



## Uncertainty Analysis of Reservoir Sedimentation

Z. Ganji Noroozi<sup>1</sup>, J. M. V. Samani<sup>2</sup>  
and S. Morid<sup>3</sup>

### Abstract

Estimation of reservoir sedimentation volume is necessary for design and hydraulic structure management purposes where different empirical and mathematical methods are employed in this regard. Due to different factors effecting sedimentation process and their stochastic process, uncertainties arise which cause failure and may force designers to consider safety factors in their designs. Therefore, uncertainty analysis may introduce a better understanding of the effect of different input parameters and their separate contributions to the whole output error. In this research, the sediment discharge rate was estimated by employing different methods such as USBR, average of classes, and the FAO modification coefficient. In these methods data collected from Yalfan hydrometry and Shakhe Dovom SAD stations were used. To calculate the trap efficiency the Brown method, and for specific weight Lane & Koelzer and Miller methods were used. The results of the FAO modification coefficient on average of classes and specific weight of Miller method compared to other corresponding methods show better agreement with the measured ones. In this research, Monte Carlo Simulation and Har's methods were investigated. Calculation of The Monte Carlo method and the uncertainty contribution of each parameter were conducted by a FORTRAN computer program introduced by the author. The results show that the sediment discharge rate and the flow rate introduce the highest contribution to the whole uncertainty of sedimentation volume, respectively. Also, Har's method show less uncertainty value compared to the Monte Carlo method.

**Keywords:** Sediment Volume, USBR, FAO, Uncertainty, Monte Carlo, Point Harr

## بررسی عدم قطعیت حجم رسوب مخازن سدها

زهرا گنجی نوروزی<sup>۱</sup>، جمال محمد ولی سامانی<sup>۲</sup>  
و سعید مرید<sup>۳</sup>

### چکیده

برآورد حجم رسوب ورودی به مخازن سدها از ضرورت‌های طراحی و مدیریت تأسیسات آبی می‌باشد. روش‌های تجربی و ریاضی مختلفی جهت برآورد حجم رسوب موجود است اما همواره این روش‌ها دارای قطعیت نبوده و باعث شکست پروژه یا استفاده از ضرایب اطمینان بالا می‌شود. در این راستا تحلیل عدم قطعیت می‌تواند راهگشا باشد. در این تحقیق، جهت برآورد دبی رسوب ورودی به سد، روش‌های USBR متوسط دسته‌ها و تعدیل ضریب FAO استفاده شده است. نتایج به دست آمده، در مقایسه با رسوب سنجی مخزن سد اکیاتان نشان داد که تعدیل ضریب FAO روی روش متوسط دسته‌ها در برآورد دبی رسوب نتایج مطلوبتری را به همراه داشته است. در بحث عدم قطعیت، دو روش شبیه‌سازی مونت کارلو و نقطه‌ای هار مورد بررسی قرار گرفت. بدین طریق که در روش مونت کارلو به دلیل حجم بالای محاسبات، از برنامه کامپیوتری نوشته شده توسط نگارنده به زبان FORTRAN برای بررسی سهم هر پارامتر در عدم قطعیت کلی حجم رسوب و محاسبه عدم قطعیت کلی استفاده گردیده است. طبق نتایج به دست آمده دبی رسوب و پس از آن دبی جریان بیشترین تأثیر و راندمان تله اندازی کمترین تأثیر را در عدم قطعیت حجم رسوب دارا هستند. همچنین روش مونت کارلو عدم قطعیت کلی را برابر با ۰/۲۰۸ و روش هار ۰/۱۷۹ برآورد کرده است.

**کلمات کلیدی:** حجم رسوب، USBR، FAO، عدم قطعیت، مونت کارلو، نقطه‌ای هار.

تاریخ دریافت مقاله: ۵ تیر ۱۳۸۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۳۰ اردیبهشت ۱۳۸۷

1- Ph.D. Student of Water Structures Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. z-ganji59@yahoo.com  
2- Associate Professor of Water Structures Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. j\_samani2003@yahoo.com  
3- Associate Professor of Water Structures Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

۱- دانشجوی دکتری رشته سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
۲- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
۳- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

## ۱- مقدمه

نتایج نشان داده است که اکثر روش های محاسباتی از روش شبیه سازی مونت کارلو ساده تر بوده و قابل استفاده هستند، Hosseini (2000) با استفاده از داده های یک سد پاره سنگی تحلیل عدم قطعیت روابط جریان در محیط متخلخل را با سه روش هار، مونت کارلو و FOVE انجام داد.

هدف از این تحقیق مقایسه عدم قطعیت حجم تجمعی رسوبگذاری سالیانه مخازن سدها با استفاده از روش های شبیه سازی مونت کارلو و نقطه ای هار می باشد. به علاوه حساسیت و اهمیت نسبی داده های ورودی تصادفی بر عدم قطعیت مورد ارزیابی قرار گرفت و بدین منظور آمار و اطلاعات سد اکباتان بکار گرفته شد.

## ۲- مواد و روش ها

### ۲-۱- منطقه مطالعاتی

حوزه آبریز سد اکباتان در محدوده ۲۸' ۴۸° تا ۴۳' ۴۸° طول شرقی و ۳۴' ۳۴° تا ۴۵' ۳۴° عرض شمالی در ۱۲ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان همدان قرار گرفته است. این حوزه از دو رودخانه اصلی آبشینه و ابرو تشکیل شده است و دارای دو ایستگاه هیدرومتری به نام های یلفان و شاخه دوم سد بر روی آنها می باشد که برای این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته اند. ایستگاه یلفان از سال ۳۵-۱۳۳۴ و ایستگاه شاخه دوم سد از سال آبی ۶۰-۱۳۵۹ به جز سال آبی ۶۶-۱۳۶۵ دارای آمار دبی جریان بوده و نمونه برداری رسوب در ایستگاه های فوق به ترتیب از سال ۱۳۴۳ و ۱۳۶۳ آغاز شده و تعداد نمونه ها در آن ها ۵۱۷ و ۷۱ نمونه می باشد. همچنین اندازه گیری های مربوط به رسوب سنجی در سد اکباتان در سال های ۶۳-۱۳۶۲ و ۶۹-۱۳۶۸ و ۷۴-۱۳۷۳ انجام گرفته که حجم رسوب انباشته شده به ترتیب ۲/۶۱ و ۳/۳۸۵ و ۳/۹۱۶ میلیون متر مکعب می باشد.

### ۲-۲- تخمین جرم و حجم رسوب تجمعی سالیانه مخزن

جهت برآورد سرعت کاهش حجم سد، پارامترهای رسوبی که شامل مقدار رسوب ورودی، راندمان تله اندازی و وزن حجمی رسوبات ته نشین شده می باشد، برآورد گردیده است.

برای تخمین بار رسوب سالیانه، بار رسوب روزانه از منحنی-سنجه روزانه رسوب مطابق معادلات زیر برآورد شده است:

$$Q_S = a_1 Q_W^{b_1} \quad (1)$$

$$Q_B = a_2 Q_W^{b_2} \quad (2)$$

یکی از مشکلات اصلی در طراحی های مهندسی و به خصوص بخش آب آن، ناتوانی در شناخت و به کمیت درآوردن متغیرهای حاکم بر فرآیندهای مربوط می باشد. در این راستا تجزیه و تحلیل عدم قطعیت<sup>۱</sup> می تواند درک درستی از اهمیت عوامل تأثیرگذار بر پدیده ایجاد کرده و شناختی راجع به سهم هر کدام از پارامترهای ورودی برخطای ظاهر شده در مدل خروجی ارائه دهد.

رسوبگذاری مخازن از جمله پارامترهای مهم در طراحی سدها است که متأثر از فرآیندهای طبیعی و مدیریتی متفاوت می باشد. عواملی مانند حجم انتقال رسوب، نوع رسوب، نحوه ته نشینی رسوبات، راندمان تله اندازی<sup>۲</sup>، بهره برداری از مخزن، شکل هندسی مخزن و تغییرات دبی رودخانه از این قبیل هستند که تمامی دارای عدم قطعیت می باشند و بالطبع، رسوبگذاری مخزن نیز خود دارای عدم قطعیت خواهد بود. علاوه بر این عوامل مدل یا معادلاتی هم که برای تخمین برخی از کمیت هایی که در بالا ذکر شد، بکار می روند و نیز مدلی که برای تخمین حجم رسوب در مخزن بکار می رود، دارای جوابهایی با قطعیت کامل نیستند. جهت به کمیت در آوردن عدم قطعیت، روش های متعددی وجود دارد که از بین آن ها روش شبیه سازی مونت کارلو<sup>۳</sup> (MCS) به طور گسترده در منابع آب مورد استفاده قرار گرفته است. از روش های دیگر محاسبه عدم قطعیت روش نقطه ای هار<sup>۴</sup> می باشد اگر چه این روش به اندازه روش مونت کارلو مورد توجه محققین قرار نگرفته اما روشی کارآمد است، به خصوص در مواردی که توزیع آماری پارامترها در دست نبوده یا به دست آوردن آنها مشکل باشد. از کارهای انجام یافته با دو روش فوق می توان به موارد زیر اشاره کرد. (Deng and Yeh (1996) جهت تحلیل عدم قطعیت فرمول های انتقال رسوب اینشتین و یانگ از روشهای تخمین نقطه ای هار، تخمین مرتبه اول تغییرات (FOVE) و روش شبیه سازی مونت کارلو استفاده کرده و نتیجه گرفتند که تفاوت زیادی بین نتایج آنالیز عدم قطعیت موضعی (روش FOVE) و نتایج روش آنالیز عدم قطعیت کلی (روش هار و مونت کارلو با نمونه گیری LHS) دیده نمی شود، (Salas (1999) در تخمین عدم قطعیت رسوب تحکیمی در مخزن سد کنی در کلرادو روش مونت کارلو را مورد استفاده قرار داد و عدم قطعیت کلی را ۰.۳۶٪ به دست آورد. (Rui Zou et al (2002) برای محاسبه عدم قطعیت در مدل سازی کیفیت آب، روش مونت کارلو را که با شبکه عصبی حل شده، را پیشنهاد کردند، (Chie Yen and Lian (2003) مطالعه مقایسه ای را با ۵ روش آنالیز عدم قطعیت از جمله روش هار، مونت کارلو و رزنبالات بر روی ظرفیت عبور سیل از کالورت انجام دادند.

مقدار واقعی برآورد می‌کنند. FAO جهت برطرف کردن این مشکل مقدار  $a_1$  و  $a_2$  را در رابطه (۱) و (۲) به صورت زیر تعدیل می‌کند:

$$a'_1 = \frac{\overline{Q_S}}{Q_W} \quad \text{و} \quad a'_2 = \frac{\overline{Q_B}}{Q_W} \quad (۳)$$

که در آن

$$a'_1 = \text{ضریب FAO} = \overline{Q_S} = \text{متوسط بار رسوب معلق روزانه (ton/day)}$$

$$a'_2 = \overline{Q_B} = \text{متوسط بار رسوب بستر روزانه (ton/day)}$$

$$Q_W = \text{متوسط دبی جریان روزانه (m}^3/\text{s)}$$
 می‌باشد.

در ادامه  $a'$  جایگزین  $a_1$  و  $a_2$  در فرمول (۱) و (۲) می‌شود و مجدداً بار رسوب از روی رابطه جدید محاسبه می‌گردد. (FAO 1981)

پس از محاسبه مقدار رسوب ورودی، برای محاسبه مقدار رسوب ته‌نشین شده در مخزن ابتدا راندمان تله‌اندازی با استفاده از رابطه براون (Brown) بدست آمد:

$$TE_t = a_3 + b_3 \{ \log_{10}(C_{t-1} / IW_t) \}^2 \quad (۴)$$

که در آن:  $TE_t$  = راندمان تله‌اندازی (%) در سال  $t$ ،  $C_{t-1}$  = حجم مفید مخزن ( $m^3$ ) در شروع سال  $t$   $QW_t = ۳۱/۵۳۶ * ۱۰^{-۶} QW_t$  و  $a_3$  و  $b_3$  = ضرایب رگرسیون می‌باشند. (Brown 1958)

بر اساس این محاسبات متوسط راندمان تله‌اندازی در این سد با استفاده از روش‌های متفاوت در تخمین بار رسوب به ترتیب ۸۸/۴۷، ۸۸/۳۷، ۸۸/۱۷ و ۸۸/۳۷ بدست آمد که نشان می‌دهد این روش‌ها تفاوتی با یکدیگر ندارند.

سپس کل بار رسوب تله‌اندازی شده در مخزن (RSL) در سال مشخص  $t$  بدست آمد:

$$RSL_t = 3.65 QT_t \times TE_t \quad (۵)$$

که RSL بر حسب تن می‌باشد و رسوب تجمعی در مخزن (تن) بعد از  $t$  سال برابر خواهد بود با:

$$ARSL_t = ARSL_{t-1} + RSL_t, \quad t = 1, 2, \dots \quad (۶)$$

که  $ARSL_0 = 0$ . زیرا رسوب تجمعی در مخزن در ابتدای سال اول صفر می‌باشد.

بعد از اینکه رسوبات در مخزن تله‌اندازی شد، در طول زمان تحکیم می‌گردد. (Miller 1953) فرمول زیر را برای تعیین متوسط وزن مخصوص ذرات رسوبی ته‌نشین شده بعد از گذشت  $t$  سال ارایه داده است:

$$W_t = W_1 + 0.4343K \left[ \left( \frac{t}{t-1} \right) \ln t - 1 \right], \quad t > 1 \quad (۷)$$

که در آن  $Q_W$  = دبی جریان،  $(m^3/s)$ ،  $Q_S$  = دبی رسوب معلق  $(ton/day)$ ،  $Q_B$  = دبی رسوب بستر،  $a_1$ ،  $b_1$ ،  $a_2$  و  $b_2$  ضرایب رگرسیونی می‌باشد. در ادامه متوسط کل رسوب ورودی در سال  $t$  ( $QT_t$ ) از رابطه  $QT_t = Q_{S_t} + Q_{B_t}$  به دست می‌آید که جهت تخمین حجم رسوب سالیانه وکل رسوب از روش‌های USBR (اداره احیای اراضی آمریکا) و متوسط دسته‌ها با استفاده از تعدیل ضریب FAO (سازمان خواربار و کشاورزی جهانی) و بدون آن مورد بررسی واقع شد که شرح روش‌ها در ادامه می‌آید.

**روش USBR:** در این روش نخست منحنی منحنی سنجه رسوب شامل دبی رسوب (معمولاً بر حسب تن در روز) در مقابل دبی جریان (متر مکعب بر ثانیه) می‌باشد از روی آمار دبی-رسوب تهیه می‌شود. آماده سازی منحنی سنجه رسوب شامل رسم تمام مقادیر اندازه‌گیری شده دبی رسوب در طی دوره آماری موجود در مقابل مقادیر متناظر دبی آب و ایجاد همبستگی با بیشترین ضریب همبستگی می‌باشد. (USBR 1987)

برای تخمین بار سالیانه رسوب در این روش باید مراحل زیر را انجام داد:

الف- برای هر سال بار رسوب روزانه را از روی منحنی-سنجه رسوب (برای کل دوره آماری) محاسبه می‌کنیم.

ب- بارهای روزانه رسوب را برای هر سال جمع و بر تعداد روزهای سال تقسیم می‌کنیم، سپس این مقدار بار متوسط سالیانه رسوب را بصورت تن در روز ارائه می‌کند.

ج- به این ترتیب برای هر سال متوسط سالیانه رسوب را در اختیار خواهیم داشت.

**روش متوسط دسته‌ها:** از آنجا که تعداد برداشت دبی رسوب در مواقع سیلابی بسیار کم می‌باشد، لذا در برازش منحنی به کل آمار، فرمول ایجاد شده، در برآورد دبی‌های بالا دچار مشکل می‌شود برای افزایش سهم دبی‌های بالا یکی از روش‌ها این است که دبی‌ها را بر اساس دامنه داده‌ها، دسته‌بندی کرده متوسط هر دسته را به دست آورده و بین متوسط دسته‌های دبی جریان و متوسط دسته‌های دبی رسوب رگرسیون ایجاد گردد و بقیه مراحل مانند روش USBR خواهد بود. ابوالقاسمی و مرید (۱۳۷۴)

**استفاده از روش FAO:** همانطور که گفته شد معمولاً روابط برازش داده شده بین دبی آب و دبی رسوب، بار رسوبی را کمتر از

نتایج برآورد حجم رسوب با روش های مختلف در شکل (۱) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود با توجه به داده های هیدروگرافی سد اکباتان، به جز روش FAO و متوسط دسته ها، سایر روش ها حجم رسوب را بسیار کمتر از مقدار واقعی برآورد می کنند. بنابراین روش متوسط دسته ها با اعمال ضریب تعدیل FAO به عنوان روش برتر پذیرفته شد. بر این اساس حجم مخزن سد اکباتان پس از یک دوره ۳۰ ساله ۴/۰۶ میلیون متر مکعب به دست می آید که میزان خطای آن در مقایسه با رسوب سنجی ۳ درصد است.

### ۲-۳- تحلیل عدم قطعیت حجم رسوبات مخزن

برآورد عدم قطعیت رسوبگذاری مخازن بر اساس مدل تجربی که در قسمت قبل توضیح داده شد، همراه با داده ها و پارامترهایی که ماهیت تصادفی<sup>۵</sup> دارند، انجام گرفته است. این پارامترها را می توان مطابق زیر طبقه بندی کرد:

- (۱) داده های مربوط به منحنی سنجه های رسوب سالیانه که برای تخمین مقدار جریان رسوب سالیانه ورودی بکار می روند از قبیل ضرایب رگرسیونی  $a_1, b_1$  و  $a_2, b_2$  مربوط به معادله سنجه رسوب، زیرا از تعداد محدودی اندازه گیری صحرایی تهیه شده اند،
- (۲) داده های مربوط به نوع رسوبات ورودی از قبیل: درصد رس، لای و ماسه ( $P(c)$ ،  $P(m)$  و  $P(s)$ ) که از سالی به سال دیگر تغییر می کنند،
- (۳) داده های مربوط به معادله رگرسیون برای تخمین راندمان تله اندازی مخازن ( $a_3, b_3$ ) و
- (۴) داده های مربوط به تغییرات جریان ورودی به مخزن ( $Q_W$ ).

$W_t$  = متوسط وزن مخصوص رسوبات ( $kg/m^3$ ) بعد از  $t$  سال و  $W_1$  = وزن مخصوص اولیه رسوبات و  $K$  = ثابت تحکیم می باشد.  $K$  و  $W_1$  توابعی از نحوه بهره برداری مخزن و اندازه رسوبات می باشند که از روی جداول به دست آمده توسط میلر به دست می آیند. (1953) Miller برای رسوبات مخلوط، یک میانگین وزنی از متوسط وزن مخصوص ها و ثابت های تحکیم به دست می آید.

$$W_1 = 0.01[W_1(c)P(c) + W_1(m)P(m) + W_1(s)P(s)] \quad (8)$$

$$K = 0.01[K(c)P(c) + K(m)P(m) + K(s)P(s)] \quad (9)$$

که در آن:  $W_1(c)$ ،  $W_1(m)$ ،  $W_1(s)$  = وزن مخصوص اولیه،  $K(c)$ ،  $K(m)$ ،  $K(s)$  = ثابت های تحکیم،  $P(c)$ ،  $P(m)$  و  $P(s)$  = به ترتیب، درصد رس، لای و ماسه می باشند. (1953) Miller برای تعیین وزن مخصوص ذرات دو روش میلر لین و کولزر (Lane & koelzer, 1943) استفاده شد که روش میلر نتایج مطلوبتری ارائه داد که مقدار آن به ترتیب در ابتدا و انتهای دوره ۱۱۰۱/۲ و ۲۲۵۷/۲ کیلو گرم بر متر مکعب می باشد.

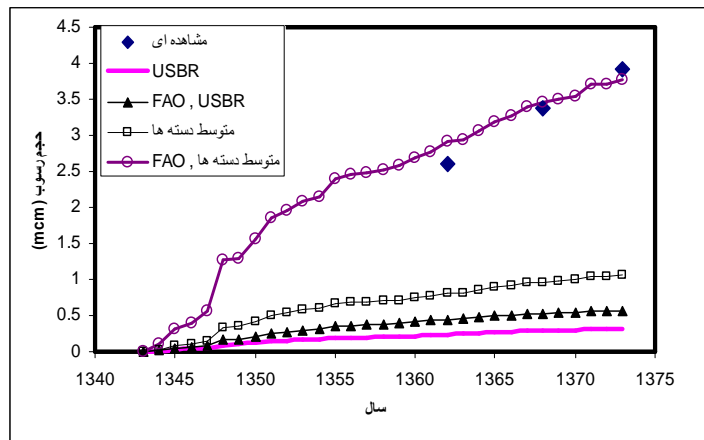
در مرحله بعد متوسط وزن مخصوص رسوبات ( $W_t$ ) جهت تبدیل جرم رسوب تجمعی سالیانه (ARSL) در مخزن به حجم رسوب تجمعی سالیانه (ARSV) بکار می رود.

$$ARSV_t = 1000ARSL_t / W_t \quad (10)$$

و نهایتاً حجم مفید باقیمانده سالیانه در مخزن در انتهای سال  $t$  را می توان بصورت زیر محاسبه کرد:

$$C_t = C_0 - ARSV_t \quad (11)$$

که  $C_0$  = حجم مفید اولیه مخزن می باشد (Salas, 1999).



شکل ۱- مقایسه نتایج روش های مختلف برآورد حجم رسوب انباشته شده در مخزن سد اکباتان

## ۲-۳-۱- تحلیل عدم قطعیت حجم رسوبات مخزن با استفاده از روش مونت کارلو

در محاسبه عدم قطعیت به روش شبیه سازی مونت کارلو بر خلاف روش‌های تحلیلی اساس کار شبیه‌سازی پدیده مورد نظر به تعداد ۱۰۰۰ بار می‌باشد. بدین منظور هر یک از پارامترهای ورودی (داده‌های تصادفی) به تعداد ۱۰۰۰ بار توسط روش‌های موجود تولید داده، شبیه‌سازی شده و با قرار دادن آنها در مدل مورد نظر ۱۰۰۰ تکرار خروجی حاصل می‌گردد. سپس ضریب تغییرات پارامتر خروجی محاسبه و به عنوان معیار عدم قطعیت خروجی در نظر گرفته می‌شود. برای تولید هر پارامتر ابتدا بهترین توزیع آماری به هر یک از پارامترهای ورودی که شامل  $\{\hat{a}_1, \hat{b}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_2, \hat{a}_3, \hat{b}_3, \hat{p}(c), \hat{p}(m), \hat{p}(s), \hat{Q}_W\}$  هستند برآزش داده می‌شود. توزیع مناسب پارامترها با برآزش بین توزیع‌های نرمال، لوگ نرمال، پیرسون، لوگ پیرسون، یکنواخت و توانی و محاسبه معیار  $RSS$  و همچنین با توجه به هیستوگرام فراوانی، انتخاب شدند که نتایج مربوط در جدول (۱) نشان داده شده است.

در محاسبه عدم قطعیت حجم رسوب خروجی نهایی  $C_t$  است که در آن  $t$  عمر مفید سد بوده و روند محاسبه آن در قسمت ۳-۲ آورده شده است. برای شبیه سازی ۱۰۰۰ تکرار از  $C_t$  به تعداد  $t \times 1000$  تکرار از پارامترهای ورودی سالانه و  $365 \times 1000 \times t$  تکرار از پارامترهای ورودی روزانه نیاز است. اگر  $t = 50$  سال در نظر گرفته شود، برای پارامترهای روزانه از قبیل  $a_1, b_1, a_2, b_2$  و  $Q_W$  نیاز به تولید ۱۸۲۵۰۰۰ داده و برای پارامترهای سالیانه مانند  $a_3, b_3$  و درصد رسوبات  $(p(c), p(m), p(s))$  نیاز به تولید ۵۰۰۰۰ داده خواهد بود.

سپس با داشتن هر ۱۸۲۵۰ و ۵۰ داده به ترتیب برای پارامترهای روزانه و سالیانه به عنوان یک دسته و با تکرار مراحلی که در بخش ۳-۲ به آن اشاره شد، خروجی‌های تصادفی که عبارتند از  $RSL_t, ARSV_t, ARSL_t$  و  $C_t$  تولید می‌شوند. در انتهای این مرحله ۵۰ داده تصادفی از  $RSL_t$  و یک داده تصادفی از  $ARSL_t, ARSV_t$  و  $C_t$  خواهیم داشت که با تکرار این مراحل به تعداد ۱۰۰۰ بار حجم رسوب ته نشین شده پس از ۵۰ سال، به تعداد ۱۰۰۰ بار شبیه سازی می‌شود که با محاسبه میانگین و انحراف معیار آن، می‌توان ضریب تغییرات را به عنوان عدم قطعیت محاسبه نمود. (Ang, Tang (1984)

## جدول ۱- توزیع‌های آماری منتخب برای ۱۰ پارامتر ورودی در عدم قطعیت حجم رسوب

فاکتورهای عدم قطعیت	میانگین	انحراف معیار	نوع توزیع
$a_1$	۰۷۳/۱۲	۴۱۳/۷	نرمال
$b_1$	۴۰۵/۱	۲۸۹/۰	لوگ نرمال
$a_2$	۴۰۶/۲	۴۸۲/۱	نرمال
$b_2$	۴۳۷/۱	۳۰۴/۰	لوگ نرمال
$a_3$	۰۶۸/۱۰۰	۶۴۶۴/۱	نرمال
$b_3$	۳۵۹/۱۳-	۵۵۲/۰	نرمال
$p(c)$	۷۳۴/۲۵	۹۸۵/۲	یکنواخت
$p(m)$	۶۰۱/۶۸	۴۷۸/۴	یکنواخت
$p(s)$	۴۶۹/۱۱	۹۷۰/۵	یکنواخت
$Q_W$	۴۸۷/۱۱	۹۷/۲	توانی

به منظور تحلیل عدم قطعیت ARSV که هدف این تحقیق را رقم می‌زند، تاثیر فاکتورهای عدم قطعیت مؤثر بر آن، به طریق زیر طبقه‌بندی شده است (C1 تا C4):

- C1- دبی سالانه با پارامترهای ثابت  $(\hat{\mu}, \phi_1, \text{and } \sigma_\varepsilon^2)$
- C2- رسوب سالانه ورودی با عدم قطعیت در پارامترهای منحنی سنجه‌های بار بستر و رسوب معلق
- C3- منحنی راندمان تله اندازی با عدم قطعیت در ضرایب رگرسیون
- C4- عدم قطعیت درصد هر نوع از رسوبات

نتایج محاسبات عدم قطعیت پس از اجرای برنامه برای هر حالت در جداول (۲) آمده است.

## جدول ۲- تحلیل نتایج عدم قطعیت ARSV با در نظر گرفتن تأثیر هر فاکتور

فاکتورهای عدم قطعیت	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
C1	۲۷۹۵۲۱۳	۲۲۶۴۱۲/۳	۰/۰۸۱
C2	۲۷۹۹۲۹۹	۵۳۱۸۶۶/۸	۰/۱۹
C3	۲۶۲۳۴۸۷	۱۴۱۶۶/۸	۰/۰۵۴
C4	۲۷۸۱۲۶۳	۱۱۱۲۵۰/۵	۰/۰۴

طبق نتایج به دست آمده، دبی رسوب سالیانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت ضرایب منحنی‌های سنجه رسوب که مقدار آن ۰/۱۹ می‌باشد، بیشترین تأثیر را در عدم قطعیت دارد. پس از دبی رسوب از

بین عوامل بالا، دبی جریان مؤثرترین عامل بر عدم قطعیت خروجی و مقدار آن ۰/۰۸۱ است. کمترین تأثیر مربوط به عدم قطعیت ضرایب منحنی راندمان تله اندازی می باشد که برابر ۰/۰۰۵۴ می باشد. ج- تولید 2n نقطه تقاطع با استفاده از روابط زیر

$$x_{i\pm} = \mu \pm \sqrt{N} \begin{bmatrix} \sigma_1 \dots \dots \\ \dots \dots 0 \\ \dots \dots \dots \\ 0 \dots \dots \\ \dots \dots \sigma_n \end{bmatrix} v_i \quad (13)$$

د- محاسبه  $Y_{i\pm} = g(x_{i\pm})$  و  $Y_{i\pm}^2 = g^2(x_{i\pm})$  برای  $i = 1, 2, \dots, n$

که در آن  $x_{i\pm}$  ماتریس پارامترهای ورودی تولید شده،  $g$  تابع محاسبه سرعت کاهش حجم که در بخش ۳-۲ توضیح داده شد،  $Y_{i\pm}$  خروجی موردنظر یعنی ARSV است.

ه- محاسبه میانگین مدل خروجی برای  $i = 1, 2, \dots, n$

$$\bar{Y}_i = \frac{Y_{i+} + Y_{i-}}{2} \quad (14)$$

$$\bar{Y}_i^{-2} = \frac{Y_{i+}^2 + Y_{i-}^2}{2} \quad (15)$$

و- محاسبه میانگین و واریانس مدل خروجی (Yeh and Tung, 1993):

$$E(Y) = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{Y}_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{Y}_i \lambda_i}{N} \quad (16)$$

$$E(Y^2) = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{Y}_i^{-2} \lambda_i}{N} \quad (17)$$

$$Var(Y) = E(Y^2) - E^2(Y) \quad (18)$$

طبق آنچه در فوق آمد، در روش نقطه‌ای هار اولین گام انتخاب پارامترهای مؤثر بر عدم قطعیت می باشد. پارامترهای مؤثر بر عدم قطعیت در قسمت ۳-۳ آورده شده است که از تکرار مجدد آن صرف نظر می کنیم.

در روش نقطه‌ای هار، از هر پارامتر ورودی به تعداد مساوی  $2N$  تولید می شود. اما با توجه به هدف تحقیق که به دست آوردن عدم قطعیت حجم رسوب پس از  $t$  سال می باشد، برای شبیه سازی  $2N$  تکرار از حجم رسوب، نیاز به  $2N \times t \times 365$  تکرار از

در مرحله بعد عدم قطعیت ARSV با توجه به تأثیر ترکیب فاکتورهای مختلف محاسبه و نتایج پس از اجرای برنامه برای حالت‌های زیر در جدول (۳) آمده است.

- A- دبی سالیانه با پارامترهای ثابت
- B- رسوب سالیانه ورودی + دبی سالیانه
- C- منحنی ضریب تله اندازی سالیانه ورودی + دبی سالیانه
- D- کل عدم قطعیت

جدول ۳- تحلیل نتایج عدم قطعیت ARSV با ترکیب فاکتور ها

ضریب تغییرات	انحراف معیار	میانگین	فاکتور های ترکیبی عدم قطعیت
۰/۰۹۱	۲۵۵۴۴۳۸/۸	۲۷۹۶۰۳۱	A
۰/۱۲	۳۳۶۸۷۲/۳	۲۸۰۷۲۶۷	B
۰/۱۳	۳۴۷۴۰۴/۳	۲۶۷۲۳۴۱	C
۰/۲۰۸	۵۸۷۲۷۹/۱	۲۸۲۳۴۵۷	D

همانگونه که مشاهده می شود عدم قطعیت کلی حجم رسوب برابر ۰/۲۰۸ به دست آمد. مقایسه عدم قطعیت کلی با عدم قطعیت هر فاکتور، نشان می دهد که ترکیب دبی رسوب با سایر پارامترها تفاوت عمده‌ای ایجاد نکرده و فقط عدم قطعیت را از ۰/۱۹ به ۰/۲۰۸ می رساند که نشان دهنده نقش عمده برآورد دبی رسوب در عدم قطعیت کلی می باشد. بعد از آن دبی، بیشترین سهم از عدم قطعیت کلی را به خود اختصاص می دهد.

### ۲-۳-۲- تحلیل عدم قطعیت حجم رسوبات مخزن با

#### استفاده از روش نقطه‌ای هار

مراحل کار با این روش جهت تحلیل عدم قطعیت حجم رسوب مخازن، در مراحل زیر خلاصه می شود:

- الف- مشخص نمودن پارامتر های فیزیکی مربوط به هر رابطه و محاسبه ماتریس هم بستگی بین آنها
  - ب- تجزیه ماتریس هم بستگی پارامترهای ورودی (CO) به ماتریس‌های بردار ویژه و ماتریس قطری مقادیر ویژه  $L$ .
- $$CO = VLV^T \quad (12)$$
- که در آن

$$SCC(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \mu_y)^2 \right]^{0.5}} \quad (19)$$

نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که از میان پارامترهای مورد استفاده در تحلیل عدم قطعیت، حجم رسوب بیشترین حساسیت را به ترتیب به  $a_1, a_2$  ( $-0/3$  و  $-0/32$ ) دارد و کمترین آن مربوط به  $p(c)$  ( $0/15$ ) می‌باشد.

#### ۴- خلاصه نتایج

تحقیق حاضر تلاشی بود در تحلیل عدم قطعیت در برآورد حجم رسوبات ذخیره شده در پشت سد ها که سد اکباتان برای آن انتخاب گردید. نتایج زیر از این تحقیق قابل ارائه است:  
- استفاده از روشهای مختلف برای برآورد حجم رسوبات سالیانه، شامل روشهای USBR، متوسط دسته‌ها همراه با اعمال تعدیل ضریب FAO نشان داد که ترکیب روش متوسط دسته‌ها با این روش نتایج مطلوب و بسیار نزدیکی به مشاهدات بر اساس هیدروگرافی سد اکباتان دارد.

- نتایج محاسبه عدم قطعیت به روش مونت کارلو با در نظر گرفتن تأثیر هر پارامتر، مهم‌ترین فاکتور را دبی رسوب با عدم قطعیت  $0/19$  و کم اهمیت ترین فاکتور را راندمان تله اندازی با عدم قطعیت  $0/054$  معرفی می‌کند.

- محاسبه عدم قطعیت با ترکیب پارامترها نشان می‌دهد که ترکیب دبی رسوب با سایر پارامترها تأثیر زیادی در نتایج ندارد که نشان‌دهنده تأثیر عمده رسوب در عدم قطعیت کلی است. پس از دبی رسوب، بیشترین نقش را دبی جریان دارد.

پارامترهای ورودی روزانه نظیر دبی و  $2N \times t$  تکرار از پارامترهای سالانه خواهد بود.

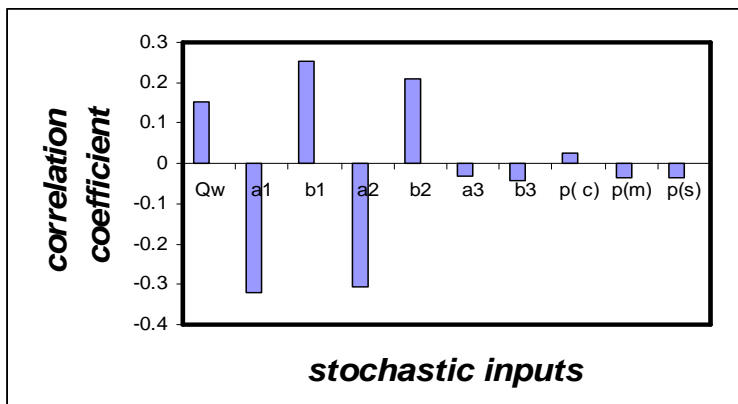
بدین منظور، پس از بررسی های انجام گرفته، دبی را از ماتریس همبستگی جدا کرده و تولید داده های دبی به تعداد مورد نیاز توسط نرم افزار SIMLAB صورت گرفت. سایر پارامترهای روزانه مانند  $a_1, b_1$  و  $a_2, b_2$  به طور سالانه محاسبه گردیده و تمام پارامترهای سالانه در هر  $t$  سال ثابت در نظر گرفته شد. البته با این ساده سازی مقداری از دقت محاسبات کاسته می‌گردد. جهت مراحل شش گانه فوق از داده های ایستگاه یلفان و نرم افزار MATLAB استفاده شد که جهت اختصار فقط ماتریس  $x_{i-}$  به عنوان نمونه در جدول (۴) نشان داده شده است.

پس از اینکه ماتریس های  $x_{i+}$  و  $x_{i-}$  محاسبه شد، با انتخاب هر دسته از پارامترها و با استفاده از مدل توضیح داده شده در بخش ۳-۲ و تکرار به مقدار لازم، پارامتر خروجی به تعداد  $2N$  بار شبیه سازی می‌شود.

پس از شبیه سازی پارامتر خروجی با توجه به روابط روش هار که در همین بخش ذکر گردید واریانس، میانگین و سپس ضریب تغییرات پارامتر خروجی محاسبه شد که مقدار عدم قطعیت کلی حجم رسوب  $0/17$  به دست آمد که در مقایسه با روش مونت کارلو  $0/029$  کاهش نشان می‌دهد.

#### ۳-۳- تحلیل حساسیت

با توجه به اهداف طرح، جهت بررسی میزان درجه تأثیر هر پارامتر ورودی در عدم قطعیت خروجی از رابطه زیر استفاده شد که در حقیقت همان همبستگی بین پارامترهای ورودی و پارامتر خروجی را نشان می‌دهد (Salas, 1999) که نتایج در شکل (۲) آمده است:



شکل ۲- نتایج تحلیل حساسیت بین پارامترهای ورودی و پارامتر خروجی



مرید، س. و میر ابوالقاسمی، ه. ۱۳۷۴. بررسی روش‌های هیدرولوژیکی برآورد بار معلق رودخانه‌ها. آب و توسعه. شماره ۱۰. ص ۶۷-۵۴.

Ang, A. H. S. and Tang, W. H. (1984). *Probability concepts in engineering planning and design. Vol.2, Decision, Risk and Reliability*, John Wiley, New York.

Brown, C. B. (1958). *Sediment transportation. Engineering Hydraulics*, H. E. Rouse, ed, Wiley, New York.

FAO. 1981. *Arid Zone Hydrology for Agricultural Development*

Hossenli, S. M. (2000). Statistical evaluation of the empirical equation that estimate hydraulic parameters flow through rockfill. *Stochastic Hydraulics 2000*, eds. Wang, Z. Y. and Hu, S. X. Balkema, Rotterdam.

Lian, Y., Chie Yen, B. (2003). Comparison of Risk Calculation Methods for a Culvert. *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, 129(2), pp. 140-152.

Lane, E. W. and Koelzer, V. A. (1943). Density of sediment deposited in reservoirs. A study of methods used in measurement and analysis of sediment load in streams, *Rep. No. 9*, Hydraulic Lab, Univ. of Iowa.

Miller, C. R. (1953). Determination of the unit weight of sediment for use in sediment volume computations. Bureau of reclamation, Denver.

Rui Zou; Wu-S Lung; and H Guo.(2002). Neural Network Embedded Monte Carlo Approach for Water Quality Modeling under Input Information Uncertainty. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 16, No. 2. pp. 135-142

Salas, J. D., and Hyun-Suk Shin (1999), Uncertainty Analysis of Reservoir Sedimentation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 125(4). pp. 339-350.

USBR. 1987. *Design of Small Dams*. Water Resource Technical Pub. Third Edd, App: A.

Yeh, K. C. and Deng, S. L. (1996). Uncertainty Analysis of Sediment Formulas, in *Stochastic Hydraulics*, 96, eds. Tickle et al.

Yeh, K. C. and Tung, Y. K., (1993). Uncertainty and Sensitivity Analysis of Pit-Migration Model, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.119, No.2.

- عدم قطعیت کلی حجم رسوب در روش مونت کارلو برابر با  $0.208$  است در حالیکه در روش هار این عدد به  $0.179$  کاهش می‌یابد.

- نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که حجم رسوب به  $a_1$  بیشترین حساسیت و به درصد رس کمترین حساسیت را دارد. پس از ضرایب رگرسیونی بیشترین حساسیت مربوط به دبی می‌باشد.

- اگر چه روش مونت کارلو روش کاملی بوده و علاوه بر عدم قطعیت کلی می‌تواند عدم قطعیت مربوط به هر پارامتر را نیز محاسبه نماید ولی به علت حجم زیاد محاسبات که اغلب محققین را وادار به برنامه نویسی می‌نماید، آنها تمایل دارند، روشهای دیگر را نیز امتحان کنند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش هار تفاوت چندانی با روش مونت کارلو نداشته و در موارد ضروری که فقط عدم قطعیت کلی مدنظر باشد می‌توان از روش هار که بسیار ساده‌تر بوده و به محاسبات کمتری نیاز دارد، استفاده نمود.

- نتایج این تحقیق می‌تواند به طراحان، جهت جلوگیری از شکست پروژه‌ها یا عدم استفاده از ضرایب اطمینان بالا کمک کرده و در نتیجه به بهینه کردن طرحها و پایین آوردن هزینه‌ها کمک شایانی نماید.

- نتایج به دست آمده از این تحقیق با روشهای هار و مونت کارلو تطابق خوبی را با نتایج به دست آمده توسط (salas 1999) با روشهای LHS و مونت کارلو نشان می‌دهد.

- روش‌شناسی و مجموعه نرم افزارهای مورد استفاده در این تحقیق، قابلیت مطلوبی را برای تحلیل‌های مورد نیاز این تحقیق نشان داد.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Analysis Uncertainty
- 2- Trap Efficiency
- 3- Mont Carlo Simulation
- 4- Har Point Method
- 5- Random
- 6- Residual Sum Of Squares

#### ۵- مراجع

سلیمانی، ع. ۱۳۸۲. آنالیز عدم قطعیت مدل‌های تجربی جریان در سد پاره سنگی و کاربرد آن در روند یابی سیل. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس. ۱۵۸ صفحه