

## Study on Geotechnical Properties of Sediment Deposited in Latian Dam Reservoir Using Field Measurements

OMID ASIAEI<sup>1</sup>, MOJTABA KARIMAEI TABARESTANI<sup>\*</sup>, ABOLFAZL SOLTANI<sup>1</sup>, MEGHDAD PAYAN<sup>2</sup>

1. Civil Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Lavizan, Tehran, Iran.

2. Geotechnic Engineering Department, Faculty of Technology, Gillan University, Rasht, Iran.

(Received: June. 28, 2021- Revised: Aug. 8, 2021- Accepted: Aug. 22, 2021)

### ABSTRACT

This study aims to investigate and analyze the results of geotechnical experiments on sediment samples taken from the Latian Dam reservoir in Tehran province. After the site visit, eight important stations were identified for surface sediment sampling, and on these sediments, common soil mechanics tests such as grain size analysis, determination of specific gravity, consolidation, compaction, and triaxial were performed to determine soil resistance and consolidation parameters. The present study results showed that by approaching the dam wall, soil water content increased by more than two times. This is due to the smaller size of the soil grains so that the percentage of clay and silt near the dam wall was more than 89%. According to the compaction test results and empirical equations, it was found that after 100 years of sediment deposition in the Latian dam reservoir, the dry density of the sediment will be equal to 1.128 g/cm<sup>3</sup>. In addition, from the triaxial test results, it was found that the cohesion and internal friction angle parameters of the sediments were equal to 0.51 kg/cm<sup>2</sup> and 26.1°, respectively.

**Keywords:** Latian Dam, Reservoir Sedimentation, Geotechnical Properties, Triaxial Test, Compaction Test.

---

\*Corresponding Author's Email: karimaei@sru.ac.ir

## بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی رسوبات ته‌نشین‌شده در مخزن سد لتیان با استفاده از اندازه‌گیری میدانی

امید آسیایی<sup>۱</sup>، مجتبی کریمائی طبرستانی<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل سلطانی<sup>۱</sup> و مقدار پاپان<sup>۲</sup>

۱. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، لویزان، تهران، ایران.

۲. گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۷ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۵/۱۷ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۵/۳۱)

### چکیده

هدف از این تحقیق بررسی و تحلیل نتایج حاصل از آزمایشات فیزیکی بر روی نمونه‌های رسوب برداشت شده از مخزن سد لتیان در استان تهران می‌باشد. پس از انجام عملیات پیمایش و بازدید از مخزن سد لتیان، ۸ نقطه مهم جهت برداشت نمونه سطحی تعیین شد و بر روی این رسوبات آزمایش‌های متداول مکانیک خاک شامل دانه‌بندی، وزن مخصوص و سه محوری جهت تعیین پارامترهای مقاومتی خاک و تحکیم انجام شد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که با نزدیک شدن از لبه‌های مخزن سد به سمت دیواره سد، درصد رطوبت خاک به میزان بیش از ۲ برابر افزایش می‌یابد. علت این موضوع ریزدانه‌تر شدن اندازه دانه‌های خاک است بطوریکه درصد رس و لای موجود در نزدیکی محور سد، بیش از ۸۹ درصد بوده است. با توجه به نتایج آزمایش تراکم و با استفاده از معادلات تجربی مشخص شد که بعد از گذشت ۱۰۰ سال از ته‌نشست رسوبات در مخزن سد لتیان، جرم مخصوص ظاهری خشک رسوبات برابر با ۱/۱۲۸ گرم بر سانتیمتر مکعب خواهد شد. همچنین، با توجه به نتایج آزمایشات سه محوری مشخص شد که مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در نهشته‌های مخزن (خاک) سد لتیان به ترتیب برابر با مقادیر ۰/۵۱ کیلوگرم بر سانتی مترمربع و  $26/1^\circ$  می‌باشد.

**واژه های کلیدی:** سد لتیان، رسوبگذاری مخزن، خصوصیات ژئوتکنیکی، آزمایش سه محوری، آزمایش تراکم.

### مقدمه

در ایران مسئله رسوبگذاری در مخزن سدها حائز اهمیت زیادی است زیرا حدود ۷۰٪ از منابع آب ایران را آب‌های سطحی تشکیل می‌دهند و عدم هماهنگی زمانی بین مقدار آبدهی حوضه-ها و میزان مصرف، باعث شده است که نیاز به مخازن ذخیره آب در اولویت مهم برنامه‌ریزی قرار گیرد. مطالعات آماری نشان می‌دهد که مخازن سدها در ایران سالانه ۱/۱۵ درصد از حجم اولیه ذخیره‌سازی خود را از دست می‌دهند. همچنین با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده از گزارش‌های مختلف به طور سالانه یک درصد از حجم کل ذخایر مخازن سدهای ایران یعنی حدود ۱۸۰ میلیون مترمکعب پر از رسوب می‌گردد (Ministry of Power, 2011). انباشت رسوبات در مخزن سدها علاوه بر کاهش پایداری سد و تاثیر نامطلوب بر عملکرد تاسیسات خروجی، دریچه‌ها و شیرهای تراز پایین، موجب تاثیرات نامطلوب زیست-محیطی در بالادست و پایین‌دست سد می‌شود. بنابراین، استفاده از روش‌های مدیریت رسوب جهت افزایش هرچه بیشتر عمر مخازن امری ضروری است و در این رابطه یکی از پیش‌نیازهای مهم، تعیین پارامترهای فیزیکی رسوبات مخزن است.

در شکل (۱) توزیع طولی رسوبگذاری در یک مخزن سد به عنوان مثال نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مخزن سد به سه بازه وجه بالایی، قله و پیشانی یا وجه پایینی تقسیم شده است. در بازه اول، دلتا با ترسیب مصالح درشت‌دانه تشکیل می‌شود. در این بازه با افزایش رقوم پیشانی یا نقطه عطف منحنی طولی رسوبگذاری، شیب به تدریج کاهش می‌یابد. انتهای این بازه آخرین مکانی است که مصالح درشت‌دانه مواد بستر تا آن فاصله منتقل می‌شوند. از این نقطه به بعد مصالح ریزدانه موجود در بستر بر روی شیب تند ایجاد شده در جبهه پایین‌دست دلتا حرکت می‌کنند ولی در فاصله کمی ترسیب می‌شوند. پس از آن بازه سومی است که عمدتاً مصالح بسیار ریز توسط جریان گل‌آلود به آن بازه منتقل می‌شوند. شیب این بازه به‌خصوص در نزدیکی‌های سد، به حالت افقی و یا حتی معکوس تبدیل می‌شود. در محل سد رسوبات ریزدانه تشکیل دریاچه گل‌آلود می‌دهند. علاوه بر مصالح بسیار ریز، مواد آلی که توسط آبزیان در درون مخزن تولید شده‌اند نیز در این مکان ترسیب می‌شوند. مطالعات میدانی بر روی فرآیندهای مختلف رسوب‌گذاری مخازن از سال ۱۹۳۶ شروع شد ولی بیشتر تحقیقات از سال‌های

می‌دهد که جریان‌های کدر در مخازن سدها به دلایل مختلفی ایجاد می‌شوند مانند: خرابی دامنه‌های مخازن و دلتاها، در شرایط سیل با غلظت رسوب معلق بالا، طوفان‌ها، وزش باد و موج‌هایی که رسوبات ریز را از سواحل کم عمق حرکت می‌دهند، ریزش مواد ریزدانه در حاشیه مخزن، یا پمپاژ و فعال بودن توربین‌ها در مخازن. ضمناً، تغییرات اقلیم و آب و هوا بر روی فرآیند رسوبگذاری مخازن موثر بوده و موجب افزایش نرخ رسوبگذاری می‌شود. (Juracek, 2015 and Yasarer and Sturm, 2016).

خصوصیات فیزیکی رسوبات همیشه مستغرق در مخزن سد دز با استفاده از روش‌های میدانی و تجربی توسط Samadi et al. (2012) and (2007) مطالعه شد. در این مطالعه که با استفاده از عملیات اندازه‌گیری میدانی در مخزن سد دز انجام شد، تعداد ۷۹ نمونه رسوب از ۱۲ مقطع واقع در بخش همیشه مستغرق مخزن برداشت شد و آزمایش‌های مختلف فیزیکی بر روی آنها انجام گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که روابط تجربی تعیین جرم مخصوص رسوبات سدها برای تخمین جرم مخصوص رسوبات مخزن سد دز به‌طور متوسط ۳۰ درصد خطا دارد که البته این خطا عمدتاً مربوط به خطای برآورد جرم مخصوص رسوبات ریزدانه مخزن است. سرانجام در این مطالعه، یک رابطه جدید برای محاسبه جرم مخصوص رسوبات پشت سد ارائه گردید. در تحقیق انجام شده توسط Bayat et al. (2016)، بررسی عدم قطعیت در برآورد حجم رسوب مخازن سدها با استفاده از روش آلفا-برش فازی صورت گرفت. در این تحقیق از داده‌های سد لتیان به عنوان مطالعه موردی استفاده شد. با توجه به اینکه در تخمین میزان رسوبگذاری و تجمع رسوبات در مخازن سدها، عدم قطعیت‌های زیادی در تخمین میزان دبی جریان، بار رسوب، اندازه ذرات و وزن مخصوص رسوبات، راندمان تله‌اندازی و نوع عملکرد مخزن وجود دارد، در نتیجه در این تحقیق جهت به کمیت درآوردن این عدم قطعیت‌ها از داده‌های ۴۶ ساله دبی جریان و بار رسوب ایستگاه‌های هیدرومتری منتهی به مخزن سد لتیان استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار دبی جریان سالانه نقش مهمی در میزان عدم قطعیت دارد و با افزایش دبی، عدم قطعیت افزایش می‌یابد. همچنین، عامل بار رسوب ورودی به مخزن، بیشترین و راندمان تله‌اندازی کمترین تاثیر را در به وجود آمدن عدم قطعیت در برآورد حجم رسوب مخزن دارند. در مطالعه انجام شده توسط Habibi et al. (2018) و Khastar et al. (2019) بررسی منشایابی رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد با استفاده از روش انگشت‌نگاری صورت گرفت. در این مطالعه جهت برآورد

۱۹۸۰ به بعد انجام شد (De Cesare and Lafitte, 2007). مطالعات Basson, (2009) نشان داده است که به‌صورت سالیانه بین ۰/۵ تا ۱ درصد از حجم مخازن سدهای دنیا به علت رسوبگذاری از بین می‌روند. این موضوع به این معناست که بدون انجام تمهیدات مقابله‌ایی ۲۵ درصد سدهای جهان طی ۲۵ تا ۵۰ سال آینده از دست خواهند رفت. مهم‌تر اینکه طبق مطالعات انجام شده توسط Sumi and Hirose (2009) و Schleiss and De Cesare (2010) حجم مخازن از دست رفته ناشی از رسوبگذاری، به مراتب بیشتر از میزان افزایش ظرفیت مخزن حاصل از ساخت و ساز سدهای جدید است. این بدین معناست که مخازن سدها به عنوان تاسیسات حیاتی در تامین آب بسیار ناپایدار بوده و انجام اقدامات ضروری جهت افزایش عمر مفید مخازن نیاز مبرم است. محققین مختلفی نظیر Imran et al. (2001) و Mulder and Alexander (2001) به این نتیجه رسیده‌اند که بخش مهمی از رسوبگذاری در مخازن ناشی از زمین‌لغزش‌های زیرآبی و روی آب در کناره‌های مخزن و در مجاورت دامنه‌های مخزن است. مطالعات انجام شده توسط Morris and Fan (1998) و Juracek (2015) مراحل و فرایندهای ژئومورفیک در طول عمر مخزن را نشان می‌دهد. در این مطالعات درجه‌بندی رسوب (دانه‌بندی) در ناحیه رسوب‌گذاری مخزن به وضوح نشان داده شده است. نتایج حاصل از پژوهش‌های Sundborg (1992) و Morgan (2009) و Bronstert et al. (2014) نشان می‌دهد که پوشش گیاهی عامل مهمی در کاهش تولید و انتقال رسوب در حوضه آبریز سد و همچنین مخزن سد هستند. رسوبات ریز توسط سطح گیاهان جذب می‌شوند و سیستم ریشه‌های آنها یک سد طبیعی در ناحیه فصل مشترک رسوب و آب ایجاد می‌کنند. به این ترتیب رشد گیاه موجب کاهش فرسایش کناره رودخانه و ریسک تولید جریان غلیظ رسوبی در مخزن سد و همچنین کاهش ریسک لغزش‌های کناره‌ای می‌شوند. بر طبق این نظریه مهمترین راهکار جهت کنترل رسوب، بیشینه نمودن پوشش گیاهی در سطح حوضه است. مطالعات مربوط به انتقال دلتای رسوب به سمت مخزن سد توسط Lai and Capart (2009) نشان داد که انتقال دلتای رسوبی می‌تواند با سرعت زیادی به داخل مخزن گسترش یابد. طبق نظر Simpson (1999) رسوباتی که توسط آشفنگی جریان در حالت تعلیق نگه داشته می‌شوند، همراه با آب، یک مخلوط دو فاز با چگالی بالاتر از آب، محیطی را به صورت جریان آشفته یا کدر<sup>۱</sup> ایجاد می‌کنند. در ارتباط با جریان‌های آشفته تحقیقات منتشر شده توسط Müller et al. (2014) نشان

تعیین پارامترهای فیزیکی رسوبات از جمله دانه‌بندی، جرم مخصوص و نسبت پوکی می‌باشد. سرویس حفاظت از منابع طبیعی آمریکا به جای یک عدد مشخص برای جرم مخصوص رسوبات در مخازن سدها، بازه‌ای مطابق جدول (۱) ارائه داده است.

جدول ۱- مقادیر جرم مخصوص ظاهری خشک رسوبات بر حسب [gr/cm<sup>3</sup>] (USDA, 1985)

نوع خاک	مغروق	خشک
رس	۰/۵۶ - ۰/۸۸	۱/۲ - ۰/۸۸
لای	۱/۲ - ۰/۸۸	۱/۳۶ - ۱/۲
مخلوط رس و لای (به میزان مساوی)	۱/۰۴ - ۰/۶۴	۱/۳۶ - ۱/۰۴
مخلوط ماسه و لای (به میزان مساوی)	۱/۵۲ - ۱/۲	۱/۷۶ - ۱/۵۲
مخلوط رس، لای و ماسه (به میزان مساوی)	۱/۲۸ - ۰/۸	۱/۶ - ۱/۲۸
ماسه	۱/۶ - ۱/۳۶	۱/۶ - ۱/۳۶
شن	۲ - ۱/۳۶	۲ - ۱/۳۶
مخلوط ماسه و شن	۲/۱ - ۱/۵۲	۲/۱ - ۱/۵۲

در مورد خصوصیات فیزیکی و مقاومتی رسوبات نیز باید گفت که با توجه به گذشت زمان رسوبات مخازن سدها متراکم‌تر شده و جرم مخصوص آنها افزایش می‌یابد لذا محققین دیگر سعی کرده‌اند تغییرات جرم مخصوص رسوبات را نسبت به زمان محاسبه کنند که از آن جمله می‌توان به رابطه (۱) ارائه شده توسط Lane and Koelzer (1943) به صورت زیر اشاره کرد:

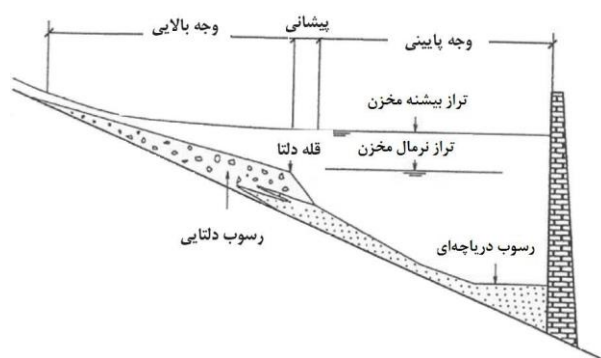
$$\rho_t = \rho_1 + \sum_{i=1}^3 \frac{(B_i \times P_i)}{100} \times \log t \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $\rho_1$  جرم مخصوص ظاهری رسوبات یک‌ساله است و توسط Lara and Pemberton (1963) محاسبه شد،  $B_i$  ضریب ثابتی است که بر حسب نوع رسوب تعیین می‌گردد،  $P_i$  درصد هریک از رسوبات در کلاسه‌های مختلف رس، سیلت و ماسه و در نهایت  $\rho_t$  جرم مخصوص ظاهری رسوبات پس از گذشت زمان  $t$  بر حسب سال است. همچنین Lara and Pemberton (1963) با آنالیز بیش از ۱۳۰۰ نمونه رسوب از مخازن سدها، روش تجربی زیر (رابطه ۲) را برای تعیین جرم مخصوص اولیه رسوب ارائه دادند:

$$\rho_1 = \rho_c P_c + \rho_M P_M + \rho_s P_s \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن  $\rho_1$  جرم مخصوص اولیه رسوبات ته نشین شده (در سال اول)،  $P_c$ ،  $P_M$  و  $P_s$  به ترتیب درصد ذرات رس، سیلت و ماسه و همچنین  $\rho_c$ ،  $\rho_M$  و  $\rho_s$  به ترتیب جرم مخصوص اولیه برای رسوبات رس، سیلت و ماسه که طبق جدول (۲) تعیین می‌شوند. برای محاسبه متوسط جرم مخصوص رسوبات ته نشین شده

درصد سهم سه زیرحوزه در رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد لاور فین در استان هرمزگان با استفاده از مدل ترکیبی چند متغیره استفاده شد. طبق نظر این محققین از نتایج مدلسازی انجام شده می‌توان در راستای جلوگیری از کاهش عمر مفید مخزن سد استفاده کرد. در تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده توسط فرآیند ته‌نشینی رسوبات معلق در مخزن سد کرخه مورد بررسی قرار گرفت. این محققین پس از نمونه‌برداری از رسوبات مخزن سد کرخه، آزمایش‌های ته‌نشینی در فلوم دایره‌ای آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد را با هدف تعیین شرایط هیدرولیکی مناسب به منظور رسوب شویی مخزن این سد انجام دادند. نتایج نشان داد که در غلظت‌های رسوب بیشتر، افزایش تنش برشی جریان در کاهش نرخ ته‌نشینی تاثیر بیشتری دارد. با توجه به اهمیت رسوبگذاری در مخزن سدها، در این تحقیق اقدام به مطالعه میدانی و آزمایشگاهی بر روی خصوصیات فیزیکی رسوبات نهشته‌شده در مخزن سد لتیان انجام شده است. پیش بینی می‌شود که نتایج حاصل از این تحقیق برای ذی‌نفعان مختلفی قابل استفاده باشد، از جمله ۱- شرکت آب منطقه‌ای تهران و بهره‌بردار سد لتیان جهت آشنایی با مشخصات رسوب ورودی به مخزن و استفاده از آن در فرآیندهایی نظیر رسوب‌شویی از مخزن، ۲- محققین مختلف جهت بررسی مسائلی نظیر پایداری سد در شرایط وجود رسوبات و بارهای حدی نظیر زلزله، و ۳- وزارت نیرو به عنوان مجری طرح در پروژه‌های کلان مدیریت سدهای کشور نظیر مطالعه مشخصات رسوب ورودی به مخازن سدهای کشور.



شکل ۱- نمایش توزیع طولی رسوب‌گذاری در مخزن سد (Randle & Bounry, 2017)

## مواد و روش‌ها

**خصوصیات فیزیکی رسوبات نهشته شده در مخزن سد**  
با توجه به اهمیت رسوبگذاری در مخازن سدها، استفاده از روش‌های مدیریت رسوب جهت افزایش هرچه بیشتر عمر مخازن امری ضروری است و در این رابطه یکی از پیش نیازهای مهم

بوده و ارتفاع آن از بستر رودخانه ۸۰ متر و از پی ۱۰۷ متر و طول تاج آن ۴۵۰ متر است. دریاچه سد لتیان دارای سطحی برابر با ۲۹۲/۸ هکتار در حداکثر رقوم سطح آب (۱۶۱۰ متر از سطح دریا) می‌باشد که ۲۴۸ هکتار آن در بخش جاجرود و مابقی در شاخه لوارک برآورد شده است. سطح حوضه آبریز آن ۷۰۰ کیلومتر مربع و میزان بارندگی متوسط سالانه ۷۱۱/۵ میلی‌متر است. در شکل (۲) نمایی از بالادست سد لتیان در آذرماه ۱۳۹۹ ارائه شده است. حجم مخزن سد لتیان ۹۵ میلیون متر مکعب و ظرفیت مفید آن بین ارتفاعات ۱۵۶۲ تا ۱۶۱۰ از سطح دریا، ۸۵ میلیون مترمکعب است. میزان آب قابل تنظیم آن سالیانه ۲۴۵ میلیون متر مکعب است که علاوه بر تولید برق در تامین آب شرب تهران و آب زراعی دشت ورامین اهمیت بسزایی دارد. متوسط جریان سالیانه ثبت شده بر اساس آمار ۱۹ ساله (۱۳۴۴-۱۳۲۶)، ۳۱۰ میلیون متر مکعب معادل با دبی ۹/۸۳ متر مکعب بر ثانیه است. براساس آمار ۳۵ ساله (۱۳۷۰-۱۳۳۵) حجم متوسط آب‌دهی سالانه رودخانه ۲۹۰/۸ میلیون متر مکعب معادل دبی جریان برابر ۹/۲۲ متر مکعب بر ثانیه برآورد شده است. دو سرریز این سد به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که بتوانند سیلاب‌هایی با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله را از خود عبور دهند. تونل سرریز اصلی ۱۱۰۰ متر مکعب در ثانیه و سرریز دریاچه اضطراری ۶۵۰ متر مکعب در ثانیه آب را تخلیه می‌کنند.

مخزن سد لتیان به دلیل شرایط توپوگرافی، شکل، طول و شیب دریاچه و همچنین نداشتن سیستم تخلیه رسوب متناسب با حجم دریاچه و میزان رسوبات ورودی و نیز پیشروی سریع پیشانی دلتا به سمت دیواره سد و بالاخره اهمیت این سد در تأمین آب آشامیدنی شهر تهران، شرایط ویژه‌ای را به‌وجود آورده است که اهمیت و ضرورت مطالعه و شناخت وضعیت فعلی و تعیین روند رسوبگذاری در آینده را دو چندان می‌کند. اولین عمق‌یابی مخزن سد لتیان در سال ۱۳۵۰ یعنی ۴ سال پس از بهره‌برداری انجام گرفت که ۳/۹ میلیون متر مکعب از ظرفیت کل مخزن نسبت به سال بهره‌برداری کاسته شده بود این نشان‌دهنده افت سالیانه ۱/۰۲ درصد از حجم کل مخزن می‌باشد. در شکل (۳) تغییرات حجم رسوب ورودی به مخزن سد لتیان با گذشت زمان از بهره‌برداری سد بر حسب سال نشان داده شده است. با توجه به این شکل با گذشت ۲۸ سال از بهره‌برداری سد، سالیانه حدود ۱ درصد از حجم مفید مخزن سد لتیان به علت انباشته شدن رسوبات کاسته می‌شود (Behrangi et al., 2008; Ministry of Power, 2011).

پس از گذشت زمان  $t$  (سال)، Miller (1953) رابطه تجربی زیر (رابطه ۳) را ارائه داد:

$$\rho_t = \rho_1 + 0.4343 \times \left( \sum_{i=1}^3 \frac{B_i \times P_i}{100} \right) \times \left( \frac{t}{t-1} (\ln t) - 1 \right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

نظر به اینکه با گذشت زمان، رسوبات مخزن دچار تراکم و یا تحکیم می‌شوند، لذا جرم مخصوص خشک رسوبات افزایش می‌یابد و با استفاده از روابط حجمی و وزنی طبق رابطه ۴ بشرح زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن  $\gamma_d$  وزن مخصوص خشک رسوب،  $\gamma$  وزن مخصوص ظاهری خاک و  $\omega$  درصد رطوبت است. توضیح اینکه جرم مخصوص ظاهری خشک رسوبات برای رس، سیلت و ماسه در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲- مقادیر ضریب برای رابطه (۲) در شرایط مختلف بهره‌برداری بر حسب  $[\text{gr}/\text{cm}^3]$  (Lara & Pemberton, 1963)

$\rho_s$	$\rho_M$	$\rho_c$	شرایط بهره‌برداری
۱/۱۵۴	۱/۱۲	۰/۴۱۶	به طور پیوسته مغروق
۱/۱۵۴	۱/۱۴	۰/۵۶۱	افت دوره ای آب در مخزن
۱/۱۵۴	۱/۱۵	۰/۶۴۱	مخزن به طور معمول خالی است
۱/۱۵۴	۱/۱۷	۰/۹۶۱	رسوب کف رودخانه

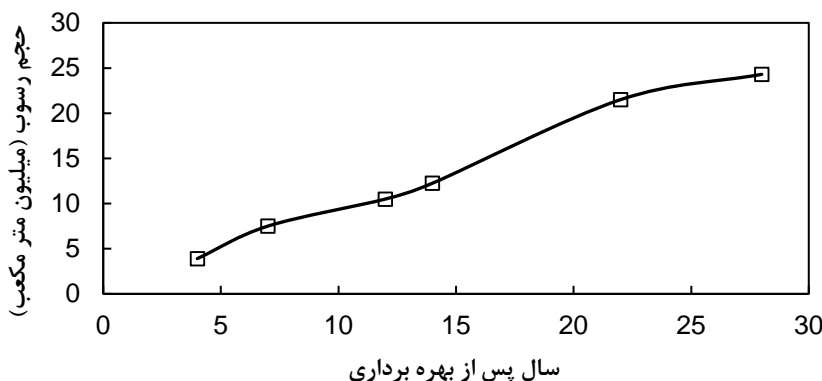
در مورد غلظت رسوبات در فرآیند تهنشینی و تحکیم نسبت به زمان می‌توان گفت تغییرات به صورت تابع لگاریتمی بیان خواهد شد و همین موضوع در مورد پارامترهای تحکیم نظیر نفوذ پذیری و نسبت پوکی و تنش موثر برقرار است و نشان می‌دهد نسبت به زمان متغیر می‌باشند و نیاز به ارائه روابطی برای پارامترهای مورد آزمایش با متغیر زمان برای سد مورد مطالعه می‌باشد. رفتار رسوبات چسبنده به دلیل خاصیت فلوکوله شدن آن‌ها بسیار پیچیده است و کارهای تحقیقاتی زیادی جهت شناخت و تبیین رفتار این نوع رسوب انجام می‌شود (Samadi et al., 2007 and 2012).

#### معرفی مطالعه موردی

سد لتیان در ۳۵ کیلومتری شمال شرقی تهران در پایین‌دست محل تقاطع رودخانه‌های جاجرود و لوارک در محل لتیان احداث گردیده و بهره‌برداری از آن در سال ۱۳۴۶ آغاز شده است. این سد یکی از اصلی‌ترین منابع تامین‌کننده آب شرب شهر تهران به شمار می‌رود. سد لتیان از نوع بتنی پایه‌دار (پشت بند دار)



شکل ۲- نمایی از بالادست دیواره سد لتیان در آذر ماه ۱۳۹۹



شکل ۳ - تغییرات حجم رسوب ورودی به مخزن سد لتیان با گذشت زمان از بهره برداری سد بر حسب سال (Behrangi et al., 2008; Ministry of Power, 2011)

که دارای جریان راکد تا خیلی آرام و مصالح بستر ریزدانه هستند مانند مخزن سد، متداول است (Management and Planning Organization, 2006). در شکل (۵) تصویری از روند برداشت نمونه‌ها ارائه شده است. کمترین عمق آب مخزن با مقداری در حدود ۱ متر، مربوط به ایستگاه P4 بود و بیشترین عمق آب مخزن مربوط به ایستگاه P6 در نزدیکی تاج سد و برابر با ۵۰ متر بود. جدول ۳ مشخصات آزمایشات انجام شده در تحقیق حاضر بر روی نمونه‌ها به همراه استاندارد مربوطه و همچنین شماره ایستگاه برداشت رسوب جهت انجام آزمایشات ارائه شده است. برای حفظ رطوبت نمونه‌ها از کیسه‌های پلاستیکی ضخیم استفاده شد و نمونه‌های برداشت شده حداقل به میزان ۲۰ کیلوگرم رسوب در نظر گرفته شد. انتخاب نمونه‌ها جهت انجام آزمایش‌ها نیز با توجه به عواملی نظیر روند تغییرات پارامتر مربوطه و مدت زمان لازم جهت انجام آزمایش بوده است. بر این اساس، آزمایش تعیین

#### نمونه برداری (برداشت رسوب)

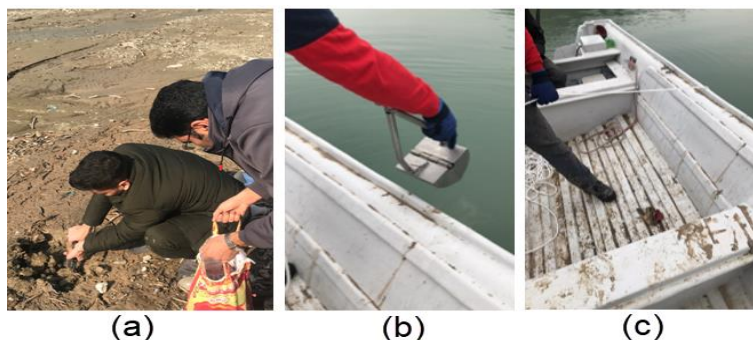
در تحقیق حاضر، با توجه به پراکندگی رسوبات، اقدام به برداشت نمونه‌های رسوب در ۸ ایستگاه مختلف از مخزن سد لتیان با استفاده از تجهیزات خاص نمونه برداری صورت گرفت. موقعیت این ۸ ایستگاه با توجه به شرایط توپوگرافی منطقه و محل اتصال رودخانه‌های اصلی به مخزن سد انتخاب گردید که در شکل (۴) نشان داده شده است. برداشت نمونه‌ها به صورت سطحی انجام گرفت. در مناطقی از بالادست مخزن شامل ایستگاه‌های P1 و P7 با توجه به نبود آب، با وسایل ساده شامل بیلچه و کمچه برداشت رسوبات انجام شد. در مناطق دیگر از یک شناور و همچنین دستگاه نمونه گیر چنگکی<sup>۱</sup> جهت برداشت رسوبات استفاده شد. این نمونه گیر از دو فک جدا تشکیل شده است که ابعاد آن ۲۰×۳۰×۶۰ سانتی متر و وزن آن ۵/۵ کیلوگرم است. استفاده از این نمونه گیر جهت دریافت نمونه‌های دست خورده از محل‌هایی

به علت ریزدانه بودن آزمایش هیدرومتری انجام شد. جهت انجام آزمایش‌های تراکم و تک محوری از نمونه‌های نزدیک به محور سد یعنی ایستگاه‌های P3، P5 و P6 استفاده شد. در نهایت آزمایشات تحکیم و سه محوری به علت زمان طولانی‌تر انجام آزمایش و تحلیل نتایج از نمونه مربوط به نزدیکترین ایستگاه به محل محور سد استفاده شد.

درصد رطوبت بر روی همه نمونه‌ها انجام گرفت. آزمایش تعیین حدود اتربرگ بر روی همه نمونه‌ها به غیر از نمونه مربوط به ایستگاه P7 که ریزدانه نبود، انجام گرفت. در آزمایش تعیین  $G_s$  خاک نیز به علت تغییرات ناچیز این پارامتر در نقاط مختلف مخزن بر روی نمونه‌های ایستگاه‌های P1 و P4 انجام نگرفت. آزمایش دانه‌بندی با الک تنها بر روی نمونه ایستگاه P7 که بیشتر مصالح از نوع درشت‌دانه ماسه‌ای بود انجام گرفت و در بقیه مناطق



شکل ۴- تصویر ماهواره‌ای از مخزن سد لتیان و مختصات جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری شده.



شکل ۵- نمایی از روش برداشت نمونه‌ها از مخزن سد لتیان. (الف) برداشت با بیلچه (ایستگاه P1) و برداشت با نمونه‌گیر چنگکی (Grab) در ایستگاه P6 (شکل‌های ب و ج).

جدول ۳- مشخصات آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌های این تحقیق

ردیف	نام آزمایش	استاندارد آزمایش	شماره ایستگاه‌های رسوب
۱	درصد رطوبت	ASTM D2216-71	همه ایستگاه‌ها
۲	حدود اتربرگ	ASTM D423-66 و ASTM D424-59	همه ایستگاه‌ها به غیر از P7
۳	تعیین $G_s$	ASTM C128-79	همه ایستگاه‌ها به غیر از P1 و P4
۴	دانه‌بندی	ASTM D422-87	P7
۵	هیدرومتری	ASTM D422-63	P1 و P4 و P5 و P6
۶	تراکم	ASTM D698-70	P3، P5 و P6
۷	تک محوری	ASTM D2166	P3، P5 و P6
۸	تحکیم	ASTM D2435	P6
۹	سه محوری	ASTM D476	P6

### تعیین درصد رطوبت خاک

نتایج آزمایش تعیین درصد رطوبت بر روی نمونه‌های برداشت شده که در جدول (۴) ارائه شده است، نشان می‌دهد که محدوده

### نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از آزمایشات به اختصار ارائه شده و مورد تحلیل و تفسیر قرار می‌گیرند.

(در محل محور سد) به تدریج درصد رطوبت موجود در خاک از ۳۸/۶۸ درصد با ۸۳/۲۵ درصد (بیش از ۲ برابر) افزایش دارد که این موضوع می‌تواند به علت ریزدانه‌تر شدن ساختار خاک باشد.

تغییرات درصد رطوبت خاک‌های برداشت شده در مخزن سد لتیان مابین ۳۷ درصد تا ۱۳۴ درصد با مقدار میانگین ۸۵/۵ درصد می‌باشد. نکته مهم اینکه در مسیر ورودی شاخه لوارک به مخزن سد لتیان شامل ایستگاه‌های P1 سپس P3 و در نهایت P6

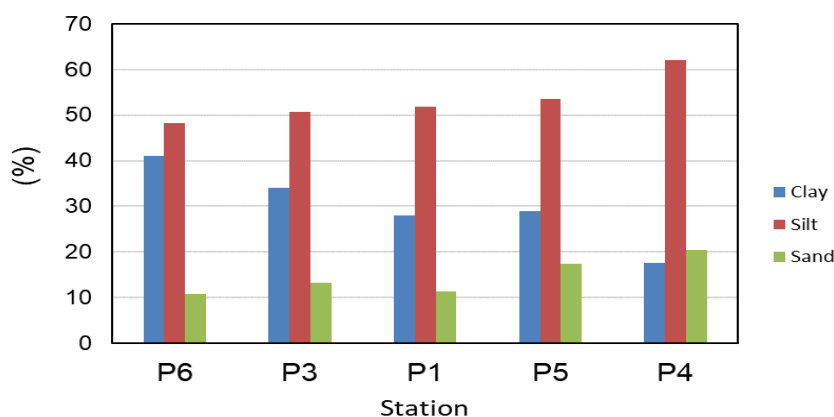
جدول ۴- نتایج آزمایش تعیین درصد رطوبت خاک در ایستگاه‌های مختلف از مخزن سد لتیان

ایستگاه	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
درصد رطوبت (ω%)	۳۸/۶۸	۱۳۳/۳۵	۶۱/۰۸	۱۱۸/۵۳	۶۷/۲۱	۸۳/۲۵	۳۷/۱۳	۶۹/۵۰

کاهش اندازه ذرات خاک (کاسته شدن از میزان ماسه و افزایش میزان رس) با نزدیک شدن به موقعیت محور سد است. این نتیجه‌گیری با توجه به مکانیزم انتقال رسوب در مخازن سدها، منطقی می‌باشد. نتایج مشابهی توسط Samadi et al., (2007) and (2012) برای رسوبات مستغرق سد دز بدست آمده است. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که رسوبات مخزن سد دز در بازه ۲۵ کیلومتری بالادست بدنه سد به طور متوسط متشکل از ۳۶ درصد رس، ۵۷ درصد لای، ۶ درصد ماسه و ۱ درصد شن می‌باشد که در تطابق نزدیک به داده‌های بدست آمده در تحقیق حاضر است. براساس نتایج بدست آمده در این دو ایستگاه و همچنین ایستگاه P3، تغییرات درصد ماسه، لای و رس را برای ایستگاه‌های مختلف رسوب برداشت شده در شکل (۶) نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که با نزدیک شدن به محور سد (حرکت از ایستگاه‌های P1 و بعد P3 و در نهایت P6 و یا حرکت از ایستگاه‌های P4 و بعد P5 و در نهایت P6) میزان درصد ماسه و سیلت کاهش و درصد رس افزایش می‌یابد. بنابراین، رسوبگذاری روند نرمال را نشان می‌دهد.

### آزمایشات دانه‌بندی و هیدرومتری

بررسی نمونه‌های برداشت شده از مخزن سد نشان داد که تنها در ایستگاه P7 بخش اصلی خاک برداشت شده درشت‌دانه بوده و قابلیت انجام آزمایش دانه‌بندی با الک را دارد و بقیه نمونه‌ها رسوبات ریزدانه بوده که نیاز به انجام آزمایش هیدرومتری جهت دانه‌بندی دارند. بررسی این منحنی دانه‌بندی نشان می‌دهد که اندازه متوسط دانه‌های خاک  $D_{50}=0.19$  mm است. نام این خاک بر اساس طبقه‌بندی متحد از نوع SP-SM است. دانه‌بندی نقاط دیگر با توجه به این که بسیار به یکدیگر نزدیک بودند فقط در چهار ایستگاه انجام شد (جدول ۳). با توجه به اینکه در این نقاط مقدار عبوری از الک ۲۰۰ بالاتر از ۵۰ درصد وزنی بود در نتیجه این خاک‌ها از نوع ریزدانه بوده و به آزمایش هیدرومتری برای تعیین اندازه ذرات نیاز بود. نتایج نشان داد که خاک موجود در موقعیت ایستگاه P1 دارای ۱۳/۲ درصد ماسه، ۵۰/۸ درصد لای و ۳۴ درصد رس (۸۶/۸ درصد عبوری از الک ۲۰۰) بود که با رسیدن به موقعیت ایستگاه P6 نزدیک به محور سد، میزان ماسه به ۱۰/۷ درصد، لای به ۴۸/۳ درصد و رس به ۴۱ درصد (۸۹/۳) درصد عبوری از الک ۲۰۰ رسید که این موضوع نشان دهنده



شکل ۶- دامنه تغییرات درصد ذرات و نوع رسوب در ایستگاه‌های مختلف سد لتیان

گرفت چرا که خاک در این ایستگاه دارای درصد کمی ریزدانه می‌باشد. نتایج نشان داد که تغییرات حد روانی برابر با  $LL=31.4\sim 50.4$  و مقدار میانگین آن برابر با ۳۹/۳ است. همچنین

### آزمایشات تعیین حدود آتربرگ

در تحقیق حاضر آزمایش تعیین حدود آتربرگ بر روی نمونه‌های خاک برداشت شده از تمامی ایستگاه‌ها به غیر از ایستگاه P7 انجام



تشکیل شده، ذخیره می‌گردد. با قرار گرفتن لایه‌های جدید رسوب بر روی رسوبات قبلی و ایجاد فشار اضافی، پل‌های ایجاد شده از بین رفته و باعث فشردگی بیشتر ذرات می‌گردد. چون لایه رسوبی جدید بصورت لایه غیرقابل نفوذ عمل کرده و اجازه فرار آب‌های منفذی لایه پایین را در جهت عمودی نمی‌دهد. از طرفی نفوذپذیری بسیار کم ذرات رس هم کمک می‌کند تا آب منفذی با سرعت خارج نشود. از این رو عمل تراکم ممکن است زمان بسیار زیادی طول بکشد. در اثر تراکم، وزن مخصوص رسوبات لایه‌های پایین بیشتر از لایه‌های بالایی است. توزیع طولی وزن مخصوص در مخزن به این صورت است که در محل دلنا مقدار آن زیاد و با نزدیک شدن به سمت سد مقدار آن کاهش می‌یابد. به‌طور کلی دو حالت در تراکم‌پذیری رسوب حائز اهمیت است. حالت اول وزن مخصوص متراکم شده رسوب در انتهای دوره زمانی و حالت دوم متوسط وزن مخصوص متراکم شده در طول دوره زمانی. برای حالت اول از نتایج بدست آمده در آزمایشگاه و برای حالت دوم می‌توان روابط ۱ و ۳ را به کار برد. در تحقیق حاضر رسوبات ۳ ایستگاه شامل P3، P5 و P6 جهت انجام آزمایش تراکم استفاده شدند. در این آزمایش پس از تعیین وزن مخصوص ظاهری خاک ( $\gamma$ ) و سنجش میزان رطوبت خاک ( $\omega$ %)، وزن مخصوص خشک خاک ( $\gamma_d$ ) با استفاده از رابطه ۴ تعیین شد. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش تراکم، در شکل ۷ تغییرات جرم مخصوص خشک نمونه خاک نسبت به درصد رطوبت نمونه خاک نشان داده شده است.

با توجه به منحنی‌های تراکم (شکل ۷)، مقدار رطوبت بهینه ( $\omega_{opt}$ ) و همچنین وزن مخصوص خشک ماکزیمم ( $\gamma_{dmax}$ ) در جدول ۵ نشان داده شده است. با این روش میتوان وزن مخصوص رسوبات در مخزن سد لتیان را که به مقدار نهایی برسد، بدست آورد. علاوه بر این درصد اشباع نمونه‌ها نیز در شرایط بهینه در این جدول ارائه شده است. نتایج نشان داد که وزن مخصوص خشک ماکزیمم به‌دست آمده بر روی نمونه‌های مختلف تقریباً نزدیک به هم بوده و مقدار متوسط آن در حدود ۱/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب است.

جدول ۵- نتایج آزمایش تراکم در شرایط تراکم بهینه

ایستگاه	P6	P5	P3
$\omega_{opt}$ (%)	۲۴/۸	۲۱/۵	۱۸/۷
$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	۱/۵۶۶	۱/۵۸	۱/۶۰۰۵

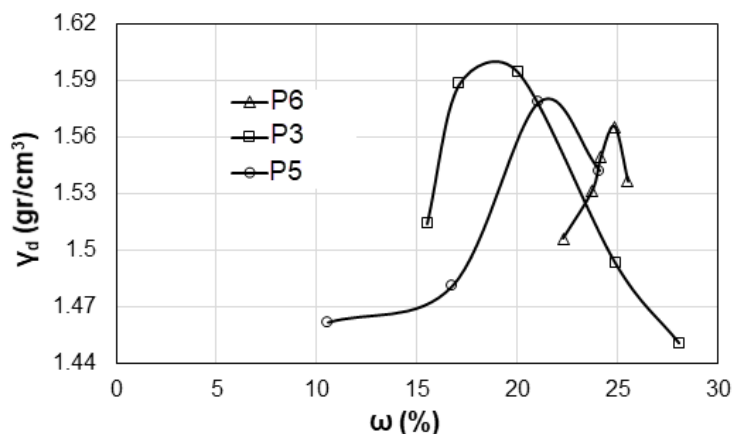
محدوده تغییرات حد خمیری بصورت  $PL = 24.2 - 34.6$  و مقدار میانگین آن برابر با ۲۹/۵ است. برطبق این اطلاعات، میانگین نشانه خمیری (PI) رسوبات که به صورت اختلاف حد روانی و حد خمیری تعریف می‌شود، و پارامتر مهمی برای بررسی رفتار پلاستیک خاک است در مخزن سد لتیان برابر با ۹/۸ است. بیشترین حد روانی و نشانه خمیری مربوط به خاک موجود در ایستگاه P6 می‌باشد که نزدیکترین فاصله را از محور سد دارد و کمترین مقادیر مربوط به ایستگاه P1 و P8 در ورودی مخزن می‌باشند. با توجه به این نتایج می‌توان گفت که با نزدیک شدن به دیواره سد حد روانی، حد خمیری و ایندکس خمیری بیشتر می‌شود که این روند با افزایش مقدار رس در رسوبات رابطه مستقیم دارد. بطور کلی، مقایسه مقادیر حدود اتربرگ بدست آمده برای رسوبات سد لتیان با رسوبات نهشته شده در مخزن سد دز (Samadi et al., 2007 and 2012) نشان می‌دهد که با توجه به اینکه میانگین این مقادیر در سد دز برابر با  $LL = 35$  و  $PL = 15$  هستند، در نتیجه رسوبات سد لتیان از حد روانی و خمیری بیشتری برخوردارند اما نشانه خمیری کمتری دارند.

#### آزمایش تعیین چگالی ویژه رسوبات

آزمایش تعیین چگالی ویژه رسوبات  $G_s$  بر روی رسوبات ایستگاه‌های مختلف انجام گرفت و نتایج نشان داد که محدوده تغییرات پارامتر ( $G_s$ ) کم و مابین ۲/۵۷ تا ۲/۷۱ و مقدار متوسط آن برابر با ۲/۶۵ است. همچنین مقدار این پارامتر در رسوبات نزدیک به بدنه سد برابر با ۲/۷۱ است. این مقدار بسیار نزدیک به رسوبات نهشته شده در پشت سد دز با مقدار  $G_s = 2.69$  (Samadi et al., 2007 and 2012) است.

#### آزمایش تراکم

پدیده تراکم رسوبات در کف مخزن سد، پدیده زمانبر است. رسوبات به مرور زمان در اثر وزن خودشان و یا وزن ناشی از رسوب‌گذاری‌های جدید متراکم‌تر می‌شوند. از آن‌جا که خلل و فرج ذرات درشت‌دانه به اندازه کافی بزرگ می‌باشد که آب منفذی به راحتی خارج گردد، عمل تراکم در این رسوبات به وجود نمی‌آید و وزن مخصوص رسوبات درشت‌دانه نسبت به زمان تغییر نمی‌کند. بلعکس ذرات لای و رس در ابتدای ترسیب به صورت رقیق ترسیب شده و ذرات همانند پل بین ذرات دیگر قرار گرفته که در نتیجه حجم زیادی از آب در درون خلل و فرج کوچک

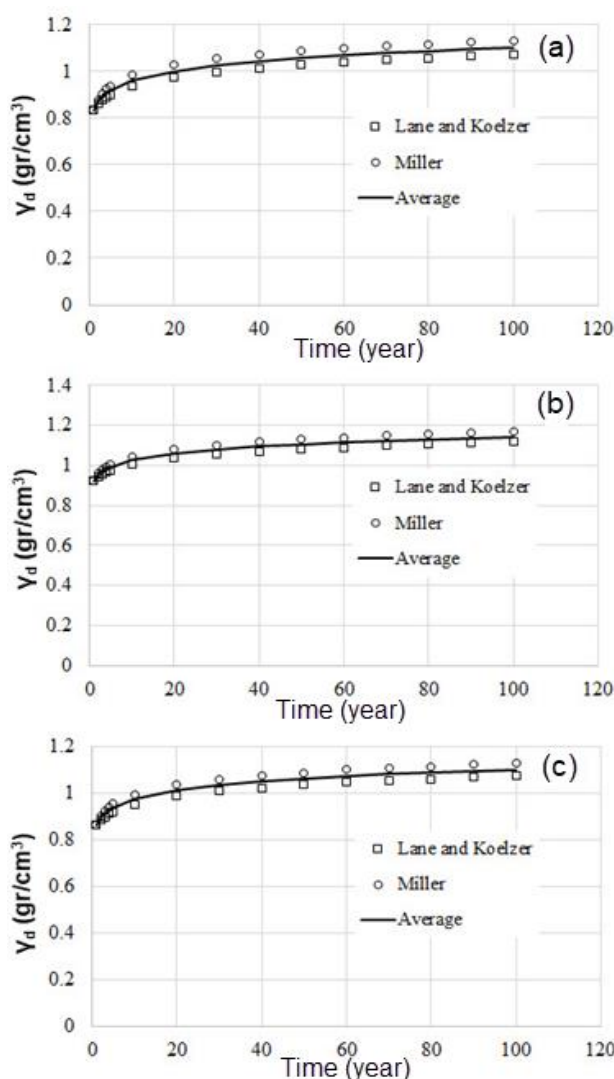


شکل ۷- منحنی میزان تراکم آزمایشگاهی رسوبات سد لتیان

نهایی (ماکزیمم حاصل از آزمایش تراکم) می‌توان تغییرات زمانی وزن مخصوص رسوبات در این بازه را محاسبه نمود. همچنین جهت تعیین وزن مخصوص اولیه رسوبات با توجه به نتایج آزمایش دانه‌بندی از رابطه (۲) استفاده شد. بر این اساس، تغییرات زمانی جرم مخصوص خشک رسوبات مخزن در ۳ ایستگاه P3، P5 و P6 در شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده جرم مخصوص ظاهری خشک رسوبات در سال اول ته‌نشینی در ایستگاه‌های P3، P5 و P6 به ترتیب برابر با ۰/۸۶۲، ۰/۹۲۱ و ۰/۸۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. علت مقدار کمتر جرم مخصوص ایستگاه P6 به علت وجود مقدار بیشتر ریزدانه در محل این ایستگاه در نزدیکی بدنه سد است. همچنین نتایج بدست آمده از طریق رابطه ۱ اندکی بیشتر از رابطه ۳ است. در نهایت نتایج نشان داد که بعد از گذشت ۱۰۰ سال از ته‌نشینی رسوبات در مخزن سد لتیان، جرم مخصوص ظاهری خشک رسوبات با توجه به رابطه ۱ برای ایستگاه‌های P3، P5 و P6 به ترتیب برابر با ۱/۱۲۸، ۱/۱۶۶ و ۱/۱۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب خواهد شد. همچنین، در شکل (۸) متوسط تغییرات جرم مخصوص رسوبات با توجه به دو رابطه ۱ (Lane and Koelzer, 1943) و رابطه ۳ (Miller, 1953) نیز در ایستگاه‌های مختلف با خط پر نشان داده شده است.

#### آزمایش مقاومت تک‌محوری

آزمایش مقاومت تک‌محوری جهت تعیین مقاومت برشی زهکشی‌نشده و مدول الاستیسیته رسوبات سد لتیان بر روی ۵ نمونه خاک از هر ایستگاه، در شرایط تراکم ۱۰۰٪ بدون فرصت دادن جهت ایجاد پدیده‌ی تیکسوتروپی در نمونه‌ها، انجام شد. در مجموع ۱۵ آزمایش در شرایط اشباع انجام شد و میانگین این مقادیر در رطوبت بهینه و شرایط تراکم ۱۰۰٪ به عنوان نتایج نهایی، گزارش گردید. شکل (۹) نحوه‌ی گسیختگی تعدادی از نمونه‌ها را پس از پایان آزمایش تک‌محوری نشان می‌دهد. در

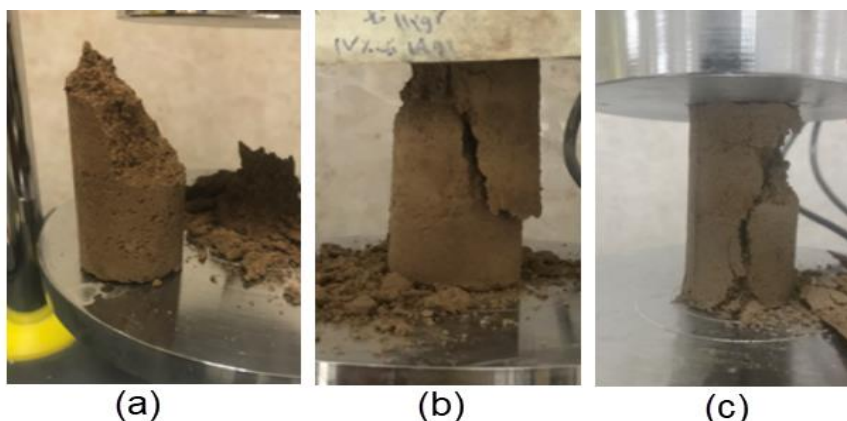


شکل ۸- برآورد تغییرات زمانی وزن مخصوص خشک رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد لتیان برای ایستگاه‌های P3 (a)، P5 (b) و P6 (c) تا سن ۱۰۰ سال.

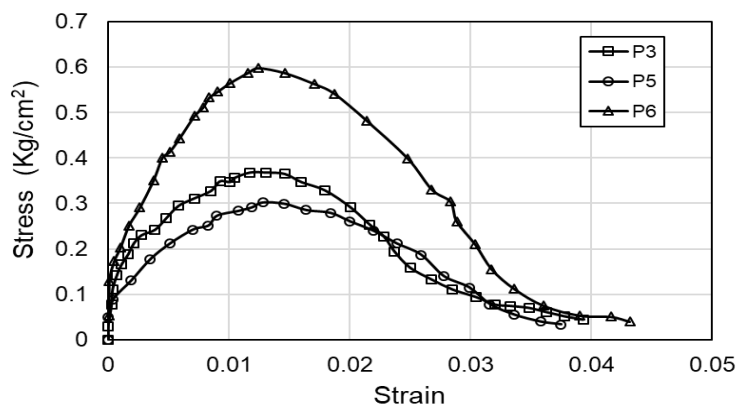
به‌منظور ارزیابی تغییرات زمانی وزن مخصوص رسوبات در مخزن سد لتیان از روابط تجربی (روابط ۱ و ۳) استفاده می‌شود. با توجه به وزن مخصوص اولیه رسوبات و همچنین وزن مخصوص

افزایش فاصله از دیواره‌ی سد بطور منظم کاهش می‌یابد. آزمایش تراکم تک محوری نشان داد که رابطه‌ی مستقیمی بین نشانه خمیری خاک با مقاومت محصور نشده آن وجود دارد. برای اثبات این ادعا، روند افزایشی تغییرات نشانه خمیری خاک نسبت به مقاومت محصور نشده آن در شکل ۱(۱) نشان داده شده است، بطوریکه با حرکت از ایستگاه P5 به سمت ایستگاه P6 نشانه خمیری خاک به میزان ۲/۷ برابر و مقاومت تراکم تک محوری (زهکشی نشده) آن به میزان ۲ برابر افزایش می‌یابد.

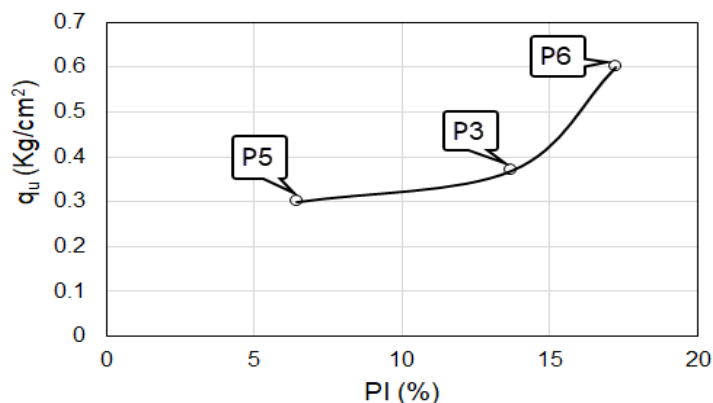
شکل ۱۰ منحنی تغییرات تنش-کرنش برای تمامی نمونه‌های مورد آزمایش ترسیم شده است. با توجه به شکل (۱۰) مقاومت تراکم تک محوری نمونه‌های خاک در ایستگاه‌های P3، P5 و P6 به ترتیب برابر با ۰/۳۷، ۰/۳ و ۰/۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشند. بیشترین مقاومت تراکم تک محوری در نمونه‌های ایستگاه P6 دیده می‌شود که بدلیل بالابودن درصد ریزدانه و مقدار رس در آن بوده است. علت تفاوت در مقاومت رسوبات ایستگاه P6 نزدیک بودن موقعیت نمونه برداری به دیواره سد است. این نمونه‌ها دارای بیشترین مقدار نشانه خمیری بوده و این مقدار با



شکل ۹- نحوه‌ی گسیختگی تعدادی از نمونه‌ها پس از پایان آزمایش تعیین مقاومت تراکم تک محوری محصور نشده: (a) نمونه از ایستگاه P6، (b) نمونه از ایستگاه P5 و (c) نمونه از ایستگاه P3



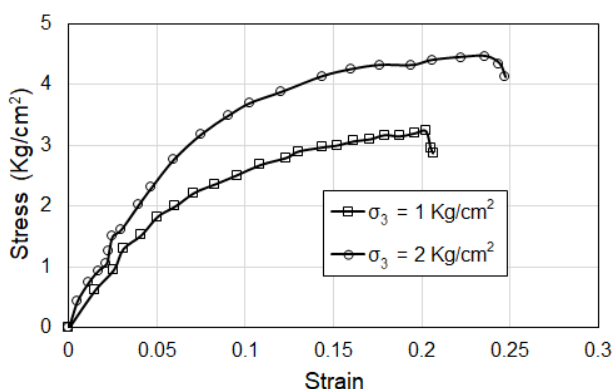
شکل ۱۰- منحنی تغییرات تنش - کرنش برای نمونه‌های سد لتیان در ایستگاه‌های P3 و P5، P6



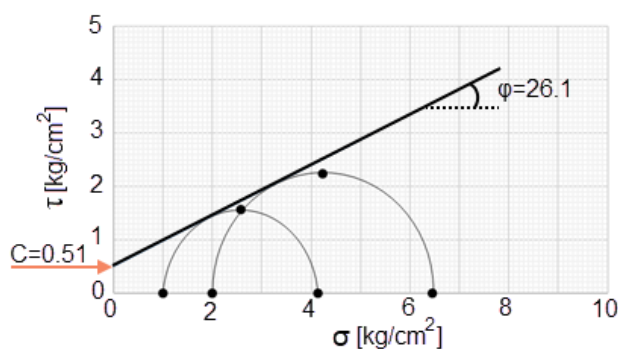
شکل ۱۱- روند افزایشی تغییرات نشانه خمیری خاک نسبت به مقاومت محصور نشده آن در نمونه‌های سد لتیان

### آزمایش مقاومت سه محوری

مدیریت مخزن سد استفاده نمود. یکی از این موارد، تحقیق بر روی پاسخ استاتیکی و دینامیکی سد در شرایط وجود رسوبات در مخزن سد است. در واقع اینرسی رسوب در مخزن سد بر رفتار استاتیکی و دینامیکی سد موثر است و قدم اول این بررسی، شناخت رسوبات است که در این تحقیق حاصل شد. مورد دیگر امل نحوه عملکرد دریاچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی و مدیریت تخلیه روب از مخزن است که رابطه مستقیمی با جرم‌مخصوص رسوبات مخزن دارد که یکی از موارد بررسی در تحقیق حاضر است. مورد بعدی مدیریت حوضه آبخیز به عنوان تامین‌کننده رسوبات نهشته شده در مخزن سد است. با توجه به خصوصیات رسوبات می‌توان به منشأ اصلی تامین آن‌ها در حوضه رسید و اقدام به مدیریت رسوب در حوضه برای جلوگیری از ورود رسوبات به مخزن نمود. در نهایت لازم است اشاره شود که استفاده از این رسوبات جهت فعالیت‌های عمرانی نیز نیازمند مطالعات بیشتر بر روی خصوصیات شیمیایی رسوبات، نحوه برداشت و هزینه تمام شده می‌باشد.



شکل ۱۲- تغییرات فشار انحرافی بر حسب کرنش نمونه در شرایط فشارهای همه جانبه مختلف



شکل ۱۳- نمودار تنش برشی-تنش محوری (دایره موهر) در لحظه گسیختگی جهت تعیین پارامترهای برشی

### نتیجه‌گیری

جهت انجام تحقیق حاضر که شامل بررسی خصوصیات شیمیایی

آزمایش سه محوری استاتیکی تحکیم‌یافته زهکشی‌نشده<sup>۱</sup> بر روی نمونه رسوب برداشت شده از نزدیک دیواره سد لتیان (ایستگاه P6)، با تعیین مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ذرات رسوب این سد در بحرانی‌ترین نقطه مخزن آن که به دریچه تحتانی نزدیک می‌باشد، در شرایط تراکم ۱۰۰ درصدی و چگالی خشک  $\gamma_d = 1.56 \text{ gr/cm}^3$  انجام شد. در دو آزمایش سه محوری انجام شده، یکبار فشار همه‌جانبه (تحکیمی)  $\sigma_3$  برابر با  $1 \text{ kg/cm}^2$  و بار دیگر برابر با  $2 \text{ kg/cm}^2$  در نظر گرفته شد. طی این دو آزمایش، مقدار ضریب فشار آب منفذی<sup>۲</sup> (نسبت تغییرات فشار آب منفذی به تغییرات تنش همه‌جانبه) به ترتیب برابر با  $0.97$  و  $0.9$  بدست آمد که این مقادیر نشان‌دهنده شرایط اشباع کامل در نمونه‌ها است.

در شکل (۱۲) تغییرات تنش انحرافی<sup>۳</sup> بر حسب کرنش نمونه در شرایط فشارهای همه‌جانبه مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل (۹) می‌توان گفت که در شرایط فشار همه‌جانبه‌ی برابر با  $\sigma_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$  گسیختگی نمونه در تنش انحرافی برابر با  $\sigma_1 - \sigma_3 = 3.2 \text{ kg/cm}^2$  و کرنش  $0.21$  رخ می‌دهد در حالیکه با افزایش فشار همه‌جانبه‌ی اعمالی به مقدار  $\sigma_3 = 2 \text{ kg/cm}^2$  گسیختگی نمونه در تنش انحرافی برابر با  $\sigma_1 - \sigma_3 = 4.5 \text{ kg/cm}^2$  و کرنش  $0.24$  رخ می‌دهد. پس از گسیختگی، تنش انحرافی کمی به صورت نامتعادل کاهش یافت که نشان‌دهنده متلاشی شدن نمونه در محفظه نمونه می‌باشد. در ادامه، با توجه به شیب منحنی تنش-کرنش، مقدار مدول الاستیسته اولیه ( $E_0$ ) به ترتیب در فشارهای همه‌جانبه  $\sigma_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$  و  $\sigma_3 = 2 \text{ kg/cm}^2$  برابر با  $E_0 = 4 \text{ MPa}$  و  $E_0 = 4.6 \text{ MPa}$  محاسبه شد. در نهایت با ترسیم نمودار تغییرات تنش برشی بر حسب تنش محوری یا دایره‌ی موهر (شکل ۱۳) برای آزمایش سه محوری، مقادیر پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه خاک با توجه به حاکم بودن شرایط تنش کل (آزمایش نوع CU)، به ترتیب برابر با  $0.51$  کیلوگرم بر سانتی-مترمربع (عرض از مبدا خط مماس) و  $26.1$  درجه (شیب خط مماس) محاسبه شدند.

بر اساس نتایج حاصل از این آزمایش و آزمایشات دیگر، شناخت مناسبی از لایه رسوبات نهشته شده در مخزن سد لتیان حاصل شد که می‌توان از آن در پروژه‌های آبی بهره‌برداری و

شده از نزدیکی محور سد نشان داد که مقدار مقاومت تک‌محوری در این منطقه بیشتر از بقیه نقاط بوده و برابر با ۰/۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشند که علت آن وجود درصد ریزدانه و رس بیشتر است. در نهایت نتایج آزمایش سه محوری استاتیکی CU (تحکیم‌یافته زهکشی‌نشده) بر روی نمونه رسوب برداشت شده‌ی نزدیک به دیواره سد (ایستگاه P6) نشان داد که مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک برابر با مقدار ۰/۵۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و  $26/1^\circ$  می‌باشد. از نتایج تحقیق حاضر با توجه به شناسایی شرایط فیزیکی و مقاومتی رسوبات ته‌نشین‌شده در مخزن سد لتیان می‌توان در بررسی رفتار بدنه سد و سازه‌های جنبی مانند پاسخ استاتیکی و به خصوص دینامیکی سازه در شرایط حضور رسوب استفاده نمود.

### سپاس‌گزاری

این مقاله، حاصل مطالعات و پژوهش‌های مربوط به پروژه تحقیقاتی است که تحت حمایت مالی گروه تحقیقات شرکت آب منطقه‌ای تهران طبق قرارداد شماره ۱۱۱/۶۶۷۸/ص ۰۸/۹۸ مورخ ۱۳۹۸/۹/۵ با کد ۱۷۰۱۶۵-۱۳۸۱۲ با نویسندگان اول و دوم منعقد و به اتمام رسیده است. نویسندگان این مقاله از همکاری‌های ارزشمند شرکت آب منطقه‌ای تهران، کمال تشکر را دارند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

### REFERENCES

- Basson, G.R. (2009). Management of siltation in existing and new reservoirs. General Report Q. 89. Proc. of the 23rd Congress of the Int. Commission on Large Dams CIGBICOLD (vol. 2).
- Bayat M., Qaderi K. And Ahmadi M. (2016). Uncertainty analysis of reservoir sedimentation using fuzzy  $\alpha$ -cut (Case study: Latian Dam). *Journal of Dam and Hydropower Plant*. 3(10), 1 - 11.
- 175 / 5000
- Behrangi, F., Bani Hashemi, M., Pourbojarian, A. And Rahmanian, M. (2008). Investigation of sedimentation process in Latian dam reservoir using hydrographic results. 7<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference, Tehran. (In Farsi)
- Bronstert, A., de Araújo, J.-C., Batalla, R. J., Costa, A. C., Delgado, J. M., Francke, T. and Vericat, D. (2014). Process based modelling of erosion, sediment transport and reservoir siltation in mesoscale semi-arid catchments. *Journal of Soils and Sediments*. 14(12), 2001–2018.
- De Cesare, G., and Lafitte, R. (2007). Outline of the historical development regarding reservoir sedimentation. 32<sup>nd</sup> IAHR Congress, Venice.
- Habibi S., Gholami H. And Fathabadi A. (2018). Source fingerprinting of sediment deposited in the dam reservoir: a case of Lavar dam watershed, Fin, Hormozgan province. *Environmental Erosion Research*. 8: 3 (31), 1-15.
- Imran, J., Parker, G., Locat, J., and Lee, H. (2001). 1D numerical model of muddy subaqueous and subaerial debris flows. *Journal of Hydraulic Engineering*. 127(11), 959–968.
- Juracek, K.E. (2015). The aging of America's reservoirs: Inreservoir and downstream physical changes and habitat implications. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 51(1), 168–184.
- Khastar M., Samadi Boroujeni H., Fattahi R., Ghasemi M., Naghshbandi A. And Heydari M. (2019). Laboratory study of the sedimentation process of suspended sediments in the reservoir of Karkheh Dam. *Amirkabir Civil engineering Journal*. 51 (2), 327-339. (In Farsi)
- Lai, S.Y., and Capart, H. (2009). Reservoir infill by hyperpycnal deltas over bedrock. *Geophysical Research Letters*, 36(8).
- Lane, E.W., and Koelzer, V.A., (1943). Density of Sediments Deposited in Reservoirs. Report No. 9. In A Study of Methods Used in Measurement and

- Analysis of Sediment Loads in Streams. Hydraulic Lab, U of Iowa.
- Lara, J.M., and Pemberton, E.L., (1963). Initial Unit Weight of Deposited Sediments. pp. 818-845. Proc. Federal Interagency Sedimentation Conf., USDA-ARS Misc. Publ. 970.
- Management and Planning Organization (2006). Field Operations Guide for Sample Rivers and Reservoirs. Code No. 349, Ministry of Energy. (In Farsi)
- Miller, C.R., (1953). Determination of the Unit Weight of Sediment for Use in Sediment Volume Computations. U.S. Bureau of Reclamation, Denver.
- Ministry of Power. (2011). Guide to sedimentation and descaling studies of dam reservoirs. Office of Engineering and Technical Standards of Water and ABFA. Technical Guide No. 589.
- Mulder, T., and Alexander, J. (2001). The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*. 48(2), 269-299.
- Morris, G.L. and Fan, J. (1998). Reservoir sedimentation handbook. New York: McGraw-Hill.
- Morgan, R. (2009). Soil erosion and conservation. Oxford: John Wiley.
- Müller, M., De Cesare, G., and Schleiss, A.J. (2014). Continuous long-term observation of suspended sediment transport between two pumped-storage reservoirs. *Journal of Hydraulic Engineering*. 140(5), 05014003.
- Randle, T.J. and Bountry, J.A. (2017). Sediment analysis guidelines for dam removal. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation for the Federal Advisory Committee on Water Information, Subcommittee on Sedimentation, Denver, CO.
- Samadi, H., Fathi Moghadam, M. and Zolfi, A. (2012). Survey physical properties of the always submerged sediments in Dez dam reservoir using the field data and the empirical methods application. *Irrigation Science and Engineering*. 36 (1) 57-62. (In Farsi)
- Samadi, H., Shafaei Bajestan, M. And Fathi Moghaddam, M. (2007). Study on sedimentation process and consolidation of cohesive sediment of Dez dam reservoir. *Agricultural Science and Technology and Natural Resources*. 40 (a), 1-11. (In Farsi)
- Schleiss, A.J., and De Cesare, G. (2010). "Physical model experiments on reservoir sedimentation", *IAHR Hyrolink*, 4, 54-57.
- Simpson, J. E. (1999). "Gravity currents: In the environment and the laboratory", Cambridge: Cambridge University Press.
- Sumi, T., and Hirose, T. (2009). "Accumulation of sediment in reservoirs", Water storage, transport and distribution (pp. 224-252). Paris, France: UNESCO-IHE and EOLSS Publishers Co. Ltd.
- Sundborg, A. (1992). "Lake and reservoir sedimentation prediction and interpretation", *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*, pp. 93-100.
- Yasarer, L.M., and Sturm, B.S. (2016). Potential impacts of climate change on reservoir services and management approaches. *Lake and Reservoir Management*. 32(1), 13-26.
- United States Department of Agriculture (USDA), Soil Conservation Service (1985). National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation, Chapter 8, Sediment-Storage Design Criteria.