

## بررسی رسوب در مخزن سد زاینده‌رود با استفاده از مدل‌های تجربی افزایش و کاهش سطح

سید فرهاد موسوی<sup>۱</sup> منوچهر حیدرپور<sup>۲</sup> سعید شهبانلو<sup>۳</sup>

(دریافت ۸۴/۱۱/۱ پذیرش ۸۵/۱/۱۶)

### چکیده

احداث سد روی یک رودخانه منجر به رسوب‌گذاری در مخزن سد می‌شود. پیش‌بینی مقدار و نحوه توزیع رسوب برای طراحان سدها، به منظور تعیین آستانه دریچه‌های عمقی و آبگیر و بررسی تعادل و پایداری سد اهمیت فراوانی دارد. در این تحقیق، کارایی مدل‌های تجربی افزایش سطح و کاهش سطح در نحوه توزیع رسوب مخزن سد زاینده‌رود ارزیابی شد. عملیات رسوب‌سنجی در مخزن این سد در سالهای ۱۳۶۷ و ۱۳۷۸ صورت گرفته است. با استفاده از منحنیهای حجم - ارتفاع و ارتفاع - سطح اولیه این سد، روشهای افزایش سطح و کاهش سطح جهت برآورد توزیع رسوب در ارتفاعات مختلف به کار گرفته شد. مقایسه توزیع رسوبات ته‌نشین شده در سد فوق 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. توزیع رسوب در سالهای ۱۳۹۹، ۱۴۲۴ و ۱۴۴۹ پیش‌بینی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** روش افزایش سطح، روش کاهش سطح، سد زاینده‌رود، رسوب‌گذاری، مخزن سد.

## Investigation of Sediments in the Zayandehrud Reservoir through Area-increment and Area-reduction Empirical Models

Sayed-Farhad Mousavi<sup>1</sup>, Manuchehr Haidarpour<sup>2</sup>, Saeid Shabanlou<sup>3</sup>

(Received Jan. 21, 2005 Accepted Apr. 6, 2006)

### Abstract

The construction of a dam on a river causes sediments to settle behind the dam. It is important for dam designer to estimate the rate and distribution of sediments in the reservoir in order to decide the dam stability and fix the sill elevations of the outlets and penstock gates. In this study, the accuracy of area-reduction and area-increment methods in estimating sediment distribution in the reservoir of Zayandehrud dam is evaluated. Measurement of sediment at dam reservoir was done in 1988 and 2000. The distribution of sediments in different heights was performed through volume-height and initial height-area curves plus area-increment and area-reduction methods. Comparison of the sediment distribution in the reservoir with these models showed that Borland and Miller area-reduction method was the best and has the least error in this respect. Therefore, this method has been applied to predict the sediment distribution for the years of 2020, 2045 and 2070.

**Keywords:** Area- Increment, Area-Reduction, Zayandehrud Dam, Sedimentation, Dam Reservoir.

1- Prof., College of Agriculture, Isfahan University of Technology- mousavi@cc.iut.ac.ir

2- Assist. Prof., College of Agriculture, Isfahan University of Technology

3- Ph.D Student, Azad Islamic University, Tehran

۱- استاد گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

mousavi@cc.iut.ac.ir

۲- استادیار گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

هدف از تحقیق حاضر بررسی نحوه توزیع رسوب در مخزن سد زاینده‌رود با استفاده از روشهای افزایش سطح، کاهش سطح بورلند و میلر و کاهش سطح اصلاح شده توسط مودی و مقایسه آنها با مقادیر اندازه‌گیری شده است؛ تا در نهایت، یک روش از بین این روشها برای پیش‌بینی توزیع رسوب در مخزن سد زاینده‌رود انتخاب می‌شود.

## ۲- روش تحقیق

در این تحقیق، سعی بر آن است که با استفاده از داده‌های ارتفاع - سطح و ارتفاع - حجم اولیه سد زاینده‌رود و ارتفاع - سطح و ارتفاع - حجم ثانویه (بعد از رسوب‌گذاری)، میزان دقت روشهای افزایش سطح، کاهش سطح بورلند و میلر و کاهش سطح اصلاح شده توسط مودی در برآورد نحوه توزیع رسوب در مخزن سد ارزیابی شود.

### ۱-۲- مشخصات سد زاینده‌رود

این سد روی رودخانه زاینده‌رود در بین سالهای ۱۳۴۴ و ۱۳۴۹ و در ۱۱۰ کیلومتری غرب اصفهان بنا گردیده است. مساحت حوضه آبریز آن ۴۱۳۴ کیلومتر مربع است. مشخصات فنی این سد به شرح جدول ۱ می‌باشد [۱۲].

### ۲-۲- روش افزایش سطح

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

$$S = A_0(H - Y_0) + V_0 \quad (1)$$

که در آن:

S: حجم رسوباتی که باید در مخزن توزیع گردد،  
H: عمق اولیه مخزن از کف رودخانه،  $Y_0$ : عمق رسوب در محل سد،  $A_0$ : مساحت اولیه مخزن در ارتفاع  $Y_0$  و  $V_0$ : حجم رسوبات در زیر ارتفاع  $Y_0$  می‌باشد.

در این روش، ابتدا باید ارتفاع صفر ( $Y_0$ ) 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 باشد حدس اولیه صحیح است وگرنه باید ارتفاع صفر را آن قدر تغییر داد تا شرط فوق برقرار شود.

احداث سد روی یک رودخانه اثرات مهمی بر جریان آب و رسوب آن داشته و باعث تغییرات درازمدت مورفولوژیکی در رودخانه می‌گردد. تجمع رسوبات در پشت سدها موجب کاهش ظرفیت ذخیره و در نتیجه محدود شدن عمر مفید آنها می‌شود. هر سال تقریباً ۲۰ میلیارد تن رسوبات توسط رودخانه‌های جهان انتقال یافته و در آبهای ساکن ته‌نشین می‌گردد [۱]. در ایران نیز سالانه بیش از ۱۰۰ میلیون متر مکعب از گنجایش مفید سدها بر اثر انباشته شدن رسوبات کاسته می‌شود [۲]. رسوب‌گذاری در مخزن علاوه بر کاهش میزان ذخیره آب باعث افزایش تبخیر برای یک ظرفیت ذخیره مشخص، آب گرفتگی و تشکیل باتلاق در اراضی بالادست سد، افزایش قدرت فرسایشی رودخانه در پایین دست سد، کاهش حجم کنترل سیلاب مخزن و در برخی موارد حاد، باعث ایجاد پدیده روگذری در خلال سیل می‌شود. ته‌نشینی رسوب در پشت دیواره یک سد، پایداری آن را کاهش داده و بر عملکرد تأسیسات خروجی، دریچه‌ها و شیرهای تراز پایین دست اثرات نامطلوب می‌گذارد. پیش‌بینی نحوه توزیع رسوب برای طراحان سدها، به منظور تعیین آستانه دریچه‌های عمقی و آبگیر و بررسی تعادل و پایداری سد اهمیت دارد [۳]. علاوه بر این، در دوران بهره‌برداری از سدها، نحوه پخش رسوب در برآورد مجدد حجم مفید باقیمانده مخزن اهمیت می‌یابد [۴]. چندین روش برای برآورد نحوه توزیع رسوب در مخازن سدها ارائه شده که اغلب آنها به صورت مدل‌های تجربی - ریاضی هستند. از این بین، دو روش تجربی کاهش سطح و افزایش سطح نسبت به سایر روشها متداول‌ترند. روش افزایش سطح توسط کریستوفانو ارائه گردیده است [۵]. روش تجربی کاهش سطح نیز توسط بورلند و میلر در سال ۱۹۶۰ ارائه گردیده و سپس توسط مودی در سال ۱۹۶۲ اصلاح شده است [۶ و ۷].

قمشی و همکاران نحوه رسوب‌گذاری در سد دز را مورد مطالعه قرار داده و از روشهای تجربی کاهش سطح و افزایش سطح استفاده کردند [۸]. عابدینی و طالب بیدختی نحوه توزیع رسوب در مخزن سد درودزن را از روش کاهش سطح مورد بررسی قرار دادند [۹]. در این مطالعه مشخص گردید که بعد از گذشت ۵۰ سال رسوبات پشت سد درودزن تا ارتفاع ۱۲/۲ متر بالا می‌آید. رهنمایی روشهای توزیع رسوب را در مخزن سد کرج به کار برده و نتایج را با اندازه‌گیری‌های سال ۱۳۷۰ مقایسه کرده است [۱۰]. تقوی و طالب بیدختی توزیع رسوب در مخازن سدهای درودزن، دز، لتیان، کرج و سفیدرود را مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. موسوی و صمدی بروجنی نحوه رسوب‌گذاری در مخازن سدهای کوچک منطقه

جدول ۱- مشخصات فنی سد زاینده‌رود

رودخانه	محل سد	نوع سد	طول تاج (متر)	ارتفاع از پی (متر)	گنجایش کل مخزن (میلیون متر مکعب)	گنجایش مفید (میلیون متر مکعب)
زاینده‌رود	ایسی سو	بتونی قوسی	۴۵۰	۱۰۰	۱۴۵۰	۱۲۴۰
شهرکرد						

جدول ۲- تیپ استاندارد مخازن [۳]

تیپ استاندارد	نوع مخزن	پارامتر m
I	دریاچه معمولی (Lake)	۳/۵ - ۴/۵
II	سیلاب‌دشت تپه‌ای (Flood Plain)	۲/۵ - ۳/۵
III	کوهپایه‌ای (Hill)	۱/۵ - ۲/۵
IV	کوهستانی (Gorge)	۱ - ۱/۵

مساحت نسبی رسوبات برای هر یک از تیپ‌های مخازن در جدول ۳ ارائه شده است. ستون ۳ این جدول روابط اصلاح شده توسط مودی را نشان می‌دهد [۱۳]. شکل ۲ منحنیهای مورد استفاده را برای تعیین عمق رسوب در پشت سدها نشان می‌دهد.

در روش کاهش سطح، گامهای زیر در تعیین چگونگی توزیع رسوب‌گذاری در مخزن باید دنبال شود [۳]:

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

گام دوم: مقادیر تابع بی‌بعد F برای مقادیر مختلف عمق نسبی P از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$F = (S - V_h) / (HA_h) \quad (4)$$

که F = تابع بی‌بعدی از کل رسوب ته‌نشین شده، ظرفیت، عمق و مساحت مخزن، S = حجم کل رسوب ته‌نشین شده،  $V_h =$  ظرفیت مخزن در رقوم h، H = عمق اولیه مخزن و  $A_h =$  مساحت مخزن در رقوم h می‌باشد.

گام سوم: مقادیر F بر حسب عمق نسبی P و همچنین رابطه F-P به دست 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 ظرفیت - عمق مخزن، حجم رسوب موجود در زیر تراز صفر مخزن تعیین و سپس با توجه به رابطه ۲ حجم رسوب در اعماق مختلف برآورد می‌گردد.

۲-۳- روش کاهش سطح

روش تجربی کاهش سطح، اولین بار توسط بورلند و میلر ارائه شد و متعاقباً توسط مودی مورد بازنگری قرار گرفت [۶ و ۷]. این روش مشخص می‌کند که توزیع رسوب در یک مخزن به شکل مخزن و حجم رسوبات ته‌نشین شده در آن بستگی دارد. ضریب شکل m یک مخزن عبارت است از عکس شیب خط نمودار عمق - ظرفیت که در یک کاغذ لگاریتمی رسم شده باشد. طبقه‌بندی مخازن بر این اساس، در جدول ۲ ارائه شده است. معادله اساسی در روش کاهش سطح به قرار زیر است [۷]

$$S = \int_0^{Y_0} A dy + \int_{Y_0}^H K dy \quad (2)$$

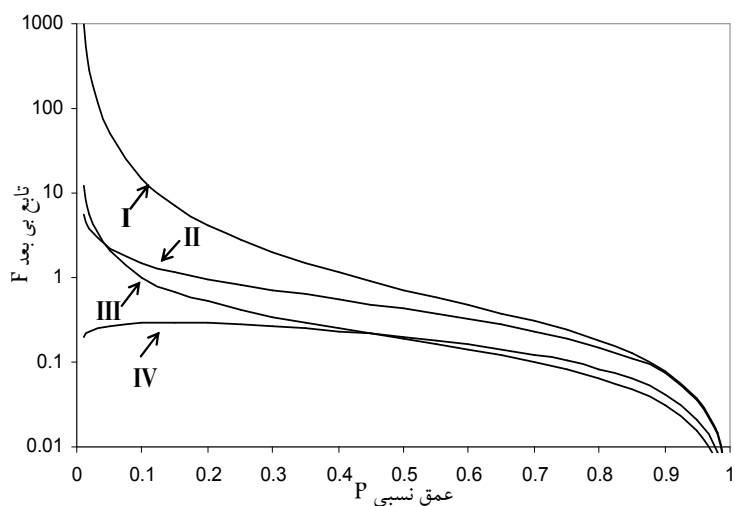
که در آن:

S: حجم کل رسوبات ته‌نشین شده، H: عمق اولیه مخزن،  $Y_0$ : 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 رسوب به سطح واقعی است و از رابطه زیر به دست می‌آید

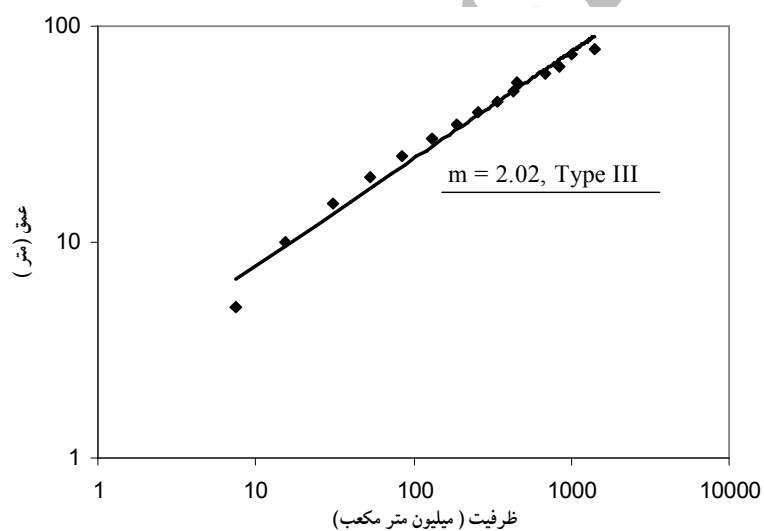
$$K = \frac{A_0}{a_0} \quad (3)$$

که در آن:

$A_0$ : سطح اولیه مخزن در تراز  $Y_0$  و  $a_0$ : سطح نسبی مخزن در تراز  $Y_0$ .



شکل ۱ - منحنیهای تعیین عمق رسوب در پشت سدها [۱۴]



شکل ۲ - مقدار  $m$  و تیپ مخزن سد زاینده‌رود در هنگام رسوب‌سنجی سال ۱۳۷۸

جدول ۳ - روابط به دست آمده توسط بورلند و میلر و مودی برای مساحت نسبی رسوب [۱۳]

مودی	بورلند و میلر	تیپ مخزن
$a = 5.074 P^{1.85} (1-P)^{0.35}$	$a = 3.417 P^{1.5} (1-P)^{0.2}$	I
$a = 2.487 P^{0.57} (1-P)^{0.41}$	$a = 2.324 P^{0.5} (1-P)^{0.4}$	II
$a = 16.967 P^{1.15} (1-P)^{2.32}$	$a = 15.8820 P^{1.1} (1-P)^{2.3}$	III
$a = 1.486 P^{-0.25} (1-P)^{1.34}$	$a = 4.2324 P^{0.1} (1-P)^{2.5}$	IV

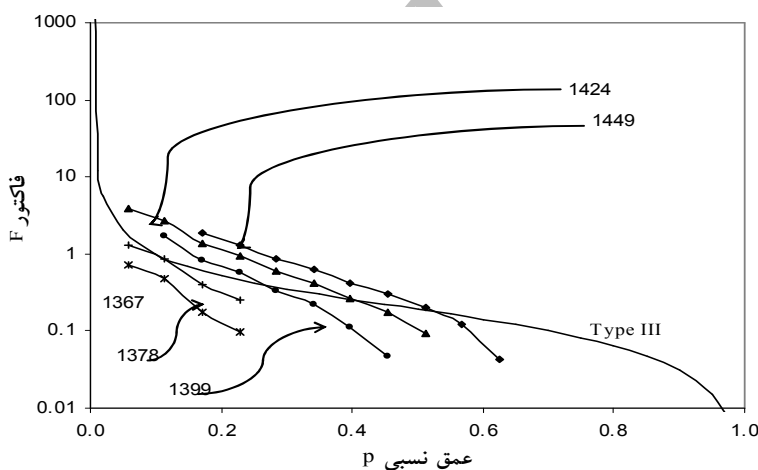
### ۳- نتایج و بحث

رابطه ظرفیت و عمق سد زاینده رود نشان می‌دهد که اکثریت مخزن با  $m = 2/5$  از تیپ III می‌باشد [۱۲]. بعد از گذشت ۱۸ سال، یعنی در رسوب‌سنجی سال ۱۳۶۷، تیپ مخزن با مقدار  $m = 2/49$  تغییری نکرده است. رسوب‌سنجی سال ۱۳۷۸ حاکی از تغییر مقدار  $m$  به  $2/02$  ولی ثابت ماندن تیپ مخزن می‌باشد (شکل ۲).

تا سال ۱۳۶۷ هر ساله  $4/25$  میلیون متر مکعب رسوب وارد مخزن زاینده رود گردیده است. رسوب‌سنجی سال ۱۳۷۸ این مقدار را  $5/89$  میلیون متر مکعب در سال نشان می‌دهد. برای تخمین وضعیت رسوب مخزن در سالهای بعد، با فرض ثابت بودن مقدار رسوب ورودی به مخزن بر اساس رسوب‌سنجی سال ۱۳۷۸، محاسبات پیش‌بینی رسوب درازمدت صورت گرفت. بر این اساس، ۲۱۵ سال پس از سال ۱۳۷۸، مخزن کاملاً از رسوب پر می‌گردد. مقادیر  $F$  متناظر با مقادیر مختلف  $P$  برای سالهای مختلف، از رابطه ۴ به دست آمده است. نمودار مربوط به نقاط داده شده روی

شکل ۳ ترسیم شده‌اند. نقاط برخورد این منحنیها با منحنی تیپ III، رقوم صفر عمق نسبی  $P_0$  را در محل سد مشخص می‌کند. رقوم رسوبی که بدین طریق به دست آمده‌اند در جدول ۴ خلاصه شده‌اند. میانگین کل خطا و انحراف معیار حجم مفید باقیمانده مخزن برای مدل‌های افزایش سطح و کاهش سطح به روشهای بورلند و میلر و مودی در جدول ۵ نشان داده شده است.

برای پیش‌بینی نحوه توزیع رسوب در مخزن سد زاینده رود، مدل کاهش سطح بورلند و میلر انتخاب شده است. منحنیهای عمق-ظرفیت سد در سالهای ۱۳۴۹ و ۱۳۷۸ و همچنین منحنیهای پیش‌بینی شده عمق-ظرفیت برای سالهای ۱۳۷۸، ۱۳۹۹، ۱۴۲۴ و ۱۴۴۹ در شکل ۴ ارائه شده است. مقایسه منحنی عمق-ظرفیت پیش‌بینی شده برای سال ۱۳۷۸ با منحنی واقعی در این سال نشان می‌دهد که در اعماق پایین تر مخزن، روش کاهش سطح بورلند و میلر حجم رسوب را بیشتر از حالت واقعی برآورد می‌کند. ولی در اعماق بالاتر، روش کاهش سطح، حجم رسوب را کمتر از مقدار واقعی آن برآورد می‌کند.



شکل ۳- منحنیهای مشخص کننده عمق نسبی رسوب در پشت سد زاینده رود

جدول ۴- ارتفاع رسوب در پشت سد زاینده رود

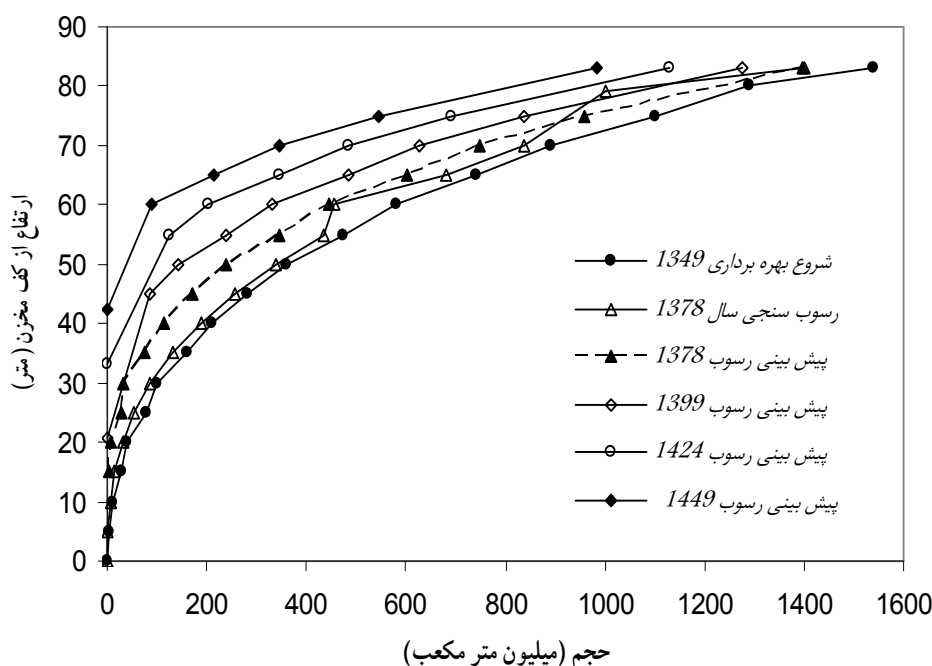
سال	$P_0$	$Y_0$ (متر)
۱۳۷۸	۰/۱۱۳	۹/۳۸
۱۳۹۹	۰/۲۵	۲۰/۷۵
۱۴۲۴	۰/۴	۳۳/۲
۱۴۴۹	۰/۵۱	۴۲/۴

جدول ۵ - مقدار متوسط خطا (E) و انحراف معیار (Se) برآورد حجم مفید باقیمانده مخزن سد زاینده‌رود

برای مدل‌های افزایش سطح و کاهش سطح

روش افزایش سطح	روش کاهش سطح مودی	روش کاهش سطح بورلند و میلر	
۵۱/۶۲	۸۴/۶۱	۴۷/۱۱	E
۲۱/۱۸	۲۴/۹۸	۱۱/۱۶	*E <sub>adj</sub>
۱۲۳/۰۴	۸۷/۱۸	۴۲/۰۸	Se
۱۳۸/۳۷	۸۲/۷۶	۳۰/۰۳	*Se <sub>adj</sub>

\* E<sub>adj</sub> و Se<sub>adj</sub> مقدار خطا و انحراف معیار مدل‌ها بدون در نظر گرفتن ۵ متر، بالای رقوم صفر مخزن می‌باشد.



شکل ۴ - منحنیهای عمق-ظرفیت برای مخزن سد زاینده‌رود

#### ۴- نتیجه‌گیری

سطح بورلند و میلر برگزیده شد. منحنیهای عمق-ظرفیت سد در سالهای ۱۳۴۹ و ۱۳۷۸ و همچنین منحنیهای پیش‌بینی شده عمق-ظرفیت برای سالهای ۱۳۷۸، ۱۳۹۹، ۱۴۲۴ و ۱۴۴۹ در شکل ۴ ارائه شده است. مقایسه منحنی عمق-ظرفیت پیش‌بینی شده برای سال ۱۳۷۸ با منحنی واقعی در این سال نشان می‌دهد که در اعماق پایین‌تر مخزن، روش کاهش سطح بورلند و میلر حجم رسوب را نسبت به حالت واقعی بیشتر برآورد می‌کند. ولی در اعماق بالاتر، روش کاهش سطح حجم رسوب را کمتر از حالت واقعی آن برآورد می‌کند.

برای برآورد نحوه توزیع رسوب در مخزن سد زاینده‌رود، مدل کاهش سطح بورلند و میلر با کمترین مقدار خطا و انحراف معیار، بهتر از سایر مدل‌ها بود. این مدل دارای خطایی برابر با ۴۷/۱۱ درصد و انحراف معیار ۴۲/۰۸ می‌باشد. برای کاهش خطای تخمین رسوب، ۵ متر پایین مخزن بعد از هر رسوب‌سنجی حذف گردید. بدین ترتیب، مقدار خطای تخمین رسوب برای مدل کاهش سطح بورلند و میلر به ۱۱/۱۶ درصد کاهش یافت. به این ترتیب برای پیش‌بینی نحوه توزیع رسوب در مخزن سد زاینده‌رود، مدل کاهش

- ۱- میرباقری، س. ا. (۱۳۶۸). "مطالعات تکنیکی در برآورد رسوبات حوزه آبریز." مجموعه مقالات، اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، مهاب قدس، تهران، ۶۵۲-۶۶۸.
- ۲- جلالیان، ا. (۱۳۷۳). "فرسایش و رسوب و علل آن در حوضه‌های آبخیز کشور و ارائه نتایج موردی در بعضی از حوضه‌های آبخیز ایران." خلاصه مقالات، چهارمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
- 3- Yang, C. T. (1996). *Sediment transport: theory and practice*, McGraw Hill, New York, 396.
- ۴- کمیته رسوب طرح استانداردهای صنعت آب، (۱۳۶۸). "محاسبه میزان رسوبات و چگونگی تجمع آنها در مخازن سدها." مجموعه مقالات، اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، مهاب قدس، تهران، ۶۶۹-۶۹۰.
- ۵- موسوی، س. ف.، و صمدی بروجنی، ح. (۱۳۷۵). "ارزیابی توزیع رسوب در مخازن سدهای کوچک منطقه چهارمحال و بختیاری." مجله آب و فاضلاب، ۱۸، ۴-۱۳.
- 6- Annandale, G. W. (1987). *Reservoir sedimentation*, Development in water science, 29, Elsevier, 221
- 7- Borland, W.M., and Miller, C.R. (1971). *River mechanics, Chapter, B 29: Reservoir sedimentation*, H.W. Shen, editor, Water Resources Publication, Fort Collins, Colorado, U.S.A.
- ۸- قمشی، م. صدقی، ح. صدقی و بینا م. (۱۳۶۸). "نحوه توزیع رسوب در مخزن و ارزیابی عمر مفید سد دز." مجموعه مقالات، اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، تهران، مهاب قدس، ۸۲۱-۸۴۴.
- ۹- عابدینی، م.، و طالب بیدختی، ن. (۱۳۶۸). "چگونگی توزیع و کنترل رسوب در مخازن سدها." مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، مهاب قدس، تهران، ۷۹۱-۸۲۰.
- ۱۰- رهنمایی، د. (۱۳۷۴). "رسوب‌گذاری در مخازن سدها." آب و توسعه، ۳(۱)، ۵۰-۵۸.
- ۱۱- تقوی، م.، و طالب بیدختی، ن. "بررسی و کاربرد روشهای معمول و متداول رسوب‌گذاری مخازن سدهای درودزن، دز، لتیان، کرج و سفیدرود" نشریه دانشکده فنی دانشگاه تبریز، ۱۳۶، ۴۷-۵۹.
- ۱۲- شعبانلو، س. (۱۳۷۹). "بررسی نحوه رسوب‌گذاری در تعدادی از سدهای مخزنی ایران با حجم‌های متفاوت." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
- 13- United States Bureau of Reclamation. (1962). *Revision of the procedure to compute sediment distribution in large reservoirs*, Sedimentation Section, Hydrology Branch.
- 14- Strand, R. I., and Pemberton, E. L. (1982). *Reservoir sedimentation.*, U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.