دراسة عن السدود البيتونية: (أنواعها، خصائص تصميمها، والعوامل المؤثرة على استقرارها)

الأستاذ المشرف: د. م. صفاء محمود الديب إعداد الطالب: إيلاف شيخ عيسى

الملخص:

تُعد السدود البيتونية من أبرز أنواع السدود التي تعتمد على مقاومة الخرسانة للضغط والثقل الذاتي . إلا أن هذه المنشآت تواجه تحديات إنشائية، من أبرزها مشكلة التسرب التي قد تهدد سلامة السد وكفاءته، حيث يحدث التسرب نتيجة لوجود الفارق في الضاغط المائي أمام وخلف السد ينجم عن ذلك حدوث تسرب للماء أسفل السد, والذي بدوره يولد قوى ضغوط دفع شاقولية سلبية تؤثر في توازن واستقرار السد، [12].

تهدف

مثل السد الثقّلي، القوسي، أو المدعّم، وكل نوع منها يستخدم خواص البيتونية لتحمل الأحمال بشكل فعال دون انزلاق أو انقلاب. [1,2,3,11]

1- أنواع السدود البيتونية :

تُصنّف السدود البيتونية بحسب شكلها وطريقة مقاومتها لضغط المياه، ومن أبرز أنواعها:

1) السد البيتوني الثقلي (Gravity Dam)

هو النوع الأكثر شيوعًا، ويعتمد في ثباته على وزنه الذاتي لمقاومة ضغط الماء. يتميز بجسم ضخم وعريض في القاعدة ويتناقص العرض باتجاه القمة. يُستخدم في المواقع التي تتمتع بأساسات صخرية قوية، ويُعد من أكثر الأنواع أمانًا لكنه مكلف بسبب كمية الخرسانة الكبيرة المستخدمة.

- المميزات: مقاومة عالية، تصميم بسيط.
- العيوب: تكلفة مرتفعة، وزن كبير.

2) السد البيتوني القوسي (Arch Dam)

يتخذ شكلاً قوسيًا في الاتجاه الأفقي، ويعتمد على نقل ضغط المياه إلى الجانبين الصخريين للواد. يُستخدم هذا النوع في المناطق الضيقة ذات الجدران الصخرية القوية، ويتطلب كمية أقل من الخرسانة مقارنة بالسد الثقلي.

- المميزات: خفيف الوزن نسبيًا، اقتصادي من حيث المواد.
- العيوب: يتطلب موقعًا جيولوجيًا خاصًا (جوانب صخرية قوية).

3) السد البيتوني المدعّم (Buttress Dam)

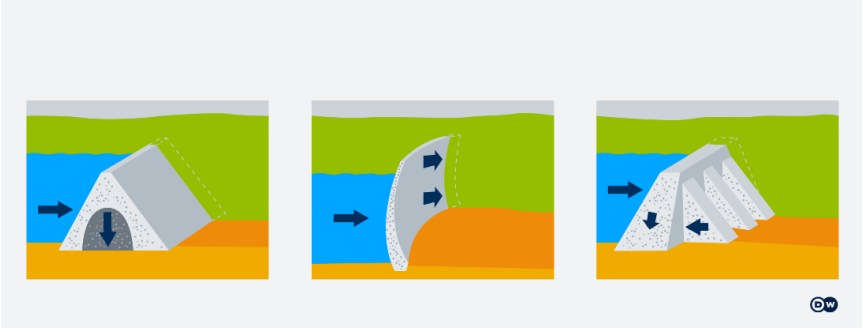
يتكوّن من جدار رأسي (يشبه الجدار الرقيق) مدعّم بدعائم مائلة خلفه. الهدف من الدعائم هو تقليل كمية الخرسانة المستخدمة مع الحفاظ على مقاومة ضغط الماء.

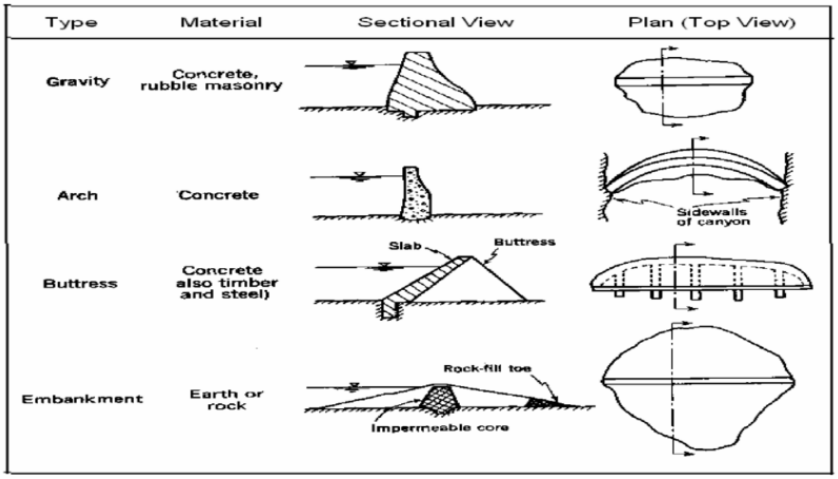
- المميزات: تقليل كميات الخرسانة، مناسب للأراضي الواسعة.
- العيوب: أكثر تعقيدًا في التنفيذ، وصيانة الدعائم قد تكون مكلفة.

4) السد القوسي الثقلي (Arch–Gravity Dam)

يجمع بين خصائص السدين القوسي والثقلي. يعتمد على الوزن الذاتي في مقاومة الضغط، مع تعزيز التصميم القوسي لنقل جزء من الحمل إلى الجانبين. يُستخدم في المواقع التي لا تسمح باستخدام قوس كامل أو جدار ثقيل فقط.

- المميزات: مزيج من الأمان والكفاءة.
- العيوب: يتطلب تصميمًا هندسيًا دقيقًا.





الشكل (1): أشكال المقطع العرضية للسدود البيتونية

2- أمثلة السدود في سوريا:

4-1 سد الفرات (سد الطبقة):

•الموقع: محافظة الرقة، على نهر الفرات.

• نوعه: سد بيتوني ثقلي مدعّم بأجزاء ترابية.

• أهميته: يعتبر أكبر سد في سوريا، بُني لتوليد الطاقة الكهرومائية وتخزين المياه للري.

• السعة التخزينية: حوالي 14.1 مليار متر مكعب.

• الطول: 4.5 كم (الجزء البيتوني منه أصغر من ذلك). [6]

4-2 سد تشرين:

• الموقع: شمال شرقي حلب، على نهر الفرات.

• نوعه: سد بيتوني مدعّم، مع منشآت ملحقة لتوليد الكهرباء.

• السعة التخزينية: 1.9 مليار متر مكعب.

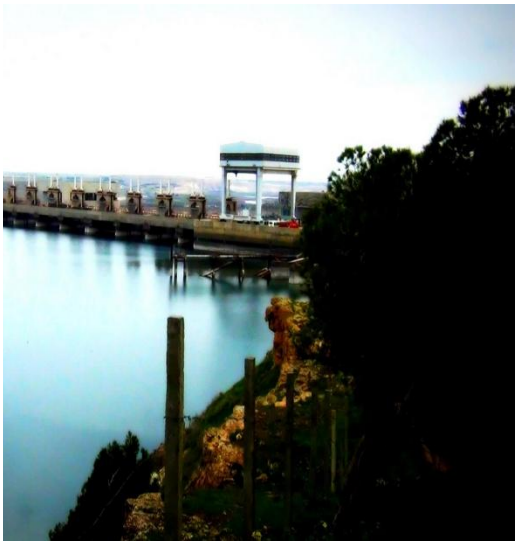
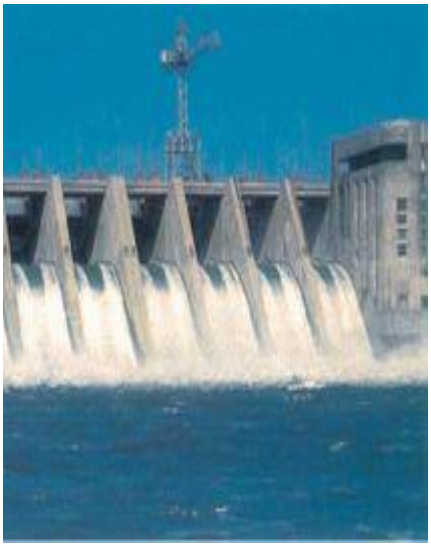
• الوظيفة: توليد الكهرباء وتنظيم تدفق المياه باتجاه سد الفرات.[6]

4-3 سد الرستن

• الموقع: على نهر العاصي، في محافظة حمص.
• نوعه: خليط من سد بيتوني وترابي.
• الأهمية: ري الأراضي الزراعية في سهل الغاب وتحقيق استقرار مائي للمنطقة.

4-4 سد محردة

•الموقع: على نهر العاصي أيضًا.
•نوعه: سد بيتوني ثقلي.
•المهام: توليد الكهرباء وتخزين المياه.

الشكل (2): سد الفرات

3- خصائص التصميم البيتوني للسدود البيتونية في سوريا:

تصميم السدود البيتونية في سوريا (مثل سد الفرات وسد تشرين) يعتمد على مجموعة من الخصائص الفنية والهندسية تضمن الأداء الأمثل والاستقرار على المدى الطويل،[6,7,8,9,10] ومن أبرز هذه الخصائص:

1. **اختيار نوع الخرسانة:**

•يتم استخدام خرسانة ذات مقاومة عالية للضغط، وغالبًا ما تكون من الصنف C30 إلى C40.

•يتم تعديل الخلطة البيتونية لتقاوم الانكماش، التآكل، والتغيرات الحرارية الناتجة عن الكتلة الضخمة.

2. **التحكم في حرارة التفاعل (Heat of Hydration)**

•بسبب الحجم الكبير للكتل البيتونية، يتم تنفيذ الصب على مراحل، وتُستخدم تقنيات التبريد (مثل الأنابيب المائية المغمورة داخل الخرسانة).

•الهدف هو منع التشققات الحرارية التي تؤثر سلبًا على استقرار السد.

3. **فواصل التمدد والانكماش**

• تُنفذ فواصل منتظمة داخل جسم السد لتجنب الإجهادات الناتجة عن تغيّر درجات الحرارة والزمن.

• تُملأ هذه الفواصل بمواد مرنة أو مقاومة للماء.

4. **حماية ضد التآكل**

4- مشاكل التي تواجه المهندسين عند تصميم السدود البيتونية:

تصميم السدود البيتونية عملية معقدة تتطلب دراسة دقيقة لعدد كبير من العوامل. خلال هذه المرحلة، قد تواجه المهندسون عدة تحديات تؤثر على أمان السد وكفاءته، وأهم هذه المشكلات:

6-1- اختيار الموقع المناسب:

يُعد الموقع العامل الأساسي في نجاح السد، ويجب أن يكون مستقرًا جيولوجيًا، بعيدًا عن الفوالق النشطة، وأن يحتوي على تربة أو صخور تتحمل الأحمال. أي خطأ في دراسة الموقع قد يؤدي إلى انهيار السد أو تسرب المياه.

6-2- أساسات غير المستقرة

في حال كانت الأساسات ضعيفة أو مائلة أو تحتوي على طبقات منفذة، فقد يؤدي ذلك إلى تسرّب المياه من قاعدة السد، مما يضعف توازنه مع الوقت. لذلك، يتطلب التصميم تحليلًا دقيقًا للتربة والصخور، واستخدام أنظمة كتامة تحت السد عند الحاجة.

6-3- الزلازل والنشاط الزلزالي

المناطق الزلزالية تُشكّل تحديًا كبيرًا عند تصميم السدود البيتونية، إذ يجب أن يكون التصميم قادرًا على امتصاص الاهتزازات من دون تشقق أو انهيار. ويتطلب ذلك استخدام برامج نمذجة زلزالية دقيقة واحتياطات إنشائية خاصة.

6-4- التغيرات الحرارية وانكماش الخرسانة:

الخرسانة تُنتج حرارة أثناء التصلب، وقد تتعرض لتغيرات حرارية كبيرة تؤدي إلى تشققات حرارية. يجب الأخذ بعين الاعتبار معاملات التمدد والانكماش واستخدام إضافات كيميائية خاصة أو تقنيات التبريد أثناء الصب.

6-5- صعوبة التحكم بمياه النهر أثناء التنفيذ:

خلال مرحلة الإنشاء، يجب تحويل مجرى النهر باستخدام أنفاق تحويل أو حواجز مؤقتة، وهو تحدٍ هندسي كبير يتطلب تخطيطًا دقيقًا حتى لا تتعرض الورشة للغمر أو تتأخر الأعمال.

6-6- مشكلة التسرب:

يُعد التسرب المائي من أخطر التحديات. قد يؤدي إلى زيادة الضغط تحت السد (uplift pressure)، أو إلى تآكل التربة خلفه. من الحلول المستخدمة: إنشاء ستائر كتامة (grout curtains)، أو جدران رأسية داخل الأساسات. يُعد التسرب أحد أخطر التحديات التي تواجه السدود البيتونية، إذ قد يؤدي إلى ضعف الهيكل، انخفاض كفاءة السد، بل وحتى انهياره في الحالات القصوى. يحدث التسرب عندما تتسرب المياه من خلال الشقوق، أو المفاصل، أو عبر الأساسات أو أطراف السد، سواء بسبب خلل في التصميم أو التربة أو ضعف المعالجة البيتونية.

6-6-1أنواع التسرب:

1. تسرب من جسم السد:

- ناتج عن تشققات في الخرسانة بسبب الانكماش الحراري أو ضعف الصب.
- قد يحدث أيضًا من خلال المفاصل غير المحكمة

2. تسرب من الأساسات:

- يحدث عندما تكون الطبقات الصخرية تحت السد منفذة أو متشققة.
- أخطر نوع لأنه يسبب ضغطًا معاكسًا (uplift pressure) قد يرفع السد جزئيًا ويؤثر على توازنه.

3. تسرب جانبي (حول أطراف السد):

- سببه عدم كفاية الربط بين السد والتضاريس الجانبية (الكتف الجيولوجي).

6-6-2 أسباب التسرب:

- عدم تنفيذ ستائر كتامة بشكل جيد.
- وجود فواصل تمدد غير محكمة.
- خلل في المزج أو الصب يؤدي إلى فراغات داخل الخرسانة.
- أساسات ضعيفة أو غير معالجة هندسيًا (لم تُحقن بالإسمنت الكافي).
- اهتزازات تربة أو نشاط زلزالي يؤدي إلى فتح شقوق صغيرة.

6-6-3 طرق المعالجة والحلول:

1- ستائر الحقن (Grout Curtains):

يتم حقن مزيج من الإسمنت أو المواد الكيميائية أسفل السد لملء الشقوق وتقوية التربة أو الصخور.

2- الستائر الخرسانية (Cut-off Walls):

جدران خرسانية تمتد عموديًا إلى أعماق التربة لوقف التسرب.

3- أنظمة تصريف تحت السد (Drainage Galleries):

تُنفذ داخل جسم السد أو الأساسات لتجميع المياه المتسربة وتخفيف الضغط تحت السد.

4- مراقبة التسرب (Instrumentation):

باستخدام أجهزة استشعار لقياس الرطوبة والضغط داخل جسم السد وحوله للكشف المبكر عن التسربات.

6-6-4- أمثلة حقيقية عن السدود البيتونية التي عانت من التسرب:

- تسرب سد تشرنوبل (أوكرانيا): حيث تسربت المياه من الأساسات ما اضطر إلى تعزيز الستائر الكتامية.
- بعض السدود القديمة في سوريا عانت من تسرب جزئي في الأساسات، تمّت معالجتها عبر الحقن الإسمنتي العميق.

5- الاستقرار والتوازن في السدود البيتونية:

يُعد استقرار السد البيتوني وتوازنه من العناصر الأساسية التي تُؤخذ بعين الاعتبار أثناء التصميم، لضمان مقاومته لكل القوى المؤثرة عليه دون أن ينزلق أو ينقلب أو يتشقق. يتوقف ذلك على مجموعة عوامل هندسية تتعلق بشكل السد، وطبيعة الأساسات، ونوع التربة، وحجم المياه خلفه، وغيرها.

- الاستقرار: قدرة السد على البقاء في وضعه الصحيح دون أن يتحرك أو ينهار نتيجة الضغوط المؤثرة عليه.
- التوازن: أن تكون القوى المؤثرة (مثل وزن السد وضغط المياه) موزعة بشكل يسمح للسد بأن يصمد دون دوران أو انزلاق.[4,5]

7-1- أنواع الاستقرار في السدود البيتونية:

1. الاستقرار ضد الانزلاق (**Sliding Stability**):

يتحقق عندما يكون الاحتكاك بين قاعدة السد والتربة كافيًا لمنع السد من الانزلاق بفعل ضغط الماء.

2. الاستقرار ضد الانقلاب (Overturning Stability):

يُقاس بقدرة وزن السد على مقاومة القوة التي تحاول قلبه إلى الأمام بفعل ضغط المياه.

3. الاستقرار ضد الرفع (Uplift Pressure):

يجب منع المياه من التسلل أسفل السد ورفع أساسه، وذلك باستخدام ستائر كتامة وتصريفات داخلية.

4. استقرار التربة والأساسات:

يعتمد على تحمل التربة للضغوط الرأسية والأفقية. أي ضعف قد يؤدي إلى هبوط غير منتظم أو انزلاقات.

7-2- العوامل التي تؤثر على الاستقرار:

- وزن السد وشكله الهندسي.
- زاوية ميل الواجهة الخلفية والأمامية.
- خصائص التربة والصخور تحت السد.
- مستوى المياه خلف السد (خزان المياه).
- وجود تسربات تؤثر على ضغط الرفع.
- نشاط زلزالي في المنطقة.

7-3- طرق تعزيز الاستقرار:

- زيادة عرض قاعدة السد لتقوية مقاومة الانزلاق والانقلاب.
- استخدام مفاصل مرنة تقلل التشققات الناتجة عن التمدد أو الزلازل.
- تصميم نظام تصريف داخلي فعال لتخفيف ضغط المياه تحت الأساسات.
- تدعيم الأساسات بالحقن الإسمنتي أو الستائر الخرسانية.
- إضافة مراسي أو كوابح في المواقع ذات التربة الضعيفة.[4,5]

7-4- معايير هندسية للاستقرار:

- يجب أن يكون معامل الأمان ضد الانزلاق ≥ 1.5.
- يجب أن يكون معامل الأمان ضد الانقلاب ≥ 2.0.

- يجب ألا يتجاوز ضغط التلامس بين السد والتربة قدرة التحمل المسموح

المراجع المعتمدة في البحث

[1] U.S. Army Corps of Engineers. (2014). Design of Gravity Dams – Engineering Manual EM 1110-2-2200.

[2]. ICOLD – International Commission on Large Dams. (2019). Bulletin 177: Grouting for Dams.

[3] Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2017). Hydraulic Structures. CRC Press.

.**[4]** Ramesh, M.V. (2020). Concrete Dam Engineering. Springer.

[5]. عبد الله، سامر. (2021). "تحليل الاستقرار في السدود الخرسانية باستخدام النمذجة العددية". مجلة جامعة دمشق للهندسة المدنية.

[6] . وزارة الموارد المائية السورية. (2022). تقرير تقني حول سد الفرات وسد البعث.

[7].الهيئة العامة للموارد المائية في سوريا – عبر موقعها الرسمي وتقاريرها السنوية.

http://www.mowr.gov.sy

[8].وزارة الموارد المائية السورية – وثائق رسمية وتقارير عن سدود (الفرات، تشرين، البعث). غالبًا تُتاح عبر نشرات الوزارة أو بوابات حكومية.

[9].دراسات منشورة على موقع ResearchGate – خاصة دراسات هندسية عن سد الفرات وسد تشرين. (مثال: أبحاث عن كفاءة التوليد المائي أو استقرار المنشآت البيتونية).

[10].تقرير: "السدود في سوريا – الواقع والتحديات" – نشر في مجلة المهندس العربي (2023، العدد 54). وهي مجلة تصدر عن نقابة المهندسين في سوريا.

[11].FAO – منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة – دليل تقني عن استخدام السدود في الزراعة، وذكر لسدود سوريا في تقارير التعاون الإقليمي.

[12]. الديب، صفاء، وأخرون (2016)، دراسة تحليلية للتسرب في أساسات السدود البيتونية وتوزع قوى رفع الضغط، رسالة ماجستير، جامعة حمص