعتمدة في تحديد سماكة الركائز:

تتنوع طرق تصميم الركائز فمنها طرق تخطيطية ثم تطورت إلى حسابية وهي تهدف لتحديد سماكة الركيزة كنسبة من المجاز. ويجب التأكيد أن هذه الطرق التخطيطية و العلاقات التقريبية تستخدم كدليل موجه للتصميم ويجب دوما التحقق من التصميم .

يتم تصميم الركائز لمقاومة الدفع الأفقي وتأمين الاستقرار ومقاومة الاجهاد الضاغط الناتج عن الأحمال. يمكن أن تسبب الاحمال الكبيرة انهيار جزئي أو كلي للدعامة التي تخضع لحالة اجهادية (ضغط–انعطاف) ويتشكل موشور كلي أو جزئي للانهيار[2]. فتظهر شقوق أفقية في حال كانت المقاومة على القص صغيرة و تظهر شقوق قطرية تعبر الروابط الافقية و الشاقولية[10]. إن القواعد المتبعة في تصميم الركائز للعقود القوطية الخفيفة الوزن قد لايمكن تطبيقها للعقود الحجرية البرميلية الثقيلة المستخدمة في العصور السابقة الرومانية و العصور اللاحقة كعصر النهضة.

11-1 تحديد عرض الركائز للأقواس القوطية:

يتم حساب عرض الركائز القوطية كنسبة من المجاز وتبلغ قيمتها في العمارة القوطية حوالي ربع المجاز[11]. **مبدأ طريقة ديراند** : يتم حساب سماكة الركائز بتقسيم القوس نصف الدائري PN إلى ثلاثة أقسام متساوية (في حالة القوس المدبب يقسم كل نصف قوس في نقطة الثلث). يمدد الوتر OP حتى مستوي الأرض فيتقاطع معها في e. نرسم قوس دائرة مركزه O ونصف قطره OP. يتقاطع القوس مع ممدد الوتر OP فنحصل على النقطة é ، ننشئ شاقولا من é يتقاطع مع ممدد NP في نقطة e تحدد سماكة الدعامة. من مساوئ هذه الطريقة أنها لم تأخذ بعين الاعتبار ارتفاع الركيزة، كما أنه من الخطأ اعتماد هذه الطريقة للعقود الثقيلة ذات الأقواس البرميلية (التي قوسها الداخلي نصف دائرة). يبين الشكل (13) أثر شكل القوس فالأقواس المدببة تتطلب ركائز أقل سماكة من الدائرية في حين تحتاج الأقواس الدائرية المنخفضة سماكة أكبر في الركائز بسبب زيادة الدفع الأفقي فيها.



الشكل (13): طريقة حساب السماكة لركائز الاقواس القوطية طريقة ديراند. [2]

11-2 تحديد عرض الركائز للأقواس في عصر النهضة:

استخدم في عصر النهضة الاقواس البرميلية التي احتوت نوافذ في بعض الاحيان. واصبح تطبيق قواعد بناء الركائز المستخدمة في العمارة القوطية غير مفيدا و خاصة أن وزن هذه العقود يبلغ الضعف تقريبا من أجل المسقط الأفقي ذاته. وتراوحت السماكة للركائز بين $(\frac{\text{المجاز}}{2} - \frac{\text{المجاز}}{3})$. درس (Fray Lorenzo 1639) عرض الركائز في عمارة عصر النهضة وذلك لثلاثة أنواع من العقود الحجرية واقترح القيم المبينة في الجدول (2).

نوع الركيزة			
الجدران مع كتف ساند		جدران بمقطع ثابت	
سماكة الجدار مع كتف السند	سماكة الجدار		
المجاز / 3 ≥	المجاز / 6	المجاز / 3	**عقود من الحجر**
المجاز / 3	المجاز / 7	المجاز / 4	**عقود من القرميد (روابط قطرية)**
المجاز / 4	المجاز / 8	المجاز / 5	**عقود قرميدية (صفين من القرميد تقطع الروابط القطرية)**

الجدول (2): **عرض الركائز في عمارة عصر النهضة لثلاثة أنواع من العقود الحجرية** [2]

يبين الجدول (2) أنه في حال وجود أكتاف ساندة للعقود البرميلية فإنه يجب أن لاتقل السماكة للجدار مع الكتف عن ثلث المجاز (للنوعين الاول و الثاني من العقود) وهذا يتوافق مع قواعد التصميم في عصر النهضة في ايطاليا. في حين تعطي العمارة القوطية نسبة عرض الركيزة الى المجاز بقيمة ¼ أو أقل [2] .

3-11 طريقة **La Hire 1640-1718**: [3]

لم تأخذ هذه الطريقة التخطيطية أبعاد الركيزة بالحسبان ولذلك فإنها تستخدم كدليل موجه للتصميم مع ضرورة التحقق من التصميم . مبدأ الطريقة هو البحث عن مساحة تتوازن مع المساحة MLHh أي تحقق العلاقة:

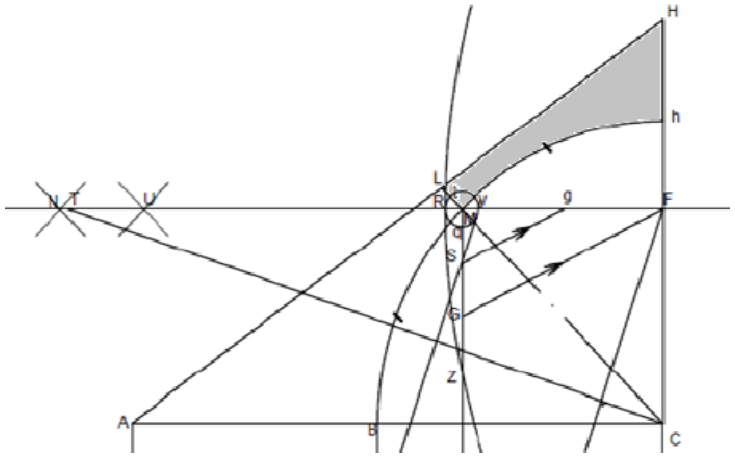
$Mg = MG = \sqrt{\text{المساحة MLHh}}$ (Mgعلى الأفق، MGعلى الشاقول) وخطوات الحل هي التالية:

1)نحدد على الوجه الداخلي للقوس النقطةM بحيث: $BM = Mh$.

2)نصل CM ونصل $t = LM$.

3)نرسم مستقيماً شاقولياً MV. 4) نرسم مستقيماً أفقياً NMW يقطعCH في F.

5)تكون المساحة MLHh مساويةً إلى: مساحة المثلث (LCH)− مساحة ربع الدائرة(MCh).



الشكل (14): طريقة **La Hire** : المساحة MLHh

6)بعد حساب المساحةMLHh، نحسب الجذر التربيعي لها.

7)نحدد على الأفق MF طولاً Mg يساوي الجذر التربيعي للمساحة السابقة، وعلى الشاقولMV طولاًMG أيضاً يساوي الجذر التربيعي للمساحة MLHh.

8)نصل النقطتين GF.

9)نرسم مستقيماً موازياً لـ GF ماراً من g، فيقطع المستقيم الشاقوليMV في النقطة S.

10)نرسم المستقيم VF.

11) نرسم مستقيماً موازياً لـ VF يمر من Sويقطع المستقيم الأفقي MF في النقطةY.

12)من C ننشىء مستقيماً معامداً لـ VF، يقطع المستقيم الأفقي FMN في النقطة T.

13)ابتداءً من النقطة Tنحدد النقطة N بحيث يكون TN يساوي نصف طولMY.

14)ابتداءً من النقطة Nنحدد النقطةU بحيث $NU = PV$.

15)نحمّل على الأفقي مستقيماً FW طوله يساوي طول المستقيم FU.

16)نعتبر M مركز لدائرة نصف قطرها MY، نرسم هذه الدائرة حيث نقطة تقاطعها مع المستقيم الأفقي MN هي R، ونقطة تقاطعها مع المستقيم الشاقولي MV في q.

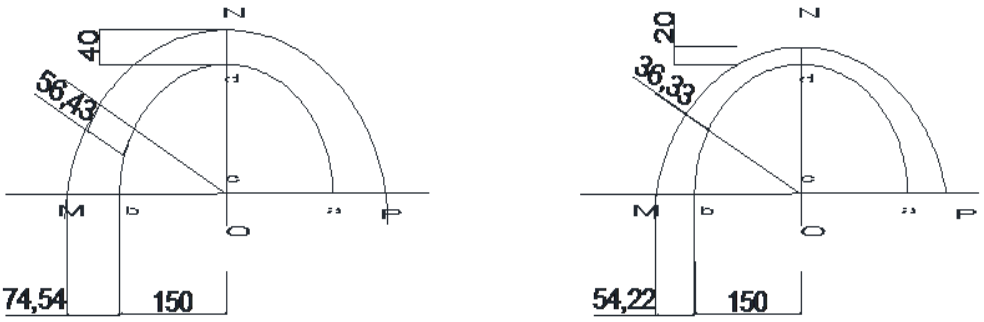
17)نرسم دائرة مركزها W نصف قطرها RW، تقطع الشاقول MV في النقطة Z.

18)يكون طول المستقيم Zq هو الطول الذي نبحث عنه لتحديد سماكة الدعامة BX اللازمة لاستقرار السقف.

12- حساب سماكة القوس في العقود الدافعة:

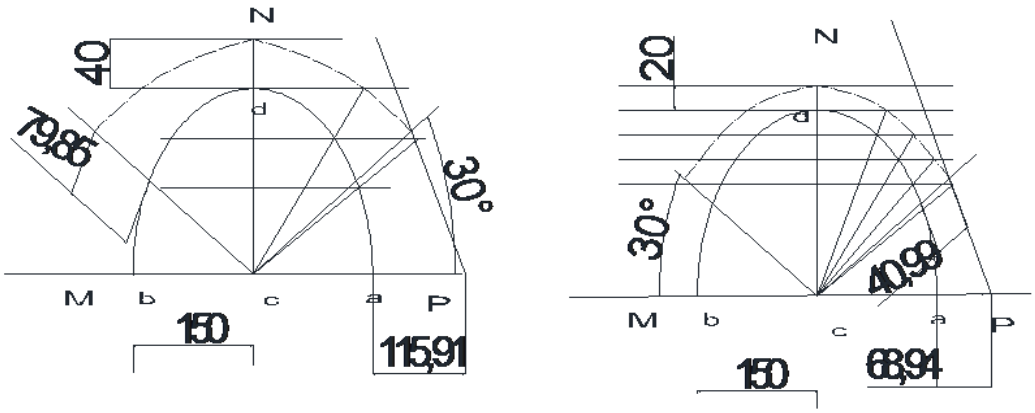
12-1 زيادة سماكة القوس في العقود الدافعة :

تم اتباع الطريقة A لزيادة سماكة القوس البرميلي من 20 cmسم عند المفتاح الى 54.22 cm عند نقاط الاستناد و من 40 cm عند المفتاح الى 74.54 cm عند نقاط الاستناد كما في الشكل (15).



الشكل (15) زيادة سماكة القوس البرميلي بالطريقة **A**

أما باتباع الطريقة B يمكن زيادة سماكة القوس البرميلي من (20 – 40 cm) عند المفتاح الى (40.99 – 79.85) cm على التتالي عند مستوي يصنع زاوية 30 درجة مع الأفق وبتمديد السماكة بشكل خطي يمس المنحني في هذه النقطة نصل إلى سماكة (68.94 – 115.91) cm عند نقاط الاستناد.



الشكل (16) زيادة سماكة القوس البرميلي بالطريقة **B**

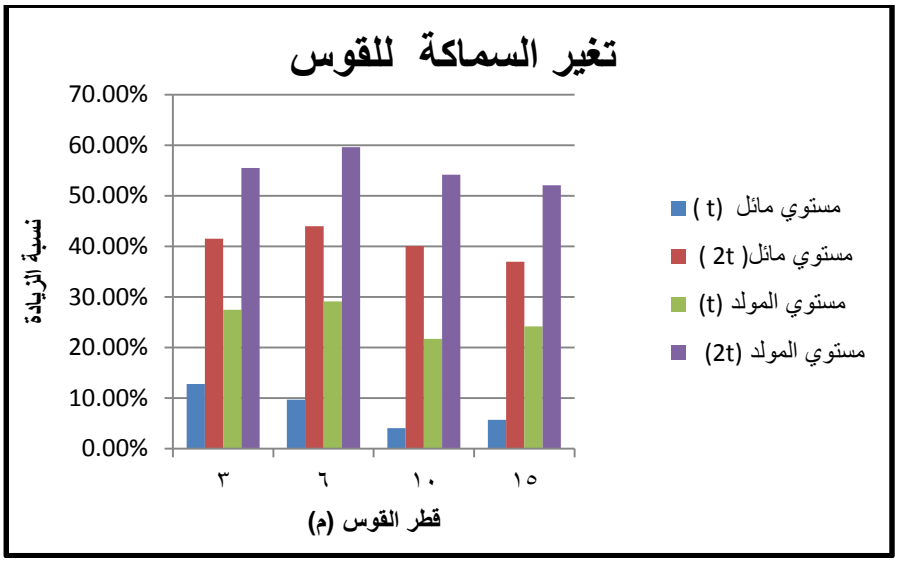
ويبين الجدول (3) تغير قيم سماكات الأقواس ضمن العقد البرميلي المحسوبة وفق الطريقتين عند مستوي الخط المولد ومستوي الزاوية 30 وذلك بتغير سماكة القوس في الذروة و نصف قطر القوس.

رمز النموذج	المتغيرات		سماكة القوس (سم) الطريقة A		سماكة القوس (سم) الطريقة B		السماكة المسموحة للقوس (سم) [12]
			مستوي		مستوي		
	قطر القوس (م)	السماكة عند القمة (سم)	الزاوية 30	الخط المولد	الزاوية 30	الخط المولد	المجاز / 17
A-D3-t	3	20	36.33	54.22	40.99	68.94	17.65
					+12.8%	+27.5%	
A-D3-2t	3	40	56.43	74.54	79.85	115.91	17.65
					+41.5%	+55.5%	
A-D6-t	6	40	72.99		80.04	139.95	35.29

	+29.1%	+9.7%	108.39				
35.29	237.78	162.86	149	113.12	80	6	**A-D6-2t**
	+59.6%	+44%					
58.82	211.53	118.9	173.76	114.18	60	10	**A-D10-t**
	+21.7%	+4.1%					
58.82	361.82	243.9	234.69	174.08	120	10	**A-D10-2t**
	+54.2%	+40.1%					
88.24	323.26	179.2	260.31	169.53	90	15	**A-D15-t**
	+24.18%	+5.7%					
88.24	535.05	356.98	351.71	260.57	180	15	**A-D15-2t**
	+52.1%	+37%					

الجدول (3) تغير قيم سماكات الأقواس ضمن العقود الدافعة البرميلية

بالنسبة للأقواس ذات السماكة الدنيا ، تراوح الفرق بين طريقتي حساب السماكة بين (4.1 – 12.8%) بقيمة وسطية 8.1% عند حساب السماكة المائلة وبين (21.7 – 29.1%) بقيمة وسطية 25.62% عند حساب السماكة الأفقية عند الخط المولد. بالنسبة للأقواس بضعف السماكة، تراوح الفرق بين طريقتي حساب السماكة بين (37 – 44%) بقيمة وسطية 40.65% عند حساب السماكة المائلة وبين (52.1 – 59.6%) بقيمة وسطية 55.35% عند حساب السماكة الأفقية عند الخط المولد.

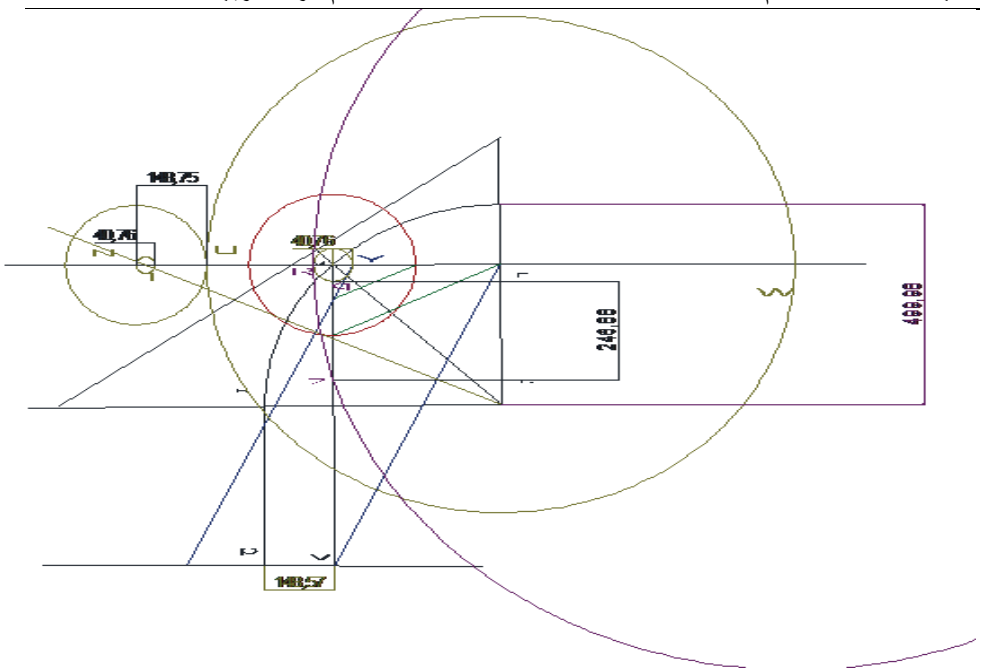


الشكل (17) زيادة سماكة القوس البرميلي بالطريقة **B**

12-2 حساب عرض الركائز:

تم تعيين سماكة الركيزة لعدة أقواس حجرية دائرية حاملة لجدار على امتداد المجاز والسماكة الدنيا تشكل $\frac{R}{10}$ أما السماكة عند القمة فتساوي $\frac{R}{3}$. تم تغيير ارتفاع الدعامة و مجاز القوس بهدف رصد تغير عرض الدعامة اللازمة بتغير أبعاد الجملة الانشائية والمقارنة بين قيم الطريقتين.

يبين الشكل (18) طريقة حساب السماكة للنموذج A-D10-H4 وفق طريقة لاهير وهذا تطلب عرضا اصغريا للدعامة يساوي 2.5مترا وفق لاهير و 2.98 مترا وفق ديراند. حيث أعطت طريقة دولاهير قيما أكبر لعرض الركائز في النماذج ذات المجازات الصغيرة (3-6 متراً) بفارق وصل إلى 59% بينما أعطت طريقة ديراند قيما أكبر للسماكة في في النماذج ذات المجازات الكبيرة (10-15 متراً) بفارق أعظمي وصل إلى 35.6%.



الشكل (18): طريقة حساب السماكة للنموذج **A-D10-H4 وفق طريقة لاهير**

والجدول (4) يبين تغير عرض الدعامة بتغير مجاز القوس الدائري وبتغير ارتفاع الركيزة. حيث تم حساب قيمة عرض الركائز بالطريقتين المذكورتين سابقاً و **هما طريقة لاهير و طريقة ديراند.**

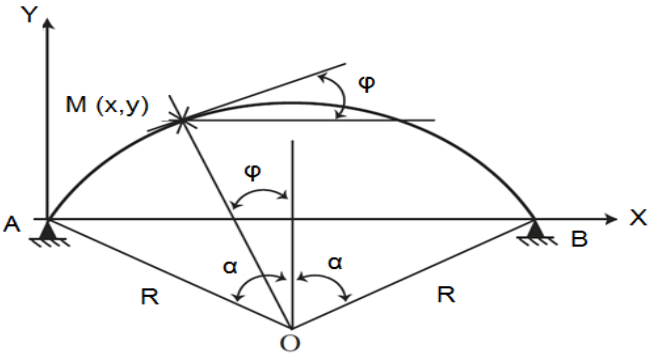
رمز النموذج	المتغيرات		سماكة القوس		عرض الركيزة (م)		
	قطر القوس (م)	ارتفاع الركيزة (م)	السماكة الاصغرية للقوس (م)	السماكة عند القمة (م)	لاهير	ديراند	الفارق %
A-D3-H4	3	4	0.15	0.5	1.21	0.76	59.2
A-D3-H8	3	8	0.15	0.5	1.1	0.75	46.7
A-D6-H4	6	4	0.3	1	1.69	1.51	11.9
A-D6-H8	6	8	0.3	1	1.6	1.51	6
A-D10-H4	10	4	0.5	1.67	2.5	2.97	15.8

1.2	2.57	2.54	1.67	0.5	8	10	A-D10-H8
35.6	6.26	4.03	2.5	0.75	4	15	A-D15-H4
0.8	3.68	3.65	2.5	0.75	8	15	A-D15-H8

الجدول (4) تغير عرض الدعامة بتغير مجاز القوس الدائري وارتفاع الركيزة.

13- حساب القوى الداخلية في القوس نصف الدائري :

لدى دراسة قوس نصف دائري غير مقرر سكونيا ، يمكن حساب الاجهادات والقوى الداخلية فيه وفق ميكانيك الانشاءات والحصول على المعادلات التالية حيث تتغير قيمة الزاوية α من 90 من أجل القوس نصف الدائري إلى قيمة أكبر من الصفر من أجل قوس دائري منخفض.



الشكل (19): قوس نصف دائري بتغير الزاوية α

تم دراسة حالة تحميل بحمل شاقولي موزع بانتظام لقوس مساحة مقطعه A لثلاثة أقواس ، اثنان منها قوس دائري منخفض بزاوية α تساوي 75° أو 60° درجة. والثالث قوس نصف دائري (90°).

تم اعتبار المجاز ثابت و يساوي 10 م ونصف قطر الانحناء 5 م أما سماكة القوس فتساوي 0.6 م وعرض القوس 0.5 م والقوس يخضع لحمل شاقولي موزع بانتظام قيمته 2 t/m. تحسب القوى الداخلية لقوس دائري محمل بحمولة موزعة بانتظام على كامل المجاز بالعلاقات التالية:

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{1}{AR^2} \times \frac{4\alpha}{2\alpha - 3\sin 2\alpha + 4\alpha \cos^2 \alpha}}$$

$$X_A = X_B = \frac{qR}{2} \times \frac{(9 - 4\alpha^2)\sin 2\alpha - 10\alpha \cos 2\alpha - 8\alpha}{2\alpha - 3\sin 2\alpha + 4\alpha \cos^2 \alpha} \gamma$$

$$N(\varphi) = qR\varphi \sin \varphi + X_A \cos \varphi$$

$$M(\varphi) = qR^2(\alpha \sin \alpha - \varphi \sin \varphi + \cos \alpha - \cos \varphi) - X_A R(\cos \varphi - \cos \alpha)$$

$$Q(\varphi) = qR\varphi \cos \varphi + X_A \sin \varphi$$

كما يتم حساب الاجهادات الناظمية الناتجة عن القوى المحورية و الانعطاف.

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{I} y$$

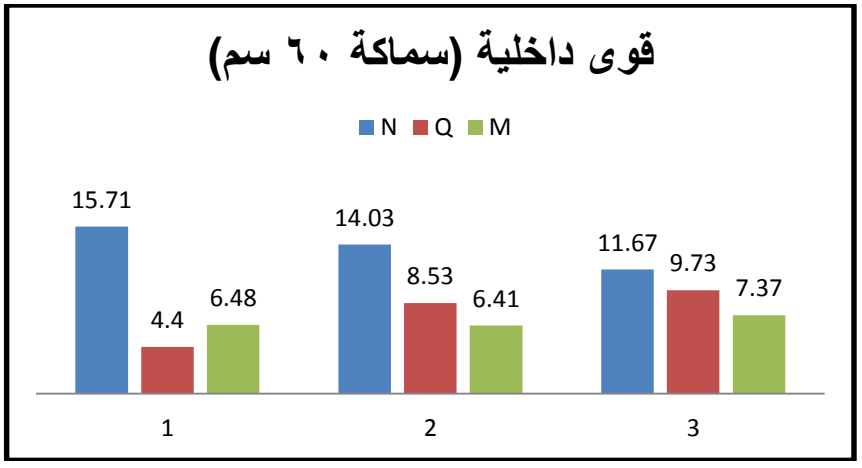
أعطت النتائج مايلي :

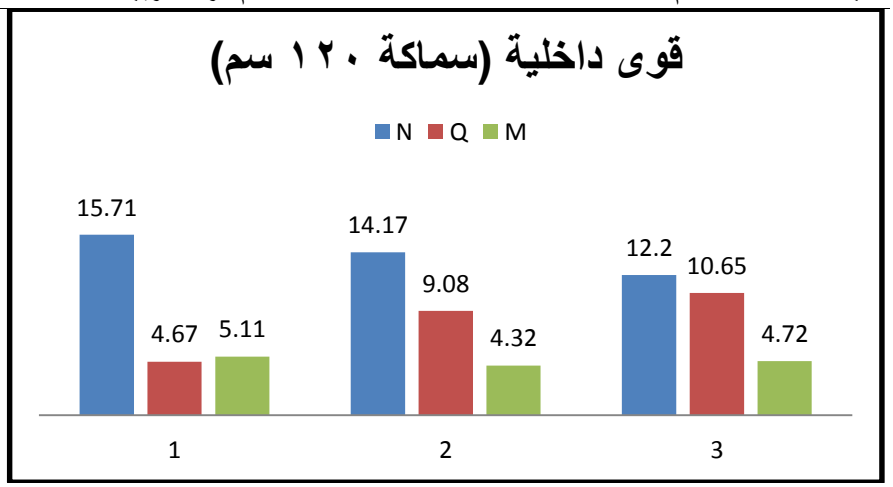
القوى الداخلية في القوس من أجل α=90 (deg)					
	Q (t)	M (t.m)	N (t)	ϕ (DEG)	1
في القمة	0	8,8	3,94	0	t=0,6m
عند المساند	3,94	0	15,71	90	
		3,07 MPa		الاجهاد الاعظمي	
في القمة	0	5,11	4,68	0	t=1,2m
عند المساند	4,67	0	15,71	90	
		0,46 MPa		الاجهاد الاعظمي	

القوى الداخلية في القوس من أجل(deg) α=75					
	Q (t)	M (t.m)	N (t)	ϕ (DEG)	2
في القمة	0	9,59	4,47	0	t=0,6m

عند المساند	7,7	0	13,81	75	
		3,35 MPa		الاجهاد الاعظمي	
في القمة	0	4,32	5,89	0	t=1,2m
عند المساند	9,08	0	14,17	75	
		0,41		الاجهاد الاعظمي	

القوى الداخلية في القوس من أجل(deg) α=60					
	Q (t)	M (t.m)	N (t)	ϕ (DEG)	3
في القمة	0	10,66	3,88	0	t=0,6m
عند المساند	8,59	0	11,01	60	
		3,68 MPa		الاجهاد الاعظمي	
في القمة	0	4,72	6,25	0	t=1,2m
عند المساند	10,65	0	12,2	60	
		0,45 MPa		الاجهاد الاعظمي	





الخلاصة والنتائج:

1- إن طريقتي حساب سماكة الأقواس في العقود تعطيان قيم متقاربة من أجل الأقواس بالسماكات الدنيا عند المستوي 30 درجة. فبلغ الفارق قيمة وسطية تساوي 8.1% .

2- ازداد الفرق بين طريقتي حساب سماكة الأقواس في العقود عند مضاعفة السماكة فبلغ الفارق قيمته العظمى عند مستوي المولد ووصل إلى 60% .

3- إن طريقتي حساب عرض الركائز تعطيان قيم متقاربة من أجل الأقواس ذات المجازات الكبيرة (10-150متراً) والدعامات المرتفعة (8 م). فبلغ الفارق قيمة عظمى تساوي 1.2%

.

4- أعطت طريقة لاهير قيما متقاربة لعرض الركائز بتغير ارتفاع الركيزة من أجل المجاز نفسه.

5- أعطت طريقة ديراند قيما متقاربة لعرض الركائز بتغير ارتفاع الركيزة من أجل المجاز نفسه باستثناء حالة النموذجين A-D15-H4 و A-D15-H8

6- ان هذه الطرق التخطيطية هي لتحديد الأبعاد الأولية للركائز والتي يجب التحقق من كفايتها في تحقيق الاستقرار ومقاومة عزوم الانقلاب وفي تحمل الاجهادات الحاصلة في الركيزة.

7.تتناقص القوى الناظمية عند نقاط الاستناد (بفارق أعظمي 26%) وتزداد قوة القص الدافعة عند نقاط الاستناد (بفارق أعظمي 56%) وذلك بتناقص الزاوية α (بانخفاض القوس).

8. أدت مضاعفة السماكة إلى تناقص في الاجهادات الناظمية بفارق وسطي 86.8%

التوصيات:

1- اعتمد هذا البحث على استخدام الطرق التخطيطية في حساب العناصر نوصي باستخدام طرق تحليلية عددية ودراسة توزع الاجهادات إضافة إلى الاستقرار.

2- نوصي بإجراء دراسة سلوك العقود الحجرية المسنودة بأكتاف جانبية والمعرضة للأحمال الأفقية.

¤¤¤¤¤¤¤¤

المراجع

[1] Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach. Santiago Huerta 2001
[2] The safety of masonry buttresses Santiago Huerta University of Madrid, Spain. 2009
[3] - Stabilité des constructions en Pierre : Le cas des voûtes. Barbotin Baptiste. 2007
[4] Dessin d'observation –Cours sur Les voûtes. Yannick Brès . ENSAG 2012
[5] –Element de Base sur la Construction en Arcs ; Voutes Coupoles une publication du SKAT Centre de Coopération Suisse pour la Technologie et le Management 1994
[6] Histoire de l'architecture Occidentale. Jean-Yves Antoine http://www.info.univ-tours.fr
[7] L'ART ROMAN . BT n°425 Mars 1959 sous la direction d'ELISE FREINET avec la collaboration des commissions pédagogiques de l'ICEM. Maquette : M.BILLEBAULT, Juillet 2011
[8] Analytical approach to collapse mechanisms of circular masonry arch. Blasi, C., and Foraboschi, P. 1994 J. Struct. Eng., 120 8, 2288–2309.

[9] Strengthening of Masonry Arches with Fiber-Reinforced Polymer Strips .Paolo Foraboschi .JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION ASCE / MAY/JUNE 2004 /

[10] Turath GHARIB Renforcement des structures historiques en maçonnerie par matériaux composites : Application aux murs en pierres calcaires L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD – LYON 1
2015
[11] Galileo was Wrong: The Geometrical Design of Masonry Arches . Santiago Huerta .NEXUS NETWORK JOURNAL – VOL. 8, NO. 2, 2006
[12] Masonry Arches : Historical Rules And Modern Mechanics. Antonio Brencich and Renta Morbiducci Italy 2007
[13] The masonry arch between «limit» and «elastic» /analysis.A critical re-examination of Durand-Claye's method. Federico Foce. Danila Aita

.Proceedings of the First International Congress on Construction History, Madrid, 20th-24th January 2003,

¤¤¤¤¤¤¤¤¤

تأثير الانحدار الطبوغرافي على الدقة الرأسية لنموذج FABDEM في البيئات الجبلية الساحلية: دراسة حالة في سورية

د. م. فادي عز الدين شعبان*

الملخص

تعتبر نماذج الارتفاع الرقمية (DEMs) التي تمثل سطح الأرض حجر الزاوية في العديد من التطبيقات الجيومكانية. يهدف هذا البحث إلى تقييم الدقة الرأسية لأحدث النماذج العالمية المتاحة مجاناً، نموذج FABDEM (v1.2)، مع التركيز بشكل خاص على تأثير عامل الانحدار الطبوغرافي. أجري التقييم ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لمنطقة دراسة تبلغ مساحتها 600 كم² في القسم الجنوبي من محافظة اللاذقية، والتي تتميز ببيئة جبلية ساحلية ذات تضاريس شديدة التنوع. تم اعتماد خريطة كونتورية مرقمنة بمقياس 1/25000، كمصدر للبيانات المرجعية. باستخدام منهجية العينة الطبقية العشوائية، تم توليد 250 نقطة اختبار موزعة على خمس فئات انحدار معرفة مسبقاً. أظهرت النتائج ارتباطاً خطياً قوياً جداً ($R^2 = 0.9976$) بين ارتفاعات النموذج والبيانات المرجعية، مع دقة رأسية إجمالية (RMSE) بلغت 9.96± م. كما كشف التحليل الطبقي عن علاقة عكسية واضحة بين الدقة والانحدار، حيث ارتفع الخطأ بشكل مطرد من 5.27± م في المناطق شبه المستوية (0–3%) ليصل إلى 15.29± م في المناطق شديدة الانحدار (>40%). كما لوحظ انقلاب في اتجاه التحيز (Bias) من سلبي إلى إيجابي في المناطق الأعلى انحداراً. تخلص الدراسة إلى أن دقة نموذج FABDEM تعتمد بشكل حاسم على الانحدار، مما يجعله مصدراً موثوقاً في المناطق المعتدلة، مع ضرورة توخي الحذر عند استخدامه في التطبيقات الدقيقة ضمن البيئات الجبلية المعقدة.

كلمات مفتاحية: FABDEM ، تقييم الدقة الرأسية، نموذج ارتفاع رقمي (DEM)، تأثير الانحدار، تحليل طبقي، نظم المعلومات الجغرافية (GIS).

* أستاذ مساعد في قسم الهندسة الطبوغرافية –كلية الهندسة المدنية –جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.

fadi.chaaban@latakia-univ.edu.sy ✉
https://orcid.org/0000-0001-8269-7224

The Impact of Topographic Slope on the Vertical Accuracy of the FABDEM Model in Coastal Mountainous Environments: A Case Study in Syria

Dr.Eng. Fadi CHAABAN*

Abstract

Bare-earth Digital Elevation Models (DEMs) are a cornerstone of numerous geospatial applications. This research aims to assess the vertical accuracy of the latest freely available global model, FABDEM (v1.2), with a specific focus on the impact of topographic slope. The evaluation was conducted within a Geographic Information System (GIS) environment for a 600 km² study area in the southern part of Latakia Governorate, characterized by a coastal mountainous environment with highly varied terrain. A digitized 1\25000 scale contour map was used as the reference dataset. Employing a stratified random sampling methodology, 250 test points were generated and distributed across five predefined slope classes. The results revealed a very strong linear correlation ($R^2 = 0.9976$) between the model's elevations and the reference data, with an overall vertical accuracy (RMSE) of ±9.96 meters. More significantly, the stratified analysis uncovered a clear inverse relationship between accuracy and slope; the error steadily increased from ±5.27 meters in nearly-level areas (0-3%) to ±15.29 meters in steep-slope areas (>40%). A shift in bias direction from negative to positive was also observed in the steepest terrains. The study concludes that the accuracy of the FABDEM model is critically dependent on slope, establishing it as a reliable source for moderate terrains but advising caution for high-precision applications in complex mountainous environments.

Keywords: FABDEM, Vertical Accuracy, Assessment Digital Elevation Model (DEM), Slope Effect, Stratified Analysis, Geographic Information System (GIS).

* Associate Professor, Department of Topographic Engineering, Faculty of Civil Engineering, Lattakia University, Lattakia, Syria.
✉ fadi.chaaban@latakia-univ.edu.sy

https://orcid.org/0000-0001-8269-7224

1 مقدمة

تُعد نماذج الارتفاع الرقمية (DEMs) مكوناً أساسياً في طيف واسع من التطبيقات العلمية، من النمذجة الهيدرولوجية وإدارة مخاطر الفيضانات إلى التحليلات الجيومورفولوجية والبيئية [1]. ومع تطور تقنيات الاستشعار عن بعد، أصبحت النماذج العالمية متاحة بشكل واسع، مثل نموذج Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) ونماذج ASTER [2]. حديثاً، برز نموذج كوبرنيكوس (Copernicus DEM) كأحد أكثر النماذج دقة، لكنه يمثل نموذج سطح رقمي (DSM) يشمل ارتفاعات الغطاء النباتي والمباني [3].

نظراً لأن العديد من التطبيقات تتطلب تمثيلاً دقيقاً لسطح الأرض المجرد (Digital Terrain Model – DTM)، فقد تم تطوير نموذج FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM) باستخدام تقنيات تعلم الآلة لإزالة تأثير الغابات والمباني من نموذج Copernicus DEM [4]. وقد أثبتت الدراسات الأولية أن FABDEM هو النموذج الأعلى دقة حالياً من بين النماذج العالمية المتاحة مجاناً التي تمثل سطح الأرض المجرد [5]، [6].

ومع ذلك، فإن دقة هذه النماذج ليست متجانسة مكانياً، حيث تتأثر بشكل كبير بالخصائص الطبوغرافية لمنطقة الدراسة، وعلى رأسها عامل الانحدار [7]. فقد أظهرت دراسات متعددة وجود علاقة عكسية واضحة بين دقة النموذج ودرجة الانحدار، حيث تزداد الأخطاء الرأسية بشكل ملحوظ في المناطق الجبلية شديدة التضاريس [5]، [6].

2 هدف البحث وأهميته

يتمثل الهدف الرئيسي لهذه الدراسة في تقديم تقييم كمي مفصل للدقة الرأسية لأحدث إصدار من نموذج(FABDEM (v1.2 ، مع التركيز بشكل خاص على عزل وتحليل تأثير عامل الانحدار الطبوغرافي على توزيع وحجم الأخطاء ضمن بيئة جبلية ساحلية معقدة.

ولتحقيق هذا الهدف، تم تحديد الأهداف الفرعية التالية:

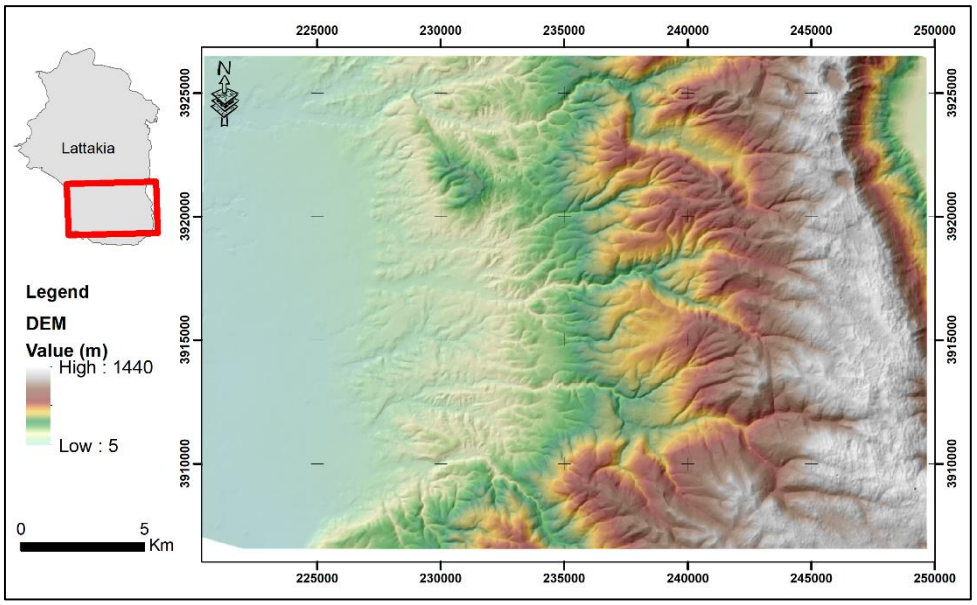
- ✓ تقييم الدقة الرأسية الإجمالية لنموذج FABDEM ضمن منطقة الدراسة باستخدام المؤشرات الإحصائية المعيارية(ME, RMSE, STD) .
- ✓ تحليل قوة واتجاه الارتباط بين قيم ارتفاع النموذج والقيم المرجعية.
- ✓ تطبيق منهجية التحليل الطبقي لتقدير التغير في الدقة الرأسية عبر خمس فئات انحدار محددة مسبقاً.
- ✓ تحديد طبيعة واتجاه التحيز المنهجي (Bias) في النموذج وكيفية تأثره بدرجة الانحدار.

وتبرز أهمية هذا البحث في كونه يقدم مساهمة علمية تتمثل في دراسة حالة جديدة ومفصلة تُضاف إلى الأدبيات العلمية الحديثة حول أداء نموذج FABDEM، وتؤكد صحة الفرضيات المتعلقة بتأثير الانحدار على دقة النموذج. ومن الناحية المنهجية، يسلط البحث الضوء على أهمية التحليل الطبقي كأداة ضرورية للفهم العميق لسلوك نماذج الارتفاع، مبرهنا على أن مؤشرات الدقة الإجمالية وحدها قد تكون مضللة. أما من حيث الفائدة التطبيقية، فإن نتائج هذه الدراسة توفر لمستخدمي نموذج FABDEM في البيئات المشابهة (الجبلية والساحلية) رؤية واضحة حول مواطن القوة والضعف في النموذج، وتقدم توصيات عملية حول مدى موثوقيته في التطبيقات المختلفة بناءً على طبيعة تضاريس المنطقة.

3 مواد وطرائق البحث

3.1 منطقة الدراسة

أجريت الدراسة في القسم الجنوبي من محافظة اللاذقية في سورية، الشكل 1، وتغطي مساحة تقارب 600 كم². تتميز المنطقة بطبيعتها الجبلية الساحلية وتنوعها الطبوغرافي الكبير، حيث تتدرج الارتفاعات من مستوى سطح البحر (0 م) لتصل إلى 1432 م في القمم الجبلية. هذا التباين الكبير في الارتفاعات والانحدارات يجعلها منطقة مثالية لاختبار أداء نموذج الارتفاع في ظروف طبوغرافية متنوعة وصعبة. تم اعتماد نظام إسقاط مركاتور العالمي المستعرض (WGS_1984_UTM_Zone_37N) لتوحيد جميع البيانات المكانية المستخدمة في هذا البحث.



الشكل1 : موقع منطقة الدراسة وتضاريسها

3.2 البيانات المستخدمة

3.2.1 نموذج الارتفاع الرقمي(FABDEM)

تم الاعتماد في هذا البحث على الإصدار الثاني لعام 2023 من نموذج (FABDEM (v1.2، الذي تم إنتاجه من قبل باحثين في جامعة بريستول [4]. يُعد هذا النموذج نموذج تضاريس رقمي (DTM) يمثل سطح الأرض المجرد بدقة مكانية تبلغ 1 ثانية قوسية (حوالي 30 م). تم اشتقاقه من نموذج Copernicus GLO-30 بعد إزالة التحيز الناتج عن ارتفاعات الغابات والمباني باستخدام خوارزميات تعلم الآلة. تم تنزيل البيانات الخاصة بمنطقة الدراسة من منصة Google Earth Engine، ومن ثم اقتطاعها وإعادة إسقاطها لتتوافق مع نظام إحداثيات منطقة الدراسة.

3.2.2 البيانات المرجعية

استُخدمت خريطة كونتورية مرقمنة بصيغة شعاعية كمصدر أساسي للبيانات المرجعية. تم إنتاج هذه الخريطة من خرائط طبوغرافية ورقية بمقياس 1/25000، وتتميز بفترة كونتورية تبلغ

10 أمتار. تتألف الطبقة من 2885 خط كونتور تغطي كامل منطقة الدراسة، وتتراوح ارتفاعاتها من 0 إلى 1440 م. تم تعريف هذه البيانات مسبقاً ضمن نظام الإسقاط WGS_1984_UTM_Zone_37N، مما يضمن توافقها المكاني مع نموذج FABDEM.

3.3 منهجية تقييم الدقة

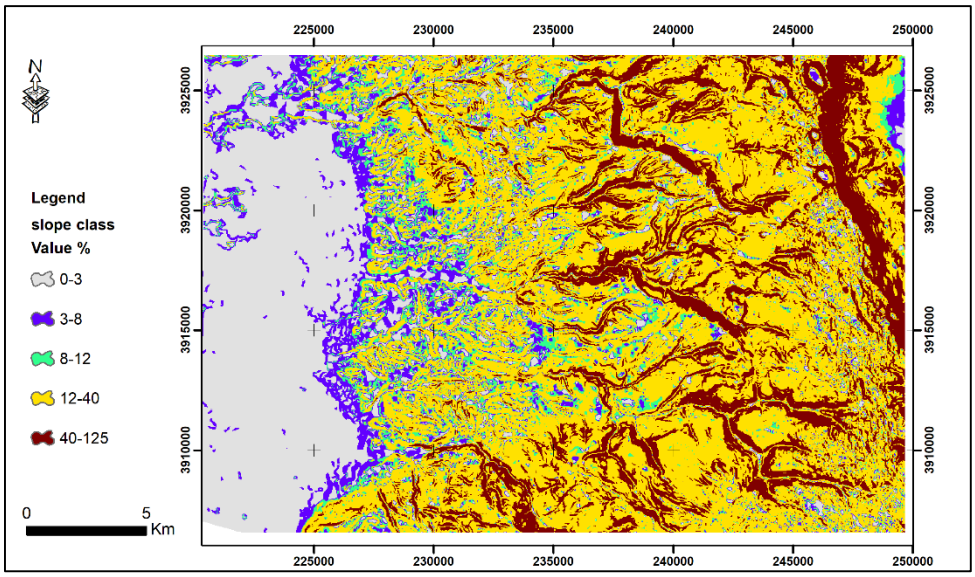
لضمان تقييم موضوعي ومفصل، تم اتباع منهجية العينة الطبقية العشوائية، والتي تسمح بتحليل تأثير الانحدار بشكل مستقل. تمت معالجة البيانات وتحليلها باستخدام برنامج ArcGIS 10.8 و Microsoft Excel.

3.3.1 إنشاء طبقات الانحدار

تم أولاً إنشاء سطح رقمي مرجعي (Reference DEM) من طبقة خطوط الكنتور. من هذا السطح المرجعي، تم اشتقاق خريطة انحدار بالنسبة المئوية (%)، الشكل 2، حيث تراوحت القيم من 0% في المناطق الساحلية المستوية إلى 125% في الجروف الجبلية. بعد ذلك، تم إعادة تصنيف خريطة الانحدار إلى خمس فئات (طبقات) استناداً إلى التصنيف المعتمد في دراسة [8]، كما هو موضح في الجدول (1). إن استخدام تصنيف معياري يضمن قابلية تكرار البحث ويجعل نتائجنا قابلة للمقارنة مع دراسات أخرى قد تتبنى نفس المعيار. إن هذا التصنيف، بطبيعته، هو تصنيف جيومورفولوجي يصف أشكال التضاريس (أراضٍ منخفضة، هضاب، تلال، جبال) بناءً على قيم الانحدار، وهي خصائص فيزيائية عالمية لا تقتصر على منطقة جغرافية معينة. كما أن اعتماد هذا التصنيف بخمس فئات متنوعة أتاح تحقيق الهدف الرئيسي للبحث، وهو دراسة سلوك الخطأ عبر طيف واسع ومتدرج من التضاريس، من الأراضي شبه المستوية إلى الجبلية المعقدة.

الجدول 1: فئات الانحدار المستخدمة في الدراسة ومساحة كل فئة

N. class	Slope %	Area km^2
1	0-3%	123
2	3-8%	74
3	8-12%	40
4	12-40%	263
5	40-125%	100
		$\sum$ = **600**



الشكل 2: خريطة تظهر توزيع فئات الانحدار في منطقة الدراسة

3.3.2 توليد نقاط الاختبار

لضمان تمثيل جميع الفئات التضاريسية بشكل عادل، تم إنشاء 250 نقطة اختبار باستخدام طريقة العينة الطبقية العشوائية، حيث تم اختيار 50 نقطة بشكل عشوائي من داخل حدود كل فئة من فئات الانحدار الخمس. هذه المنهجية تضمن عدم تركز النقاط في المناطق المنبسطة الواسعة وتوفر عددا كافيا من العينات في مناطق الانحدار الأصغر مساحةً.

3.3.3 استخلاص الارتفاعات والتحليل الإحصائي

باستخدام طبقة النقاط النهائية، تم استخلاص قيم الارتفاع المقابلة لكل نقطة من مصدرين: (1) خطوط الكنتور المرجعية، و (2) نموذج FABDEM. تم بعد ذلك حساب الفرق (الخطأ) بين القيمتين لكل نقطة. ولتقييم الدقة كمياً، تم حساب المؤشرات الإحصائية التالية:

- مخطط التشتت ومعامل التحديد (R^2): لقياس قوة العلاقة الخطية بين قيم النموذج والقيم المرجعية.

- متوسط الخطأ(ME) : لتحديد وجود واتجاه أي تحيز منهجي (Bias) في النموذج.
- الانحراف المعياري للخطأ (STD): لقياس مدى تشتت الأخطاء حول المتوسط.
- الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (RMSE): كمقياس شامل للدقة الرأسية المطلقة للنموذج.

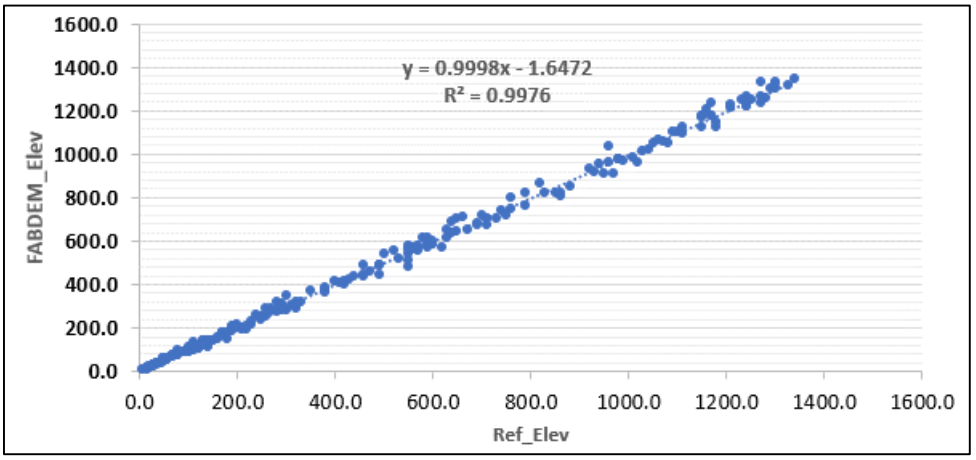
تم حساب هذه المؤشرات مرة للدقة الكلية (لكامل الـ 250 نقطة)، ومرة أخرى لكل فئة من فئات الانحدار على حدة.

4 النتائج والمناقشة

4.1 تقييم الارتباط والدقة الكلية

أظهر تحليل الارتباط وجود علاقة خطية قوية ومباشرة بين قيم ارتفاع نموذج FABDEM والقيم المرجعية، حيث بلغ معامل التحديد (R^2) قيمة عالية جداً تساوي 0.9976 (الشكل 3). وتشير معادلة خط الانحدار الخطي (معادلة 1) إلى أن ميل الخط (0.9998) قريب بشكل استثنائي من القيمة المثالية (1.0)، مما يدل على اتساق أداء النموذج عبر كامل النطاق الارتفاعي.

$$Y = 0.9998x - 1.6472 \qquad \text{معادلة(1)}$$



الشكل 3: مخطط التشتت للعلاقة بين ارتفاع FABDEM والارتفاع المرجعي

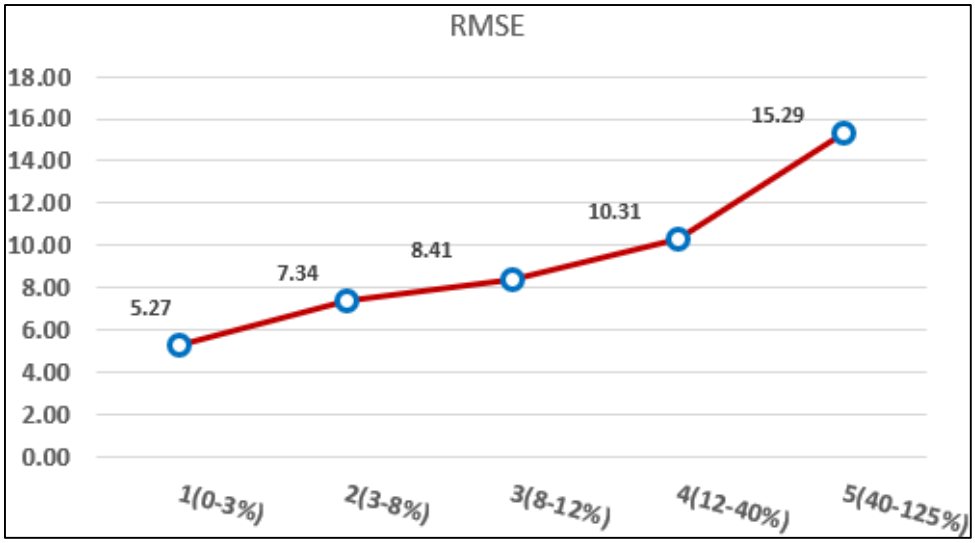
على الرغم من هذا الارتباط القوي، كشف تقييم الدقة الكلية عن قيمة (RMSE) بلغت ±9.96 م، ومتوسط خطأ (ME) قدره −1.2 م. تشير قيمة ME السالبة إلى وجود تحيز منهجي عام طفيف في النموذج نحو التقليل من تقدير الارتفاعات مقارنة بالبيانات المرجعية. أما قيمة الانحراف المعياري الكلية للخطأ (STD) فقد بلغت 9.9 م، وهي قيمة مرتفعة تعكس تبايناً كبيراً في توزيع الأخطاء، مما يشير إلى أن الخطأ الإجمالي ليس متجانساً عبر منطقة الدراسة ويتأثر بوجود أخطاء كبيرة في مناطق معينة. هذا التشتت العالي يبرر ضرورة إجراء تحليل طبقي أعمق لفهم سلوك النموذج بشكل أفضل.

4.2 تحليل تأثير الانحدار على الدقة الرأسية

يكشف التحليل الطبقي عن الحقيقية وراء قيمة RMSE الإجمالية، ويبرهن بشكل قاطع على وجود علاقة سببية بين الدقة الرأسية للنموذج والانحدار الطبوغرافي. يوضح الجدول (2) والرسم البياني (الشكل 4) هذه العلاقة بوضوح، حيث ارتفعت قيمة الخطأ (RMSE) بشكل تدريجي ومنتظم مع زيادة درجة الانحدار. فقد بدأ الخطأ بقيمة ±5.27 م في المناطق شبه المستوية (0−3%)، ووصل إلى ±10.31 م في مناطق التلال (12−40%)، ثم قفز بشكل حاد ليصل إلى ±15.29 م في المناطق الجبلية شديدة الانحدار (>40%). هذا الاتجاه يؤكد أن الأداء الممتاز للنموذج في المناطق المنبسطة ينخفض بشكل كبير كلما أصبحت التضاريس أكثر تعقيداً، وهو ما يتوافق تماماً مع الأدبيات العلمية السائدة [6]، [7].

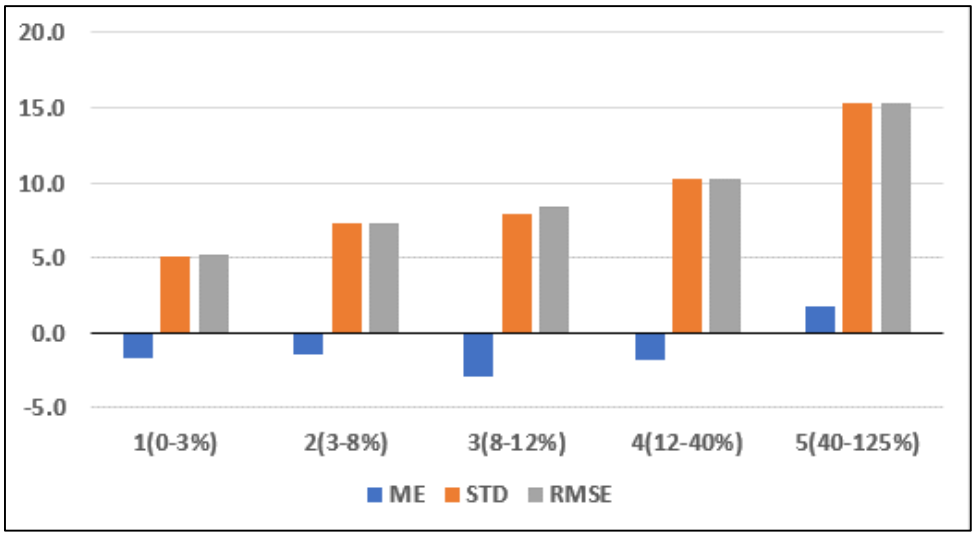
الجدول 2: النتائج الإحصائية (ME, STD, RMSE) لكل فئة من فئات الانحدار

N. class	Slope %	Area km^2	ME	STD	RMSE
1	0-3%	123	-1.7	5.05	±5.27
2	3-8%	74	-1.5	7.27	±7.34
3	8-12%	40	-2.9	7.97	±8.41
4	12-40%	263	-1.8	10.24	±10.31
5	40-125%	100	1.8	15.34	±15.29
		$\sum = 600$			



الشكل 4: رسم بياني يوضح تزايد قيمة RMSE مع فئات الانحدار

وإلى جانب مؤشر RMSE ، يقدم الانحراف المعياري للخطأ (STD) مؤشراً حاسماً حول مدى اتساق أو ثبات أداء النموذج. وتكشف النتائج في الجدول (2) والرسم البياني (الشكل 5) عن وجود علاقة طردية قوية بين درجة الانحدار وقيمة الانحراف المعياري، حيث ارتفعت قيمة تشتت الخطأ من 5.05 م في الفئة شبه المستوية (0–3%) لتصل إلى 15.34 م في الفئة الأعلى انحداراً (>40%)، أي بزيادة تتجاوز ثلاثة أضعاف. ويفسر هذا التزايد المطرد بأن أداء النموذج لا يصبح أقل دقة في المناطق المنحدرة فحسب، بل يصبح أيضاً أكثر تفاوتاً وتقلباً وغير متوقع. إن القفزة الكبيرة في قيمة الانحراف المعياري، خاصة في الفئة الأخيرة، تؤكد أن الأخطاء في هذه الفئة متباينة بشكل كبير وتحتوي على قيم شاذة (outliers) ذات حجم كبير، وهو ما يفسر بشكل مباشر الارتفاع الحاد في قيمة RMSE لنفس الفئة. وبالتالي، يعزز تحليل الانحراف المعياري الاستنتاج القائل بأن موثوقية نموذج FABDEM تتدهور بشكل ملحوظ مع زيادة تعقيد التضاريس.



الشكل 5: التغير في قيم ME, STD, RMSE عبر فئات الانحدار الخمس

علاوة على ذلك، لوحظ نمط مهم في قيم متوسط الخطأ (ME) يكشف عن سلوك انقلاب التحيز، (الشكل 5). فالملاحظة الرئيسية لسلوك متوسط الخطأ في الفئات الأربعة الأولى هي أن جميع القيم سالبة بشكل ثابت، وتتراوح ضمن نطاق ضيق نسبياً (بين 1.5− و 2.9−م). هذا يشير إلى وجود تحيز منهجي عام ومستمر نحو التقليل من تقدير الارتفاعات في جميع التضاريس التي يقل انحدارها عن 40%. أما التقلبات الطفيفة بين هذه الفئات، لا تمثل اتجاهاً فيزيائياً محدداً، بل هي على الأرجح ناتجة عن التباين الإحصائي الطبيعي للعينة العشوائية ضمن كل طبقة. إن السمة الأبرز والأكثر دلالة إحصائياً هي الانقلاب الحاد والواضح لهذا الاتجاه السلبي العام ليصبح التحيز إيجابياً (1.8+ م) في الفئة الأعلى انحداراً. ويمكن تفسير هذه الظاهرة بأن البكسل الذي تبلغ مساحته 30*30 م يصبح غير قادر على تمثيل قيعان الأودية الضيقة أو الحواف الحادة بدقة، فيقوم بحساب متوسط ارتفاع يمثل أجزاء من سفوح الوادي بدلاً من قاعه الحقيقي، مما يؤدي إلى المبالغة في تقدير الارتفاع في هذه المواقع الدقيقة.

4.3 مصادر الخطأ المحتملة

من الضروري الإشارة إلى أن قيمة RMSE الإجمالية (9.96± م) المسجلة في هذه الدراسة تبدو أعلى من تلك المسجلة في دراسات تقييم FABDEM الأخرى التي تراوحت بين 2.6 و 5.6

م [2]، [5]، [6] . يمكن إرجاع هذا الاختلاف بشكل رئيسي إلى طبيعة البيانات المرجعية المستخدمة. فبينما اعتمدت تلك الدراسات على بيانات LiDAR عالية الدقة أو نقاط تحكم أرضية، اعتمدت دراستنا على خرائط كنتورية بمقياس 1/25000. وبالتالي، فإن الخطأ المسجل هنا لا يمثل خطأ نموذج FABDEM فقط، بل هو خطأ مركب يشمل:

- الأخطاء الأصلية الموجودة في الخرائط الطبوغرافية الورقية.
- الأخطاء الناتجة عن عملية رقمنة خطوط الكنتور.
- الاختلافات المحتملة في المرجع الرأسي (Vertical Datum) بين البيانات.

ومع ذلك، فإن الاتجاه الواضح والقوي لتزايد الخطأ مع الانحدار يبقى نتيجة صحيحة ومهمة، لأنه يعكس سلوك النموذج النسبي بغض النظر عن جودة المرجع.

5 الاستنتاجات والتوصيات

أجرى هذا البحث تقييماً مفصلاً للدقة الرأسية لنموذج الارتفاع الرقمي FABDEM (v1.2) في بيئة جبلية ساحلية متنوعة (محافظة اللاذقية)، مع التركيز على تأثير عامل الانحدار. وقد توصلت الدراسة إلى الاستنتاجات الرئيسية التالية:

1. يُظهر نموذج FABDEM توافقاً خطياً قوياً جداً مع التضاريس المرجعية، لكن دقته المطلقة تعتمد بشكل حاسم على درجة الانحدار.
2. تزداد الأخطاء الرأسية (RMSE) بشكل مطرد ومنتظم مع زيادة درجة الانحدار، حيث يكون النموذج في أفضل أداء له في المناطق شبه المستوية، بينما تنخفض دقته بشكل كبير في التضاريس الجبلية شديدة الانحدار.
3. يظهر النموذج سلوكاً غير منتظم في التحيز، حيث يميل إلى تقليل الارتفاعات في المناطق المعتدلة، ثم المبالغة فيها في المناطق الأكثر انحداراً.

بناءً على ذلك، توصي الدراسة باستخدام نموذج FABDEM كمصدر موثوق لبيانات الارتفاع في الدراسات الإقليمية التي تغطي مناطق ذات انحدارات منخفضة إلى متوسطة. أما بالنسبة للتطبيقات التي تتطلب دقة رأسية عالية (مثل النمذجة الهيدرولوجية الدقيقة أو تحديد مخاطر الانزلاقات) في بيئات جبلية معقدة، فيجب على المستخدمين توخي الحذر وإجراء تقييم دقة محلي

قبل اعتماد النموذج، أو اللجوء إلى مصادر بيانات عالية الدقة إن أمكن. تؤكد هذه الدراسة على ضرورة عدم الاعتماد على مؤشر الدقة الإجمالي وحده، وأهمية إجراء تحليل طبقي لفهم سلوك النموذج بشكل أفضل في الظروف الطبوغرافية المختلفة.

6 المراجع

[1] M. A. Ghannadi, S. Alebooye, M. Izadi, and A. Ghanadi, "Vertical Accuracy Assessment Of Copernicus DEM (Case Study: Tehran And Jam Cities)," in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2023. doi: 10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-209-2023.

[2] A. Saberi, M. Kabolizadeh, K. Rangzan, and M. Abrehdary, "Accuracy assessment and improvement of SRTM, ASTER, FABDEM, and MERIT DEMs by polynomial and optimization algorithm: A case study (Khuzestan Province, Iran)," *Open Geosciences*, vol. 15, no. 1, 2023, doi: 10.1515/geo-2022-0455.

[3] Copernicus Data Space Ecosystem, "Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model."

[4] L. Hawker *et al.*, "A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed," *Environmental Research Letters*, vol. 17, no. 2, 2022, doi: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.

[5] N. Osama, Z. Shao, and M. Freeshah, "The FABDEM Outperforms the Global DEMs in Representing Bare Terrain

Heights," *Photogramm Eng Remote Sensing*, vol. 89, no. 10, 2023, doi: 10.14358/PERS.23-00026R2.

[6] M. Meadows, S. Jones, and K. Reinke, "Vertical accuracy assessment of freely available global DEMs (FABDEM, Copernicus DEM, NASADEM, AW3D30 and SRTM) in flood-prone environments," *Int J Digit Earth*, vol. 17, no. 1, 2024, doi: 10.1080/17538947.2024.2308734.

[7] J. R. Santillan, "Vertical Accuracy Evaluation of The Forest And Buildings Removed Copernicus Dem (Fabdem) Over The Philippines," in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 2023. doi: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W6-2022-311-2023.

[8] G. M. Dawod and I. E. Ascoura, "The Validity of Open-Source Elevations for Different Topographic Map Scales and Geomatics Applications," *Journal of Geographic Information System*, vol. 13, no. 02, pp. 148–165, 2021, doi: 10.4236/JGIS.2021.132009.

دراسة تأثير درجات الحرارة على كفاءة إزالة COD, N, P في المعالجة البيولوجية

م. هناء جرجس/ عضو هيئة فنية–جامعة حماه

الملخص

يهدف البحث إلى دراسة تأثير درجات الحرارة على كفاءة إزالة COD و N وP في المعالجة البيواوجية بالحمأة المنشطة.

تم في هذا العمل:

1– تحليل بيانات مقاسة في محطة الدوير بحمص خلال أشهر السنة، وأظهرت النتائج مايلي:

– كفاءة إزالة BOD_5 تتراوح مابين 78%إلى91% وتكون أعلى قيمة لفعالية الإزالة عند أعلى درجة حرارة وسطية مقاسة $27.2\ C^o$.

– كفاءة إزالة COD تتراوح مابين 62%إلى87% وتكون أعلى قيمة لفعالية الإزالة عند أعلى درجة حرارة وسطية مقاسة $27.2C^o$.

2– تشغيل مفاعل SBR مخبري لمعالجة مياه صرف صحي خلال أشهر مختلفة من السنة، وأظهرت النتائج مايلي:

– كفاءة إزالة COD تتراوح ما بين (82–60)% حيث بلغت أعلى قيمة عند درجة حرارة $27C^0$.

– كفاءة إزالة P تتراوح ما بين (89–48)% حيث بلغت أعلى قيمة عند درجة حرارة $27C^0$.

– كفاءة إزالة NH4 تتراوح ما بين (89–46)% حيث بلغت أعلى قيمة عند درجة حرارة $27C^0$.

الكلمات المفتاحية: معالجة بيولوجية– درجات الحرارة– P–N–COD

study the effect of temperature on the removal efficiency of COD, N, and P in biological treatment

E.Hanaa gerges

Summary

This research aims to study the effect of temperature on the removal efficiency of COD, N, and P in biological treatment.

In this work, the following was done:

1- Analysis of data measured at the Al-Duwair station in Homs during various months of the year. The results showed the following:

- BOD_5 removal efficiency ranged from 78% to 91%, with the highest removal efficiency recorded at the highest average temperature of 27.2°C.
- COD removal efficiency ranged from 62% to 87%, with the highest removal efficiency recorded at the highest average temperature of 27.2°C.

2- Operation of a laboratory SBR reactor for wastewater treatment during different months of the year.

The results showed the following:

- COD removal efficiency ranged from 60% to 82%, with the highest value recorded at 27°C.
- P removal efficiency ranged from 48% to 89%, with the highest value recorded at 27°C.
- The NH4 removal efficiency ranges between (46-89)%, with the highest value recorded at a temperature of $27C^0$.

Key words: biological treatment - temperature - COD, N, P

1- مقدمة:

طبقت تقنية المعالجة البيولوجية على نطاق واسع في أنظمة معالجة مياه الصرف الصحي البلدية (المنزلية) وتعد هذه التقنية المرحلة الأهم في محطات معالجة مياه الصرف الصحي، إذ تزال من خلالها 60% من سوائل الصرف الصحي، يعد تكوين مياه الصرف المنزلية أقل تقلباً من مياه الصرف الصناعي، حيث تحوي بشكل تقريبي على 50% بروتينات، 40%

كربوهيدرات، 10% دهون وزيوت وكميات ضـــئيلة من الملوثات المعدنية، وتهدف المعالجة البيولوجية لهذه المياه إلى أكســـدة تخثير وإزالة المواد الصـــلبة الغروانية الغير قابلة للترســـيب وتكســـير المواد العضـــوية وتحويلها إلى مواد غير ضـــارة. كما تســـاهم في إزالة المغذيات مثل النتروجين والفوســـفور [1]. تؤثر بعض العوامل على المعالجة البيولوجية، وتعد درجات الحرارة من العوامل الأساسية ذات التأثير، خصوصاً في المناطق الأكثر برودة أو سخونة، لذلك من الصـــعب فهم المعالجة البيولوجية المثلى عند درجات حرارة أقل من الدرجة $4C^o$ أو أكثر من الدرجة $70C^o$.

تعاني العديد من محطات معالجة الصـرف الصـحي، خاصـة تلك التي تعتمد على المعالجة البيولوجية، من تراجع كبير في كفاءة المعالجة خلال فترات انخفاض درجات الحرارة، مما يؤدي إلى تصـريف مياه غير مطابقة للمواصـفات البيئية. وعلى الرغم من إدراك أهمية هذا العامل، إلا أن هناك نقصًا في الدراسات التطبيقية التي تربط بين أداء المحطات وتغير درجات الحرارة في الســـياقات المناخية المختلفة، حيث تعتمد درجات الحرارة على المنطقة الجغرافية، لذلك يتم اختيار طريقة المعالجة البيولوجية الأكثر ملائمة لدرجات الحرارة.

تعتبر الكائنات الدقيقة مثل البكتريا والفونجي والبروتوزا والأولغا وغيرها ذات أهمية كبيرة في عمليات المعالجة البيولوجية وتؤثر درجات الحرارة بشـكل كبير على معدل نمو البكتيريا ونشـاط الأنزيمات وتنوع المجتمع الميكروبي [2].

2- هدف البحث:

الهدف من البحث دراسة تأثير درجات الحرارة على تخفيض مؤشرات التلوث (الأكسجين الكيميائي المتطلب Chemical Oxygen demand (COD) – الفوسفور Phosphor (P) –النتروجين Nitrogen (N)) وتحديد العوامل الأخرى التي تتأثر بدرجات الحرارة واقتراح الحلول التشغيلية المناسبة عند درجات الحرارة المنخفضة للحصول على كفاءة تشغيلية أعلى لمحطات المعالجة

البيولوجية العاملة بالحمأة المنشطة في ظل قلة الدراسات التي تربط بين المناخ المحلي وخصائص مياه الصرف ومدى تأثرها بالحرارة، وندرة الأبحاث التي تتناول حلولاً تشغيلية مباشرة للتعامل مع درجات الحرارة المنخفضة.

3- مواد وطرق البحث:

3-1 الدراسات المرجعية :

بينت العديد من الدراسات المرجعية على محطات المعالجة البيولوجية أنه عند درجات حرارة مثالية ($20-35C^0$) تكون عمليات التمثيل الغذائي في ذروتها ويكون هضم المواد العضوية في ذروته، حيث بينت الدراسات أن زيادة درجات الحرارة من $10C^o$ إلى $30C^o$ يزيد من كفاءة إزالة BOD_5بمقدار 30% و يزيد من كفاءة إزالة COD بمقدار 40% بينما تنخفض كفاءة إزالة المواد العضوية بشكل ملحوظ عند درجات الحرارة تحت $15C^o$ [6]. إن النتروجين الكلي يتألف من الأمونيا والنتريت والنتروجين العضوي الدقائقي والنتروجين العضوي المنحل، وتتضمن إزالة النتروجين عمليتين النترجة (Nitrification) وإزالة النترجة(Denitrification)، في عملية النترجة تتأكسد الأمونيا إلى نتريت ثم إلى نترات، وفي إزالة النترجة يتحول النترات إلى غاز النتروجين بغياب الأكسجين. وتعتبر هذه العملية من العمليات الحيوية الدقيقة التي تتطلب توازنًا في المجتمعات البكتيرية (أمونياكس، نيتروباكتر، نيتروسوموناس). وقد أثبتت الأبحاث أن هذه البكتيريا تتأثر بدرجة الحرارة حيث ينخفض معدل النترجة إلى النصف عند انخفاض درجة الحرارة من $25C^0$ إلى الدرجة $10C^0$ وما دون، كما أن درجات الحرارة المنخفضة تقلل من تنوع ووفرة البكتيريا المسؤولة عن نترجة الأمونيوم مما يؤدي إلى تراكم النيتروجين في المياه المعالجة [7]. تعتمد إزالة الفسفور على متعضيات PAO2 لخزن الفوسفور على شكل بولي فسفات داخل خلاياه في الظروف الهوائية، وتحرره في الظروف اللاهوائية، ثم تمتصه بشكل أكبر عند الظروف الهوائية. وتؤثر درجات الحرارة بشكل كبير على عمل هذه المتعضيات بالإضافة إلى زمن المكث الهيدروليكي [8].

تقلل درجات الحرارة العادية من متطلبات الأراضي وتعزز عملية التحويل وتزيد من كفاءة الإزالة وتحدد الطريقة الأفضل لاختيار نوع المعالجة البيولوجية، مثلاً في أمريكا تكون درجات الحرارة من $3C^o$ إلى $27C^o$ حسب المنطقة الجغرافية والحرارة الوسطية $15C^o$

وتصل إلى $35C^o$ في بعض الأماكن، لذلك يتم تصميم خزانات الهضم اللاهوائي فقط في المناطق ذات درجات الحرارة المرتفعة لأن البكتريا المنتجة للميتان شديدة الحساسية لدرجات الحرارة، ويعتمد تصميم هذه الخزانات على زمن التفاعل الذي يعتمد بدوره على درجات الحرارة، لذلك ينصح بأن تكون درجات الحرارة بحدود $26-65C^o$ لضمان الأداء النشغيلي الجيد لهذه المنشآت [7]. يؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى زيادة معامل التهوية، إذ يعتبر الأكسجين أقل قابلية للذوبان في الماء الدافئ منه في الماء البارد(Dissolved Oxygen) كما يوضح الجدول (3-1) [5]

الجدول(3-1): تأثير درجات الحرارة على تركيز DO

درجة الحرارة (C^o)	DO (mg/l)
0	14.6
5	13.1
10	11.3
15	10.1
20	9.1
25	8.2

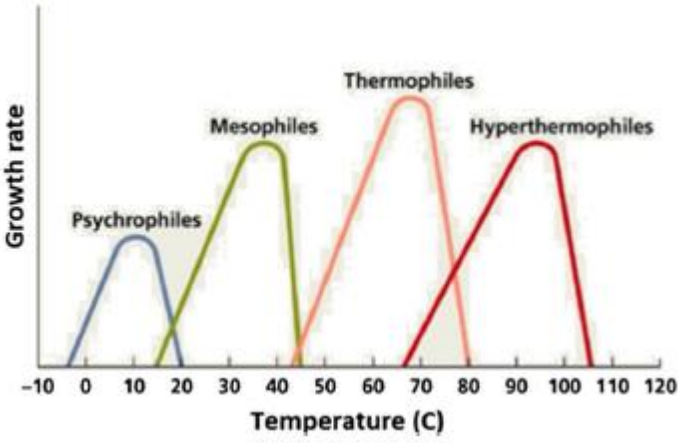
تؤثر درجات الحرارة بشكل كبير على نشاط الكائنات الحية الدقيقة التي يسهم في المعالجة البيولوجية، حيث نميز أربع أنواع من التجمعات المكروبية حسب درجة الحرارة كما يبين الشكل (3-1) [9]

1- ميزوفيل(Misophiles) $10-45C^o$

2- تيرموفيل(Thremophiles) $40-75C^o$

3- بسيكروفيل(Psychrophiles) 0-20C°

4- غيريات التغذية(Hyperthermophiles) 70-100C°



الشكل(3-1): التجمعات المكروبية حسب درجات الحرارة

3-2 تحليل بيانات مقاسة من محطة الدوير بحمص :

تقع محطة معالجة مياه الصرف الصحي إلى الشمال من مدينة حمص بالقرب من قرية الدوير وقد أنجزت الدراسة التصميمية لمحطة معالجة مياه مجاري مدينة حمص في عام 1978 م، وهي تعتمد طريقة الحمأة المنشطة الكلاسيكية، وتم إنشاؤها على مدى عشرين عاماً، و بدأ تشغيلها خلال عام 1999 م والغاية من محطة المعالجة معالجة مياه مجاري مدينة حمص ومياه معمل السكر بيولوجياً. وقد صممت المحطة لتعمل عند المعطيات التالية -**التدفقات(m3/d):**- التدفق الوسطي: 133900

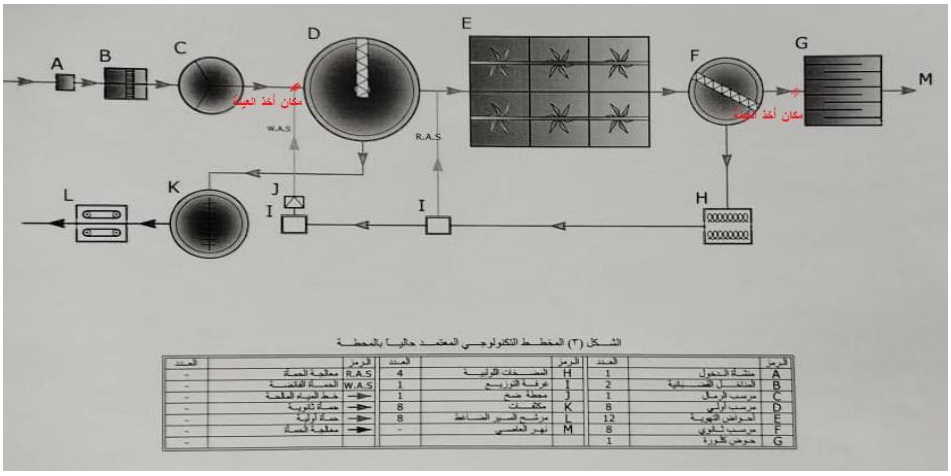
- التدفق الأعظم في الطقس الرطب 295000
- التدفق الأعظم الذي يتلقى معالجة كاملة 233000
- التدفق الأصغر 49100

التراكيز الأولية (mg/L):- الأوكسجين المستهلك بيوكيميائياً(Biological Oxygen (BOD5
507 mg/L : demand

- المواد الصلبة المعلقة(Suspend solid (SS : 512 mg/L

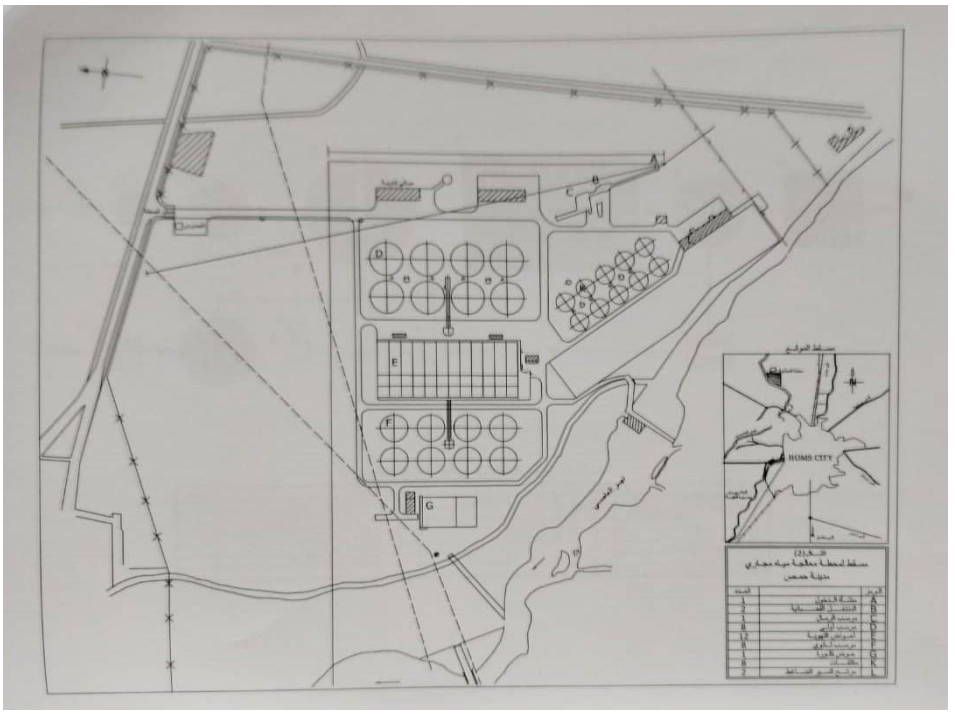
تعالج الحمأة الفائضة في محطة معالجة مياه المجاري حمص وفق التسلسل التالي:

-التغليظ في أحواض التكثيف-إزالة الماء باستخدام السيور المرشحة الضاغط-التجفيف في ساحات الحمأة. تصل مياه مجاري مدينة حمص إلى محطة المعالجة بالثقالة من ثلاث خطوط رئيسية لمياه المجاري ذات مقطع فموي حيث تدخل إلى محطة المعالجة بمجمع رئيسي واحد وأيضاً تصل المياه من منطقة الوعر بالضخ [3,4]. ويبين الشكل (3-2) المخطط التكنولوجي لعمل محطة المعالجة مبيناً عليه أماكن أخذ العينات.



الشكل (3-2): المخطط التكنولوجي لمنشآت محطة المعالجة

كما يبين الشكل (3-3) مسقط لمحطة معالجة مياه مجاري حمص.



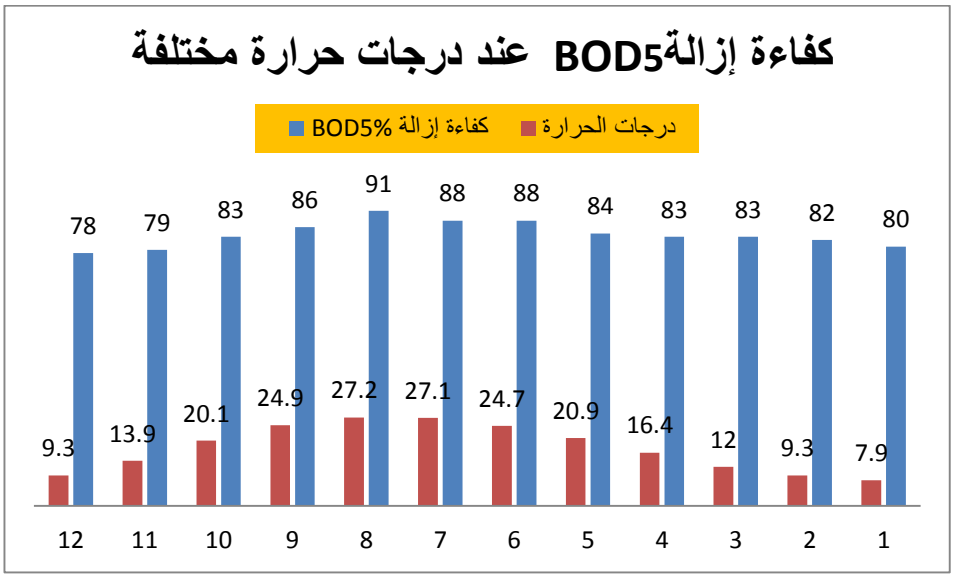
الشكل (3-3): مسقط لمحطة معالجة مياه مجاري حمص

تم الحصول على بيانات واقعية مقاسة في محطة الدوير بشكل يومي لعام 2011 ولمدة عام كامل في مختلف شهور السنة، تم أخذ مؤشرات التلوث ($CODin-BOD_5in$) للعينات الداخلة إلى حوض التهوية والمؤشرات ($CODout-BOD_5out$) للعينات الخارجة من حوض الترسيب الثانوي، كما تم الحصول على قيم لدرجات الحرارة الوسطية للعام نفسه في حمص من مركز الأرصاد الجوية ويبين الجدول (3-2) القيم الوسطية لمؤشرات التلوث لكل شهر من السنة.

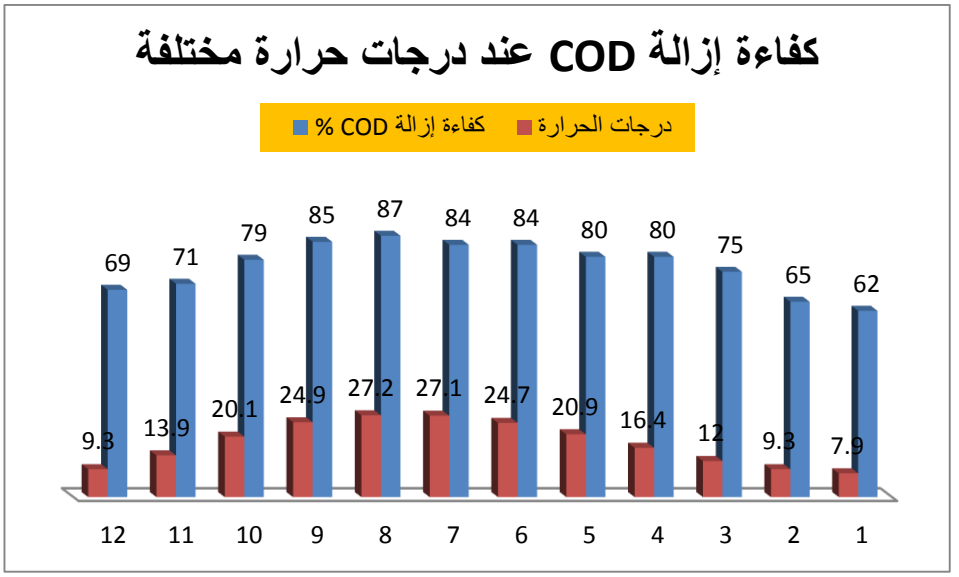
الجدول (3-2): القيم الوسطية المقاسة للملوثات في شهر من السنة

الملوث / الشهر	$(BOD_5)_{in}$	$(DOD_5)_{out}$	$(COD)_{in}$	$(COD)_{out}$	MLSS	درجة الحرارة الوسطية C°
	(mg/l)					
كانون الثاني	280	54	350	132	3150	7.9
شباط	283	50	409	141	2170	9.3
آذار	329	55	515	125	2350	12
نيسان	341	55	631	123	3730	16.4
أيار	434	69	723	141	3810	20.9
حزيران	448	52	764	117	3880	24.7
تموز	417	50	628	99	4290	27.1
آب	370	30	552	67	4410	27.2
أيلول	415	58	630	100	3500	24.9
تشرين الأول	430	70	611	125	3800	20.1
تشرين الثاني	320	65	450	130	3200	13.9
كانون الأول	325	69	455	140	3200	9.3

وتبين الأشكال(3-4) و(3-5) العلاقة بين كفاءة إزالة BOD5 و COD عند درجات حرارة مختلفة.



الشكل (3-4): كفاءة إزالة BOD5 عند درجات حرارة مختلفة.



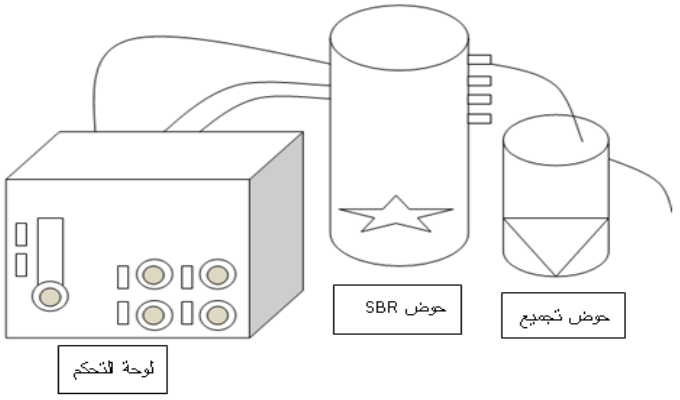
الشكل (3-5): كفاءة إزالة COD عند درجات حرارة مختلفة.

تبين النتائج أن كفاءة إزالة BOD_5 تتراوح مابين 78%إلى91% وتكون أعلى قيمة لفعالية الإزالة عند أعلى درجة حرارة وسطية مقاسة $27.2\ C^o$.

كما أن كفاءة إزالة COD تتراوح مابين 62%إلى87% وتكون أعلى قيمة لفعالية الإزالة عند أعلى درجة حرارة وسطية مقاسة $27.2C^o$.

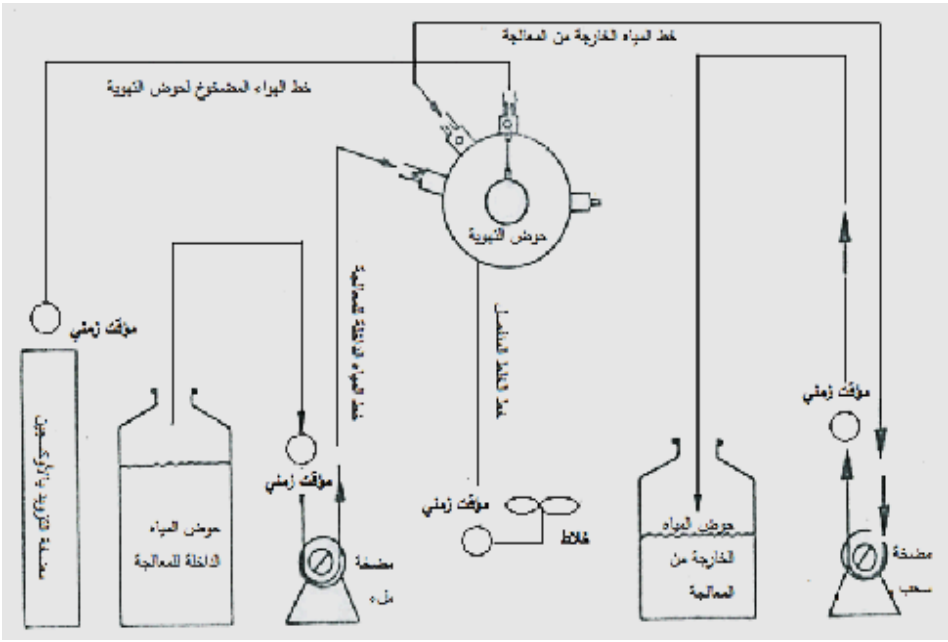
3-3 نتائج العمل المخبري:

تم العمل على وحدة معالجة بيولوجية مخبرية تتألف من حوض (Sequencing Batch (SBR Reactor بحجم 10 L تتم تهوية الحوض من خلال أنابيب مثقبة متوضعة في أسفل الحوض، كما تم تزويده بخلاط لتأمين عملية الخلط في الطور منقوص الأكسجين، يتم إدخال المياه إلى الحوض من خلال مضخة السحب، ويتم تفريغ المياه المعالجة بواسطة مضخة تفريغ إلى حوض تجميع، ترتبط كل مضخة بمؤقت زمني خاص، وكذلك مضخة التهوية والخلاط، ويبين الشكل (3-6) أقسام المفاعل المخبري



الشكل (3-6): أقسام المفاعل المخبري

كما يبين الشكل (3-7) المخطط التكنولوجي لعمل المفاعل، تحوي وحدة المعالجة على لوحة تحكم يمكن من خلالها التحكم بزمن السحب والتهوية والخلط والتفريغ.



الشكل (3–7): المخطط التكنولوجي لعمل المفاعل

ويبين الشكل (3–8) لوحة التحكم الخاصة بوحدة المعالجة، والشكل(3–9) صورة المفاعل أثناء العمل.

الشكل (3-8): لوحة التحكم الخاصة بوحدة المعالجة

الشكل(3-9): صورة المفاعل أثناء العمل

تم وضع 3L من الحمأة المنشطة (مأخوذة من محطة المعالجة في الدوير) في حوض الـ SBR مع 3L من مياه الصرف الصحي (من محطة الدوير أو من مجرور الشماس المار ضمن جامعة حمص)، ثم تعريضها لتعاقب الأطوار (لاهوائي- هوائي- منقوص الأكسجين) كما يبين الجدول (3-3) لتحقيق أفضل كفاءة لإزالة المواد العضوية والمغذيات [6].

الجدول (3-3): زمن الأطوار اللازم لتشغيل المفاعل

الطور	ملء	لاهوائي	هوائي	منقوص الأكسجين	سحب
الزمن (ساعة)	0.5	2	4	1	0.5

ثم إضافة 4L من مياه الصرف الصحي المراد معالجتها إلى الحوض بحيث يتم الحفاظ على 6L (مزيج الحمأة ومياه الصرف المدروسة) ضمن حوض الـ SBR والعمل على سحب الـ 4L المضافة

في نهاية كل دورة خلال زمن سحب ساكن (0.5h)، ويتم تجميع المياه الناتجة عن المعالجة في حوض تجميع.

في الطور اللاهوائي يتم إيقاف التهوية والخلط، وفي الطور منقوص الأكسجين يتم إيقاف التهوية فقط. يتم تشغيل وحدة المعالجة التجريبية لمدة أسبوع عند بدء التشغيل قبل إجراء التجارب على المياه المعالجة حتى تتأقلم الحمأة مع مياه الصرف ضمن ظروف المخبر.

البارامترات المقاسة:

– NH_4 – P– COD– درجة الحرارة الوسطية

الأجهزة المستخدمة:

– حاضنة قياس COD – مقياس الطيف الضوئي المرئي

– كاشف الفوسفات– كاشف النترات

ويبين الشكل (3–10) العينات قبل المعالجة، والشكل(3–11) العينات بعد المعالجة

الشكل (3–10): العينات قبل المعالجة

الشكل(3–11): العينات بعد المعالجة

كما يبين الشكل (3–12) مياه الصرف المخلوطة مع الحمأة أثناء عمل المفاعل.

الشكل (3-12): مياه الصرف المخلوطة مع الحمأة أثناء عمل المفاعل

وتبين الأشـــكال (3-13) و(3-14) حاضـــنة COD وجهاز قياس الطيف الضـــوئي.

الشكل (3-13): حاضنة COD

الشكل (3-14): جهاز قياس الطيف الضوئي

تم قياس (COD- P- NH4) قبل وبعد المعالجة ضمن المفاعل المخبري في شهور مختلفة من السنة ضمن درجات حرارة متفاوتة، وأعطت التجارب النتائج المبينة في الجدول(3-4).

الجدول(3-4): القيم المقاسة COD- P- NH4 قبل وبعد المعالجة

الشهر	درجة الحرارة C^0 الوسطية	COD_{in} / COD_{out}	P_{in} / P_{out}	$NH4_{in}$ / $NH4_{out}$
حزيران تموز	27	550 / 121	30.6 / 3.5	32.8 / 3.9
		450 / 90	29.9 / 4.1	34.4 / 3.6
		580 / 100	31.9 / 3.5	30.2 / 3.2
		430	14.6	28.8

أيلول	20	111	3.6	12
		336	12.2	36
		90	3.2	13
		298	14.6	30.2
		90	4.1	3.2
تشرين 1	13	290	15.5	28
		111	5.5	15
تشرين 2		282	13.7	28
		110	6.5	15
		266	13.7	36
		100	6	18

تم حساب كفاءة الإزالة لكل من (COD– P– NH4) عند درجات الحرارة الوسطية، وأعطت الحسابات النتائج المبينة في الجدول(3–5).

الجدول(3–5): كفاءة إزالة NH4 –P –COD عند درجات حرارة مختلفة

درجة الحرارة C^0	كفاء إزالة COD %	كفاء إزالة P %	كفاء إزالة NH4 %
27	78	88	88
	80	86	89
	82	89	89
20	74	75	61
	73	73	64
	70	71	65

13	62	48	46
	60	52	46
	60	56	50

نلاحظ من الجدول السابق (3-5) مايلي:

- أن كفاءة إزالة COD تتراوح ما بين (82-60)% حيث بلغت أعلى قيمة عند درجة حرارة $27C^0$.
- أن كفاءة إزالة P تتراوح ما بين (89-48)% حيث بلغت أعلى قيمة عند درجة حرارة $27C^0$.
- أن كفاءة إزالة NH4 تتراوح ما بين (89-46)% حيث بلغت أعلى قيمة عند درجة حرارة $27C^0$.

4- النتائج ومناقشتها:

- تبين النتائج الفعلية المأخوذة من محطة الدوير خلال أشهر السنة أن أعلى قيمة لكفاءة إزالة BOD_5 بلغت 91% كما أن أعلى قيمة لكفاءة إزالة COD بلغت 87% عند أعلى درجة حرارة وسطية مقاسة C^o 27.2. وبالرغم من ذلك فقد حققت المحطة كفاءة إزالة جيدة للملوثات العضوية في أشهر الشتاء:
  - كفاءة إزالة BOD_5 تتراوح مابين 79% إلى 82%
  - كما أن كفاءة إزالة COD تتراوح مابين 62% إلى 71%

  وذلك بسبب زيادة زمن المكوث.
- تبين النتائج المقاسة على المياه المعالجة ضمن المفاعل المخبري خلال أشهر مختلفة السنة أن أعلى قيمة لكفاءة إزالة COD بلغت 82%، وأعلى قيمة لكفاءة إزالة P بلغت 89%، وكذلك أعلى قيمة لكفاءة إزالة NH4 بلغت 89% عند أعلى درجة حرارة وسطية مقاسة C^o 27 .

نلاحظ ازدياد كفاءة المعالجة مع ازدياد درجات الحرارة، ويرجع السبب إلى نشاط بكتريا الميزوفيل التي تبلغ أوجها عند درجات الحرارة ($25-35\ C^0$)، وتلعب دوراً رئيسياً في عمليات المعالجة الهوائية [6].

كما نلاحظ تناقص كفاءة الإزالة مع انخفاض درجات الحرارة لأن معدل النمو الأقصى للبكتيريا ينخفض عند درجات حرارة منخفضة أقل من (15°C) وتتراجع فعالية الإنزيمات المشاركة في التحلل الحيوي ببطء في درجات الحرارة المنخفضة [10].

5- الاستنتاجات والتوصيات:

- تؤثر درجات الحرارة بشـــكل كبير في عمليات المعالجة البيولوجية، وهناك صـــعوبة كبيرة في التحكم في درجات الحرارة في المحطات العاملة لذلك لابد من زيادة الأبحاث العملية التي تدرس تأثير درجات الحرارة على أنظمة المعالجة في الظروف المحلية.
- تتأثر الأحياء الدقيقة التي تقوم بإزالة الملوثات في أنظمة المعالجة البيولوجية بشـــكل كبير بدرجات الحرارة، لذلك لابد من زيادة الموارد اللازمة لدراســة و تحليل البكتريا الدقيقة وتفاعلاتها تحت المجهر.
- دراسة تأثير درجات الحرارة على خصائص الحمأة وترسيبها.
- دراسة تأثير درجات الحرارة على SS وMLSS
- إن الأنظمة العاملة تحتاج إلى تكييف تشـغيلي عند درجات الحرارة المنخفضــة مثل زيادة زمن المكوث أو عزل الخزانات، أو تعديل ضخ الهواء أو سرعة المضخات حسب درجات الحرارة.

المراجع العربية:

1- د.ميخائيل، جوزيف، د. زكية، رصين، محطات معالجة مياه المجاري/جامعة حمص /2002-2001

2- د. زكية، رصين، ميكروبولوجيا المياه/جامعة حمص 2009-2010/

3- د. عجيب، نعيمة: أسس تصميم محطات المعالجة /محاضرة علمية 2020/

4- محطة المعالجة في الدوير

المراجع الأجنبية:

5- Metcalf & Eddy. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5th Edition.

6- Rittmann, B. E., & McCarty, P. L. (2012). Environmental Biotechnology: Principles and Applications

7- Zhang, Y., Li, J., & Wang, Z. (2023). Effect of Temperature on Domestic Wastewater Treatment. Journal of Environmental Management, 325, 116469.

8- Springer Nature. (2021). Seasonal Impact of Temperature on Wastewater Treatment Performance. Water Science and Technology, 83(6), 1257-1268.

9- Alisawi, H. A. O. et al. (2020). Performance of wastewater treatment during variable temperature conditions: a review.

10- Tejaswini, E. et al. (2020). Effect of Temperature on Effluent Quality in a Biological Activated Sludge Process.