الرياضيات أداة لفهم التراث: نمذجة رياضية لأنظمة الأفلاج في سلطنة عمان

Mathematics as a Tool for Understanding Heritage: Mathematical Modeling of Aflaj Systems in the Sultanate of Oman

إعداد

د. منصور ياسر عبيد الرواحي

Dr. Mansoor Yasser Obaid Al-Rawahi

أستاذ مساعد كلية الآداب والعلوم الإنسانية جامعة الشرقية – سلطنة عمان

د. مسعود سعيد الحضرمي

Dr. Masoud Saeed Al-Hadrami

باحث دراسات وتطوير أول – وزارة التربية والتعليم – سلطنة عمان

Doi: 10.21608/jasep.2025.435281

استلام البحث: ١٢ / ٣ /٢٠٢٥

قبول النشـــر: ١٠ / ٥ / ٢٠٢٥

الرواحي، منصور ياسر عبيد و الحضرمي، مسعود سعيد (٢٠٢٥). الرياضيات أداة لفهم التراث: نمذجة رياضية لأنظمة الأفلاج في سلطنة عمان. ***المجلة العربية للعلوم التربوية والنفسية***، المؤسسة العربية للتربية والعلوم والآداب، مصر،٩(٥٠)، ٥٩١ – ٦٢٠.

http://jasep.journals.ekb.eg

الرياضيات أداة لفهم التراث: نمذجة رياضية لأنظمة الأفلاج في سلطنة عمان

المستخلص:

يتناول البحث الحالي النظام الهيدروليكي التقليدي للأفلاج العُمانية من منظور رياضي وهندسي، ويُبرز كيف أن هذا الإرث المائي العريق يمثل تطبيقًا عمليًا مبكرًا لعدد من المفاهيم العلمية الحديثة، وقد تم تحليل تدفق المياه داخل قنوات الفلج باستخدام معادلات هيدروليكية مثل معادلة برنولي، ومعادلة ماننغ لحساب سرعة الجريان في القنوات المفتوحة، ومعادلة دارسي- فايسباخ لتقدير الفواقد الناتجة عن الاحتكاك، كما أُخذت زاوية الانحدار وقطر المقطع العرضي للفلج في الحسبان، لتوضيح العلاقة بين التصميم الهندسي وكفاءة الجريان. اعتمد البحث أيضًا على نماذج رياضية مثل الرسوم البيانية (Graph Theory) والمصفوفات لتحليل بنية شبكة الأفلاج، وربطها بسلوك تدفق المياه وتوزيعها بين المزارع والمجتمعات. من الجانب الاجتماعي، استعرض البحث نظام "الساعات" المستخدم لتقسيم المياه بين المزارعين، وبيّن كيف يُعد نموذجًا عدليًا دقيقًا يستند إلى تقسيم الزمن كوحدة لقياس الحقوق المائية، يُظهر هذا النظام توافقًا بين الرياضيات والممارسات المجتمعية؛ مما يعكس تطورًا مبكرًا في إدارة الموارد، وخلص البحث إلى أن نظام الأفلاج ليس فقط إنجازًا تقنيًا، بل مثال حي على تكامل العلم والهندسة مع القيم الاجتماعية والبيئية، ما ساهم في استدامته لقرون. وأوصت الدراسة بضرورة تحسين عمليات صيانة الأفلاج التقليدية مع إدخال تقنيات هندسية معاصرة، وتعزيز برامج التدريب للمزارعين حول أساليب إدارة الأفلاج بكفاءة، بالإضافة إلى تطوير استراتيجيات لضمان استدامة الموارد المائية والحفاظ عليها للأجيال القادمة من خلال دمج الأساليب الحديثة مع التقليدية.

الكلمات المفتاحية: الرياضيات، التراث، النمذجة، الأفلاج ، الأنظمة.

Abstract:

The present study examines the traditional hydraulic system of Omani aflaj from a mathematical and engineering perspective, highlighting how this rich water heritage represents an early practical application of several modern scientific concepts. The water flow within the aflaj channels was analyzed using hydraulic equations such as Bernoulli's equation, Manning's equation for calculating flow velocity in open channels, and the Darcy-Weisbach equation for estimating friction losses. The slope angle and the cross-sectional diameter of the falaj were also considered to illustrate the relationship

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

between engineering design and flow efficiency. The study further employed mathematical models, including graph theory and matrices, to analyze the structure of the aflaj network and its relation to water flow behavior and distribution among farms and communities. From a social perspective, the study reviewed the "hours" system used to allocate water among farmers, demonstrating how it serves as an accurate and equitable model based on time division as a unit for measuring water rights. This system shows a remarkable alignment between mathematics and community practices, reflecting an early development in resource management. The study concluded that the aflaj system is not only a technological achievement but also a living example of the integration of science, engineering, and social and environmental values, which has contributed to its sustainability for centuries. The study recommended enhancing the maintenance processes of traditional aflaj by incorporating modern engineering techniques, strengthening training programs for farmers on efficient aflaj management methods, and developing strategies to ensure the sustainability and preservation of water resources for future generations by integrating modern and traditional approaches.

مقدمة البحث

في مسيرة الإنسان لفهم العالم من حوله، كانت الرياضيات ولا تزال لغة دقيقة لفهم الأنظمة الطبيعية والاجتماعية، إذ تُستخدم في تحليل الظواهر المعقدة وتقديم تفسيرات مبنية على نماذج رياضية وهندسية. وقد أشار ستيفن هوكينغ (Hawking, 2001) إلى أن "الرياضيات هي البنية التحتية للكون"، ما يؤكد دورها المحوري في تفسير الظواهر الكونية والإنسانية على حد سواء.

وفي هذا السياق، تحتل أنظمة إدارة المياه مكانة بارزة بين الأنظمة التي يمكن دراستها رياضيًا، حيث تُعد من أكثر المجالات التي وظّف فيها الإنسان قدراته الرياضية والفكرية لتحقيق التوازن بين الحاجة البشرية والموارد الطبيعية. ومن بين هذه الأنظمة، يبرز نظام الفلج العماني كأحد أعرق وأذكى أنظمة توزيع المياه في العالم، إذ يمثل نموذجًا بيئيًا وهندسيًا فريدًا تم تطويره منذ آلاف السنين في بيئة قاحلة

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

نسبيًا، دون استخدام أدوات حديثة، لكنه نجح في تقديم نموذج متكامل لتوزيع المياه بإنصاف واستدامة.

ووفقًا لما ورد في كتاب "الأفلاج العمانية" الصادر عن وزارة التراث والثقافة (2017)، فإن نظام الفلج يُبنى على مبادئ دقيقة في قياس الانحدار، حساب التوقيت، وتوزيع الحصص، وكلها تعتمد على ما يمكن وصفه اليوم بمفاهيم رياضية واضحة، مثل نظرية الشبكات[١]، قوانين الهيدرولوجيا[٢]، والتوزيع الزمني[٣].

ومن هنا تبرز أهمية توظيف النمذجة الرياضية لفهم نظام الأفلاج، ليس فقط لتفسير آليات عمله، بل لإبراز العبقرية الكامنة في الفكر العماني التقليدي، وفتح الباب أمام استخدام هذه النماذج في تطبيقات معاصرة لإدارة المياه، في ظل تحديات التغير المناخي والندرة المائية.

وعليه، يتمحور هذا البحث حول الإشكالية التالية:

هل يمكن للنماذج الرياضية أن تفسّر نجاح نظام الفلج في سلطنة عمان منذ قرون؟ وما مدى دقة الأسس الرياضية الكامنة خلف هذا النظام؟

أهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى استكشاف الترابط العميق بين الرياضيات والتراث المائي العماني من خلال تحليل أنظمة الأفلاج ونمذجتها رياضيًا، وذلك من خلال تحقيق الأهداف التالية:

---

[١] هي فرع من فروع الرياضيات التطبيقية يُعنى بدراسة الكيانات المترابطة – سواء كانت محطات، عقدًا، أو مسارات – من خلال تمثيلها على شكل نقاط (عُقد) وخطوط (روابط) تربط بينها. في سياق الأفلاج، تُستخدم هذه النظرية لفهم البنية التحتية لنظام توزيع المياه، حيث تمثل القنوات والأنفاق شبكة مترابطة تنقل المياه من المصدر إلى وجهتها النهائية. هذا التمثيل يساعد على تحليل كفاءة توزيع المياه، ورسم نماذج تُظهر أفضل السبل لتقليل الفاقد، وتوفير بدائل عند حدوث انسدادات أو أعطال.

[٢] هي مجموعة من المبادئ والقواعد العلمية التي تدرس دورة المياه في الطبيعة، بما في ذلك حركة المياه الجوفية والسطحية، التبخر، التسرب، والتصريف. في نظام الفلج، تُسهم قوانين الهيدرولوجيا في حساب سرعة جريان الماء، تقدير الكمية المتوفرة، وفهم العلاقة بين طبيعة التربة والانحدار وكمية التدفق. من خلال هذه المعطيات، يُمكن تصميم بنية الفلج بطريقة تضمن استمرارية السريان، وتقلل من مخاطر الجفاف أو الفيضانات المفاجئة.

[٣] هو مفهوم يُشير إلى تنظيم وتوزيع مورد معين – مثل الماء – عبر فترات زمنية محددة، بناءً على معايير كمية أو نسبية. في نظام الأفلاج، يُطبّق هذا المفهوم عبر تقسيم أوقات السقي إلى وحدات زمنية دقيقة، تُعرف في بعض الأنظمة بـ" بالباده" أو "الاثر"، وتُمنح كل وحدة زراعية أو مستفيد حقًا محددًا في توقيت معين. يهدف هذا التنظيم الزمني إلى تحقيق العدالة في التوزيع، وتفادي التداخل أو الهدر، ما يعكس فهمًا متقدمًا لمبادئ الإدارة الزمنية للموارد

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

١. توظيف أدوات الرياضيات التطبيقية، كالمعادلات التفاضلية، ونظرية الشبكات، والإحصاء، لفهم وتحليل أنظمة توزيع المياه في الأفلاج العمانية، والتعمق في الأسس العلمية التي قد تكون غير مصرح بها لكنها حاضرة في بنية النظام . (Hillel, 2000)
٢. بناء نماذج رياضية وهيدرولوجية تحاكي سريان المياه في الفلج، من المنبع إلى المصب، وتأخذ بعين الاعتبار عناصر مثل الانحدار، الطول، معدل التدفق، وفقدان المياه بالتبخر أو التسرب، بما يعزز من فهم ديناميكية الفلج كمنظومة مغلقة ومستدامة.
٣. استكشاف العلاقة بين التصميم الهندسي للفلج والمفاهيم الرياضية الأساسية، خاصة ما يتعلق بانحدار القنوات، وتوزيع الحصص المائية الزمنية (الساعات)، وربطها بمفاهيم مثل العدالة في التوزيع، والتحكم في الجريان، وكفاءة نقل المياه باستخدام منظور رياضي علمي.
٤. تقديم رؤية معاصرة لتراث تقليدي، من خلال إعادة قراءة نظام الفلج باستخدام الأدوات العلمية الحديثة، وإبراز قابليته للتطبيق في إدارة الموارد المائية في المناطق الجافة، بما يساهم في تقديم نموذج مستدام قابل للاستفادة منه في مشاريع المياه على الصعيدين المحلي والدولي (وزارة التراث والثقافة، ٢٠١٠).

أهمية البحث

يحمل هذا البحث أهمية خاصة تتجلى في الجوانب العلمية والثقافية والتعليمية، وذلك على النحو الآتي:

١. **فتح مجال جديد بين التراث والعلوم الرياضية**: يُعد هذا البحث من الدراسات البينية التي تجمع بين علم الرياضيات والتاريخ والتراث البيئي، وهو اتجاه حديث في البحوث العلمية يُعرف باسم "العلوم المتكاملة" أو "البينية"، ويهدف إلى تقديم مقاربات جديدة لفهم الظواهر من زوايا متعددة .(Jacobs & Frickel, 2009) إن نمذجة نظام الفلج رياضيًا تُمثّل فتحًا معرفيًا يمكن أن يُثري الدراسات المستقبلية التي تربط بين البيئة، الهندسة، والتاريخ المحلي.
٢. **تقديم نموذج عماني في التراث يمكن تحويله إلى مادة تعليمية STEM** يُعد إدماج التراث المحلي في التعليم الحديث مدخلًا فعّالًا لبناء وحدات تعليمية قائمة على مفهوم STEMالعلوم، التكنولوجيا، الهندسة، الرياضيات .(فمن خلال دراسة نظام الفلج في سلطنة عمان كنموذج حقيقي، يمكن لطلبة المدارس والجامعات أن يتعلموا مبادئ الفيزياء والهيدرولوجيا والهندسة، مما يربط المفاهيم العلمية ببيئتهم الثقافية والاجتماعية.

تشير الأدبيات التربوية إلى أن التعليم القائم على المكان، الذي يدمج البيئة المحلية في المناهج، يُعزز من التعلم النشط والسياقي .ففي دراسة أجراها باسكوب

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

وباير (٢٠٢١) على مشاريع STEM في مدارس جنوب تشيلي، وُجد أن دمج التحديات البيئية المحلية في التعليم ساهم في تعزيز مشاركة الطلاب والمعلمين، وخلق روابط جديدة مع المجتمع المحلي، مما ساهم في بناء قدرات مجتمعية لمواجهة التحديات الاجتماعية والبيئية .

بالإضافة إلى ذلك، يُبرز منهج STEM ذو الصلة الثقافية (CReST) أهمية دمج التراث الثقافي في التعليم، فقد أظهرت دراسة لفيري ووايت (٢٠٢٤) أن استخدام عناصر من التراث الثقافي في تدريس الكيمياء وتاريخ العالم في المدارس الثانوية يعزز من اهتمام الطلاب بالمادة ويحسن من أدائهم الأكاديمي.

بناءً على هذه الدراسات، يمكن القول إن دمج نظام الفلج في سلطنة عمان في مناهج STEM يُعد خطوة استراتيجية لتعزيز التعلم السياقي، وربط الطلاب بتراثهم الثقافي، وتطوير مهاراتهم العلمية بطريقة عملية وملموسة.

٣. **تعزيز الهوية الوطنية من خلال العلم**: يشكل هذا البحث مساهمة فاعلة في تعزيز الهوية العمانية من خلال إبراز الإرث الحضاري في إدارة المياه، وربطه بالأدوات الرياضية الحديثة، ما يمنح الجيل الجديد فهمًا علميًا لجوانب من تراثه، ويعزز الانتماء عبر المعرفة، ويؤكد على أن التفكير العلمي ليس وافدًا، بل متأصل في الممارسات العمانية منذ قرون (وزارة التراث والثقافة، ٢٠١٠).

أسئلة البحث

ينطلق هذا البحث من مجموعة من الأسئلة الرئيسة التي تسعى إلى استكشاف نظام الافلاج من منظور رياضي تحليلي، بهدف بناء فهم منهجي لآليات تشغيله وتوزيع مياهه، وتتمثل هذه الأسئلة في الآتي:

١. **ما هي القوانين الرياضية التي تنطبق على نظام توزيع المياه في الفلج؟** ويشمل ذلك تحليل العلاقة بين معدل التدفق، حجم القناة، عامل الانحدار، وتأثير مقاومة الجدران، بالاستناد إلى قوانين الهيدرولوجيا والفيزياء الرياضية.

٢. **هل يمكن تمثيل الفلج كنموذج رياضي شبكي؟** أي دراسة الفلج كمجموعة من العقد (Nodes) والمسارات (Edges) وفقًا لنظرية الشبكات (Graph Theory)، وتحليل تدفق المياه عبرها باستخدام نماذج رياضية تعتمد على المعادلات الخطية أو غير الخطية.

٣. **ما أثر الزاوية والانحدار في سريان المياه ضمن قنوات الفلج؟** وهذا يتطلب تطبيق قوانين الانحدار ونسبة الجريان(Gradient & Flow Rate) ، وربطها بكفاءة نقل المياه، والفقد الناتج عن الاحتكاك أو التسرب.

٤. **كيف يُوزَّع الماء بين المزارعين رياضيًا عبر القسمة الزمنية (الساعات)؟** ويقصد بها دراسة النظام الزمني لتوزيع المياه بين المستفيدين وفق مبدأ

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

"الساعات"، وتحليل هذه القسمة كنموذج عددي قابل للتحليل الرياضي، يضمن العدالة والاستمرارية.

منهجية البحث

يرتكز هذا البحث على منهجية علمية تجمع بين الوصف والتحليل والنمذجة، مستفيدًا من أدوات الرياضيات التطبيقية لدراسة نظام الفلج بوصفه نموذجًا تراثيًا ذا بنية هندسية دقيقة. وتتوزع المنهجية على المحاور التالية:

١- **المنهج المتّبع:**

- المنهج الوصفي التحليلي لدراسة خصائص نظام الفلج، تاريخيًا وهندسيًا، وتحليل مكوناته ووظائفه من خلال البيانات والمصادر المتوفرة.
- المنهج التجريبي – النمذجي لتطبيق نماذج رياضية وهيدرولوجية على بيانات حقيقية مستمدة من أحد الأفلاج، بهدف محاكاة سريان المياه وتوزيعها.

٢- **مجتمع البحث وعينته:** سيتم اختيار نموذج فلج واحد أو أكثر من الأفلاج العمانية النشطة (مثل فلج دارس بنزوى، أو فلج الخطمين بنيابة (بركة الموز)، وذلك لتطبيق النماذج الرياضية على بيانات فعلية من واقع الميدان.

٣- **أدوات البحث:**

- المصادر والمراجع العلمية كتب، دراسات، وثائق محلية، ودوريات علمية تتعلق بالأفلاج والرياضيات.
- المقابلات النوعية مع مهندسين مائيين، ومُلاك الأفلاج، وخبراء من وزارة الثروة الزراعية والمياه.
- برامج النمذجة الرياضية والهيدرولوجية مثلMATLAB ، Excel، GeoGebra، لتصميم النماذج الحسابية وتفسيرها.
- القياسات الميدانية تشمل أطوال القنوات، درجات الانحدار، معدلات التدفق، وأزمنة توزيع المياه.

٤- **الأساليب الإحصائية والتحليلية:**

- استخدام المعادلات التفاضلية لتحليل سريان المياه.
- تطبيق نظرية الشبكات لتمثيل بنية الفلج.
- تحليل بيانات التوزيع الزمني (الساعات) باستخدام النمذجة العددية والرسم البياني.

٥- **حدود البحث:**

- زمانيًا يركّز على النماذج الحالية لأفلاج ما زالت فاعلة.
- مكانيًا يقتصر التطبيق على أفلاج عمانية مختارة. (فلج دارس بولاية نزوى وفلج الخطمين بنيابة بركة الموز)

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

- موضوعيًا يركّز على الجوانب الرياضية والهندسية، ولا يتناول الجوانب الفقهية أو الاجتماعية بشكل مفصل.

الدراسات السابقة

شهد موضوع الأفلاج العُمانية اهتمامًا أكاديميًا متزايدًا خلال العقود الماضية، تمثل في عدد من الدراسات التي تناولت الجوانب التاريخية، الاجتماعية، والبيئية لهذه الأنظمة التقليدية. ومع ذلك، فإن استخدام الرياضيات كنموذج تحليلي لفهم بنية الفلج العماني لا يزال مجالًا نادرًا، وهو ما يسعى إليه هذا البحث. وفيما يلي أبرز الدراسات السابقة ذات الصلة:

أ: الدراسات العُمانية والعربية

١. وزارة التراث والثقافة الأفلاج العُمانية (2010).

تقدم الدراسة وصفًا دقيقًا لأصناف الأفلاج، وطرق توزيع المياه، والتقاليد المرتبطة بها كما تؤكد أن نظام الفلج يقوم على حسابات زمنية دقيقة مثل "الأثر" و"البادة"، لكنها لم توظف النمذجة الرياضية لتحليل النظام.

٢. وزارة البلديات الإقليمية وموارد المياه المشروع التجريبي لتوثيق السنن والأعراف والملكيات المتعلقة بالأفلاج(2009) .

صدر عن وزارة البلديات الإقليمية وموارد المياه في عام ٢٠٠٩ "المشروع التجريبي لتوثيق السنن والأعراف والملكيات المتعلقة بالأفلاج"، والذي يُعد من المشاريع الرائدة في توثيق المعرفة التقليدية المرتبطة بإدارة نظام الأفلاج في عُمان، وقد جاء هذا المشروع ليسلط الضوء على البنية الاجتماعية والقانونية التي تضبط استخدام المياه وتوزيعها في المجتمعات المحلية.

احتوى المشروع على توثيق دقيق للأعراف التقليدية المعمول بها في توزيع المياه، ووصف شامل لوحدات التوقيت المعتمدة مثل "الساعة"، و"الأثر"، و"الدوار"، إلى جانب تحليل أنماط الإدارة الجماعية للمياه التي تقوم على الشراكة والتوافق، مما يعكس نظامًا متكاملًا للتوزيع المستدام.

ورغم أن المشروع قد أشار إلى إمكانية الاستفادة من هذه النظم التقليدية في بناء نماذج علمية حديثة، إلا أنه لم يتوسع في تقديم تحليل رياضي دقيق لتلك الأنظمة، مما يترك المجال مفتوحًا أمام الباحثين للقيام بدراسات تكميلية تجمع بين التراث والهندسة الرياضية المعاصرة.

٣. مسعود الحضرمي وآخرون نظام تقسيم مياه الأفلاج عند العمانيين، وزارة التراث والثقافة(2017) .

يُعد كتاب "نظام تقسيم مياه الأفلاج عند العمانيين"، والصادر عن وزارة التراث والثقافة، من أهم المراجع الميدانية المتخصصة في دراسة التوزيع الزمني

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

لمياه الأفلاج العمانية. وقد تميز هذا العمل بدقته في توثيق الأسس العملية التي يقوم عليها نظام الأفلاج، وتفصيل الجوانب التطبيقية التي كانت سائدة منذ قرون.

سلّط المشروع الضوء على وحدة "الأثر" بوصفها الوحدة الأساسية في حساب وتقسيم المياه، وهي وحدة زمنية محلية تقيس المدة التي تستغرقها نقطة من الظل أو النجم لعبور مسافة معينة على سطح الجدار أو الأرض، ما يدل على دمج دقيق بين الحساب الفلكي والتقنيات التقليدية في ضبط الوقت والماء.

كما تضمن الكتاب شرحًا وافيًا حول أنظمة "تقسيم المياه" النهارية والليلية، وهي أساليب عُمانية فريدة لتنظيم توزيع المياه على مدار اليوم والليل، باستخدام مؤشرات طبيعية مثل ظلال الجدران واتجاهات النجوم، بما يعكس فهماً بيئيًا متقدمًا لدى المجتمعات المحلية.

وتكمن أهمية هذا المرجع في كونه لا يكتفي بالتوثيق التاريخي، بل يُمثل نقطة انطلاق حقيقية لبناء نماذج رياضية حديثة تُحاكي النظام التقليدي بأسلوب علمي، مما يفتح آفاقًا جديدة لدمج المعارف التراثية مع أدوات التحليل الرياضي، ويُتيح تطوير دراسات هندسية بيئية مستندة إلى تجربة عُمانية متجذّرة.

ب: الدراسات الأجنبية

٤. Wilkinson, J. C. (1977). Water Systems in Oman: Origins and Development. درس تطور الأفلاج العمانية من منظور تاريخي واستعماري، وركّز على العلاقة بين النظام المائي وبنية المجتمع.

٥. Lightfoot, D. R. (1996). Moroccan Khettara: Traditional Irrigation and Progressive Desiccation. ناقش نظام الري التقليدي في المغرب (الخطارات)، وهو شبيه بالأفلاج، وربطه بالتغيرات البيئية.

٦. Bouwer, H. (2002). Integrated Water Management for the 21st Century. عرض تقنيات حديثة لإدارة المياه، وأشار إلى إمكانية الاستفادة من الأنظمة التقليدية.

موقع هذا البحث بين الدراسات السابقة:

يُعد هذا البحث أول دراسة **تستخدم أدوات الرياضيات التطبيقية لتحليل نظام الفلج العماني**، من خلال:

- تحويل وحدات الوقت التقليدية إلى نماذج عددية.
- تحليل سريان المياه باستخدام المعادلات التفاضلية.
- بناء نموذج شبكي لهيكل الفلج.
- توظيف الرياضيات لقياس العدالة في التوزيع المائي.

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

مصطلحات البحث

- الفلج :

الفلج هو نظام ري تقليدي يُستخدم في سلطنة عُمان وبعض المناطق المجاورة، يعتمد على قنوات مائية تنقل المياه من مصادرها إلى المناطق الزراعية والمجتمعات المحلية. يُعتبر هذا النظام عنصرًا أساسيًا في الحياة الزراعية والاجتماعية والاقتصادية منذ آلاف السنين، وقد أُدرجت بعض الأفلاج العُمانية ضمن قائمة التراث العالمي (اليونسكو، ٢٠٠٦، ص ١)

أنواع الأفلاج في عُمان:

١. **الفلج الداؤودي** يُشكل نسبة ٤٥% من إجمالي الأفلاج في سلطنة عُمان، ومصدر مياهه هو الآبار الجوفية أو ما يسمى بـ "أم الفلج". تتميز قنواته بالامتداد في أنفاق تحت الأرض، بعرض لا يزيد عن متر وارتفاع يصل إلى مترين، ويقع بعضها على عمق يصل إلى ٥٠ مترًا تحت سطح الأرض. من أشهرها: فلج دارس وفلج الخطمين بولاية نزوى، وفلج الملكي بولاية إزكي، وفلج الميسر بولاية الرستاق. (الخليج، ٢٠١١، ص ١)

٢. **الفلج العيني** يستمد مياهه من العيون المائية التي تنبع من بين صخور الجبال، وتكون مياهه أكثر عذوبة ونقاء. (الخليج، ٢٠١١، ص ١)

٣. **الفلج الغيلي** يعتمد على المياه السطحية الجارية على سطح الأرض أو المياه تحت السطحية بالقرب من سطح الأرض في مجاري الأودية أو على سفوح الجبال. يزيد منسوب المياه في هذا النوع من الأفلاج مباشرة بعد هطول الأمطار، وربما يجف عند انقطاعها لمدة طويلة، وتبلغ نسبة الأفلاج الغيلية في السلطنة ٥٥%. (الخليج، ٢٠١١، ص ١)

الإطار النظري

أهمية الأفلاج في المجتمع العُماني:

تُعد الأفلاج من أبرز الشواهد على الحضارة العُمانية، إذ لعبت دورًا حيويًا في تشكيل المجتمعات الزراعية واستدامتها في بيئة قاحلة وشحيحة الموارد المائية، وقد أسهمت هذه الأنظمة في دعم النمو السكاني والعمراني، مما أدى إلى قيام تجمعات سكنية مستقرة في القرى والبلدات العُمانية (اليحيائي، ٢٠٢٢).

كما ساهمت الأفلاج أيضًا في تنظيم الحياة الاجتماعية من خلال اعتماد المجتمع على نظام توزيع دقيق للمياه يضمن العدالة والشفافية بين المستخدمين، ويُرسّخ قيم التعاون والتكافل بين المزارعين والأسر المستفيدة (العامري، ٢٠٢٣).

إضافة إلى ذلك، تُعد الأفلاج نموذجًا للإبداع الهندسي العُماني في التعامل مع البيئة، حيث ابتكر العمانيون أنظمة تحت الأرض تمتد لمسافات طويلة، ما يدل على

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

معرفة متقدمة بالجغرافيا والهيدرولوجيا، وقدرة عالية على التكيف مع الظروف الطبيعية القاسية (الحارثي، ٢٠١٧).

- المعادلات الهيدروليكية

تُستخدم المعادلات الهيدروليكية لتحليل حركة المياه داخل القنوات المفتوحة، وهي ضرورية لفهم العلاقة بين التدفق، والانحدار، والهندسة المقطعية للقناة. من أبرز هذه المعادلات معادلة مانينغ **(Manning's Equation)**، التي تُستخدم لحساب سرعة التدفق في القنوات المفتوحة بناءً على معامل الخشونة، ونصف القطر الهيدروليكي، وميل القاع(. (Chow, V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill

- **معادلة مانينغ: (Manning's Equation)**

تُعبر معادلة مانينغ عن سرعة التدفق المتوسطة (V) في قناة مفتوحة كما يلي:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

حيث:

V: سرعة التدفق المتوسطة (متر/ثانية)

n: معامل خشونة مانينغ.

R: نصف القطر الهيدروليكي (متر)، وهو نسبة مساحة المقطع العرضي للتدفق إلى المحيط المبتل.

S: ميل قاع القناة، وهو نسبة التغير في الارتفاع إلى الطول الأفقي للقناة.

تساعد هذه المعادلة في تصميم وتحليل القنوات المفتوحة، مثل الأنهار والقنوات وأنظمة الصرف، لضمان التدفق الفعّال للمياه. (**Manning's Equation** معادلة مانينغ"، ٢٠٢٣).

التدفق هو كمية المياه التي تمر عبر مقطع محدد من قناة مائية خلال وحدة زمنية، ويُقاس غالبًا بالمتر المكعب في الثانية (m^3/s) ويُحسب التدفق باستخدام العلاقة التالية: (Mays, L. W. (2005، ص ٢٣٠)

$$Q=A\times V$$

حيث:

Q: معدل التدفق (ثانية/م^3)

A: مساحة المقطع العرضي للتدفق (م^2)

V: السرعة المتوسطة للتدفق (الثانية/م)

تُستخدم هذه العلاقة في تصميم وتحليل أنظمة نقل المياه، مثل القنوات والأنابيب، لضمان كفاءة وفعالية توزيع المياه.

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

بالإضافة إلى ذلك، تُستخدم معادلات أخرى لتحليل سلوك التدفق في القنوات والأنابيب، من أبرزها **معادلة دارسي-فايسباخ (Darcy–Weisbach equation)**، التي تربط فقدان الضغط الناتج عن الاحتكاك بطول القناة، وقطرها، وسرعة التدفق. وتُعد هذه المعادلة أساسية في تصميم أنظمة نقل المياه، حيث تساعد في حساب الكفاءة الهيدروليكية وتحديد الفاقد في الضغط بدقة، وهو ما يُعد مهمًا في التطبيقات الهندسية المتقدمة.(Lumen Learning, n.d.)

الشبكات تشير إلى البنية الهندسية لأنظمة توزيع المياه، التي قد تشمل شبكات قنوات أو أنابيب، ويتم تحليلها باستخدام نظرية الرسوم البيانية (Graph Theory) ونماذج التدفق، وهي أدوات رياضية ضرورية لفهم تدفق المياه عبر أنظمة متشابكة مثل الأفلاج. (Ahuja, R.K., Magnanti, T.L., & Orlin, J.B., 1993, Network Flows, p. 34)

٢- لمحة عن تاريخ الأفلاج العُمانية (من زاوية رياضية)

يُعد نظام الأفلاج العُماني من أقدم الأنظمة المائية المعروفة في العالم، حيث تشير الدراسات إلى أنه يعود لأكثر من ٢٥٠٠ عام، وقد أظهر العمانيون وعيًا رياضيًا مبكرًا في إدارة المياه، تمثّل في استخدام نظام دقيق لتقسيم الحصص المائية بالاعتماد على وحدات زمنية مثل "الأثر" و"البادة"، والتي يتم ضبطها من خلال مراقبة الظل أو حركة النجوم. يُبرز هذا النظام فهمًا عميقًا للمفاهيم الحسابية والهندسية في مجتمع تقليدي يعتمد على الملاحظة والتجريب (الحضرمي، ٢٠١٧، ص ٥٥–٦٤).

كما أن عملية توزيع المياه بين المزارعين تتم وفق جداول زمنية محكمة تتضمن مفاهيم رياضية مثل "الدورة" و"الربع" و"النصف"، مما يعكس نمطًا زمنيًا متكاملًا لإدارة الموارد، ويُظهر قدرة على التنظيم الجماعي المستدام في بيئة نادرة الموارد (وزارة البلديات الإقليمية وموارد المياه، ٢٠٠٩، ص ٧٠–٧٣).

٣- مراجعة نماذج رياضية سابقة لإدارة المياه

عند النظر إلى تطور الأنظمة المائية القديمة، يتّضح أن العديد من الحضارات القديمة استخدمت نماذج رياضية دقيقة لتنظيم تدفّق المياه وتوزيعها، مستفيدةً من أدوات بسيطة، ولكنها قائمة على مبادئ حسابية وهندسية واضحة.

يُعد النموذج الفارسي المعروف بـ "القهات (Qanat) "من أبرز هذه النماذج، حيث اعتمد على حفر نفق مائل بانحدار دقيق يسمح بتدفّق المياه الجوفية من أعالي الجبال إلى المناطق السكنية والزراعية دون الحاجة إلى أي وسيلة ضخ. وقد أظهرت الدراسات أن تصميم هذه القنوات كان يستند إلى حسابات دقيقة للانحدار باستخدام أدوات تقليدية مثل الميزان المائي وحبال القياس.(Lightfoot, 1996)

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

أما النموذج الروماني، والمعروف بنظام "الأكويدكت(Aqueduct) "، فقد مثّل ذروة التقدم في البنية التحتية المائية في العصور الكلاسيكية. اعتمد الرومان على مبادئ رياضية صارمة، مثل الانحدار الثابت، والزوايا المحسوبة بدقة، لتوجيه المياه من المناطق الجبلية إلى المدن، مع تقليل احتمالات الفيضانات أو فقد المياه خلال التدفق(Hodge, 2002) .

تُظهر هذه النماذج كيف أن الفكر الرياضي والهندسي كان جزءًا جوهريًا من تصميم أنظمة المياه التقليدية، مما يعزز أهمية الربط بين التراث والهندسة في فهم واستلهام الأنظمة الحديثة.

٤- المبادئ الرياضية في تصميم الفلج العُماني

يعتمد نظام الفلج العُماني على مجموعة من المبادئ الرياضية والهندسية التي تم تطويرها وصقلها عبر قرون من الممارسة والخبرة المجتمعية، وتُعد الزوايا، والانحدارات، والتوقيت الزمني، ومعادلات التدفق من أهم الأسس التي بُني عليها هذا النظام.

الزوايا والانحدار

تعتمد قنوات الفلج على انحدار طفيف ودقيق يضمن تدفّق المياه بشكل مستمر دون توقف أو فقد بالتبخر، وتشير الدراسات الميدانية إلى أن زاوية الانحدار المثلى تتراوح غالبًا بين ١:١٠٠٠ و١:١٥٠٠، وهو انحدار محسوب بدقة من خلال الملاحظة العملية والتجريب المستمر عبر الأجيال(UNESCO, 2006 ؛ الحضرمي، ٢٠١٧، ص ٣٨)

التوزيع الزمني

يقوم نظام الفلج على تقنيات دقيقة في تقسيم الزمن، حيث يُقسم اليوم إلى وحدات زمنية تُعرف بـ"الآثر"، يُعادل كل أثر نصف ساعة تقريبًا، وتُجمع الآثار لتكوين "بادة" (نصف يوم). يُمكن تمثيل هذا النظام الزمني باستخدام مخططات تدفّق دورية، بما يُتيح نمذجته رياضيًا (وزارة البلديات، ٢٠٠٩، ص ٦٨؛ الحضرمي، ٢٠١٧، ص ٥٦).

حساب التدفق

يتم تقليديًا تقدير حجم الماء المتدفق في الفلج عن طريق الملاحظة المباشرة لانسياب المياه في الشريعة[٤]، أو باستخدام أدوات تراثية مثل الطاسة أو المد، والتي

[٤] هي الموقع المكشوف أو الحوض المائي الذي يظهر فيه ماء الفلج إلى سطح الأرض بعد أن يسري عبر الأنفاق الباطنية. وتُعد الشريعة النقطة الأساسية التي تُراقب فيها كمية المياه المتدفقة، ومن خلالها يُقسّم الماء على المستفيدين.

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

تمثل وحدات زمنية تُستخدم لتقسيم الحصص المائية بين المزارعين. ومع تطور المعرفة العلمية، أصبح من الممكن تحويل هذه المقاييس التقليدية إلى وحدات فيزيائية دقيقة، وربطها بنماذج رياضية معتمدة، أبرزها معادلة مانينغ (Manning's Equation)، المستخدمة لحساب التدفق في القنوات المفتوحة، والتي تُكتب بالشكل $Q=\frac{1}{n} S^{2/3} A R^{1/2}$

حيث:

- **Q هو حجم التدفق (م³/ثانية)**
- **k ثابت مرتبط بالاحتكاك**
- **S الانحدار الطولي للقناة**
- **A مساحة المقطع العرضي للتدفق.(Chow, 1959, pp. 105–112)**

أ- إنشاء نموذج رياضي مبسط لقناة فلج:

يُعد تطوير نموذج رياضي لقنوات الأفلاج أمرًا حيويًا لفهم ديناميكيات التدفق وتحسين كفاءة توزيع المياه. تُستخدم معادلة مانينغ لحساب سرعة التدفق في القنوات المفتوحة:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

حيث:

- V سرعة التدفق (متر/ثانية)
- n معامل الخشونة، يعتمد على طبيعة سطح القناة
- R نصف القطر الهيدروليكي (متر)، وهو نسبة مساحة المقطع العرضي إلى المحيط المبتل
- S ميل القاع

تساعد هذه المعادلة في تصميم وتحليل تدفق المياه داخل قنوات الأفلاج، مع مراعاة العوامل الفيزيائية والهيدروليكية(Mays, 2005, p. 230)

ب- تحليل بيانات التدفق ومقارنتها بالمعادلات النظرية:

يتطلب هذا التحليل جمع بيانات ميدانية حول معدلات التدفق في قنوات الأفلاج، ثم مقارنتها بالنتائج المتوقعة من المعادلات النظرية مثل معادلة مانينغ، يُسهم ذلك في تقييم دقة النموذج الرياضي وتحديد الفجوات بين القيم النظرية والعملية. في حالة

عادةً، تكون الشريعة مصممة بطريقة تتيح رصد التدفق، وتوزيع المياه إلى القنوات الزراعية، كما تُعتبر المكان الذي تُستخدم فيه أدوات القياس التقليدية مثل الطاسة أو المد لضبط الحصص المائية بدقة.

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

وجود اختلافات، يمكن تعديل المعلمات أو إعادة تقييم الافتراضات لضمان توافق النتائج مع الواقع (الغافري، ٢٠٠٦، ص ١٥).

ج- دراسة "نظام الساعات" كتوزيع زمني رياضي:

في نظام الأفلاج العُماني، يتم تقسيم المياه بين المستخدمين بناءً على نظام زمني دقيق يُعرف بـ"نظام الساعات"، يُقسم اليوم إلى فترات تُسمى "البادة"، حيث تتألف كل بادة من ١٢ ساعة، تُستخدم أدوات تقليدية مثل "الطاسة" (الساعة المائية) لقياس الوقت وتحديد مواعيد السقي، مما يضمن توزيعًا عادلًا للمياه بين المزارعين، هذا النظام يُبرز فهمًا متقدمًا للزمن وتطبيقاته في إدارة الموارد المائية (وزارة الإعلام، ٢٠١٩، ص ٤٧).

يُظهر هذا النظام التقليدي للتوزيع الزمني مدى تعقيد ودقة إدارة الموارد المائية في المجتمعات العُمانية .تحليل هذا النظام يُمكن الباحثين من فهم كيفية تكيّف المجتمعات مع الموارد المحدودة وتطوير آليات تضمن العدالة والكفاءة في التوزيع، بالإضافة إلى ذلك، يمكن استخدام هذه المعرفة لتطوير أنظمة إدارة مياه حديثة تستفيد من المبادئ التقليدية مع دمج التقنيات الحديثة.

في إطار دراستنا التحليلية لنظام الأفلاج العُماني، تم اختيار نموذجين من الأفلاج النشطة لتطبيق النماذج الرياضية على بيانات ميدانية فعلية:

١- **فلج دارس (ولاية نزوى):**

يُعد فلج دارس من أكبر وأشهر الأفلاج في سلطنة عُمان، ويقع في ولاية نزوى بمحافظة الداخلية. يمتد طوله إلى حوالي ٤ كيلومترات من عين الفلج إلى منطقة الشريعة، مع امتداد تحت الأرض يصل إلى أكثر من ٢٠ كيلومترًا. يُستخدم لري مساحات واسعة من المزارع والبساتين في الولاية، ويُعد محورًا أساسيًا للحياة الزراعية والاقتصادية للسكان المحليين، نظرًا لأهميته التاريخية والهندسية، تم إدراجه ضمن قائمة التراث العالمي لليونسكو عام ٢٠٠٦(Omaninfo.om, n.d.)

٢- **فلج الخطمين (نيابة بركة الموز، ولاية نزوى):**

يقع فلج الخطمين في نيابة بركة الموز التابعة لولاية نزوى، وهو أحد الأفلاج الداودية المهمة في المنطقة، يتغذى من وادي المعيدن المنحدر من الجبل الأخضر، ويبلغ طوله الكلي حوالي ٢,٤٥٠ مترًا. يتميز بتصميم هندسي دقيق في توزيع مياهه، حيث ينقسم إلى ثلاثة أقسام متساوية تروي مزارع الأهالي وأراضي بيت المال، يمر مجرى الفلج داخل حصن بيت الرديدة التاريخي، مما يُبرز التكامل بين البنية التحتية المائية والمعمارية في المنطقة، تم إدراجه أيضًا ضمن قائمة التراث العالمي لليونسكو عام ٢٠٠٦.(Alwatan.om, 2021)

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

يهدف اختيار هذين النموذجين إلى تحليل وتطبيق النماذج الرياضية على بيانات فعلية، مما يُسهم في فهم أعمق لآليات تشغيل وتوزيع المياه في نظام الأفلاج العُماني.

النتائج

١- **تقييم تصميم قناة فلج الخطمين:**

أجريت دراسة لتقييم كفاءة فلج الخطمين في تلبية احتياجات الري باستخدام نموذج HEC-RAS لمحاكاة ديناميكيات تدفق المياه داخل قنوات الفلج، وقد أظهرت النتائج أن المساحة المزروعة تبلغ ٧٢٣,١٢٤ متر مربع، تضم ١٦,٨٧٣ نخلة تمثل ٩١% من إجمالي المساحة، و٣,٩٢٠ شجرة من أنواع أخرى. تم تحديد إجمالي الطلب اليومي على المياه بحوالي ٣,٥٣٢.٨٥ متر مكعب لري هذه الأراضي. أثبتت الدراسة أن نظام الفلج يعمل بكفاءة عالية، حيث يبلغ متوسط الإمداد السنوي للمياه ٩,٦٧٦.٨ متر مكعب يوميًا، مما يشير إلى قدرة الفلج على تلبية الطلب المائي للزراعة المحلية.(Al-Kaabi et al., 2024)

٢- **نظام الري الذكي الهجين باستخدام مياه الأفلاج والطاقة الشمسية:**

تم تطوير نظام ري ذكي يجمع بين طاقة المياه المتدفقة من الأفلاج والطاقة الشمسية. يتألف النظام من وحدات لتوليد الطاقة باستخدام مولد تورغو-هيدرو وألواح شمسية، بالإضافة إلى نظام تحكم يعتمد على متحكم Arduino وأجهزة استشعار لقياس درجة الحرارة، الرطوبة، ورطوبة التربة. تُرسل البيانات المجمعة إلى منصة إنترنت الأشياءBlynk ، مما يسمح بالتحكم والمراقبة عن بُعد. أظهرت النتائج أن النظام يحقق استخدامًا فعالًا لمياه الأفلاج والطاقة الشمسية، مما يسهم في تقليل الهدر وتحسين كفاءة الري.(Adamsab et al., 2020)

٣- **تطبيق الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء في أنظمة الري بالطاقة الشمسية:**

تمت مراجعة تطبيقات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء في أنظمة الري التي تعتمد على الطاقة الشمسية. أشارت الدراسة إلى تطوير نظام ري ذكي يستخدم مصادر الطاقة المتجددة، مع التركيز على تقليل الهدر وتحسين استخدام المياه. يستخدم النظام وحدات تحكمArduino ، وأجهزة استشعار، وتطبيقات إنترنت الأشياء لمراقبة درجة الحرارة، والرطوبة، ورطوبة التربة، مما يمكن المزارعين من حساب احتياجات المياه بشكل أكثر فعالية.(Kumar et al., 2024)

في إطار دراستنا التحليلية لنظام الأفلاج العُماني، تم اعتماد منهجية شاملة لجمع وتحليل البيانات، تضمنت استخدام مصادر ومراجع علمية، إجراء مقابلات نوعية، توظيف برامج النمذجة الرياضية والهيدرولوجية، والقيام بقياسات ميدانية للإجابة على أسئلة الدراسة

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

أولا: عرض النتائج المتعلقة بالسؤال الأول ومناقشتها:

١. ما هي القوانين الرياضية التي تنطبق على نظام توزيع المياه في الفلج؟

يُعد نظام الفلج من أقدم أنظمة الري التقليدية في العالم، وقد أثبت فعاليته عبر العصور، ويمكن تحليله اليوم باستخدام أدوات الفيزياء الرياضية والهيدرولوجيا الحديثة. يعتمد تدفق المياه في قنوات الفلج على مجموعة من القوانين الرياضية والفيزيائية، أبرزها ما يلي:

١- قانون برنولي(Bernoulli's Equation)

يُستخدم لتحليل العلاقة بين الضغط، والسرعة، والارتفاع في نقاط مختلفة من الفلج.

$$\rho + \frac{1}{2}\, PV^2 + Pgh = \text{ثابت}$$

- P الضغط عند نقطة معينة
- ρ كثافة الماء
- v سرعة التدفق
- g تسارع الجاذبية الأرضية
- hالارتفاع

في نظام الفلج، يكون الارتفاع والانحدار من العوامل الأساسية التي تحدد السرعة ومعدل التدفق.(Chow, 1959)

٢- معادلة الاستمرارية(Continuity Equation)

تُستخدم لتحديد العلاقة بين حجم القناة ومعدل التدفق.

$$Q=A\cdot v$$

- Qمعدل التدفق الحجمي (م³/ثانية)
- Aمساحة مقطع القناة (م²)
- vسرعة المياه (م/ث)

وبالتالي، أي تغيّر في مساحة مقطع الفلج سيؤثر مباشرة في سرعة المياه ومعدل توزيعها.(Streeter & Wylie, 1998)

٣- معادلة مانينغ(Manning's Equation)

تُعد من أهم المعادلات المستخدمة في قنوات المياه المفتوحة مثل قنوات الفلج، حيث تأخذ في الحسبان عامل الانحدار ومقاومة الجدران.

$$v = \frac{1}{n}\, R^{2/3}\, S^{1/2}$$

- vسرعة الجريان
- n معامل مانينغ (يمثل مقاومة الجدران)
- R نصف القطر الهيدروليكي (نسبة المساحة إلى المحيط المبتل)
- S انحدار القناة (فرق الارتفاع / الطول)

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

هذه المعادلة مثالية لنمذجة نظام الفلج، حيث أن القنوات غالبًا ما تكون غير منتظمة الشكل وتتعرض لمقاومة بسبب الخشونة أو الطمي.(Chow, 1959) .

٤- معادلة دارسي-فايسباخ(Darcy–Weisbach Equation)

يمكن استخدامها في المقاطع المغلقة أو شبه المغلقة من الفلج، لحساب تأثير الاحتكاك في الجدران على تدفق المياه:

$$hf = f.\frac{l}{d}.v^2/2_g$$

- h-f الفاقد في الضغط أو الارتفاع بسبب الاحتكاك
- f معامل الاحتكاك
- L طول القناة
- D القطر الهيدروليكي
- V السرعة
- g تسارع الجاذبية .(Streeter & Wylie, 1998)

التحليل العام:

- الانحدار الطفيف في قنوات الفلج يعزز التدفق الطبيعي بدون الحاجة إلى مضخات.
- حجم القناة ومساحتها يؤثران على الكمية المنقولة وسرعة الوصول.
- مقاومة الجدران (خاصة في الأفلاج القديمة التي تحتوي على تكلسات وطين) تؤدي إلى خفض السرعة وفاقد في الطاقة الهيدروليكية.
- يُعد نظام الفلج مثالًا حيًا على تطبيق الهيدروليكا الطبيعية بطريقة عملية منذ آلاف السنين.

- **تمثيل الفلج كنموذج رياضي شبكي وفق نظرية الشبكات(Graph Theory)**

نظام الفلج يمكن نمذجته باستخدام نظرية الشبكات الرياضية، حيث يُمثل كمخطط شبكي موجه يتكون من:

- عُقد :(Nodes) تمثل نقاط توزيع المياه مثل المنازل، المزارع، البرك.
- مسارات :(Edges) تمثل قنوات نقل المياه بين هذه النقاط.

كل مسار يمكن أن يحمل خصائص فيزيائية مثل الطول، القطر، مقاومة الجدران، والانحدار.(Mohan, 2006)

النمذجة الرياضية:

١. شبكة موجهة ذات أوزان:(Weighted Directed Graph)

في إطار تمثيل نظام الفلج كنموذج رياضي شبكي، يمكن توصيفه على شكل شبكة موجهة ذات أوزان، حيث تُعبّر العُقد (Nodes) عن نقاط التوزيع أو التجميع في النظام، مثل المزارع أو الخزانات أو فروع التقسيم، بينما تمثل المسارات

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

(Edges) القنوات التي تنقل المياه بين هذه النقاط. يُخصَّص لكل مسار وزن يعكس خاصية فيزيائية محددة مثل كمية التدفق أو مستوى المقاومة في ذلك الجزء من القناة.

يسمح هذا النوع من النمذجة بفهم أفضل لكيفية سريان المياه داخل شبكة الفلج، كما يُمكِّن من تحليل الأداء العام للنظام، واكتشاف نقاط الاختناق التي قد تحد من فعالية التوزيع. من خلال هذه الشبكة، يمكن إجراء محاكاة واقعية للتدفق المائي، وتحديد السيناريوهات الأمثل لإدارة الموارد المائية، خصوصًا في الفترات التي تشهد انخفاضًا في منسوب المياه أو ارتفاعًا في الطلب.

علاوة على ذلك، يتيح استخدام الشبكات الموجهة ذات الأوزان إمكانية تطوير أدوات برمجية لمراقبة أداء الفلج في الزمن الحقيقي، وتحسين نظام التوزيع من خلال إعادة ضبط الأوزان وفقًا للتغيرات الموسمية أو الجغرافية.

٢. معادلة التوازن عند العقد $\sum Qin = \sum Qout$

تُعد معادلة التوازن من الركائز الأساسية في تحليل تدفق المياه داخل الأنظمة الشبكية، بما في ذلك نظام الأفلاج. تنص هذه المعادلة على أن مجموع التدفقات الداخلة إلى العقدة يجب أن يساوي مجموع التدفقات الخارجة منها، وذلك في حالة عدم وجود تخزين داخلي مؤقت أو فاقد محلي كبير. يُعبر عن هذه العلاقة كما يلي:

$$\sum Qin = \sum Q\ out$$

ويُستخدم هذا المبدأ لتحديد كمية المياه التي تصل وتغادر كل نقطة توزيع أو تجميع، مما يساعد في بناء نموذج دقيق لتوزيع المياه على طول الشبكة. من خلال هذه المعادلة، يمكن التحقق من سلامة التصميم الهيدروليكي للقنوات، والكشف عن أية اختلالات في التوزيع قد تؤثر على كفاءة النظام.

وقد تم توثيق هذا المفهوم في أدبيات تحليل الشبكات الهيدروليكية، لا سيما في دليل EPANET الذي أعدّه روسمان (Rossman, 2000)، والذي يُعد مرجعًا عالميًا في محاكاة شبكات توزيع المياه.

٣. النموذج المصفوفي (Matrix Form): $A \cdot x =$

يُستخدم النموذج المصفوفي كأداة رياضية فعّالة لتمثيل شبكة توزيع المياه في الفلج بشكل منظم ودقيق، ويُعبَّر عنه رياضيًا كما يلي:

في هذا النموذج:

A: تمثل مصفوفة الاتصال (Connectivity Matrix)، والتي تحدد العلاقات بين العقد والمسارات.

x: هو متجه المتغيرات المجهولة، ويُعبّر عن معدلات التدفق في كل قناة من قنوات الفلج.

b: هو متجه المصادر والمصبات، ويُحدد كمية المياه الداخلة أو الخارجة من النظام في كل عقدة.

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

يسمح هذا النموذج بتحليل تدفق المياه عبر كامل شبكة الفلج باستخدام تقنيات الجبر الخطي، كما يُستخدم في بناء نماذج محاكاة حاسوبية تُعطي تصورًا شاملًا حول كفاءة التوزيع وأداء النظام تحت ظروف مختلفة. ويُعد النموذج المصفوفي مناسبًا بشكل خاص في حال وجود عدد كبير من العقد والمسارات، ما يجعله أداة قوية للتحليل والتخطيط الاستراتيجي لشبكات الري التقليدية مثل الفلج.

٤. نماذج غير خطية:

في بعض الحالات، لا يكون سلوك تدفق المياه في قنوات الفلج خطيًا بشكل تام، خصوصًا عند وجود تأثيرات معقدة مثل الاحتكاك غير المنتظم، أو تغير الضغط والارتفاع بشكل غير خطي نتيجة لتغيرات هندسية أو طبوغرافية داخل القنوات، في هذه الحالات، تُستخدم معادلات غير خطية لوصف العلاقة بين متغيرات الجريان مثل السرعة، الانحدار، الخشونة، والقطر الهيدروليكي.

تتطلب هذه النماذج استخدام أدوات تحليلية وحاسوبية متقدمة، مثل:

EPANET: أداة مجانية تُستخدم لمحاكاة شبكات توزيع المياه في البيئات الحضرية والريفية.

OpenFOAM: برنامج مفتوح المصدر يُستخدم في الديناميكا الحركية للموائع (CFD)، ويُتيح تحليلًا دقيقًا لسلوك الجريان في القنوات.

MATLAB: يُستخدم لبناء نماذج رياضية عددية متقدمة، مع إمكانية حل المعادلات التفاضلية المعقدة وتحليل السيناريوهات المتعددة.

تمثل هذه الأدوات نقلة نوعية في فهم سلوك الأفلاج، حيث تسمح بمحاكاة واقع النظام بدقة، وتوقّع أدائه تحت تأثير متغيرات متعددة، مما يدعم صانعي القرار في تطوير سياسات مستدامة لإدارة الموارد المائية.

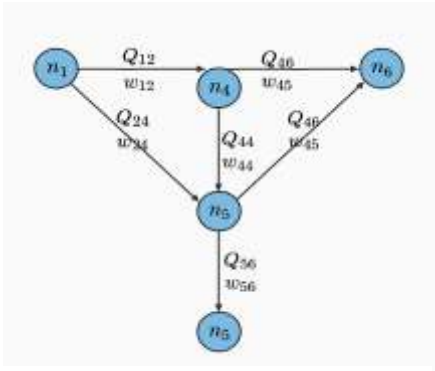
شرح تفصيلي وتحليل علمي للنظام الشبكات (Graph Theory)،

W تشير الى التدفقات

Q تمثل العقد

n توزيع المياه في الفلج

مصدر الصورة التوضيحية :تم إعداد الشكل الشبكي باستخدام أدوات الذكاء الاصطناعي التوليدي (DALL·E) لتصميم تمثيل مرئي خاص بنظام الفلج.



شكل ١ النمذجة الرياضية لنظام الفلج

السؤال الثاني :أثر الزاوية والانحدار في سريان المياه ضمن قنوات الفلج

يلعب كل من زاوية الانحدار ودرجة الميل دورًا حيويًا في التحكم بسرعة المياه

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

داخل قنوات الفلج، مما يؤثر بشكل مباشر على كفاءة نقل المياه وتقليل الفاقد.

١- علاقة الانحدار بالجريان:

الانحدار يُقاس كنسبة فرق الارتفاع إلى المسافة الأفقية، ويُرمز له بـ .

وفقًا لمعادلة مانينغ : $v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$

كلما زاد الانحدار، زادت سرعة الجريان، بشرط أن تكون مقاومة الجدران ثابتة.

٢- زاوية الميل وتأثيرها:

زاوية ميل القناة (θ) ترتبط بالانحدار وفقًا للعلاقة : $\tan(\theta)=\frac{\Delta h}{l}$

زاوية الميل الحادة قد تزيد من السرعة، ولكنها تُعرض النظام لفاقد أكبر في الطاقة نتيجة:

- الاحتكاك مع الجدران (Darcy–Weisbach)
- التسرب عبر التربة في حال عدم التبطين
- التآكل الداخلي بسبب السرعة الزائدة

٣- كفاءة النقل وفواقد الطاقة:

- في قنوات الفلج، يُفضّل انحدار بسيط (عادة ١:١٠٠٠ إلى ١:٢٠٠٠) لتحقيق توازن بين التدفق الكافي وتجنّب الفاقد.
- أي خلل في الزاوية قد يؤدي إلى تراكم الرواسب أو تعرية القناة.

٤- الفقد الناتج عن الاحتكاك:

باستخدام معادلة دارسي-فايسباخ : $hf = f.\frac{l}{d}.\frac{v^2}{2_g}$

يزداد الفقد كلما زادت السرعة أو زاد طول القناة دون تبطين مناسب.

٥- الفقد الناتج عن التسرب:

- يعتمد على نفاذية التربة.
- في بعض الأفلاج، يتم تبطين القنوات بالطين أو الحجارة لتقليل التسرب.

التوازن المطلوب:

- الانحدار المثالي هو الذي يُمكّن الماء من الجريان دون تجمع أو اندفاع.
- زاوية الانحدار يجب أن تراعي الطبوغرافيا وكثافة المستخدمين (Salih, 2015; Chow, 1959) .

السؤال الثالث: توزيع الماء بين المزارعين عبر القسمة الزمنية (الساعات)

يُعتبر نظام "الساعات" من أبرز مظاهر التنظيم الاجتماعي في إدارة الموارد المائية ضمن نظام الفلج، حيث يتم تخصيص وقت معين لكل مزارع لسحب كمية من المياه بناءً على نظام دقيق وموروث يُراعي العدالة والاستمرارية. وقد تطور هذا

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

النظام عبر العصور، ومرَّ بمراحل متنوعة في وسائل تحديد الوقت، قبل أن يستقر على النظام الزمني الحديث.

-تطور وسائل تحديد الوقت:

في المراحل القديمة، لم تكن هناك ساعات ميكانيكية أو إلكترونية، لذا استخدم المزارعون وسائل طبيعية لتحديد أوقاتهم بدقة:

- مراقبة النجوم :كان يتم تحديد توقيت الحصص الليلية استنادًا إلى مواقع نجوم معروفة مثل "نجم سهيل" أو "الثريا"، حيث ترتبط هذه النجوم بمواقيت موسمية معروفة لدى الفلاحين. وقد ورد تفصيل هذا النظام في كتاب الدكتور مسعود الحضرمي ضمن مشروعه البحثي "نظام تقسيم مياه الأفلاج عند العمانيين" (وزارة التراث والثقافة، ٢٠١٧)، حيث بيّن أن النجوم كانت تستخدم كوسيلة رئيسية لتحديد الأوقات الليلية لتوزيع المياه، ويُقسَّم الليل إلى وحدات تُعرف بـ"الأثر"، بناءً على طلوع أو غروب نجم معين. وأشار إلى أن تقسيم الأثرات الفلكية في بعض المناطق يصل إلى دقة متناهية وفقًا لحركة نجمية مدروسة.
- الظل :استُخدم ميلان ظل العصا أو الجدران أو الجبال لتقدير الوقت خلال النهار، وهي طريقة شائعة في المجتمعات الزراعية التقليدية.
- الساعة الشمسية :يتم زرع عصا عمودية على سطح مستوٍ، ويُقاس الوقت بناءً على طول وموقع الظل الناتج عنها.
- الساعة المائية (القلوزة) :وهي وعاء مثقوب يُملأ بالماء، ويُستخدم معدل التسرب لتحديد الوقت، حيث يعرف الناس مثلاً أن امتلاء الوعاء بالكامل يُمثل ساعة معينة.
- الساعة الرملية :كانت تستخدم أحيانًا لقياس فترات قصيرة من الوقت، وهي عبارة عن إناءين زجاجيين موصولين تمر الرمال بينهما بمعدل منتظم.

وقد أشار الباحث عبدالله الغافري في دراساته الأكاديمية (الغافري، ٢٠١٩) إلى هذه الأدوات بأنها كانت أدوات دقيقة نسبيًا، وأسهمت في تحقيق العدالة بين المزارعين قبل ظهور الساعة المعاصرة.

- **تطور النظام نحو القسمة الزمنية الحديثة:**

مع دخول الأدوات الحديثة، أصبح التوزيع المائي في الأفلاج يُقاس بوحدات زمنية دقيقة تُعرف بـ "الساعات". ويُقسم اليوم إلى عدد من الساعات، وتُوزع الحصص حسب ملكية المزارع.

كل مزارع يمتلك عددًا محددًا من الساعات أو أجزاء منها، وتُعرف الأجزاء باسم الأثر أو نصف الأثر .وقد يُعادل الأثر مثلًا ١٥ أو ٣٠ دقيقة حسب عرف الفلج وعدد المزارعين.

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

- **النموذج العددي لتوزيع المياه:**

رياضياً، يمكن التعبير عن كمية المياه التي يستحقها كل مزارع بالمعادلة $Vi=Q\cdot ti$

حيث:

- VI حجم المياه المستحق للمزارع i
- Q معدل تدفق الفلج (متر مكعب في الساعة)
- tiعدد الساعات أو الأثرات المخصصة للمزارع i

العدالة والاستمرارية:

من أهم خصائص هذا النظام هو حفاظه على:

- العدالة :بتوزيع الوقت بناءً على الملكية أو العرف.
- الاستمرارية :حيث لا تتداخل الحصص وتُنفذ وفق جدول ثابت، مما يضمن سريان الماء بسلاسة.

وتُشرف شخصية تُعرف بـ العقيد أو العريف او الوكيل على التنفيذ بدقة، ويُسجل أي إخلال بالنظام.

قابلية النمذجة الحديثة:

هذا النظام قابل للتحليل البرمجي كنموذج عددي، عبر:

- الجداول الزمنية الديناميكية.
- محاكاة التوزيع عبر البرمجة الخطية.
- تطبيقات إدارة المياه الزراعية.

وقد أوصى الغافري (٢٠١٩) بإدخال النمذجة الرقمية لمواكبة متغيرات العصر وتعزيز الشفافية.

ومن خلال ذلك فالسؤال الذي يطرح نفسه هل يمكن للنماذج الرياضية أن تفسّر نجاح نظام الفلج العماني منذ قرون؟ وما مدى دقة الأسس الرياضية الكامنة خلف هذا النظام؟

يمكن للنماذج الرياضية أن تُفسّر إلى حدّ بعيد نجاح نظام الفلج العُماني واستمراره منذ قرون طويلة، حيث تُعدّ الأفلاج مثالًا متقدّمًا لتكامل الرياضيات التطبيقية مع علوم الأرض والهندسة الهيدروليكية ضمن بيئة طبيعية وجغرافية معقّدة. تكمن عبقرية الفلج في استخدام أسس رياضية دقيقة ضمنيًا في تنظيم توزيع المياه، إذ بُني النظام على مبدأ التوزيع العادل والمنتظم، من خلال استخدام وحدات زمنية ومكانية محكمة تُعرف بـ"الأقساط" و"الأدوار"، وهي في جوهرها تجسيد رياضي لمعادلات النسبة والتناسب، وتقسيم الوقت والمساحة بدقة.

كما يعتمد توزيع المياه على حسابات فلكية موسمية (كالمربعانية والصرفة) لضبط جداول الري، إلى جانب استخدام الهندسة الفراغية لتحديد الانحدارات المثالية

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

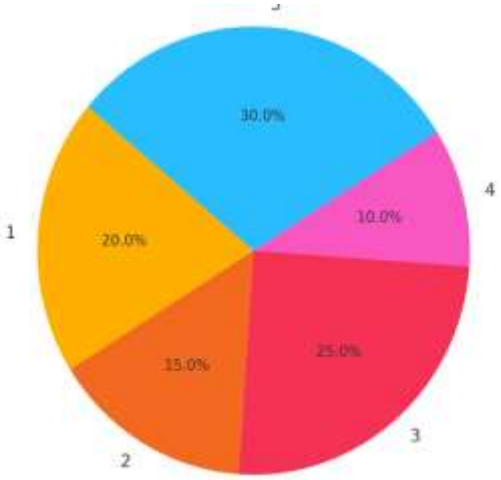
لتدفق الماء بالجاذبية دون مضخات، وهو ما يتطلب فهمًا دقيقًا للزوايا، والمسافة، والانحدار.(Gradient)

وقد أظهرت دراسات حديثة أن تحليل مسارات الفلج يمكن نمذجته باستخدام تقنيات التحليل الرياضي للتدفق(Flow Modeling) ، والمعادلات التفاضلية التي تُستخدم اليوم في محاكاة شبكات المياه الحديثة. كما أن التوزيع العادل للري يشبه في بنيته خوارزميات التخصيص الرياضي التي تُستخدم في الاقتصاد.

أما عن دقة الأسس الرياضية الكامنة في هذا النظام، فإن المدهش في الأمر أن هذه القواعد وُضعت في سياق تقليدي غير مكتوب، ولكنها بلغت مستوى عالٍ من الدقة والكفاءة يعادل أنظمة الري المعاصرة، وهو ما يبرّر استمرار تشغيل بعض الأفلاج العمانية منذ أكثر من ١٥٠٠ عام دون تعطل.

إن نظام الفلج، بقدر ما هو هندسي وبيئي، فهو أيضًا رياضي في جوهره، حيث استخدم العُمانيون نماذج ذهنية وتقسيمات عددية متوازنة لضمان عدالة المياه واستدامتها، مما يعكس فهماً مبكرًا لمفاهيم رياضية مثل الاستدامة، والتحسين الأمثل، والعدالة الكمية.

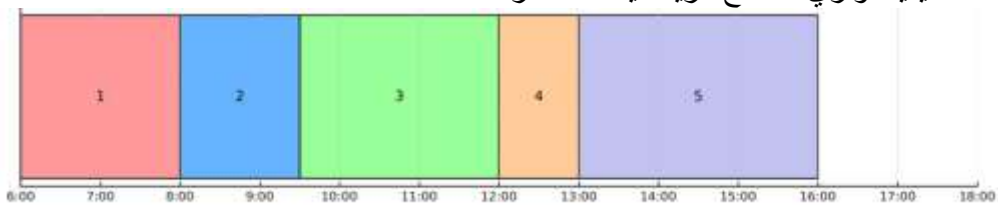
هذا الرسم البياني الدائري يوضح نموذجًا مبسطًا لتوزيع المياه بين خمسة مزارعين في نظام فلج، حيث تم تخصيص حصص دقيقة لكل مزارع بناءً على النسب الزمنية أو المساحية، وهو ما يعكس جوهر العدالة الرياضية في نظام الفلج.



شكل ٢ نموذج مبسط من عمل الباحثان كيفية توزيع المياه

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

يُوضح الشكل التالي نموذجًا مبسطًا لتوزيع الحصص الزمنية لري الأراضي الزراعية في نظام الفلج، حيث تم تخصيص فترات زمنية محددة لخمسة ملاك افتراضيين على مدار 12ساعة تبدأ من السادسة صباحًا وتنتهي عند السادسة مساءً يمثّل كل شريط أفقي قسمة زمنية مخصصة لأحد الملاك، وتم ترتيبها بشكل متسلسل بما يعكس توالي توزيع المياه ضمن نظام دقيق ومنصف .ويُلاحظ أن الفترات تختلف باختلاف الحصص المتفق عليها، ما يدل على وجود نظام توزيع يعتمد على النسبة والتناسب، وهو ما كان يُعرف محليًا بـ"الساعات "أو "الأدوار ."هذا التمثيل الزمني يُجسد المبادئ الرياضية الكامنة خلف نظام الفلج، إذ يُشابه من حيث البنية نظم الجدولة الزمنية المستخدمة في هندسة شبكات توزيع المياه الحديثة .كما يُبرز أحد جوانب عبقرية التراث العُماني في تنظيم الموارد الطبيعية باستخدام أدوات معرفية تقليدية توازي النماذج الرياضية المعاصرة.



شكل٣ التمثيل الزمني لشبكة توزيع مياه الأفلاج

التوصيات:

توضح هذه الدراسات التكامل بين المعرفة التقليدية والتقنيات الحديثة في تحسين إدارة الموارد المائية في عُمان، مع التركيز على كفاءة استخدام المياه والطاقة في أنظمة الري. وتُعد الأفلاج نظامًا تقليديًا لإدارة المياه في سلطنة عُمان، وتعكس تراثًا ثقافيًا غنيًا ومعرفة هندسية متقدمة. لضمان استمرارية هذا التراث وتكامله مع العلوم الحديثة، نوصي بما يلي:

١- دمج التراث العُماني في مناهج العلوم والتكنولوجيا والهندسة والرياضيات (STEM):

يُسهم إدراج نظام الأفلاج في مناهج STEM في تعزيز فهم الطلاب للتطبيقات العملية لهذه العلوم في سياقهم الثقافي. على سبيل المثال، يمكن استخدام دراسة الأفلاج لتوضيح مفاهيم مثل تدفق السوائل، والهيدروليكا، وإدارة الموارد المائية. هذا الدمج يُعزز تقدير الطلاب لتراثهم ويُبرز تطبيقات العلوم في حل المشكلات البيئية المحلية. وقد أشار مالك (Malik, 2018) إلى أهمية إنشاء رؤية مجتمعية شاملة لتعليمSTEM ، بدعم من المؤسسات التعليمية والمجتمعية، لتعزيز هذا التكامل.

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

٢- رقمنة نماذج الأفلاج باستخدام تقنيات النمذجة الرياضية:

تُتيح النمذجة الرياضية الرقمية فهمًا أعمق لخصائص تدفق المياه في الأفلاج وتساعد في تحسين إدارتها. باستخدام برامج محاكاة متقدمة، يمكن تحليل تأثير التغيرات البيئية على كفاءة الأفلاج، مما يُسهم في تطوير استراتيجيات مستدامة للحفاظ عليها. في هذا السياق، قدمت دراسة حديثة نموذجًا عدديًا يعتمد على طريقة "بيترف-غالركن" لتحليل تدفق المياه في الأفلاج، مما يوفر دقة أكبر في فهم التفاعل بين القنوات المائية والطبقات الجوفية(Al-Maktoumi et al., 2023) .

٣- تشجيع البحوث البينية بين الرياضيات، التراث، والبيئة:

يُعد تعزيز التعاون بين مجالات الرياضيات، التراث الثقافي، والعلوم البيئية ضروريًا لفهم وإدارة الأنظمة التقليدية مثل الأفلاج. تشجيع الدراسات التي تستكشف الجوانب الرياضية والهندسية للأفلاج، مع مراعاة أهميتها الثقافية والبيئية، يُمكن أن يُسهم في تطوير حلول مبتكرة للحفاظ على هذا التراث وتطبيقه في السياقات الحديثة. في هذا الإطار، أنشأت جامعة نزوى "كرسي اليونسكو لدراسات الأفلاج"، بهدف تعزيز البحوث متعددة التخصصات حول الهيدروجيولوجيا، والهندسة، والنظام البيئي، والتراث الثقافي، والجوانب الاجتماعية والاقتصادية للأفلاج (University of Nizwa, n.d.) .

الخاتمة

يمثّل نظام الأفلاج العُمانية منظومة مائية عبقرية متجذرة في عمق التاريخ، وقد استطاع الإنسان العُماني ببساطته وذكائه أن يُوظّف قوانين الطبيعة والهيدروليكا قبل أن تُدوَّن في الكتب والمراجع. إن النمذجة الرياضية الحديثة، بدءًا من معادلة مانينغ إلى المعادلات المصفوفية والنماذج غير الخطية، تُمكّننا اليوم من إعادة قراءة هذا النظام التقليدي بلغة العلم، دون أن نجرده من روحه التراثية.

إن دمج العلم بالتراث، والتكنولوجيا بالحكمة الشعبية، هو التوجه الأمثل للحفاظ على هذه الأنظمة المستدامة وتطويرها. فكما أسهمت الأفلاج في ضمان الأمن المائي للمجتمعات العُمانية لقرون، فإن إدماجها في الأطر الهندسية المعاصرة سيساهم في استدامة مواردنا وتوجيه استخدامها بكفاءة وعدالة.

وهكذا، فإن دراسة الأفلاج ليست مجرد استعراض لنظام مائي تقليدي، بل هي نافذة نطلّ منها على كيفية مواءمة الإنسان للبيئة، وكيف يمكن للعلم الحديث أن يُنير ما بناه الأجداد، وأن يواصل المسيرة نحو مستقبل أكثر أمنًا مائيًا واستدامة بيئية.

ومن هنا، فإن هذا العمل يفتح المجال للباحثين والمهندسين والمؤرخين لتوسيع نطاق الدراسة والتحليل، بهدف توثيق معارف الأجداد وربطها بالنماذج التكنولوجية الحديثة. فالأفلاج ليست مجرد قنوات مائية، بل هي منظومة شاملة تجمع بين الطبيعة،

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

والمعرفة، والعدالة المجتمعية. إنها دعوة لنعيد اكتشاف تراثنا بعيون علمية، ونمنحه المساحة التي يستحقها في حاضرنا ومستقبلنا.

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

المراجع العربية:

الأفلاج العُمانية :تجسيد لحضارة مستدامة .جريدة عُمان. (النوفلي، س. ٢٠٢٢).

الأفلاج في عُمان .اليونسكو .(2006) . https://whc.unesco.org :

الأفلاج نظام فريد للري في عُمان .الخليج.(2011) :
https://www.alkhaleej.ae

الأفلاج والعيون – مسقط .وزارة الإعلام.(2019) .

الحارثي، ع .(2017) .أفلاج عُمان للري.. تراث يتمتع على السياحة .الجزيرة نت، ٦ نوفمبر. متاح على/https://www.aljazeera.net/culture/2017/11/6 :

الحضرمي، م .(2017) .مشروع الأفلاج: نظام تقسيم المياه عند العمانيين .وزارة التراث والثقافة، سلطنة عُمان.

العامري، س .(2023) .الدور الاجتماعي للأفلاج في المجتمعات العُمانية .مجلة إشراقة، جامعة نزوى. متاح على
https://ishraqa.unizwa.edu.om/article_169128.html

الغافري، عبد الله. (٢٠٠٦). "الأفلاج العُمانية: منظومة حياة مهددة ."مجلة جامعة السلطان قابوس للعلوم.

الغافري، عبدالله .(2019) .دراسات في نظام الأفلاج العمانية.

اليحيائي، م .(2022) .الأنظمة التقليدية للمياه ودورها في التنمية العمرانية بعُمان . مجلة الآداب والعلوم الاجتماعية، جامعة السلطان قابوس. متاح على :
https://journals.squ.edu.om/index.php/jass/article/view/5116

Alwatan.om. (2021) فلج الخطمين ببركة الموز أحد الأفلاج التاريخية العميقة . تم الاسترجاع منhttps://alwatan.om/details/433476 :

Omaninfo.om. بدون تاريخ متاح على:
https://www.omaninfo.om/mainsections/43/show/1

وزارة التراث والثقافة .(2010) .الأفلاج العمانية .سلطنة عُمان.

وزارة التراث والثقافة .(2010) .الأفلاج العمانية .سلطنة عُمان: دائرة البحوث والدراسات.

وزارة البلديات الإقليمية وموارد المياه .(2009) .المشروع التجريبي لتوثيق السنن والأعراف والملكيات المتعلقة بالأفلاج .سلطنة عُمان.

المراجع الأجنبية

Adamsab, K., Saif, M., Saif, S., Khamis, I., & Talib, W. (2020). Hybrid powered intelligent irrigation system using Oman Falaj and solar energy. Materials Today: Proceedings, 42, 3625–3630.

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

Al-Kaabi, O., Al-Ghafri, A. S., Al-Shabibi, I., & Al-Rawahi, A. S. (2024). Assessing the channel design of the eco-friendly 'Falaj' water system in meeting the optimal water demand: A case study of Falaj Al-Khatmain, Sultanate of Oman. Nanotechnology Perceptions, 20(S14), 547–549.

Al-Maktoumi, A., Al-Busaidi, H., & Al-Ismaily, S. (2023). Hydraulic of sustainable groundwater resources, aflaj in Oman using meshless numerical method. Retrieved from: ResearchGate.

Beers, S.Z. (2011). 21st Century Skills: Preparing Students for THEIR Future. Association for Supervision and Curriculum Development.

Chow, V.T. (1959). Open-Channel Hydraulics. New York: McGraw-Hill, pp. 105–112.

Hawking, S. (2001). The Universe in a Nutshell. Bantam Books.

Hillel, D. (2000). Salvation of the Soil: How Science and Technology Can Help Prevent Desertification. Scientific American.

Hodge, A.T. (2002). Roman Aqueducts & Water Supply. pp. 140–158.

Jacobs, J.A., & Frickel, S. (2009). Interdisciplinarity: A Critical Assessment. Annual Review of Sociology, 35, 43–65.

Kumar, Y., Shinde, N., & Wazed, M. A. (2024). Artificial Intelligence (AI) and Internet of Things (IoT) enabled solar irrigation systems: A review. Nanotechnology Perceptions, 20(S10), 1229–1230.

Lightfoot, D. (1996). Moroccan Khettara: Traditional Irrigation and Progressive Desiccation. Geoforum, 27(2), 261–273.

Malik, S. (2018). DAI's Sakil Malik Presents Recommendations for Improving STEM Education in Oman. Retrieved from: https://www.dai.com/news/dais-sakil-malik-presents-recommendations-for-improving-stem-education-in-oman

Mays, L. W. (2005). Water Resources Engineering. Wiley.

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472

Mohan, C. K. (2006). Graph Theory and Its Applications. Springer.

Rossman, L. A. (2000). EPANET 2 Users Manual. U.S. Environmental Protection Agency.

Salih, A. (2015). Hydraulic Modeling of Traditional Water Systems in Arid Regions. Journal of Water Resources and Environmental Engineering, 7(3).

Streeter, V. L., & Wylie, E. B. (1998). Fluid Mechanics. McGraw-Hill.

University of Nizwa. (n.d.). UNESCO Chair on Aflaj Studies (Archaeo-hydrology). Retrieved from: https://www.unizwa.edu.om/index.php?contentid=2847&lang=en

UNESCO. (2006). Falaj Irrigation Systems of Oman: Nomination File for World Heritage Status. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

ISSN: 2537-0464 eISSN: 2537-0472