

## بررسی فرایند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده مخزن سد دز

حسین صمدی بروجنی<sup>۱</sup>، محمود شفاعی بجستان<sup>۲</sup> و منوچهر فتحی مقدم<sup>۲</sup>

### چکیده

رسوب گذاری و متعاقب آن تحکیم رسوبات چسبنده در مخازن سدها بخصوص در نزدیک ساختگاه سد، مشکلات متعددی را به وجود می آورد که ممکن است منجر به گرفتگی دریچه های تحتانی و یا ورود رسوبات به درون آبگیر نیروگاه گردد. خروج این رسوبات با روش آبشویی 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 گسترده ای 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 می باشد. از این رو در این تحقیق با استفاده از مدل فیزیکی استوانه ای شکل به ارتفاع ۳/۸ متر، قطر ۳۰ سانتی متر، نمونه های خاک چسبنده تحت شرایط رسوب گذاری و سپس تحکیم قرار گرفته و پارامترهایی چون وزن مخصوص ظاهری خاک، نسبت پوکی و پارامترهای تحکیم اندازه گیری گردیدند. با توجه به اهمیت سد دز و پیش بینی این که تا پنج سال آینده رسوبات چسبنده وارد نیروگاه می شوند، نمونه های 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 می باشد. هم چنین در این تحقیق روابط تنش مؤثر - ضریب نفوذپذیری - نسبت پوکی به صورت روابط نمائی استخراج گردید که از این روابط می توان در مدل های 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 به دست آمده از این تحقیق مورد تأیید است.

واژه های کلیدی: رسوب گذاری، مدل فیزیکی، پارامترهای تحکیم، تنش مؤثر

### مقدمه

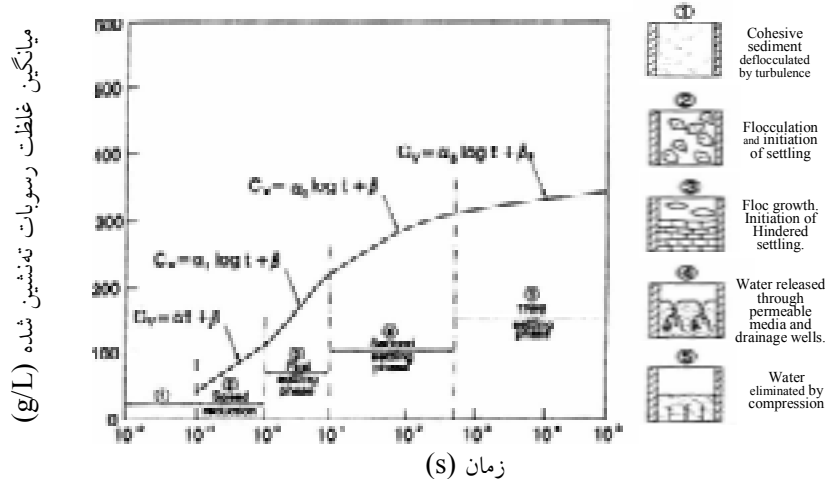
نقش مؤثری دارد.

بیشتر رسوبات ریزدانه دارای خاصیت چسبندگی می باشد. معمولاً کانی های رسی (با اندازه کمتر از ۲ میکرون) دارای چنین خاصیتی بوده و این خاصیت موجب می شود که در حالت معلق به همدیگر چسبیده و تشکیل فلوکول های دهنده که

ارزیابی و بررسی روند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده در مخازن سدها و سواحل یکی از موضوعات و مسائل مهم است که در طرح های مختلف رسوب زدائی و کنترل رسوب، از جمله پروژه های لایروبی و عملیات رسوبشویی هیدرولیکی سدها

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



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

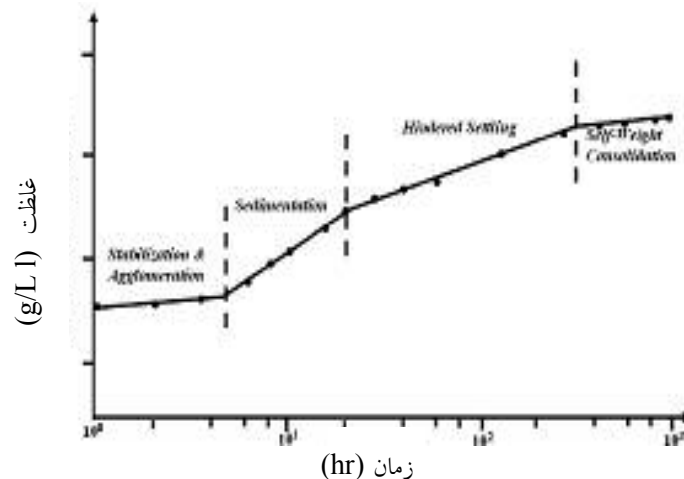
فیزیکی و مکانیکی رسوبات در حین فرایند ته نشینی و تحکیم به دست آورد. در کشور ما نیز به دلیل وجود سدهای مخزنی متعدد با نرخ رسوب گذاری بالا، این موضوع می بایست مورد توجه خاص قرار گیرد. هر چند نگارنده در این زمینه هیچ مطالعه موردی در سطح کشور مشاهده ننموده است.

در مخازن سدها، پدیده رسوب گذاری به گونه ای انجام می گیرد که رسوبات درشت دانه در قسمت های بالایی مخزن و در ناحیه ای موسوم به دلتای سد ته نشین می گردد و هر چه به بدنه سد نزدیک تر می شویم رسوبات ریزدانه تر می شوند. از طرف دیگر وقوع پدیده جریان غلیظ در مواقع سیلابی موجب می گردد رسوبات ریزدانه به صورت یک لایه جریان غلیظ در بستر مخزن حرکت کرده تا این که به بدنه سد برسد. با رسیدن این جریان رسوبی به نزدیکی بدنه سد که معمولاً از جنس رسوبات چسبنده هستند و در صورتی که دریچه های تحتانی جهت تخلیه این جریان باز نباشند، عمل ته نشینی و تحکیم رسوبات اتفاق افتاده و با گذشت زمان خواص فیزیکی- مکانیکی رسوبات تغییر می کند (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

خصوصیات فیزیکی - شیمیایی متفاوتی با دانه های رسوبی مجزا دارند (۷).

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 می شود (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 نمی باشد (۷). با پیدایش و ساخت دستگاه های دقیق اندازه گیری لیزری، نوری و سونیک، امکان انجام تحقیقات دقیق تر و قابل اعتمادتر به وجود آمده است (۵). با این حال با توجه به این که تحکیم رسوبات چسبنده نسبت به زمان به شدت متغیر بوده و خصوصیات مکانیکی آن با گذشت زمان تغییر می کند، لذا شبیه سازی باید به گونه ای انجام شود که بتوان براساس آن وضعیت تراکم و وزن مخصوص رسوبات را در زمان های مختلف تعیین نمود. این امر در مخازن سدها که مرتباً ارتفاع رسوبات به دلیل رسوب گذاری رو به افزایش است، با پیچیدگی بیشتری همراه است (۱۴). به منظور رسیدن به این هدف، لازم است جنبه های تئوری فرآیند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده، به دقت مورد توجه قرار گیرد و با تلفیق نتایج اندازه گیری های صحرائی و آزمایشگاهی با مدل های ریاضی شبیه سازی، پیش بینی های نسبتاً دقیق در خصوص وضعیت



شکل ۲. مراحل چهارگانه ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده پیشنهادی بلوم کوئیست و تاون سند (۳)

رسوب گذاری (Sedimentation)، فاز ته نشینی به تأخیر افتاده (Hindered settling) و فاز تحکیم تحت وزن خود رسوبات (Self-weight consolidation) تقسیم بندی شود (شکل ۲).

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 مهم ترین پارامترهای تحکیم می توان به نفوذپذیری و تراکم پذیری اشاره کرد. تراکم پذیری همان نسبت پوکی رسوبات بر حسب تنش مؤثر می باشد و نفوذپذیری معمولاً بر حسب نسبت پوکی رسوبات به صورت رابطه نمائی بیان می شود (۶ و ۱۰). این پارامترها برای مدلسازی ریاضی ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده مورد استفاده می باشند (۱۱).

محققین مختلف بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و اندازه گیری روابط تجربی زیادی را برای بیان پارامترهای تحکیم ارائه نموده اند. کری پر و برام ویل (۳) بر مبنای آزمایش های ته نشینی و تحکیم رس فسفاتیک فلوریدا در یک مخزن به عمق ۶ متر روابط زیر را به دست آورد:

$$k = 4 \times 10^{-6} e^{4/11} \quad [1]$$

$$e = 29/43 \sigma'^{-0.29} \quad [2]$$

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

شده اند و رسوبات کاملاً به صورت معلق هستند و در این مرحله فرایند ته نشینی آغاز می شود. در مرحله دوم که ممکن است حدود چند ثانیه طول بکشد، اولین ذرات رسوبی به فاز ته نشینی نزدیک می شوند. در مرحله سوم بخشی از رسوبات فلوکوله شده، ته نشین می شود و دو فاز مجزا به وجود می آید. در این مرحله ممکن است غلظت رسوبات تا ۲۰۰ گرم بر لیتر برسد. در مرحله چهارم یک مرز مشخص بین فاز سیال و جامد به وجود می آید و پس از آن می توان روند تحکیم و نشست رسوبات را با زمان ثبت نمود. در این مرحله به تدریج آب های محبوس شده از لابه لای فلوکول ها خارج شده و بخشی از فلوک ها به واسطه نیروی وزن لایه های بالایی در هم شکسته و عمل تحکیم آغاز می شود. 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 می شود و در صورتی که آزمایش برای مدت طولانی ادامه داشته باشد، عمل تحکیم با روند کندتر صورت می گیرد و به آن تحکیم ثانویه نیز می گویند.

بلوم کوئیست و تاون سند (۲) معتقد بودند فرایند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده می تواند در چهار فاز تحت عناوین فاز استقرار ایستا (Stabilization Agglomeration)، فاز

مخلوط آب و رسوب بوده است (۶، ۸، ۹ و ۱۲). در صورتی که 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 فلوکولها 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 شکل ۳ 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.

پارامترهای تحکیم در دو حالت، یکی نمونه رسی با ۹۰٪ و دیگری با ۳۰٪ آب منفذی به شرح زیر به دست آورد. برای حالت رسوب با ۹۰٪ آب منفذی:

$$k = 1/68 \times 10^{-4} e^{3/0.2} \quad [3]$$

$$e = 11/51 \sigma'^{-0.312} \quad [4]$$

برای حالت رسوب با ۳۰٪ آب منفذی:

$$k = 8/9 \times 10^{-4} e^{3/5} \quad [5]$$

$$e = 7 \sigma'^{-0.29} \quad [6]$$

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 به دست آورد:

$$k = 4 \times 10^{-6} e^{4/1} \quad [7]$$

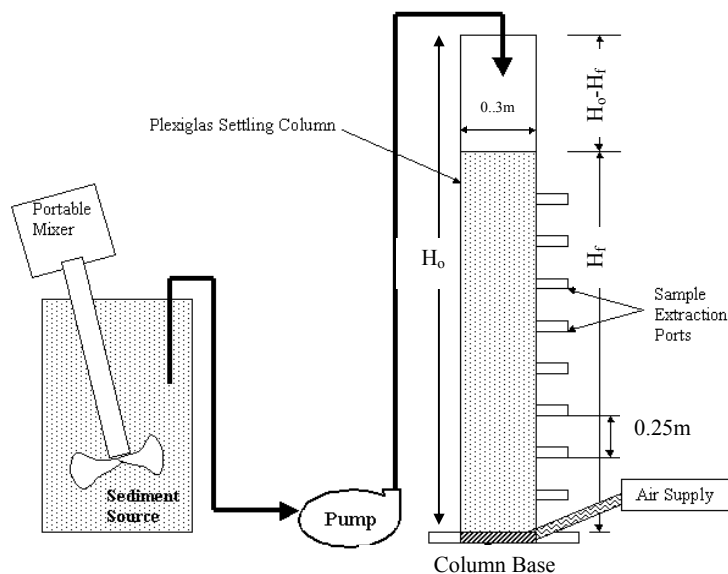
$$e = 28/33 \sigma'^{-0.3} \quad [8]$$

در روابط فوق  $k$ : نفوذپذیری بر حسب فوت بر روز و  $\sigma'$ : 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



شکل ۳. نمای کلی مدل فیزیکی ته نشینی و تحکیم رسوبات

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی رسوبات مخزن سد دز در نزدیکی بدنه سد

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

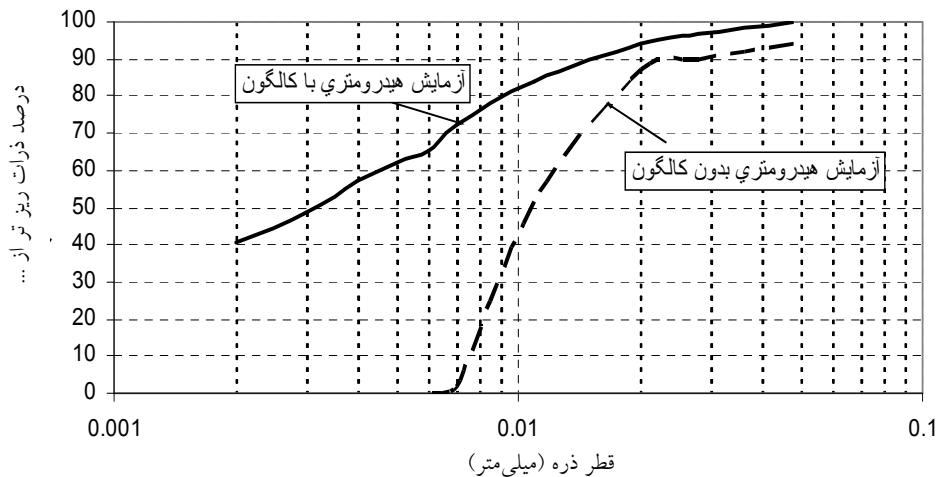
می‌تواند بیانگر خاصیت چسبندگی و فلوکوله شدن رسوبات مورد مطالعه باشد (۲ و ۱۱).

#### 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 پیژومترها، 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

#### 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 از ۴۰ 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 جدول ۱ 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 شکل ۴ ارائه شده است. اختلاف این دو منحنی



شکل ۴. منحنی دانه بندی رسوبات مخزن سد در دو حالت همراه با ماده جداکننده و بدون ماده جداکننده

جدول ۲. 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	با اندازه‌گیری فشار آب منفذی Temp.=17 °C
TB	۳۸	۳۰	۳۰۷/۵	۶۸/۱۵	۲۰۰	۹۷۳	با اندازه‌گیری فشار آب منفذی Temp.=21 °C
TC	۳۸	۵	۳۲/۵	۹/۴	۲۰۰	۶۹۱/۵	در تاریکی و بدون اندازه‌گیری فشار آب منفذی Temp.=5 °C
TD	۳۸	۵	۳۲/۵	۸/۷	۲۰۰	۷۴۷	در تاریکی و بدون اندازه‌گیری فشار آب منفذی Temp.=21 °C
TE	۳۸	۵	۳۲/۵	۸/۷	۲۰۰	۷۴۷	بدون اندازه‌گیری فشار آب منفذی Temp.=21 °C
TF	۳۸	۳۰	۳۲/۵	۹/۱	۲۰۰	۷۱۴	بدون اندازه‌گیری فشار آب منفذی Temp.=21 °C

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

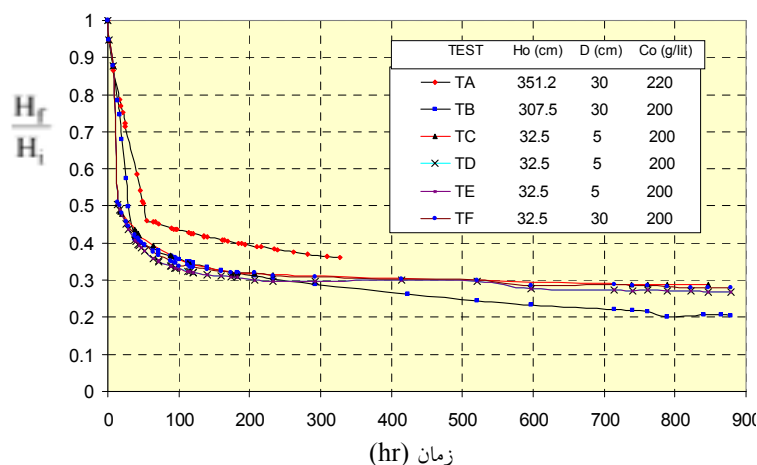
$C_{final}$  و  $C_{initial}$ : میانگین عمقی غلظت رسوب در مدل در ابتدا و انتهای دوره آزمایش (گرم بر لیتر)

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

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 جدول ۲ می‌باشد. در کلیه آزمایش‌ها، زهکشی فقط از سمت بالا امکان‌پذیر بوده است و آزمایش‌های TE، TD، TC

نوار مدرج نصب شده بر روی جدار سیلندر ته نشینی و تحکیم به صورت 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 شیمیایی با انجام آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های اخذ شده از مدل تعیین شده‌اند. در این



شکل ۵. تغییرات  $\frac{H_f}{H_i}$  نسبت به زمان برای آزمایش‌های مختلف

این دو منحنی موازی یکدیگر می‌باشند.

- غلظت اولیه آزمایش‌های TB و TF: قطر مدل در دو آزمایش مساوی بوده ولی ارتفاع مدل در آزمایش TB حدوداً ۳ برابر ارتفاع آزمایش TF می‌باشد. مقایسه منحنی‌های تغییرات  $\frac{H_f}{H_i}$  مربوط به این دو آزمایش نشان می‌دهد که در یک هفته اول فرایند ته نشینی و تحکیم، دو منحنی تطابق خوبی با هم دارند ولی پس از آن، منحنی TB پایین‌تر از منحنی TF قرار می‌گیرد. این نتیجه تأثیر مقیاس 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 به ترتیب برابر ۵ و ۲۱ درجه سانتی‌گراد بوده است. این امر باعث شده منحنی تغییرات  $\frac{H_f}{H_i}$  مربوط به آزمایش TC اندکی بالاتر از منحنی مربوط به آزمایش TD قرار بگیرد، که این نتیجه نشان می‌دهد عامل درجه حرارت بر روی فرایند ته نشینی و تحکیم بدون تأثیر نمی‌باشد.
- آزمایش‌های TD و TE از نظر ارتفاع، غلظت اولیه و درجه حرارت در شرایط یکسان بوده ولی مدل TD در تاریکی و مدل TE در روشنی قرار گرفته بودند. بدین منظور با

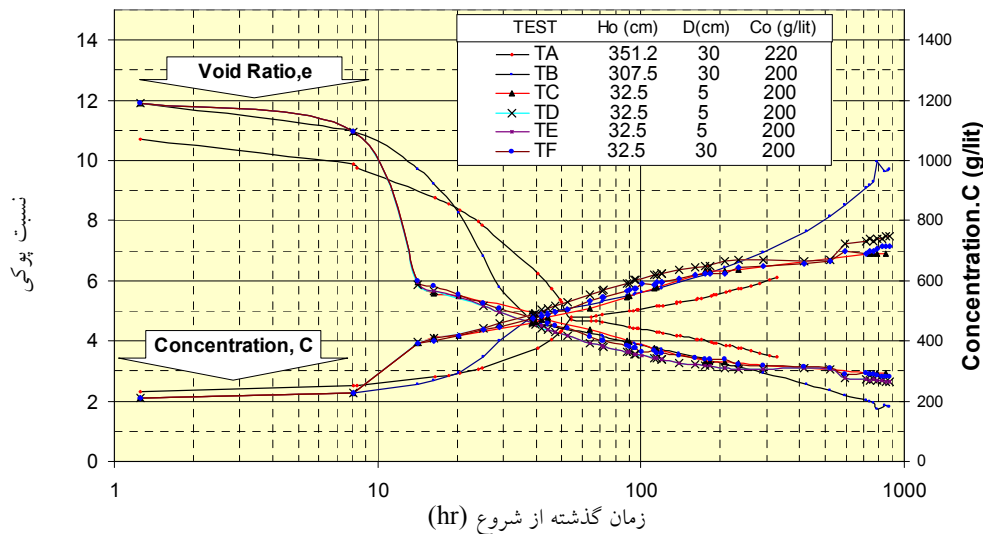
TF و در سیلندرهای استوانه‌ای کوچک (به صورت پایلوت) انجام گرفته که غلظت اولیه آنها مساوی غلظت اولیه آزمایش TB بوده است.

## نتایج و بحث

### نتیجه اندازه‌گیری‌ها

در آزمایش‌های انجام شده، ظرف کمتر از یک ساعت یک سطح مشخص بین رسوبات و آب بالای آن تشکیل شد و امکان اندازه‌گیری روند ته نشینی و تحکیم در مدل به وجود آمد. نتایج اندازه‌گیری‌ها حاکی از آن است که با گذشت زمان سرعت نشست و تحکیم رسوبات چسبنده کاهش می‌یابد. جهت نشان دادن این امر معمولاً از پارامتر  $\frac{H_f}{H_i}$  استفاده می‌شود که در آن  $H_i$  ارتفاع ستون مخلوط آب و رسوب در ابتدای آزمایش و  $H_f$  ارتفاع رسوبات ته نشین شده در زمان‌های پس از شروع آزمایش می‌باشد. تغییرات پارامتر مذکور نسبت به زمان برای آزمایش‌های انجام گرفته در نمودار شکل ۵ ارائه شده است. براساس این اطلاعات نتایج زیر قابل ارائه می‌باشد.

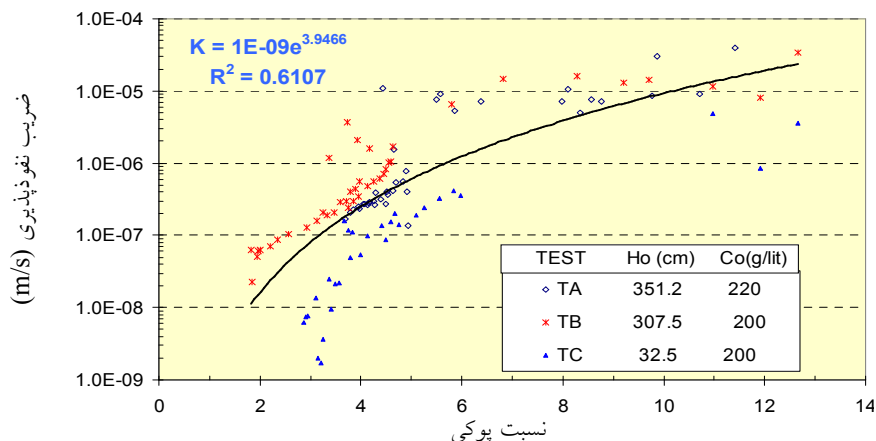
- غلظت اولیه آزمایش TA بیشتر از آزمایش TB بوده است. این امر باعث شده منحنی تغییرات  $\frac{H_f}{H_i}$  مربوط به آزمایش TA بالاتر از منحنی مربوط به آزمایش TB قرار بگیرد، ولی



شکل ۶. تغییرات غلظت رسوب نسبت به زمان برای آزمایش‌های انجام شده

مرحله تراکم ایستا (Stabilization agglomeration) موسوم است (۳). طول مدت این مرحله معمولاً کمتر از یک ساعت بوده و نسبت پوکی بیشتر از ۱۰ به دست آمده است. در مرحله دوم که به آن اصطلاحاً مرحله رسوب گذاری 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

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 شکل ۶ 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



شکل ۷. ارتباط نفوذپذیری با نسبت پوکی در آزمایش TA

مذکور به صورت زیر نوشته می شود (۱۲):

$$n(v_f - v_s) = -k \cdot i \quad [9]$$

$$(1-n) v_s + n \cdot v_f = 0 \quad [10]$$

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 می باشد.

با ترکیب دو معادله فوق خواهیم داشت:

$$k = -v_s / i \quad [11]$$

با توجه به روابط موجود و اندازه گیری های انجام شده، ضریب نفوذپذیری به دست آمده که نتایج حاصله در نمودار شکل ۷ ارائه شده و بهترین معادله آن به صورت زیر به دست آمده است:

$$k = 1 \times 10^{-9} e^{3.9466} \cdot R^2 = 0.61 \quad [12]$$

که در آن:

$k$ : ضریب نفوذپذیری برحسب متر بر ثانیه و  $e$ : نسبت

پوکی می باشد.

این نتیجه نظر محققینی همچون کاری یر، ساموگی و کریزک (۶ و ۱۰) را که رابطه بین نفوذپذیری و نسبت پوکی را به صورت رابطه نمائی ارائه داده بودند، تأیید می کند. نمای معادله فوق که برابر  $3/9466$  به دست آمد به مقادیر به دست آمده توسط محققین فوق (به ترتیب برابر  $4/11$ ،  $3/02$  و  $4/1$ ) نسبتاً نزدیک است.

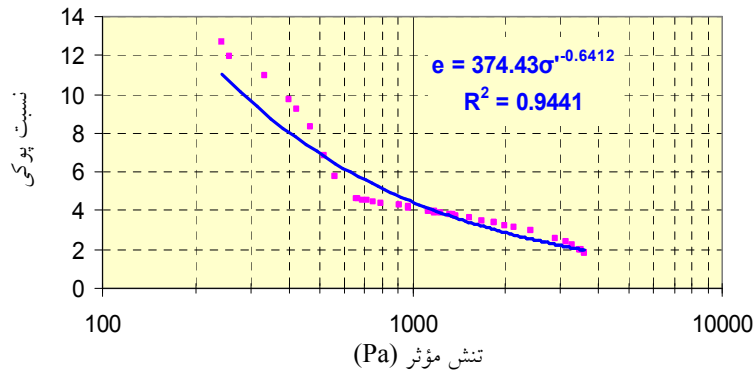
آرام می باشد و این مرحله ممکن است پس از ۱۰ تا ۲۰ روز از زمان شروع فرایند ته نشینی و تحکیم آغاز شده و از نظر تئوریک تا زمان بی نهایت ادامه یابد. این نتایج نظر بلوم کوئیست و تاون سند (۲) که فرایند ته نشینی و تحکیم را در چهار مرحله مجزا تقسیم بندی کرده بود، تأیید می نماید.

### پارامترهای تحکیم

در مدل های 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 به صورت روابط تجربی و برحسب نسبت پوکی به مدل های مذکور داده می شوند. لذا در این تحقیق بر پایه اندازه گیری ها و آزمایش های انجام شده، روابط تحکیم برای رسوبات مخزن سد دز به دست آمده که به شرح زیر می باشد.

### نفوذپذیری

پدیده تحکیم در حقیقت خروج آب های منفذی لایه های خاک می باشد. لذا نفوذ پذیری خاک را مهم ترین عامل مؤثر در تحکیم می دانند (۱۱). این پارامتر در طول تحکیم ثابت نبوده و تغییرات آن غیر خطی می باشد. برای تعیین میزان نفوذپذیری، لازم است قانون های دارسی و پیوستگی مورد استفاده قرار گیرد. در فرایند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده، قوانین



شکل ۸. رابطه بین تنش مؤثر و نسبت پوکی در آزمایش TA

مربوطه به صورت زیر قابل بیان می‌باشد:

$$\Delta H = \left( \frac{\rho_{\text{mixture}}}{\rho_w} - 1 \right) h_s \quad [13]$$

$$\rho_{\text{mixture}} = \rho_w + C \cdot \frac{G_s - 1}{G_s} \quad [14]$$

که در آن:

$\Delta H$  اضافه فشار آب منفذی (متر- بلندای آب) و  $h_s$  ارتفاع رسوب در مدل (متر)، و  $\rho_w$  و  $\rho_{\text{mixture}}$  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 زمانی که فرایند تحکیم به انتها نزدیک شود، اضافه فشار آب منفذی به سمت صفر میل می‌کند. براساس نتایج اندازه‌گیری‌ها، رابطه بین اضافه فشار آب منفذی،  $\Delta H$  (برحسب متر) و زمان،  $T$  (بر حسب ساعت) به شرح زیر به دست آمده است:

$$\Delta H = 36/5 \times e^{-0/0032T} \quad [15]$$

همچنین رابطه بین تنش مؤثر،  $\sigma'$  (برحسب پاسکال) و نسبت پوکی،  $e$ ، مطابق نمودار شکل ۸ بوده و بهترین معادله آن همان‌گونه که اغلب محققین دیگر نیز پیشنهاد نموده‌اند، نمائی و به صورت زیر به دست می‌آید:

$$e = 374/43 \sigma'^{-0/6412}, R^2 = 0/94 \quad [16]$$

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 امکان پذیر 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 اندازه‌گیری 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

### 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 می‌نمایم.

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.

### 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.