# ارزیابی خطای روش‌های افزایش سطح و کاهش سطح در پیش‌بینی نحوه توزیع رسوب در مخازن سدهای دز، درودزن و شهید عباسپور

سید فرهاد موسوی*، جهانشیر محمدزاده هابیلی و منوچهر حیدرپور[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۸/۲۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۱۲/۸)

## چکیده

**پس از احداث سد روی یک رودخانه، رسوبات در پشت آن تجمع می‌یابند. پیش‌بینی مقدار و نحوه توزیع رسوب برای طراحان سدها اهمیت دارد. در این پژوهش، میزان خطای روش‌های تجربی افزایش سطح و کاهش سطح در پیش‌بینی توزیع رسوب مخازن سدهای دز، درودزن و شهید عباسپور ارزیابی شده است. آخرین نتایج رسوب‌سنجی در مخازن این سدها در سال‌های ۱۳۸۲ (دز)، ۱۳۸۴ (درودزن) و ۱۳۸۴ (شهید عباسپور) به‌دست آمده است. مقایسه توزیع رسوب واقعی با توزیع رسوب پیش‌بینی شده توسط روش‌های افزایش سطح و کاهش سطح نشان می‌دهد که حداکثر میزان خطا در تعیین عمق رسوب در پشت بدنه سد اتفاق می‌افتد و با افزایش تراز، میزان خطا کمتر می‌شود. برای سد درودزن که حجم رسوبات آن خیلی کم است (۳۱ میلیون متر مکعب)، روش کاهش سطح نسبت به روش افزایش سطح دارای خطای بیشتری است (۸۱% در مقابل ۳۷/۵%). در سدهای دز و شهید عباسپور که حجم رسوبات آنها زیاد است (به ترتیب ۶۰۸ و ۷۳۷ میلیون متر مکعب)، هر دو روش دارای خطای تقریباً یکسانی می‌باشند (در سد دز هر دو روش ۲۹% و در سد شهید عباسپور، روش کاهش سطح ۲۲% و روش افزایش سطح ۲۵% خطا داشت). با افزایش حجم رسوب نهشته شده طی سال‌های متمادی پس از بهره‌برداری از این سدها، مقدار ضریب شکل هر سه مخزن کم شده و در نهایت تیپ مخازن به تیپ ۲ تغییر پیدا کرده است.**

**واژه‌های کلیدی: توزیع رسوب، ظرفیت ذخیره، فرسایش، مخزن**

## مقدمه

احداث سد روی یک رودخانه، منجر به رسوب‌گذاری و در نتیجه کاهش ظرفیت ذخیره مخزن سد می‌شود. رسوب‌گذاری، محدودیت‌هایی را در فایده‌بخشی مخزن برای اهداف اولیه ایجاد می‌کند. علاوه بر این، رسوب‌گذاری باعث افزایش میزان تبخیر آب از سطح مخزن برای یک ظرفیت ذخیره مشخص (به‌دلیل افزایش سطح مخزن)، آب‌گرفتگی و تشکیل باتلاق در اراضی بالادست سد، افزایش قدرت فرسایش رودخانه در پایین دست سد، کاهش حجم کنترل سیلاب مخزن و در برخی موارد حاد باعث ایجاد پدیده روگذری در خلال سیل می‌شود (۲۱). افزایش عمق رسوب در پشت بدنه سد، پایداری آن را کاهش داده و بر عملکرد تأسیسات خروج آب، دریچه‌ها و شیرهای تراز پایین دست اثر نامطلوب می‌گذارد. پیش‌بینی مقدار و نحوه توزیع رسوب برای طراحان سدها، به‌منظور تعیین حجم مفید مخزن، تعیین رقوم آستانه تأسیسات خروج آب، بررسی تعادل و پایداری سد، تسهیلات تفریحی و تأثیری که رسوبات نهشته

۱. به ترتیب استاد، دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشیار آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mousavi@cc.iut.ac.ir



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.11.5 ]

شده در ورودی به مخزن بر اراضی بالادست می‌گذارند (به‌دلیل پس‌زدگی آب) اهمیت فراوان دارد (۷ و ۲۰). اگرچه مدل‌های ریاضی متعددی برای توزیع رسوب در مخازن با استفاده از معادلات آب و رسوب توسعه یافته است، اما روش‌های تجربی هنوز به‌طور وسیعی در کارهای عملی مهندسی استفاده می‌شوند (۱۷).

تونیولو و پارکر (۱۹) توزیع یک بعدی رسوب در مخازن سدها را با استفاده از روش‌های عددی بررسی کردند. قمشی (۱۰) با مطالعه نحوه رسوب‌گذاری در سد دز نتیجه گرفت که بعد از ۱۱۴ سال، نیمی از ظرفیت اولیه مخزن سد با رسوب پر خواهد شد. طبق نتایج روش تجربی کاهش سطح (Area-reduction method)، مشخص گردید که ۸۲ سال بعد از بهره‌برداری از سد، رسوبات در پشت سد تا رقوم لبه دریچه توربین‌ها خواهند رسید و ممکن است مسائلی را ایجاد کنند.

عابدینی و طالب بیدختی (۹) نحوه توزیع رسوب در مخزن سد درودزن را با استفاده از روش پیشنهادی مودی (۲۰) بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که روش پیشنهادی مودی در مقایسه با روش‌های قبلی باعث حذف آزمون و خطا گردیده و کاربرد آن منجر به محاسبه مستقیم عمق رسوبات و توزیع آنها در مخازن سدها می‌گردد. تراز بستر رودخانه در محل احداث سد درودزن بعد از گذشت ۵۰ سال به اندازه ۱۲/۲ متر بالا می‌آید.

طالب بیدختی و معین تقوی (۸) توزیع رسوب در مخازن چند سد ایران را بررسی کردند. متوسط خطا به روش تجربی کاهش سطح برای سدهای درودزن، دز، لتیان و کرج به ترتیب ۲۴، ۳/۸۹، ۱۴/۴۹ و ۴۲/۱۵ درصد و به روش تجربی افزایش سطح (Area-increment method) به ترتیب ۳۳/۱۵، ۳/۲۶، ۲۳/۷۲ و ۵/۴۷ درصد محاسبه گردید.

رهنمایی (۱) روش‌های افزایش سطح و کاهش سطح را برای تعیین چگونگی توزیع رسوبات مخزن سد کرج به‌کار برد و نتایج را با اندازه‌گیری‌های سال ۱۳۷۰ مقایسه کرد. در رقوم بالای مخزن، حجم‌های رسوب حاصل از دو روش تجربی تفاوت معنی‌داری با رسوب‌سنجی نداشتند ولی در رقوم‌های پایین، روش کاهش سطح جواب بهتری داده است. مجموع مربعات خطای تخمین توزیع رسوب به روش کاهش سطح ۸۸/۶۴ و به روش افزایش سطح ۱۳۴/۹۹ به‌دست آمد.

موسوی و صمدی بروجنی (۱۱) نحوه رسوب‌گذاری در مخازن ۱۴ سد کوچک منطقه چهار محال و بختیاری را بررسی کردند. سدهای کوچک دارای ارتفاع کمتر از ۱۵ متر، حجم مخزن کمتر از یک میلیون متر مکعب و مساحت حوضه آبریز کوچک‌تر از ۴۰ کیلو متر مربع هستند. نتایج نشان داد که روش‌های افزایش سطح و کاهش سطح در مورد توزیع رسوب سدهای کوچک نیز کاربرد دارند. این دو روش در رقوم پایین مخزن دارای دقت کم و در رقوم بالا دارای دقت خوبی هستند.

شعبانلو و همکاران (۶) بر اساس رسوب‌سنجی سال‌های ۱۳۶۲ و ۱۳۷۶ مخزن سد دز، علاوه بر تعیین نحوه توزیع رسوب در مخزن به روش‌های کاهش سطح و افزایش سطح (به طریق بورلند و میلر) و تحلیل رگرسیونی، میزان رسوباتی که تا سال ۱۴۰۰ به مخزن وارد خواهند شد را برآورد کرده‌اند. نتایج نشان داد که مدل کاهش سطح به طریق بورلند و میلر بهتر از سایر مدل‌ها توانسته توزیع رسوبات در مخزن را تخمین بزند و خطای کمتری داشته است.

موسوی و همکاران (۱۲) توزیع رسوب در مخزن سد زاینده‌رود را با استفاده از مدل‌های تجربی افزایش سطح و کاهش سطح بررسی کردند. عملیات رسوب‌سنجی در مخزن این سد در سال‌های ۱۳۶۷ و ۱۳۷۸ صورت گرفته است. مقایسه توزیع رسوبات ته‌نشین شده در سد با مدل‌های توزیع رسوب نشان داد که مدل کاهش سطح بورلند و میلر با کمترین خطا نسبت به سایر روش‌ها، بیشترین هم‌خوانی را با نحوه توزیع رسوب دارد.

در پژوهش حاضر، به‌منظور تعیین خطای روش‌های افزایش سطح و کاهش سطح در پیش‌بینی نحوه توزیع رسوب در مخازن سدهای دز، درودزن و شهید عباسپور، از آخرین داده‌های رسوب‌سنجی انجام شده در آنها استفاده شده است.



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.11.5 ]

برای این منظور، ابتدا با توجه به حجم رسوبات نهشته شده در مخازن این سدها و با استفاده از روش‌های افزایش سطح و کاهش سطح، منحنی‌های ارتفاع - حجم مخازن سدها به‌دست آمده و سپس با منحنی‌های واقعی ارتفاع – حجم پس از آخرین عملیات رسوب‌سنجی مقایسه شده است.

## مواد و روش‌ها

به‌منظور تعیین خطای روش‌های تجربی افزایش سطح و کاهش سطح در پیش‌بینی نحوه توزیع رسوب در مخازن سدهای دز، درودزن و شهید عباسپور، از داده‌های آخرین رسوب‌سنجی انجام شده در مخازن این سدها استفاده شده است. گرچه در سد دز در سال‌های ۱۳۶۲ و ۱۳۷۶، در سد درودزن در سال‌های ۱۳۶۳ و ۱۳۷۶ و در سد شهید عباسپور در سال‌های ۱۳۶۲ و ۱۳۷۶ عملیات رسوب‌سنجی انجام شده ولی آنچه که مهم است وضعیت فعلی توزیع رسوب در مخازن این سدها و ظرفیت باقی‌مانده کنونی آنهاست. آخرین عملیات رسوب‌سنجی که اطلاعات آنها موجود بود، در مخزن سد دز در سال ۱۳۸۲، در سد درودزن در سال ۱۳۸۴ و در سد شهید عباسپور در سال ۱۳۸۴ انجام شده است (۲، ۳ و ۴). در جدول ۱، برخی از مشخصات سدهای مورد مطالعه آورده شده است. در این قسمت، روش‌های افزایش سطح و کاهش سطح به‌طور مختصر شرح داده می‌شوند.

### الف) روش افزایش سطح

در این روش فرض می‌شود که منحنی سطح- ارتفاع مخزن پس از رسوب‌گذاری به موازات منحنی اولیه است. به بیان دیگر، فرض می‌شود که سطح رسوبات در تمام ارتفاعات ثابت است و حجم رسوبات در بالای ارتفاع صفر به‌صورت یک‌نواخت توزیع شده است (۱۳). رابطه ریاضی این روش به‌صورت زیر می‌باشد:

$$S = A_o(H - Y_o) + V_o \qquad [۱]$$

در این رابطه:

S = حجم رسوباتی که باید در مخزن توزیع شود، H = عمق اولیه مخزن (قبل از رسوب‌گذاری)، $Y_o$ = عمق رسوب در محل سد، $A_o$ = مساحت اولیه مخزن (قبل از رسوب‌گذاری) در ارتفاع $Y_o$ و $V_o$ = حجم رسوبات در زیر ارتفاع $Y_o$.

در این روش، ابتدا باید ارتفاع صفر (ارتفاعی که رسوبات پس از یک مدت معین تا آن حد بالا می‌آید، $Y_o$) حدس زده شده و سپس از روی منحنی سطح - ارتفاع، مقادیر سطح و حجم مخزن قرائت شود. اگر حجم محاسبه شده و اندازه‌گیری شده یکسان باشند، حدس اولیه ارتفاع صفر صحیح است وگرنه باید ارتفاع صفر را آن قدر تغییر داد تا شرط فوق برقرار شود.

### ب) روش کاهش سطح

روش تجربی کاهش سطح، اولین بار توسط بورلند و میلر (۱۴) ارائه شد و سپس توسط مودی اصلاح گردید (۱۲). در این روش، توزیع رسوب در مخزن به ضریب شکل مخزن و حجم رسوبات نهشته شده در آن بستگی دارد. ضریب شکل مخزن (m) عبارت است از عکس شیب منحنی ارتفاع - حجم مخزن که در یک کاغذ لگاریتمی ترسیم شده باشد. با توجه به مقدار m، بورلند و میلر مخازن را به چهار دسته کلی طبقه‌بندی کردند. در جدول ۲ طبقه‌بندی ارائه شده توسط بورلند و میلر آمده است (۱۵).

معادله اساسی در روش کاهش سطح به‌صورت زیر می‌باشد (۱۳):

$$S = \int_{o}^{Y_o} Ady + \int_{Y_o}^{H} Kady \qquad [۲]$$

در این رابطه:

S = حجم کل رسوبات نهشته شده، H = عمق اولیه مخزن (قبل از رسوب‌گذاری)، $Y_o$ = عمق رسوب در پشت سد، A = سطح مخزن در ترازهای مختلف، dy = جزء ارتفاع، a = سطح نسبی رسوب که به ازای مقادیر مختلف عمق نسبی p قابل محاسبه است و K = ضریب تناسب برای تبدیل سطح نسبی



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.11.5 ]

**جدول ۱. مشخصات سدهای مورد مطالعه**

| سد | نوع سد | بالاترین تراز آبگیری (متر) | ارتفاع نسبت به بالاترین تراز آب (متر) | حجم مخزن (میلیون متر مکعب) | حجم رسوب در آخرین عملیات سنجی (میلیون متر مکعب) |
|---|---|---|---|---|---|
| دز | بتنی دو قوسی | ۳۵۲ | ۱۸۷ | ۳۴۶۵/۴ | ۶۰۸ |
| درودزن | خاکی با هسته رسی | ۱۶۷۶/۵ | ۵۳ | ۹۹۳ | ۳۱ |
| شهید عباسپور | بتنی دو قوسی | ۵۴۳ | ۱۷۷ | ۳۷۶۴ | ۷۳۷ |

**جدول ۲. تیپ استاندارد مخازن (۱۴)**

| تیپ استاندارد | نوع مخزن | مقدار m |
|---|---|---|
| I | دریاچه‌ای (Lake) | ۳/۵ ـ ۴/۵ |
| II | سیلابدشت (Flood plain) | ۲/۵ ـ ۳/۵ |
| III | کوهپایه‌ای (Hill) | ۱/۵ ـ ۲/۵ |
| IV | کوهستانی (Gorge) | ۱ ـ ۱/۵ |

**جدول ۳. روابط به‌دست آمده توسط بورلند و میلر و مودی برای مساحت نسبی رسوب (۱۶)**

| تیپ مخزن | بورلند و میلر | مودی |
|---|---|---|
| I | $a = 3/417p^{1/5}(1-p)^{0/2}$ | $a = 5/074p^{1/85}(1-p)^{0/35}$ |
| II | $a = 2/324p^{0/5}(1-p)^{0/4}$ | $a = 2/487p^{0/57}(1-p)^{0/41}$ |
| III | $a = 15/882p^{1/1}(1-p)^{2/3}$ | $a = 16/967p^{1/15}(1-p)^{2/32}$ |
| IV | $a = 4/2324p^{0/4}(1-p)^{2/5}$ | $a = 1/486p^{-0/25}(1-p)^{134}$ |

رسوب به سطح واقعی، مقدار K از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$K = \frac{A_o}{a} \qquad [۳]$$

که $A_o$ = سطح اولیه مخزن در تراز $Y_o$ و a = سطح نسبی مخزن در تراز $Y_o$. برای تعیین تراز $Y_o$ از نمودارهای شکل ۱ می‌شود. هم‌چنین مساحت نسبی رسوبات برای هر یک از تیپ‌های مخازن در جدول ۳ ارائه شده است. ستون سوم این جدول روابط اصلاح شده توسط مودی را نشان می دهد (۱۹).

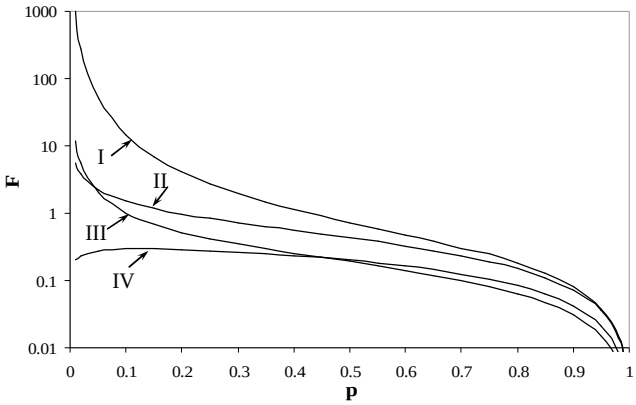
در روش کاهش سطح، گام‌های زیر در تعیین چگونگی توزیع رسوب‌گذاری در مخزن باید طی شود (۱۴ و ۲۱):

گام اول: عمق مخزن در مقابل ظرفیت آن در یک کاغذ تمام لگاریتمی رسم می‌گردد تا ضریب شکل مخزن (m) تعیین و بر اساس آن تیپ مخزن از جدول ۱ مشخص شود.

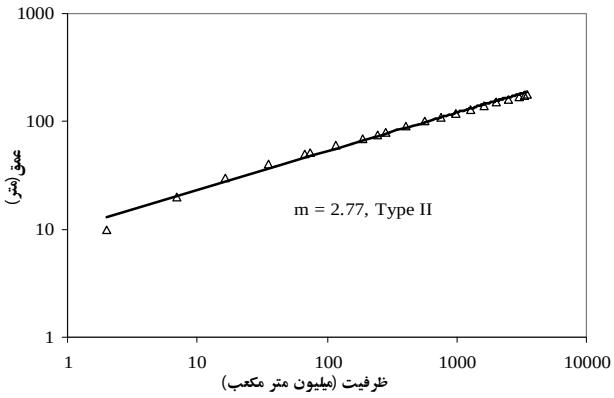


[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

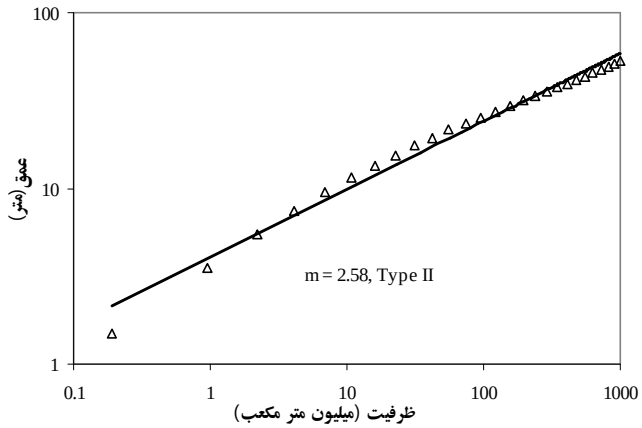
[ DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.11.5 ]



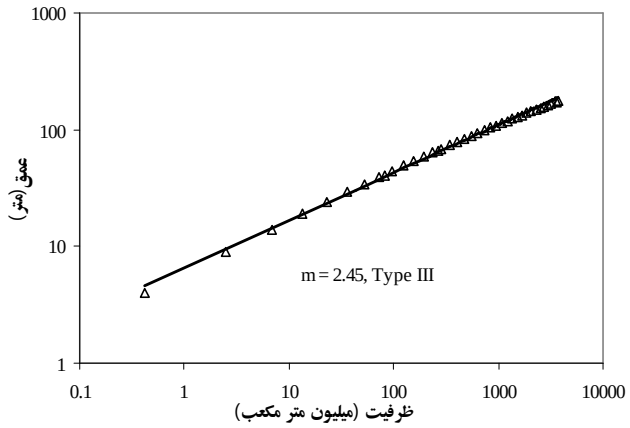

**شکل ۱. منحنی‌های تعیین عمق رسوب در پشت سدها (۱۴)**




**شکل ۲. مقدار m و تیپ مخزن سد دز در زمان بهره‌برداری**




**شکل ۳. مقدار m و تیپ مخزن سد درودزن در زمان بهره‌برداری**




**شکل ۴. مقدار m و تیپ مخزن سد شهید عباسپور در زمان بهره‌برداری**

گام دوم: مقادیر تابع بدون بعد F (شکل ۱) برای مقادیر مختلف عمق نسبی (p) از رابطه زیر محاسبه شود:

$$F = \frac{S - V_h}{H A_h} \qquad [۴]$$

که F = تابع بدون بعد از کل رسوبات ته‌نشین شده، ظرفیت، عمق و مساحت مخزن، S = حجم کل رسوبات نهشته شده، $V_h$ = ظرفیت مخزن در رقوم h، H = عمق اولیه مخزن و $A_h$ = مساحت مخزن در رقوم h.

گام سوم: مقادیر F بر حسب عمق نسبی p و هم‌چنین رابطه F-p به‌دست آمده از شکل ۱ در یک دستگاه مختصات رسم می‌شود. نقطه برخورد این دو منحنی، رقوم صفر جدید را در محل سد مشخص می‌کند.

گام چهارم: با استفاده از منحنی اولیه ارتفاع - حجم مخزن، حجم رسوب موجود در زیر تراز صفر مخزن تعیین و سپس با توجه به معادله ۲ حجم رسوب در اعماق مختلف براورد می‌گردد.

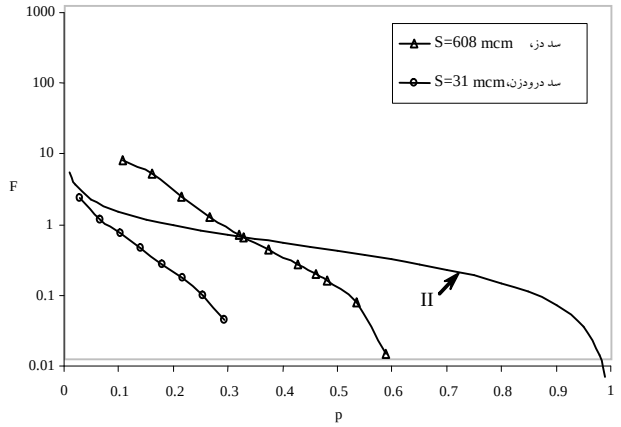
## نتایج و بحث

در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ مقدار m و تیپ مخزن (براساس جدول۲) سدهای دز، درودزن و شهید عباسپور در زمان بهره‌برداری مشخص شده است. ضریب شکل مخزن دز ۲/۷۷،

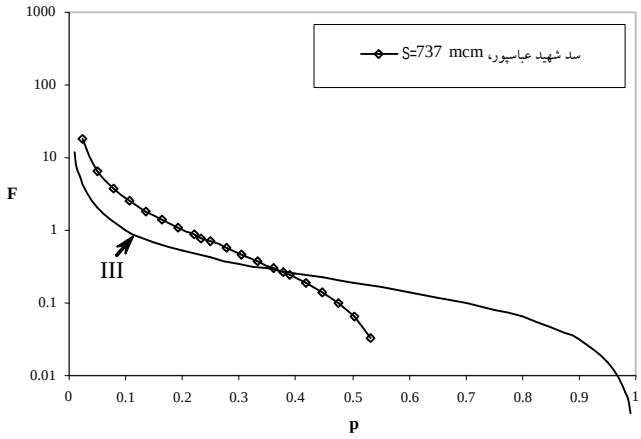


[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.11.5 ]




**شکل ۵. منحنی‌های مشخص کننده عمق نسبی رسوب برای سدهای دز و درودزن**




**شکل ۶. منحنی مشخص کننده عمق نسبی رسوب برای سد شهید عباسپور**

سد درودزن ۲/۵۸ و سد شهید عباسپور ۲/۴۵ می‌باشد.

با توجه به اطلاعات آخرین رسوب‌سنجی‌های انجام شده در مخازن سدهای دز، درودزن و شهید عباسپور، حجم رسوب نهشته شده در مخازن این سدها به ترتیب در حدود ۶۰۸، ۳۱ و ۷۳۷ میلیون متر مکعب می‌باشد (۲، ۳ و۴).

برای سدهای دز، درودزن و شهید عباسپور، مقادیر F متناظر با مقادیر مختلف p به ازای حجم رسوبات نهشته شده در مخازن این سدها با استفاده از معادله ۴ محاسبه شده است. نمودار مربوط به نقاط داده شده برای سدهای دز و درودزن در شکل ۵ و برای سد شهید عباسپور در شکل ۶ ترسیم شده است. برای سدهای دز و درودزن از منحنی تیپ ۲ و برای سد شهید عباسپور از منحنی تیپ ۳ استفاده شده است. نقاط برخورد منحنی‌های F-p سدهای مورد مطالعه با منحنی‌های استاندارد، رقوم عمق نسبی رسوب $p_o$ را در محل سد مشخص می‌کند. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶، مقدار $p_o$ برای سدهای دز، درودزن و شهید عباسپور به ترتیب ۰/۳۳، ۰/۰۱ و ۰/۳۷۵ می‌باشد. با توجه به رابطه $Y_o= p_oH$، عمق رسوب در پشت این سدها به ترتیب ۵۸/۵، ۰/۵۳ و ۶۶/۴ متر است.

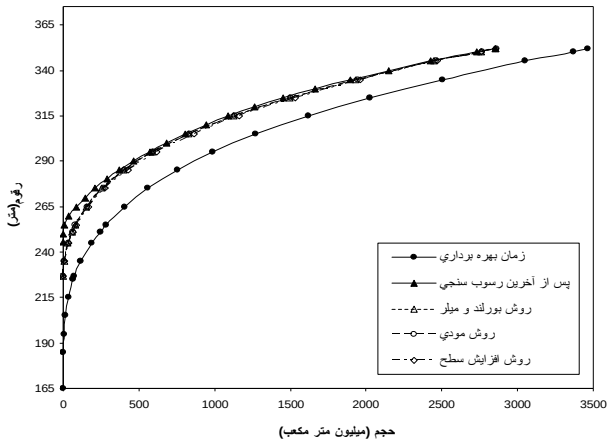
در شکل ۷، منحنی‌های ارتفاع- حجم اولیه، ارتفاع- حجم ثانویه (پس از رسوب‌گذاری) و ارتفاع- حجم پیش‌بینی شده با استفاده از روش‌های مختلف در مخزن سد دز ارائه شده است. در این شکل ملاحظه می‌شود که به ازای ۶۰۸ میلیون متر مکعب رسوب ته‌نشین شده در مخزن این سد، منحنی‌های ارتفاع- حجم پیش‌بینی شده با استفاده از روش‌های افزایش سطح، بورلند و میلر و کاهش سطح اصلاح شده توسط مودی تقریباً یکسان بوده و حجم رسوب در ارتفاعات مختلف را کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهند. عمق واقعی رسوب در پشت سد دز ۸۰/۵ متر است، در حالی‌که سه روش فوق، عمق رسوب را در حدود ۵۸/۵ متر پیش‌بینی کرده‌اند، یعنی ۲۲ متر کمتر از مقدار واقعی.

در شکل ۸، منحنی‌های ارتفاع- حجم اولیه، ارتفاع- حجم ثانویه و ارتفاع- حجم پیش‌بینی شده با استفاده از روش‌های مختلف برای سد درودزن ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، به ازای ۳۱ میلیون متر مکعب رسوب نهشته شده در مخزن این سد، منحنی‌های ارتفاع- حجم پیش‌بینی شده با استفاده از روش‌های سه‌گانه تقریباً یکسان بوده و توزیع رسوب در ارتفاعات مختلف را کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهند. عمق رسوب نهشته شده در مخزن این سد (ارتفاع صفر) در حدود ۸ متر می‌باشد، در حالی‌که روش افزایش سطح عمق رسوب را ۵ متر و روش‌های کاهش سطح

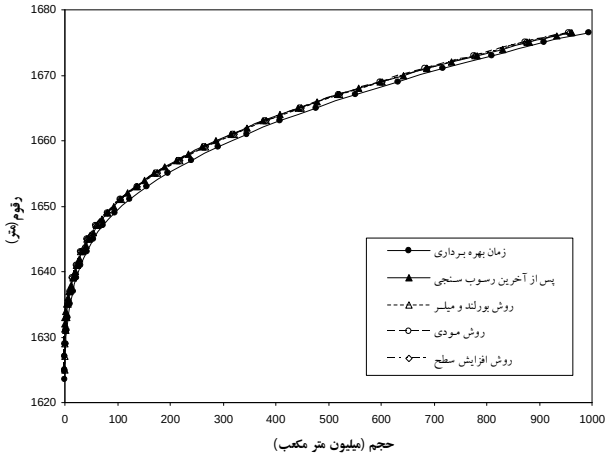


[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

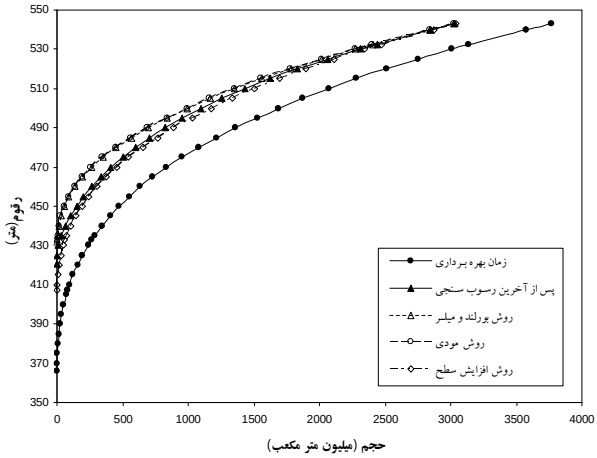
[ DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.11.5 ]




**شکل ۷. منحنی‌های ارتفاع- حجم اولیه، ثانویه و پیش‌بینی شده برای سد دز**




**شکل ۸. منحنی‌های ارتفاع- حجم اولیه، ثانویه و پیش بینی شده برای سد درودزن**




**شکل ۹. منحنی‌های ارتفاع- حجم اولیه، ثانویه و پیش‌بینی شده برای سد شهید عباسپور**

بورلند و میلر و کاهش سطح اصلاح شده توسط مودی عمق رسوب را در حدود ۱/۵ متر پیش‌بینی می‌کنند.

در شکل ۹، منحنی‌های ارتفاع- حجم اولیه، ارتفاع- حجم ثانویه و ارتفاع- حجم پیش‌بینی شده با استفاده از روش‌های مختلف برای سد شهید عباسپور ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، به ازای ۷۳۷ میلیون متر مکعب رسوب نهشته شده در مخزن این سد، منحنی‌های ارتفاع- حجم پیش‌بینی شده با استفاده از روش‌های کاهش سطح بورلند و میلر و کاهش سطح اصلاح شده توسط مودی تقریباً یکسان بوده و توزیع رسوب در ارتفاعات مختلف را بیشتر از مقدار واقعی نشان می‌دهند. در حالی‌که روش افزایش سطح، توزیع رسوب در ارتفاعات را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرده و به منحنی واقعی نزدیک‌تر می‌باشد. هم‌چنین عمق رسوب نهشته شده در مخزن این سد در حدود ۵۵ متر می‌باشد، در حالی‌که روش افزایش سطح، عمق رسوب را ۴۱ متر و روش‌های بورلند و میلر و کاهش سطح اصلاح شده توسط مودی، عمق رسوب را ۶۷ متر پیش‌بینی می‌کنند.

در جداول ۴ تا ۶ درصد خطای تخمین حجم تجمعی رسوبات توزیع شده در مخازن سدهای دز، درودزن و شهید عباسپور ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، خطای



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.11.5 ]

**جدول ۴. درصد خطای تخمین حجم تجمعی رسوبات به روش‌های مختلف در بالای تراز رسوبات نهشته شده در مخزن سد دز**

| تراز (متر) | کاهش سطح بورلند و میلر | کاهش سطح مودی | افزایش سطح |
|---|---|---|---|
| ۲۴۵/۵ | ۲۷/۴۴ | ۲۸/۰۸ | ۲۹/۴۹ |
| ۲۵۱ | ۲۳/۷۶ | ۲۴/۵۸ | ۲۶/۷۱ |
| ۲۵۵ | ۲۵/۴۶ | ۲۶/۳۰ | ۲۸/۸۴ |
| ۲۶۵ | ۲۰/۴۶ | ۲۱/۳۶ | ۲۵/۲۱ |
| ۲۷۵ | ۱۳/۳۰ | ۱۴/۱۹ | ۱۹/۴۴ |
| ۲۸۵ | ۶/۷۹ | ۷/۶۰ | ۱۴/۱۲ |
| ۲۹۵ | ۲/۹۹ | ۳/۶۷ | ۱۱/۰۴ |
| ۳۰۵ | ۲/۴۹ | ۳/۰۰ | ۱۰/۶۳ |
| ۳۱۵ | ۴/۸۸ | ۵/۲۱ | ۱۲/۴۷ |
| ۳۲۵ | ۶/۱۷ | ۶/۳۶ | ۱۲/۸۵ |
| ۳۳۵ | ۴/۸۴ | ۴/۹۲ | ۱۰/۱۸ |
| ۳۴۵ | ۱/۹۳ | ۱/۹۴ | ۴/۹۶ |
| ۳۵۰ | ۰/۵۲ | ۰/۵۲ | ۱/۶۷ |
| ۳۵۲ | ۰ | ۰ | ۰ |

**جدول ۵. درصد خطای تخمین حجم تجمعی رسوبات به روش‌های مختلف در مخزن سد درودزن**

| تراز (متر) | کاهش سطح بورلند و میلر | کاهش سطح مودی | افزایش سطح |
|---|---|---|---|
| ۱۶۳۱/۱۹ | ۴۰/۴۲ | ۴۵/۹۳ | ۵۲/۵۵ |
| ۱۶۳۵ | ۳۶/۸۰ | ۴۱/۵۶ | ۳۸/۳۱ |
| ۱۶۳۹ | ۴/۸۸ | ۱۰/۶۱ | ۴/۸۸ |
| ۱۶۴۳ | ۲۸/۴۸ | ۲۲/۳۴ | ۲۶/۹۶ |
| ۱۶۴۷ | ۱۵/۹۶ | ۱۱/۶۱ | ۱۲/۴۱ |
| ۱۶۵۱ | ۹/۴۳ | ۱۲/۰۵ | ۱۳/۷۷ |
| ۱۶۵۵ | ۲۳/۸۵ | ۲۵/۴۸ | ۲۸/۵۱ |
| ۱۶۵۹ | ۲۵/۶۱ | ۲۶/۷۴ | ۳۰/۷۸ |
| ۱۶۶۳ | ۲۱/۴۹ | ۲۲/۲۸ | ۲۷/۱۳ |
| ۱۶۶۷ | ۱۷/۵۷ | ۱۸/۰۳ | ۲۳/۰۹ |
| ۱۶۷۱ | ۴/۸۰ | ۵/۰۲ | ۹/۸۴ |
| ۱۶۷۶/۵ | ۰ | ۰ | ۰ |



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.11.5 ]

**جدول ۶. درصد خطای تخمین حجم تجمعی رسوبات به روش‌های مختلف در مخزن سد شهید عباسپور**

| تراز (متر) | کاهش سطح بورلند و میلر | کاهش سطح مودی | افزایش سطح |
|---|---|---|---|
| ۴۲۰/۷ | ۰ | ۰ | ۷/۱۰ |
| ۴۳۰ | ۴/۷۳ | ۴/۶۴ | ۱۴/۸۲ |
| ۴۴۰ | ۱۹/۱۰ | ۱۸/۳۶ | ۱۳/۳۳ |
| ۴۵۰ | ۳۰/۱۱ | ۲۹/۴۷ | ۱۰/۸۶ |
| ۴۶۰ | ۳۵/۵۴ | ۳۵/۰۵ | ۹/۱۲ |
| ۴۷۰ | ۳۶/۷۵ | ۳۶/۴۲ | ۷/۸۷ |
| ۴۸۰ | ۳۱/۴۹ | ۳۱/۲۹ | ۹/۲۵ |
| ۴۹۰ | ۲۵/۳۵ | ۲۵/۲۶ | ۱۰/۰۲ |
| ۵۰۰ | ۱۷/۸۰ | ۱۷/۷۷ | ۱۱/۰۳ |
| ۵۱۰ | ۱۲/۴۳ | ۱۲/۴۲ | ۹/۸۷ |
| ۵۲۰ | ۸/۷۸ | ۸/۷۹ | ۶/۸۹ |
| ۵۳۰ | ۵/۹۹ | ۶/۰۰ | ۲/۸۷ |
| ۵۴۰ | ۱/۴۸ | ۱/۴۹ | ۰/۴۹ |
| ۵۴۳ | ۰ | ۰ | ۰ |

تخمین در رقوم‌های پایین هر سه مخزن زیاد است و با افزایش رقوم به سمت سطح آب از میزان خطا کاسته می‌شود. آنچه که در جداول ۴ تا ۶ مد نظر است مقایسه روند کلی خطای تخمین سه روش تجربی مورد مطالعه است. در این باره، مقایسه آماری و معنی‌دار بودن تفاوت‌ها مطلب خاصی را نشان نمی‌دهد.

در جدول ۷، درصد خطای روش‌های مختلف مورد استفاده در این پژوهش در پیش‌بینی ارتفاع رسوبات نهشته شده در پشت بدنه سدهای مورد مطالعه آورده شده است. به‌طور کلی، در مراحل اولیه رسوب‌گذاری که حجم رسوبات نهشته شده خیلی کم است، روش افزایش سطح نسبت به روش کاهش سطح دارای دقت بیشتری می‌باشد. در صورتی که حجم رسوبات نهشته شده زیاد باشد هر سه روش تقریباً دارای دقت یکسانی در پیش‌بینی ارتفاع رسوب می‌باشند.

رهنمایی (۱) در مقایسه روش‌های تجربی کاهش سطح و افزایش سطح و اندازه‌گیری رسوب نهشته شده در دریاچه سد کرج به این نتیجه رسید که از رقوم ۱۶۱۰ تا ۱۷۰۵، مجموع مربعات خطای تخمین توزیع رسوب به روش کاهش سطح کمتر از روش افزایش سطح و از رقوم ۱۷۱۰ تا ۱۷۷۰، مجموع مربعات خطا در روش افزایش سطح کمتر از روش کاهش سطح می‌باشد. موسوی و همکاران (۱۲) روش کاهش سطح را برای پیش‌بینی توزیع رسوب در مخزن سد زاینده‌رود مناسب دانستند. شعبانلو (۵) نیز در بررسی خود در مورد پیش‌بینی توزیع رسوب در مخازن ۱۰ سد ایران به این نتیجه رسید که در کل، مدل کاهش سطح به طریق بورلند و میلر بهتر از سایر مدل‌ها می‌باشد. بنابراین، مقایسه نتایج پژوهش حاضر با سایر تحقیقات نشان می‌دهد که در بعضی از سدها روش کاهش سطح، در بعضی روش افزایش سطح و در تعدادی نیز هر دو روش کاربرد دارند. ضمناً هر کدام از این روش‌ها، در اعماق مختلف مخزن پیش‌بینی متفاوتی دارند. لذا، هنوز نیاز به تحقیقات بیشتری در این ارتباط می‌باشد تا روشی جامع و قابل کاربرد در اکثر سدها توسعه یابد.

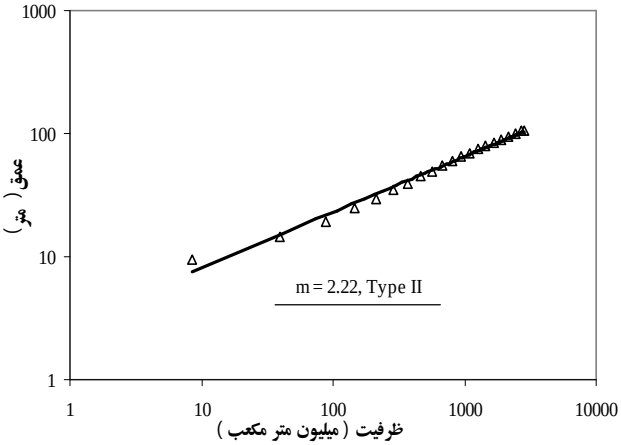


[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

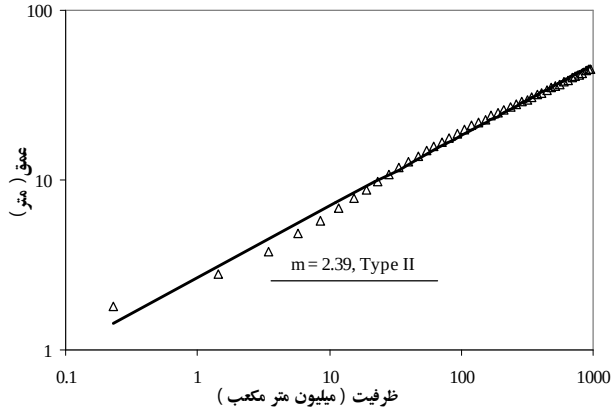
[ DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.11.5 ]

**جدول ۷. درصد خطای روش‌های مختلف در پیش‌بینی ارتفاع رسوبات نهشته شده در پشت بدنه سدهای مورد مطالعه**

| سد / روش | افزایش سطح | کاهش سطح بورلند و میلر | کاهش سطح اصلاح شده توسط مودی |
|---|---|---|---|
| دز | %۲۹ | %۲۹ | %۲۹ |
| درودزن | %۳۷/۵ | %۸۱ | %۸۱ |
| شهید عباسپور | %۲۵ | %۲۲ | %۲۲ |




**شکل ۱۰. مقدار m و تیپ مخزن سد دز در رسوب‌سنجی سال ۱۳۸۲**




**شکل ۱۱. مقدار m و تیپ مخزن سد درودزن در رسوب‌سنجی سال ۱۳۸۴**

در پژوهش حاضر، تیپ مخازن سدهای مورد مطالعه بر اساس منحنی حجم- ارتفاع اولیه (قبل از رسوب‌گذاری) و ضریب شکل مخازن انتخاب شده است. اما ممکن است علاوه بر این موارد، نحوه بهره‌برداری از مخزن نیز در انتخاب تیپ آن مؤثر باشد. این یکی از اشکالات روش‌های تجربی موجود برای پیش‌بینی توزیع رسوب در پشت سدهاست که نیاز به تحقیق بیشتری دارد.

معمولاً ضریب شکل مخزن سد پس از یک دوره رسوب‌گذاری تغییر می‌کند. در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ ضریب شکل مخزن سدهای مورد مطالعه پس از آخرین رسوب‌سنجی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود، با افزایش حجم رسوب نهشته شده طی سال‌های متمادی پس از بهره‌برداری از مخازن سدهای مورد مطالعه، مقدار ضریب شکل هر سه مخزن کم شده و در نهایت تیپ مخازن به تیپ ۲ تغییر پیدا کرده است. شعبانلو (۵) نیز به تغییر ضریب شکل مخزن در مورد سدهای زاینده‌رود، امیر کبیر و اکباتان، پس از سال‌ها رسوب‌گذاری اشاره کرده است.

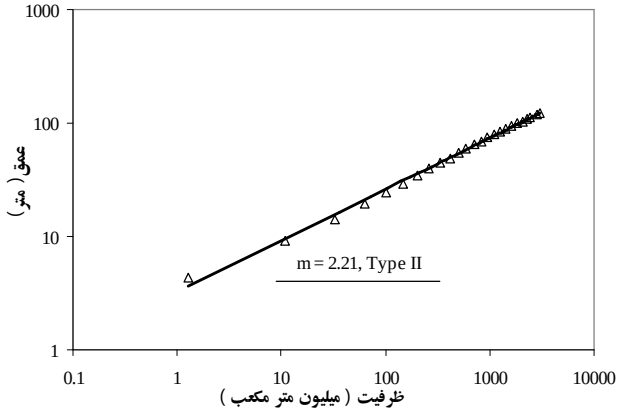
## نتیجه‌گیری

به‌منظور تعیین میزان خطای روش‌های تجربی افزایش سطح و کاهش سطح در پیش‌بینی توزیع رسوب در مخازن سدهای دز، درودزن و شهید عباسپور، از آمار آخرین رسوب‌سنجی انجام شده در این سدها استفاده شده است. با توجه به حجم رسوبات نهشته شده در مخازن این سدها و با استفاده از روش‌های فوق، منحنی‌های ارتفاع- حجم مخازن سدها تخمین زده شده و



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.11.5 ]




**شکل ۱۲. مقدار m و تیپ مخزن سد شهید عباسپور در رسوب‌سنجی سال ۱۳۸۴**

سپس با منحنی واقعی ارتفاع- حجم که از آخرین عملیات رسوب‌سنجی به‌دست آمده، مقایسه شده است. آخرین عملیات رسوب‌سنجی در مخزن سد دز در سال ۱۳۸۲، سد درودزن در سال ۱۳۸۴ و سد شهید عباسپور در سال ۱۳۸۴ انجام شده است. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که پیش‌بینی توزیع رسوب به روش‌های کاهش سطح بورلند و میلر و کاهش سطح مودی یکسان می‌باشد. در مراحل اولیه رسوب‌گذاری که حجم رسوبات نهشته شده خیلی کم است، روش افزایش سطح دارای دقت بیشتری بود ولی با افزایش حجم رسوبات ته‌نشین شده در مخازن سدها هر سه روش دارای دقت یکسانی هستند. با افزایش حجم رسوب نهشته شده در مخازن سدهای مورد مطالعه، مقدار ضریب شکل مخزن کم شده و تیپ هر سه مخزن به تیپ ۲ تغییر کرده است.

## منابع مورد استفاده


۱. رهنمایی، د. ۱۳۷۴. رسوب‌گذاری در مخازن سدها. آب و توسعه ۳(۱): ۵۰-۵۸.

۲. شرکت مهندسین مشاور دریا ترسیم. ۱۳۸۲. گزارش رسوب‌سنجی سد دز.

۳. شرکت مهندسین مشاور دریا ترسیم. ۱۳۸۴. گزارش رسوب‌سنجی سد درودزن.

۴. شرکت مهندسین مشاور دریا ترسیم. ۱۳۸۴. گزارش رسوب‌سنجی سد شهید عباسپور.

۵. شعبانلو، س. ۱۳۷۹. بررسی نحوه رسوب‌گذاری در تعدادی از سدهای مخزنی ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زه‌کشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۶. شعبانلو، س.، س. ف. موسوی و م. حیدرپور. ۱۳۸۱. بررسی میزان رسوب ورودی به مخزن دز و نحوه توزیع آن تاکنون و براورد وضعیت مخزن در آینده. ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، بهمن ۱۳۸۱، دانشگاه شهید چمران اهواز، ص ص ۵۵-۶۵.

۷. شفاعی بجستان، م. ۱۳۷۳. *هیدرولیک رسوب*. انتشارات دانشگاه شهید چمران، اهواز.

۸. طالب بیدختی، ن. و م. معین تقوی. ۱۳۶۸. بررسی و کاربرد روش‌های معمول و متداول رسوب‌گذاری مخازن سدهای درودزن، دز، لتیان، کرج و سفیدرود. مجله دانشکده فنی دانشگاه تبریز ۱۳۶: ۴۷-۵۹.




[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.11.5 ]

۹. عابدینی، م. و ن. طالب بیدختی۱۳۶۸. چگونگی توزیع و کنترل رسوب در مخازن سدها. مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، تهران، مهاب قدس، ص ۷۹۱-۸۲۰.

۱۰.قمشی، م. ۱۳۶۷. نحوه توزیع رسوب در مخزن و ارزیابی عمر مفید سد دز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زه‌کشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۱۱. موسوی، س. ف. و ح. صمدی بروجنی. ۱۳۷۵. ارزیابی توزیع رسوب در مخازن سدهای کوچک منطقه چهارمحال و بختیاری. آب و فاضلاب ۱۸: ۴-۱۳.

۱۲.موسوی، س. ف.، م. حیدرپور و س. شعبانلو. ۱۳۸۵. بررسی رسوب در مخزن سد زاینده‌رود با استفاده از مدل‌های افزایش و کاهش سطح. آب و فاضلاب ۵۷: ۷۶-۸۲.

13. Annandale, G. W. 1987. Reservoir Sedimentation. Development in Water Science, No. 29, Elsevier, Amsterdam, 221 p.
14. Borland, W. M. and C. R. Miller. 1958. Distribution of sediment in large reservoirs. J. Hydraul. Div., ASCE 84(2): 1587.1–1587.9.
15. Borland, W. M. and C. R. Miller. 1971. Reservoir Sedimentation. Ch. 29, River Mechanics, *In*: H.W. Shen (Ed.), Water Resources Publication, Fort Collins, Colorado, U.S.A.
16. Mutreja, K. N. 1986. Applied Hydrology. Tata Mc-Graw-Hill Pub. Inc., New Delhi, India.
17. Salas, J. D. and H-S Shin. 1999. Uncertainty analysis of reservoir sedimentation. ASCE, J. Hydraul. Eng. 125(4): 339-350.
18. Strand, R. I. and E. L. Pemberton. 1982. Reservoir Sedimentation. U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
19. Toniolo, H. and G. Parker. 2003. 1D numerical modeling of reservoir sedimentation. Proc., IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Barcelona, Spain, pp. 457-468.
20. United States Bureau of Reclamation. 1962. Revision of the procedure to compute sediment distribution in large reservoirs. Sedimentation Section, Hydrology Branch.
21. Yang, C. T. 1996. Sediment Transport: Theory and Practice. Mc-Graw Hill Inc., New York.

[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.46.11.5 ]