بررسی فرایند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده مخزن سد دز

حسین صمدی بروجنی[۱]، محمود شفاعی بجستان[۲] و منوچهر فتحی مقدم[۲]

چکیده

رسوب گذاری و متعاقب آن تحکیم رسوبات چسبنده در مخازن سدها بخصوص در نزدیک ساختگاه سد، مشکلات متعددی را به‌وجود می‌آورد که ممکن است منجر به گرفتگی دریچه‌های تحتانی و یا ورود رسوبات به درون آبگیر نیروگاه گردد. خروج این رسوبات با روش آبشوئی تنها زمانی موفق خواهد بود که با توجه به پارامترهای فیزیکی- مکانیکی رسوبات چسبنده تحکیم یافته، شرایط هیدرولیکی مناسب ایجاد گردد. هر چند تحقیقات بسیار گسترده‌ای در خصوص توزیع رسوب در مخازن سدها انجام شده است ولی مطالعات در رابطه با رسوبات چسبنده و چگونگی تغییرات پارامترهای فیزیکی- مکانیکی این رسوبات نسبت به زمان، بسیار اندک می‌باشد. از این رو در این تحقیق با استفاده از مدل فیزیکی استوانه‌ای شکل به ارتفاع ۳/۸ متر، قطر ۳۰ سانتی‌متر، نمونه‌های خاک چسبنده تحت شرایط رسوب گذاری و سپس تحکیم قرار گرفته و پارامترهایی چون وزن مخصوص ظاهری خاک، نسبت پوکی و پارامترهای تحکیم اندازه‌گیری گردیدند. با توجه به اهمیت سد دز و پیش بینی این‌که تا پنج سال آینده رسوبات چسبنده وارد نیروگاه می‌شوند، نمونه‌های رسوبی تهیه شده از مخزن سد دز مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که تغییرات غلظت رسوب در فرایند ته نشینی و تحکیم نسبت به زمان به صورت تابع لگاریتمی با چهار مرحله کاملاً مجزا می‌باشد. هم‌چنین در این تحقیق روابط تنش مؤثر- ضریب نفوذپذیری- نسبت پوکی به صورت روابط نمائی استخراج گردید که از این روابط می‌توان در مدل‌های ریاضی پیش بینی تحکیم رسوبات چسبنده در سدهای مخزنی استفاده کرد. نتایج این مطالعه با مطالعات محققین دیگر نیز مقایسه و نشان داد که روابط به‌دست آمده از این تحقیق مورد تأیید است.

واژه‌های کلیدی: رسوب‌گذاری، مدل فیزیکی، پارامترهای تحکیم، تنش مؤثر

مقدمه

ارزیابی و بررسی روند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده در مخازن سدها و سواحل یکی از موضوعات و مسائل مهم است که در طرح‌های مختلف رسوب‌زدائی و کنترل رسوب، از جمله پروژه‌های لایروبی و عملیات رسوبشوئی هیدرولیکی سدها نقش مؤثری دارد.

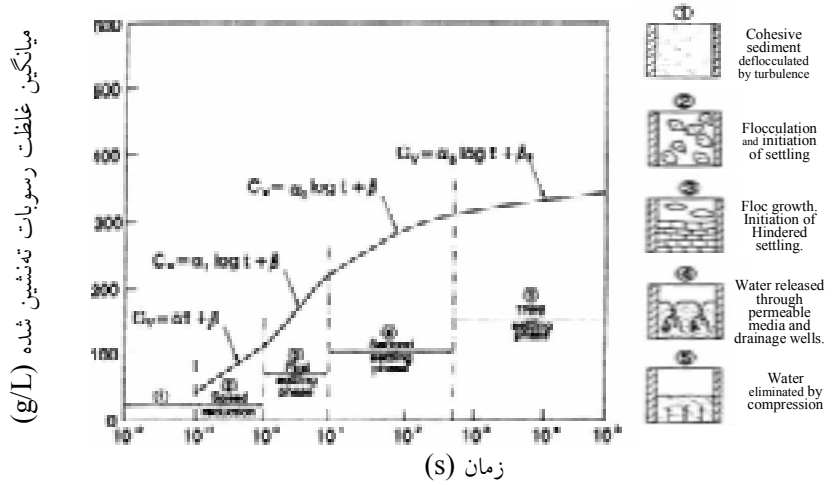
بیشتر رسوبات ریزدانه دارای خاصیت چسبندگی می‌باشد. معمولاً کانی‌های رسی (با اندازه کمتر از ۲ میکرون) دارای چنین خاصیتی بوده و این خاصیت موجب می‌شود که در حالت معلق به همدیگر چسبیده و تشکیل فلوکول‌هایی دهند که

۱. دانشجوی سابق دکتری مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز و در حال حاضر استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲. به ترتیب استاد و استادیار آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

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

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.1.6]



شکل ۱. مراحل ته نشینی و تراکم رسوبات چسبنده درسیال ساکن(۷)

خصوصیات فیزیکی – شیمیایی متفاوتی با دانه‌های رسوبی مجزا دارند (۷).

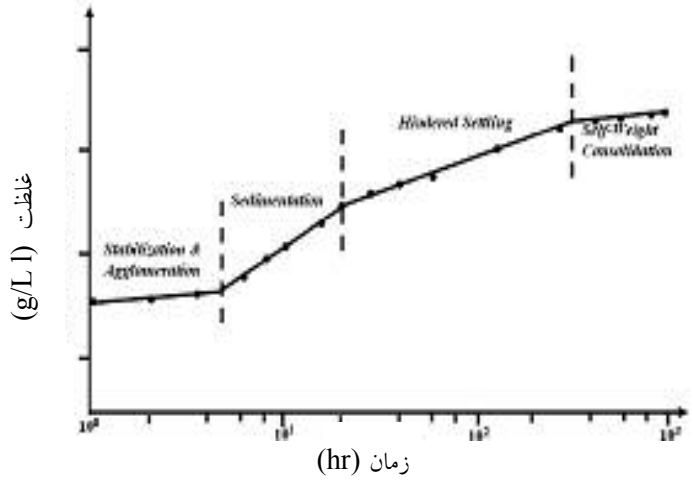
رفتار رسوبات چسبنده به‌دلیل خاصیت فلوکوله شدن آنها، بسیار پیچیده است و کارهای تحقیقاتی زیادی جهت شناخت و تبیین رفتار این نوع رسوب انجام می‌شود (۴). با این حال هنوز بسیاری از رفتارهای رسوبات چسبنده در پرده ابهام قرار دارد و قوانین محکمی برای تبیین و تفسیر رفتار آنها در دسترس نمی‌باشد (۷). با پیدایش و ساخت دستگاه‌های دقیق اندازه‌گیری لیزری ، نوری و سونیک ، امکان انجام تحقیقات دقیق تر و قابل اعتمادتر به‌وجود آمده است (۵). با این حال باتوجه به این‌که تحکیم رسوبات چسبنده نسبت به زمان به شدت متغیر بوده و خصوصیات مکانیکی آن با گذشت زمان تغییر می‌کند، لذا شبیه‌سازی باید به‌گونه‌ای انجام شود که بتوان براساس آن وضعیت تراکم و وزن مخصوص رسوبات را در زمان‌های مختلف تعیین نمود. این امر در مخازن سدها که مرتباً ارتفاع رسوبات به دلیل رسوب‌گذاری رو به افزایش است، با پیچیدگی بیشتری همراه است (۱۴). به منظور رسیدن به این هدف، لازم است جنبه‌های تئوری فرآیند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده، به دقت مورد توجه قرار گیرد و با تلفیق نتایج اندازه‌گیری‌های صحرایی و آزمایشگاهی با مدل‌های ریاضی شبیه سازی، پیش بینی‌های نسبتاً دقیق در خصوص وضعیت فیزیکی و مکانیکی رسوبات در حین فرایند ته نشینی و تحکیم به‌دست آورد. در کشور ما نیز به‌دلیل وجود سدهای مخزنی متعدد با نرخ رسوب‌گذاری بالا، این موضوع می‌بایست مورد توجه خاص قرار گیرد. هرچند نگارنده در این زمینه هیچ مطالعه موردی در سطح کشور مشاهده ننموده است.

در مخازن سدها، پدیده رسوب‌گذاری به‌گونه‌ای انجام می‌گیرد که رسوبات درشت دانه در قسمت‌های بالایی مخزن و در ناحیه‌ای موسوم به دلتای سد ته نشین می‌گردد و هر چه به بدنه سد نزدیک‌تر می‌شویم رسوبات ریزدانه تر می‌شوند. از طرف دیگر وقوع پدیده جریان غلیظ در مواقع سیلابی موجب می‌گردد رسوبات ریزدانه به‌صورت یک لایه جریان غلیظ در بستر مخزن حرکت کرده تا این‌که به بدنه سد برسد. با رسیدن این جریان رسوبی به نزدیکی بدنه سد که معمولاً از جنس رسوبات چسبنده هستند و در صورتی‌که دریچه‌های تحتانی جهت تخلیه این جریانات باز نباشند، عمل ته نشینی و تحکیم رسوبات اتفاق افتاده و با گذشت زمان خواص فیزیکی–مکانیکی رسوبات تغییر می‌کند (۱۴).

میگنویت (به نقل از ۷) با انجام بررسی رفتار ته نشینی و تراکم رسوبات چسبنده، پنج مرحله مجزا تعریف نمود و نشان داد تراکم رسوبات چسبنده با لگاریتم زمان رابطه مستقیم دارد (شکل ۱). در مرحله اول سیال و رسوب کاملاً با هم مخلوط

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

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.1.6]



شکل۲. مراحل چهارگانه ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده پیشنهادی بلوم کوئیست و تاون سند (۳)

شده‌اند و رسوبات کاملاً به‌صورت معلق هستند و در این مرحله فرایند ته نشینی آغاز می‌شود. در مرحله دوم که ممکن است حدود چند ثانیه طول بکشد ، اولین ذرات رسوبی به فاز ته‌نشینی نزدیک می‌شوند. در مرحله سوم بخشی از رسوبات فلوکوله شده ، ته نشین می‌شود و دو فاز مجزا به‌وجود می‌آید. در این مرحله ممکن است غلظت رسوبات تا ۲۰۰ گرم بر لیتر برسد. در مرحله چهارم یک مرز مشخص بین فاز سیال و جامد به‌وجود می‌آید و پس از آن می‌توان روند تحکیم و نشست رسوبات را با زمان ثبت نمود. در این مرحله به تدریج آب‌های محبوس شده از لابه لای فلوکول‌ها خارج شده و بخشی از فلوک‌ها به واسطه نیروی وزن لایه‌های بالایی در هم شکسته و عمل تحکیم آغاز می‌شود. غلظت رسوبات ممکن است در این مرحله به ۳۰۰ گرم بر لیتر برسد. در مرحله پنجم آب منفذی به دلیل تراکم بیش از حد قادر به تخلیه سریع از لابه لای رسوبات نبوده و روند تحکیم در این مرحله کند می‌شود و در صورتی‌که آزمایش برای مدت طولانی ادامه داشته باشد، عمل تحکیم با روند کندتر صورت می‌گیرد و به آن تحکیم ثانویه نیز می‌گویند.

بلوم کوئیست و تاون سند (۲) معتقد بودند فرایند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده می‌تواند در چهار فاز تحت عناوین فاز استقرار ایستا (Stabilization Agglomeration)، فاز رسوب‌گذاری (Sedimentation)، فاز ته نشینی به تأخیر افتاده (Hindered settling) و فاز تحکیم تحت وزن خود رسوبات (Self-weight consolidation) تقسیم بندی شود (شکل۲).

به منظور شناخت پدیده ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده، علاوه بر روند نشست رسوبات لازم است پارامترهای تحکیم نیز مورد توجه قرار گیرد. از جمله مهم‌ترین پارامترهای تحکیم می‌توان به نفوذپذیری و تراکم پذیری اشاره کرد. تراکم پذیری همان نسبت پوکی رسوبات بر حسب تنش مؤثر می‌باشد و نفوذپذیری معمولاً بر حسب نسبت پوکی رسوبات به‌صورت رابطه نمائی بیان می‌شود (۶ و ۱۰). این پارامترها برای مدلسازی ریاضی ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده مورد استفاده می‌باشند (۱۱).

محققین مختلف بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و اندازه‌گیری روابط تجربی زیادی را برای بیان پارامترهای تحکیم ارائه نموده‌اند. کری یر و برام ویل (۳) بر مبنای آزمایش‌های ته نشینی و تحکیم رس فسفاتیک فلوریدا در یک مخزن به عمق ۶ متر روابط زیر را به‌دست آورد:

$$k = ۴\times۱۰^{-۶} e^{۴/۱۱} \qquad [۱]$$

$$e = ۲۹/۴۳\sigma'^{-۰/۲۹} \qquad [۲]$$

کریزک و ساموگی (۶) با انجام آزمایش‌های ته نشینی و تحکیم رسوبات لایروبی شده در مخزنی به عمق ۴ متر روابطی را برای

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

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.1.6]

پارامترهای تحکیم در دوحالت، یکی نمونه رسی با ۹۰٪ و دیگری با ۳۰٪ آب منفذی به شرح زیر به‌دست آورد.

برای حالت رسوب با ۹۰٪ آب منفذی:

$$k = ۱/۶۸\times۱۰^{-۴}e^{۳/۰۲} \quad [۳]$$

$$e = ۱۱/۵۱\sigma'^{-۰/۳۱۲} \quad [۴]$$

برای حالت رسوب با ۳۰٪ آب منفذی:

$$k = ۸/۹\times۱۰^{-۴}e^{۳/۵} \quad [۵]$$

$$e = ۷\sigma'^{-۰/۲۹} \quad [۶]$$

ساموگی و دیگران (۱۰) نیز با انجام آزمایش‌های ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده در یک مخزن مکعب مستطیل به عمق ۱۰ متر، روابط زیر را برای پارامترهای تحکیم به‌دست آورد:

$$k = ۴\times۱۰^{-۶}e^{۴/۱} \quad [۷]$$

$$e = ۲۸/۳۳\sigma'^{-۰/۳} \quad [۸]$$

در روابط فوق k: نفوذپذیری بر حسب فوت بر روز و σ': تنش مؤثر بر حسب پوند بر فوت مربع و e نسبت پوکی می‌باشد.

با توجه به اهداف تحقیق که شناخت هر چه بیشتر فرایند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده مخزن سد دز بوده است، سعی شده در این مقاله نتایج آزمایش‌های انجام شده در مدل فیزیکی استوانه ته نشینی و تحکیم به نحو مطلوب ارائه شود و با تجزیه و تحلیل مناسب، وضعیت فیزیکی و مکانیکی رسوبات مورد مطالعه (از نظر وزن مخصوص ظاهری رسوبات، نسبت پوکی و پارامترهای تحکیم) مورد بررسی قرار گیرد و روند تغییرات این پارامترها نسبت به زمان تعیین گردد.

مواد و روش‌ها

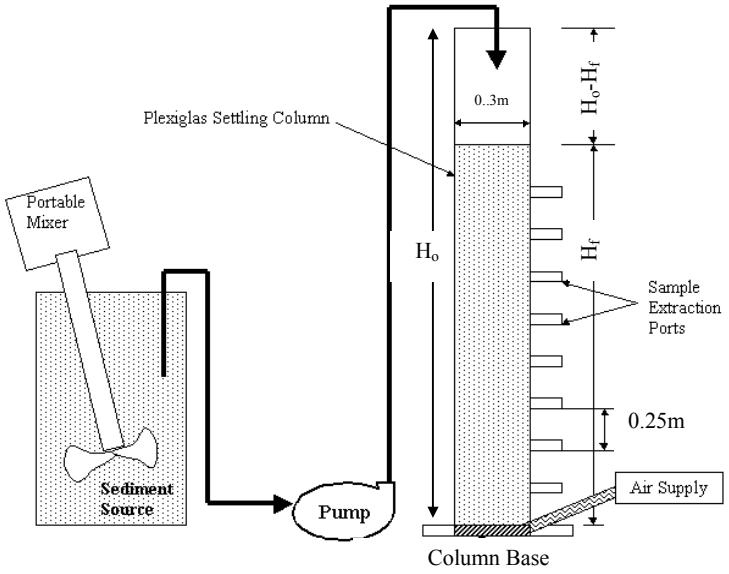
یکی از روش‌های متداول بررسی فرایند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده، استفاده از مدل‌های فیزیکی و انجام آزمایش‌های مربوطه می‌باشد.کارهای آزمایشگاهی انجام شده توسط محققین مختلف جهت تعیین روند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده، عمدتاً با استفاده از سیلندر استوانه‌ای حاوی مخلوط آب و رسوب بوده است (۶، ۸، ۹ و۱۲). در صورتی‌که ارتفاع ستون مخلوط آب و رسوب در ابتدای آزمایش H_i و غلظت آن C_i در نظر گرفته شود، پس از مدتی یک مرز مشخص بین دو فاز رسوب و سیال تشکیل می‌شود که ارتفاع رسوبات ته نشین شده H_f و ارتفاع سیال بالای آن $H_i - H_f$ خواهد بود. با گذشت زمان و خروج آب‌های منفذی، عمل تحکیم رخ داده و به تدریج H_f کاهش می‌یابد. این کاهش معمولاً با لگاریتم زمان تناسب خطی داشته و به نحوه تشکیل فلوکول‌ها بستگی دارد و نحوه تشکیل فلوک‌ها نیز به خواص فیزیکوشیمیایی آب و رسوب و میزان چسبندگی رسوبات وابسته است (۹). محققین مختلف جهت ارزیابی و بررسی روند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده، از پارامترهای مختلف نظیر تنش مؤثر، نفوذپذیری، تراکم پذیری، غلظت، وزن مخصوص ظاهری، نسبت تخلخل، نسبت پوکی و ... استفاده نموده‌اند که این پارامترها در حین آزمایش‌ها با استفاده از روش‌ها و تجهیزات مختلف اندازه‌گیری یا تعیین شده‌اند (۱۳).

مدل فیزیکی

مدل فیزیکی مورد استفاده در این تحقیق در محل آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز مستقر بوده و همان‌گونه که در شکل۳ دیده می‌شود شامل سه قسمت اصلی سیلندر ته‌نشینی و تحکیم (با قطر داخلی ۳۰ سانتی‌متر، ارتفاع کلی ۳۸۰ سانتی‌متر و از جنس پلاکسی گلاس)، سیستم تأمین رسوب (با مخزن ۴۰۰ لیتری مجهز به یک همزن برقی و یک پمپ مستغرق با دبی ۴ لیتر بر ثانیه) و تابلوی پیزومتری (به ارتفاع ۴ متر و عرض ۱/۵ متر جهت نگه‌داری ۳۵ عدد لوله شفاف پیزومتر) می‌باشد. ضمناً روی جدار سیلندر، شیرهای نمونه‌گیر به فواصل ۲۵ سانتی‌متر و خروجی‌های پیزومتر جهت اندازه‌گیری فشار آب منفذی به فواصل ۱۰ سانتی‌متر تعبیه شده است. در داخل خروجی‌های پیزومتر از نوعی فیلتر پارچه‌ای مخصوص استفاده گردید تا در زمان شروع آزمایش‌ها رسوبات وارد لوله پیزومتر نگردد.

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

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.1.6]



شکل۳. نمای کلی مدل فیزیکی ته نشینی و تحکیم رسوبات

جدول۱. خصوصیات فیزیکی رسوبات مخزن سد دز در نزدیکی بدنه سد

شرح	رطوبت نمونه (%)	دانسیته ظاهری اشباع (gr/cm^3)	Gs	حدود اتربرگ		کلاس خاک
				PI	LL	
بیشترین	۲/۶۵	۲	۲/۷۶	۲۹	۵۱	
کمترین	۲۶	۱/۶۳	۲/۷	۱۲	۳۰	CL
متوسط (۲۱ نمونه)	۴۹/۲	۱/۸۴	۲/۷۳	۱۸/۱۹	۳۷/۶۷	

تهیه رسوب مورد نیاز در آزمایش‌ها

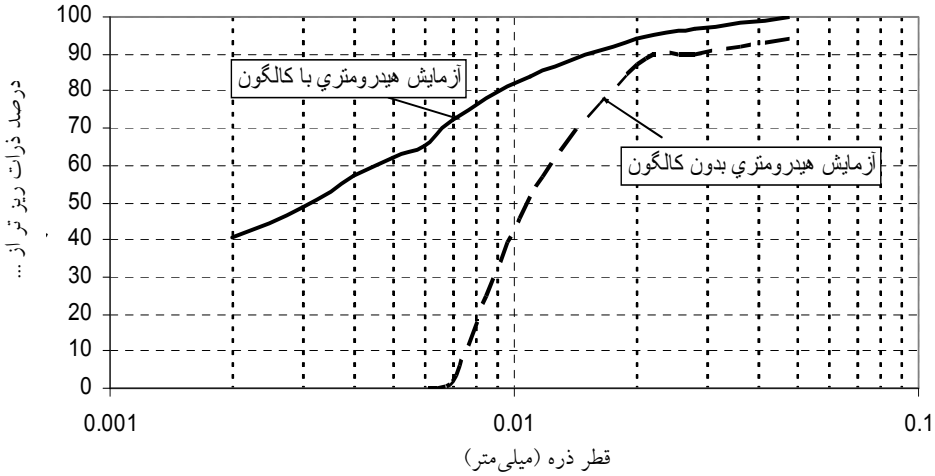
رسوبات مورد آزمایش در این تحقیق از مخزن سد دز، در نزدیکی بدنه سد تهیه شد. این رسوبات با استفاده از یک نمونه بردار وزنی (Gravity Corer) متعلق به سازمان آب و برق خوزستان از بستر رسوبات مخزن (حدود ۱۰ متر زیر سطح رسوبات) بالا آورده شد. این رسوبات از نوع رسوبات چسبنده بوده و به‌طور متوسط از۴۰ درصد رس و ۶۰ درصد سیلت تشکیل شده اند (۸). جهت مشخص کردن خصوصیات فیزیکی این رسوبات، آزمایش‌های لازم بر روی ۲۱ نمونه انجام گرفت که نتایج حاصله در جدول۱ ارائه شده است. هم‌چنین آزمایش دانه بندی بر روی نمونه‌های رسوب در دو حالت با و بدون ماده جدا کننده (کالگون) انجام گرفت که نتیجه این آزمایش‌ها در نمودار شکل۴ ارائه شده است. اختلاف این دو منحنی می‌تواند بیانگر خاصیت چسبندگی و فلوکوله شدن رسوبات مورد مطالعه باشد(۲ و ۱۱).

مراحل انجام آزمایش‌ها

جهت انجام آزمایش‌ها ابتدا مخلوط آب و رسوب با غلظت مورد نظر در مخزن درست شد و پس از آماده سازی سیلندر ته نشینی و تحکیم، مخلوط آب و رسوب بوسیله پمپ از مخزن به مدل انتقال داده شد و اندازه‌گیری‌های مورد نظر، شامل قرائت پیزومترها، قرائت سطح رسوب در مدل، قرائت درجه حرارت و نمونه‌گیری از شیرهای نمونه‌گیری انجام گرفت. علاوه بر آن برخی اندازه‌گیری‌ها در استوانه‌های کوچک آزمایشگاهی به عنوان مدل پایلوت انجام گرفت که در این مقاله از نتایج آن نیز استفاده شده است. قرائت سطح رسوب از طریق

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

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.1.6]



شکل۴. منحنی دانه بندی رسوبات مخزن سد دز در دو حالت همراه با ماده جداکننده و بدون ماده جداکننده

جدول۲. حالات مختلف انجام آزمایش‌های ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده مخزن سد دز

نام آزمایش	طول مدت آزمایش (روز)	قطر استوانه تحکیم (سانتی متر)	$H_{initial}$	H_{final}	$C_{initial}$	C_{final}	ملاحظات
TA	۱۵	۳۰	۳۵۱/۲	۱۳۱/۴	۲۲۰	۶۱۰	Temp.=17 ^{o}C با اندازه‌گیری فشار آب منفذی
TB	۳۸	۳۰	۳۰۷/۵	۶۸/۱۵	۲۰۰	۹۷۳	Temp.=21 ^{o}C با اندازه‌گیری فشار آب منفذی
TC	۳۸	۵	۳۲/۵	۹/۴	۲۰۰	۶۹۱/۵	Temp.=5 ^{o}C در تاریکی و بدون اندازه‌گیری فشار آب منفذی
TD	۳۸	۵	۳۲/۵	۸/۷	۲۰۰	۷۴۷	Temp.=21 ^{o}C در تاریکی و بدون اندازه‌گیری فشار آب منفذی
TE	۳۸	۵	۳۲/۵	۸/۷	۲۰۰	۷۴۷	Temp.=21 ^{o}C بدون اندازه‌گیری فشار آب منفذی
TF	۳۸	۳۰	۳۲/۵	۹/۱	۲۰۰	۷۱۴	Temp.=21 ^{o}C بدون اندازه‌گیری فشار آب منفذی

$H_{initial}$, H_{final}: ارتفاع رسوب در مدل در ابتدا و انتهای دوره آزمایش (سانتی‌متر)

$C_{initial}$ و C_{final} : میانگین عمقی غلظت رسوب در مدل در ابتدا و انتهای دوره آزمایش (گرم بر لیتر)

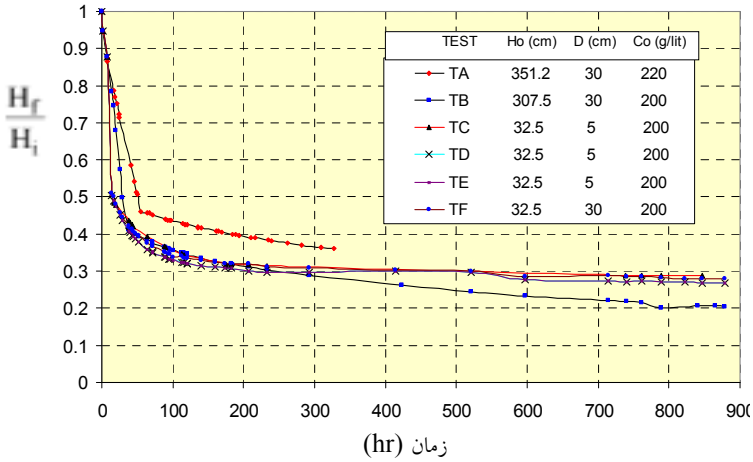
جهت ایجاد شرایط تاریکی در مدل فیزیکی از یک جدار لوله‌ای با قطر بزرگ‌تر استفاده شد.

نوار مدرج نصب شده بر روی جدار سیلندر ته نشینی و تحکیم به‌صورت چشمی انجام گرفت و فشار آب منفذی از روی موقعیت سطح آب درون لوله‌های پیزومتر تعیین گردید. سایر پارامترها نظیر نسبت پوکی، غلظت، وزن مخصوص، دانه بندی، درصد رطوبت و خصوصیات شیمیائی با انجام آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های اخذ شده از مدل تعیین شده‌اند. در این تحقیق آزمایش‌های شیمیایی در آزمایشگاه سازمان آب و برق خوزستان و سایر آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌ها در دانشگاه شهید چمران انجام گرفته است.

حالات مختلف آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به شرح جدول۲ می‌باشد. در کلیه آزمایش‌ها، زهکشی فقط از سمت بالا امکان‌پذیر بوده است و آزمایش‌های TC ، TD ، TE

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

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.1.6]



شکل۵ . تغییرات $\frac{H_f}{H_i}$ نسبت به زمان برای آزمایش‌های مختلف

و TF در سیلنـــدرهای استوانه‌ای کوچک (به‌صورت پـایلوت) انجام گرفته که غلظت اولیه آنها مساوی غلظـت اولیـه آزمـایش TB بوده است.

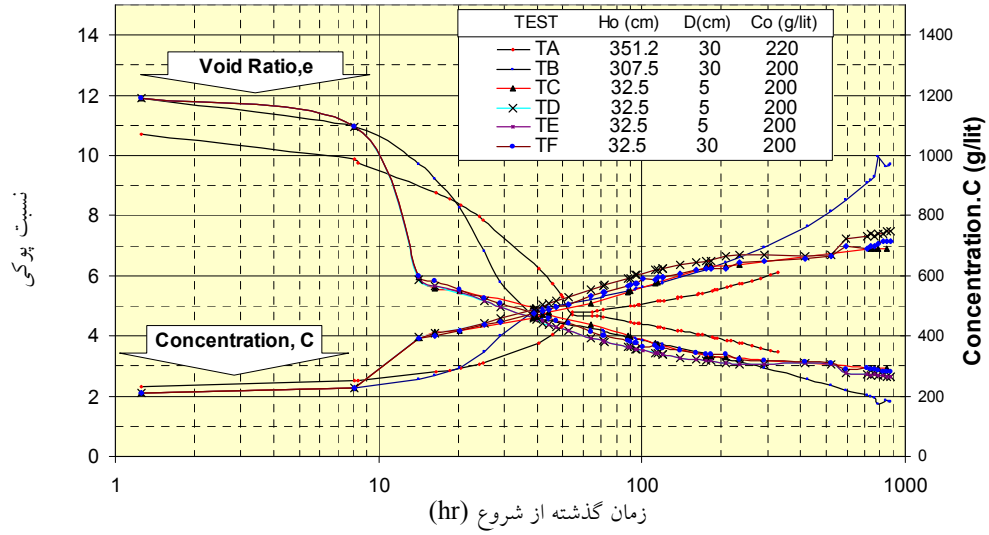
نتایج و بحث

نتیجه اندازه‌گیری‌ها

در آزمایش‌های انجام شده، ظرف کمتر از یک ساعت یک سطح مشخص بین رســـوبات و آب بالای آن تشکیل شد و امکـــان اندازه‌گیری روند ته نشینی و تحکیم در مدل به‌وجود آمد. نتایج اندازه‌گیری‌ها حاکی از آن است کـه بـا گذشـت زمـان سـرعت نشست و تحکیم رسوبات چسبنده کاهش می‌یابد. جهت نـشان دادن این امر معمولاً از پارامتر $\frac{H_f}{H_i}$ استفاده می‌شود که در آن H_i ارتفاع ستون مخلـوط آب و رسـوب در ابتـدای آزمـایش و H_f ارتفاع رسوبات تـه نـشین شـده در زمـان‌هـای پـس از شـروع آزمایش می‌باشد. تغییرات پارامتر مذکور نسبت بـه زمـان بـرای آزمایش‌های انجام گرفته در نمـودار شـکل۵ ارائـه شـده اسـت. براساس این اطلاعات نتـــایج زیر قابل ارائـــه می‌باشد.

- غلظت اولیه آزمایش TA بیشتر از آزمایش TB بـوده اسـت. این امر باعث شده منحنی تغییرات $\frac{H_f}{H_i}$ مربوط به آزمـایش TA بالاتر از منحنی مربوط به آزمایش TB قرار بگیرد، ولی این دو منحنی موازی یکدیگر می‌باشند.
- غلظت اولیه آزمایش‌های TB و TF: قطر مدل در دو آزمایش مساوی بوده ولی ارتفـاع مـدل در آزمـایش TB حـدوداً ۳ برابر ارتفـاع آزمـایش TF مـی‌باشـد. مقایـسه منحنـی‌هـای تغییرات $\frac{H_f}{H_i}$ مربوط به این دو آزمـایش نشان می‌دهـد کـه در یک هفته اول فراینـد تـه نـشینی و تحکـیم، دو منحنـی تطابق خـوبی بـا هـم دارنـد ولـی پـس از آن، منحنـی TB پایین‌تر از منحنی TF قـرار مـی‌گیـرد. ایـن نتیجـــه تـأثیر مقیـاس در شبیه‌سازی ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده با استفاده از مدل فیزیکی را نشان می‌دهد.
- آزمایش‌های TC و TD در شرایط اولیه یکسان انجام شده و تنها درجه حرارت در آنها متفاوت و بـه ترتیـب برابـر ۵ و ۲۱ درجه سانتی‌گراد بوده است. این امر باعث شده منحنـی تغییرات $\frac{H_f}{H_i}$ مربوط به آزمایش TC اندکی بالاتر از منحنـی مربوط به آزمایشTD قـرار بگیـرد، کـه ایـن نتیجـه نـشان می‌دهد عامل درجه حرارت بر روی فراینـــد تـه نـشینی و تحکیـــم بدون تأثیر نمی‌باشد.
- آزمایش‌های TD و TE از نظر ارتفاع، غلظت اولیـه و درجـه حرارت در شرایط یکسان بوده ولی مدل TD در تاریکی و مدل TE در روشنایی قرار گرفتـه بودنـد. بـدین منظـور بـا

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.1.6]



شکل۶ . تغییرات غلظت رسوب نسبت به زمان برای آزمایش‌های انجام شده

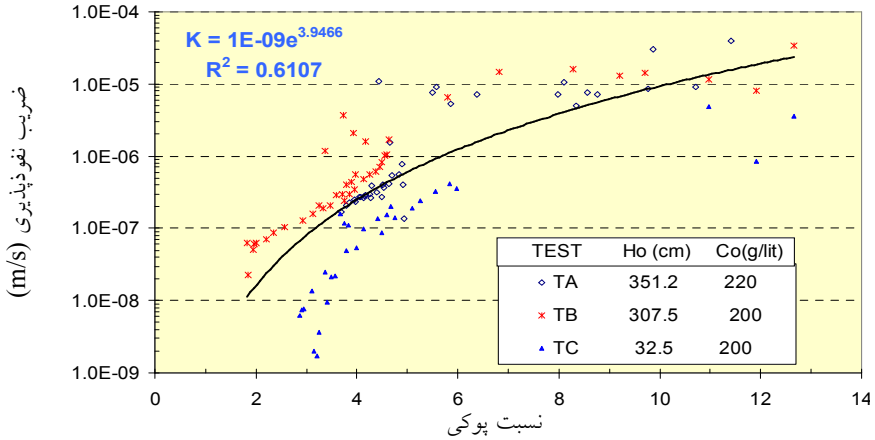
ایجاد یک پوشش تیره بر روی مدل TD از رسیدن نور آزمایشگاه (در روز نور خورشید و در شب نور لامپ) به مدل جلوگیری گردید. نتایج نشان می‌دهد منحنی تغییرات $\frac{H_f}{H_i}$ مربوط به دو آزمایش مذکور روی همدیگر منطبق شده و این نتیجه نشان می‌دهد عامل نور، تأثیر معنی‌داری روی فرایند ته نشینی و تحکیم نداشته است.

آزمایش‌های TE و TF از نظر ارتفاع، غلظت اولیه و درجه حرارت در شرایط یکسان بوده ولی قطر مدل TF شش برابر قطر مدل TE بوده است. نتایج نشان می‌دهد منحنی تغییرات $\frac{H_f}{H_i}$ مربوط به دو آزمایش مذکور اختلاف چشمگیری با هم نداشته‌اند و این امر عدم تأثیر قطر مدل بر نتایج حاصله را نشان می‌دهد.

با توجه به ارتفاع H اندازه‌گیری شده و با توجه به غلظت اولیه رسوب (در لحظه شروع آزمایش)، می‌توان غلظت و نسبت پوکی را در زمان‌های مختلف محاسبه کرد که این محاسبات انجام گرفته و نتایج در شکل۶ ارائه شده است. بر اساس این نمودار می‌توان منحنی تغییرات نسبت پوکی و غلظت رسوبات نسبت به زمان را به چهار ناحیه مجزا تقسیم کرد. ناحیه اول که در ساعات اولیه فرایند ته نشینی و تحکیم رخ می‌دهد، به مرحله تراکم ایستا (Stabilization agglomeration) موسوم است (۳). طول مدت این مرحله معمولا کمتر از یک ساعت بوده و نسبت پوکی بیشتر از ۱۰ به‌دست آمده است. در مرحله دوم که به آن اصطلاحاً مرحله رسوب‌گذاری می‌گویند (Sedimentation)، غلظت رسوبات افزایش یافته و نسبت پوکی به حدود ۵ کاهش می‌یابد. طول مدت این مرحله ممکن است حدود یک روز باشد (۳). در مرحله سوم غلظت رسوبات آن‌قدر افزایش یافته که ته نشینی ذرات رسوبی به شدت تحت تأثیر یکدیگر بوده ولی هنوز رسوبات ته نشین شده به یک خاک با ساختمان با دوام تبدیل نشده است. سرعت نشست مرز مشترک آب و رسوب در این مرحله کندتر از مرحله دوم بوده ولی مدت زمان این مرحله بیشتر بوده و ممکن است به بیش از یک هفته برسد. به این مرحله، ته نشست به تأخیر افتاده (Hindered settling) نیز می‌گویند (۳). در آزمایش‌های انجام شده، نسبت پوکی در این مرحله بین ۵ تا ۳ بوده است. در مرحله چهارم پدیده تحکیم رسوبات اتفاق افتاده و فشار مؤثر تدریجاً افزایش یافته و نسبت پوکی با گذشت زمان کاهش می‌یابد. به این مرحله تحکیم تحت وزن خود (Self weight consolidation) گفته می‌شود (۳). روند نشست سطح رسوب در این مرحله بسیار

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

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.1.6]



شکل۷ . ارتباط نفوذپذیری با نسبت پوکی در آزمایش TA

آرام می‌باشد و این مرحله ممکن است پس از ۱۰ تا ۲۰ روز از زمان شروع فرایند ته نشینی و تحکیم آغاز شده و از نظر تئوریک تا زمان بی نهایت ادامه یابد. این نتایج نظر بلوم کوئیست و تاون سند (۲) که فرایند ته نشینی و تحکیم را در چهار مرحله مجزا تقسیم بندی کرده بود، تأیید می‌نماید.

پارامترهای تحکیم

در مدل‌های شبیه سازی ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده، نیاز است پارامترهای تحکیم نظیر تنش مؤثر و نفوذپذیری به عنوان اطلاعات اولیه مورد نیاز، معلوم و مشخص باشند. معمولاً این پارامترها به‌صورت روابط تجربی و برحسب نسبت پوکی به مدل‌های مذکور داده می‌شوند. لذا در این تحقیق بر پایه اندازه‌گیری‌ها و آزمایش‌های انجام شده، روابط تحکیم برای رسوبات مخزن سد دز به‌دست آمده که به‌شرح زیر می‌باشد.

نفوذپذیری

پدیده تحکیم در حقیقت خروج آب‌های منفذی لایه‌های خاک می‌باشد. لذا نفوذ پذیری خاک را مهم‌ترین عامل مؤثر در تحکیم می‌دانند (۱۱). این پارامتر در طول تحکیم ثابت نبوده و تغییرات آن غیر خطی می‌باشد. برای تعیین میزان نفوذپذیری، لازم است قانون‌های دارسی و پیوستگی مورد استفاده قرار گیرد. در فرایند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده، قوانین مذکور به‌صورت زیر نوشته می‌شود (۱۲):

$$n(v_f - v_s) = -k.i \qquad [۹]$$

$$(1-n)\, v_s + n.\, v_f = 0 \qquad [۱۰]$$

که در آن:

n: نسبت پوکی، v_f و v_s به ترتیب سرعت فازهای سیال و جامد، k ضریب نفوذپذیری و i گرادیان هیدرولیکی می‌باشد.

با ترکیب دو معادله فوق خواهیم داشت:

$$k = -\, v_s / i \qquad [۱۱]$$

با توجه به روابط موجود و اندازه‌گیری‌های انجام شده، ضریب نفوذپذیری به‌دست آمده که نتایج حاصله در نمودار شکل۷ ارائه شده و بهترین معادله آن به‌صورت زیر به‌دست آمده است:

$$k = ۱\times۱۰^{-۹} e^{۳/۹۴۶۶} \quad ,R^2=۰/۶۱ \qquad [۱۲]$$

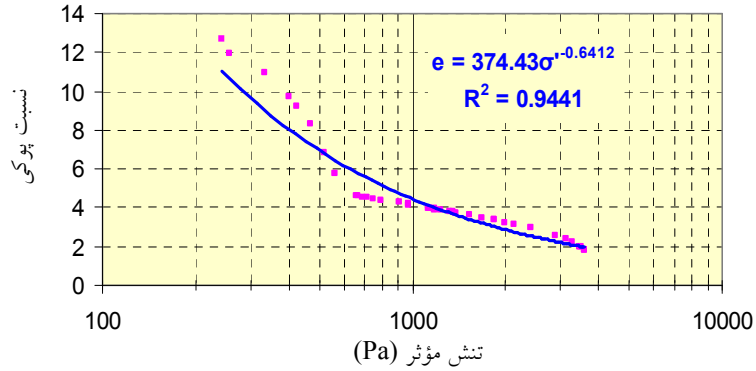
که در آن:

k: ضریب نفوذپذیری برحسب متر بر ثانیه و e: نسبت پوکی می‌باشد.

این نتیجه نظر محققینی همچون کاری یر، ساموگی و کریزک (۶ و۱۰) را که رابطه بین نفوذپذیری و نسبت پوکی را به‌صورت رابطه نمائی ارائه داده بودند، تأیید می‌کند. نمای معادله فوق که برابر ۳/۹۴۶۶ به‌دست آمد به مقادیر به‌دست آمده توسط محققین فوق (به ترتیب برابر ۴/۱۱ ، ۳/۰۲ و ۴/۱) نسبتاً نزدیک است.

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

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.1.6]



شکل۸ . رابطه بین تنش مؤثر و نسبت پوکی در آزمایش TA

از رابطه مذکور می‌توان در مدل سازی ریاضی ته نشینی و تحکیم رسوبات مخزن سد دز و رسوبات چسبنده مشابه به عنوان یکی از پارامتر ورودی مدل ریاضی استفاده نمود.

تنش مؤثر

با گذشت زمان به دلیل تحکیم رسوبات چسبنده، وزن مخصوص رسوبات ته نشین شده افزایش می‌یابد. در مراحل اولیه فرایند ته نشینی و تحکیم، نسبت پوکی رسوبات زیاد بوده و هنوز تنش مؤثر ظاهر نشده ولی با گذشت زمان، به تدریج آبهای منفذی خارج شده و این امر موجب می‌شود تنش مؤثر ظاهر گردد. اندازه‌گیری مستقیم تنش مؤثر بسیار دشوار بوده و عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد، لذا معمولاً با اندازه‌گیری فشار آب منفذی و با کم کردن آن از فشار کل، تنش مؤثر محاسبه می‌شود. در این تحقیق، فشار آب منفذی با استفاده از لوله‌های پیزومتریک اندازه‌گیری شد. این پیزومترها از طریق اتصالگر پیزومتری در فواصل ارتفاعی ۱۰ سانتی‌متری بر روی مدل استوانه تحکیم نصب شده بود. در آزمایش‌های TA و TB اندازه گیری فشار آب منفذی انجام گرفت. بر اساس نتایج قرائت‌های پیزومتریک، در ابتدای آزمایش سطح آب پیزومتریک برای پیزومترهایی که در محدوده رسوب قرار داشتند، بالاتر از سطح آب در مدل بود. این مقدار که از این پس اضافه فشار آب منفذی نامیده می‌شود، متناسب با غلظت رسوبات بوده و با استفاده از قانون مانومترها، قابل محاسبه است که رابطه مربوطه به‌صورت زیر قابل بیان می‌باشد:

$$\Delta H = \left(\frac{\rho_{mixture}}{\rho_w} - ۱ \right) . h_s \qquad [۱۳]$$

$$\rho_{mixture} = \rho_w + C . \frac{G_s - ۱}{G_s} \qquad [۱۴]$$

که در آن:

ΔH اضافه فشار آب منفذی (متر- بلندای آب) و h_s ارتفاع رسوب در مدل (متر)، و $\rho_{mixture}$ و ρ_w به ترتیب جرم مخصوص مخلوط آب- رسوب و آب

(کیلوگرم بر متر مکعب)، G_s چگالی دانه‌های رسوب و C غلظت رسوب می‌باشد.

با گذشت زمان که پدیده تحکیم اتفاق می‌افتد، به تدریج فشار آب منفذی کاهش یافته و این فشار تبدیل به فشار مؤثر می‌گردد و در زمانی‌که فرایند تحکیم به انتها نزدیک شود، اضافه فشار آب منفذی به سمت صفر میل می‌کند. براساس نتایج اندازه‌گیری‌ها، رابطه بین اضافه فشار آب منفذی، ΔH (برحسب متر) و زمان، T (بر حسب ساعت) به‌شرح زیر به‌دست آمده است:

$$\Delta H = ۳۶/۵ \times e^{-۰/۰۰۳۲T} \qquad [۱۵]$$

هم‌چنین رابطه بین تنش مؤثر، σ' (برحسب پاسکال) و نسبت پوکی، e، مطابق نمودار شکل۸ بوده و بهترین معادله آن همان‌گونه که اغلب محققین دیگر نیز پیشنهاد نموده‌اند، نمائی و به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$e = ۳۷۴/۴۳ \sigma'^{-۰/۶۴۱۲} \quad , R^2 = ۰/۹۴ \qquad [۱۶]$$

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

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.1.6]

رابطه فوق نظر محققینی همچون کاری یر، ساموگی و کریزک (۶ و ۱۰) را که رابطه بین تنش مؤثر و نسبت پوکی را به‌صورت رابطه نمائی ارائه داده بودند، تأیید می‌کند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از سازمان آب و برق خوزستان و به‌ویژه از آقای دکتر ایزدجو که حمایت‌های مالی و علمی زیادی در انجام این تحقیق با ما داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌نماییم.

منابع مورد استفاده

1. Acres International and Dezab Consultant Engineering. 2003. Dez Dam Rehabilitation Project- Task1 Report. Report to KWPA, Ahwaz, Iran,
2. Bloomquist, D.G. and F.C. Townsend. 1984. Centrifugal modeling of phosphatic clay consolidation. ASCE Symposium on Sedimentation/Consolidation Models, San Francisco.
3. Carrier, W.D. and L.G. Bromwell. 1983. Disposal and Reclamation of Mining and Dredging Wastes. Proceedings of the Seventh Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vancouver, Canada.
4. Haralampides,H., J.A. McCorquodale and B.G. Krishnappan. 2003. Deposition properties of fine sediment. J. Hydr. Eng. 129(3): 230-234.
5. Krishnappan, B.G. 2000. In Situ size distribution of suspended particles in the Fraser River. J. Hydr. Eng. ASCE. 126(8): 561-569.
6. Krizek, R.J. and F. Somogyi. 1984. Perspective on modeling consolidation of dredged materials. ASCE Symposium on Sedimentation/Consolidation Models, San Francisco.
7. Morris, G.L. and J. Fan. 1998. Reservoir Sedimentation Handbook. McGraw-Hill Pub., New York.
8. Samadi-Boroujeni, H. 2004. Modelling of Sedimentation/consolidation of cohesive sediments. Ph.D. Thesis, Shahid Chamran University, Iran.
9. Schiffman, R.L., V. Pane and R.E. Gibson.1984. An overview of nonlinear finite strain sedimentation and consolidation. ASCE Symposium on Sedimentation/ Consolidation Models, San Francisco.
10. Somogyi, F., W.D. Carrier, L.E. Lawver and J.F. Beckman. 1984. Waste phosphatic clay disposal in mine cuts. ASCE Symposium on Sedimentation/Consolidation Models, San Francisco,
11. Toorman, E.A. 1999. Sedimentation and self-weight consolidation: Constitutive equations and numerical modeling. J. Geotechnique 49 (6): 709-726.
12. Tunguy, J.M. and G. Rouas. 1995. Physical and Numerical Modeling of Settling and Consolidation of Cohesive Sediments in Calm Water. Proceeding of Sixth Int. Symposium on River Sedimentation, New Delhi.
13. Yong, R.N. and C. Townsend. 1984. Sedimentation and consolidation models. ASCE Symposium on Sedimentation/Consolidation Models, San Francisco.
14. Yu, W.S. , H.Y. Lee and S.M. Hsu. 2000. Experiments on deposition behavior of fine sediment in a reservoir. J. Hydr. Eng. ASCE. 126(12): 912-920.

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

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.40.1.6]