

بررسی آزمایشگاهی تأثیر پساب تصفیه شده شهری بر فرایند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده در سامانه های انتقال آب

زهرا طاهری¹، کاظم اسماعیلی^{2*}، حسین صمدی بروجنی³ و سعید رضا خدائیناس⁴

1- دانشجوی دکترا، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

2- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

3- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

4- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

* esmaili@um.ac.ir

(دریافت مقاله: 97/7/6؛ پذیرش مقاله: 97/10/2)

چکیده - تحکیم رسوبات چسبنده نقش مؤثری در مقادیر تنش برشی بحرانی فرسایش رسوبات ته نشین شده در مخازن و کانال های انتقال آب دارد. آگاهی یافتن از رفتار رسوبات ریزدانه می تواند تأثیر بسزایی در بهره برداری و نگهداری سازه های آبی داشته باشد. از این رو در این تحقیق به بررسی تأثیر پساب شهری، که در شرایط خشکسالی به عنوان منابع آب تجدیدپذیر مورد استفاده قرار می گیرد، بر ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده در سامانه های انتقال پرداخته شده است. به همین منظور مراحل تحکیم رسوبات در چهار بازه زمانی 1، 3، 14 و 28 روز و با استفاده از ستون های ته نشینی و برای سه غلظت 0، 30 و 60 درصد پساب و سه غلظت اولیه رسوب 200، 300 و 400 گرم بر لیتر انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش غلظت اولیه، نرخ عمق ته نشینی رسوبات (H/H_0) نیز افزایش می یابد و غلظت اولیه رسوبات تا 300 گرم بر لیتر بر فرایند تحکیم تأثیرگذار است؛ به طوری که تفاوت چندانی بین غلظت اولیه 300 تا 400 گرم بر لیتر مشاهده نمی شود. همچنین مشخص شد مراحل تحکیم در آب خالص و سیال حاوی 60 درصد پساب بسیار نزدیک به هم است اما در سیال حاوی 30 درصد پساب رفتار متفاوتی نشان می دهد. با بررسی درصد سدیم قابل تبادل (ESP) برای درصدهای مختلف پساب و در پایان تحکیم 28 روز مشخص شد که روند تغییرات H/H_0 برای درصدهای مختلف پساب با تغییرات شاخص پخشیدگی ESP یکسان است. علت پدیده پراکنش در سیال حاوی 30 درصد پساب را می توان با خصوصیات شیمیایی سیال و جانمایی کلسیم به جای یون سدیم در ذرات رسی توجیه نمود.

کلیدواژگان: تحکیم، شاخص ESP، رسوبات چسبنده، پساب

1- مقدمه

اصلی ترین پارامترهای هیدرولیک انتقال رسوبات ریزدانه دانست که آگاهی و بررسی این فرایندها در بهره برداری و

فرایندهای فرسایش، ته نشینی و تحکیم را می توان از

توده‌ها نیز نقش اساسی در رفتار رسوبات چسبنده دارد، زیرا مدت زمان معلق بودن ذرات، سرعت ته‌نشینی و از همه مهم‌تر دو پدیده انتقال و ته‌نشینی رسوبات مرتبط با اندازه توده‌هاست (Fedrico, 2005).

ساختار و ویژگی فلوک‌های رسوبی تحت تأثیر لرزش و تغییر شکل ناشی از آشفتگی جریان، برخورد بین ذرات، درجه تحکیم رسوبات و غیره می‌باشد (Huang et al., 2006).

مقدار pH بر مقاومت نیروی بین ذره‌ای تأثیرگذار است، به طوری که مقدار کم pH نیروی چسبندگی بین ذرات را افزایش می‌دهد که بر روی مقاومت رسوبات چسبنده در برابر تنش‌برشی بستر و نرخ ته‌نشینی بستر تأثیر گذار است (Amelia et al., 2010). محققان مختلف جهت ارزیابی و بررسی روند ته‌نشینی 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 و تعیین شده‌اند (Yong and Townsend, 1984).

به طور کلی روند تحکیم رسوبات با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی، ریاضی و مشاهدات و اندازه‌گیری‌های میدانی مورد بررسی قرار می‌گیرد که در ادامه به نتایج این تحقیقات اشاره می‌شود.

میگونیته به نقل از Morris and Fan (1998) با انجام بررسی رفتار ته‌نشینی و تراکم رسوبات چسبنده، پنج مرحله مجزا برای تحکیم رسوبات تعریف نمود و نشان داد تراکم رسوبات چسبنده با لگاریتم زمان رابطه مستقیم دارد. در مرحله اول سیال و رسوب کاملاً باهم مخلوط شده و رسوبات کاملاً به صورت معلق هستند و در این مرحله فرایند ته‌نشینی 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، ته‌نشین می‌شوند و دو فاز مجزا به وجود می‌آید. در مرحله چهارم یک مرز مشخص بین فاز سیال و جامد به وجود می‌آید و پس از آن می‌توان روند تحکیم و نشست رسوبات را با زمان ثبت نمود. در این

نگهداری مخازن سدها، سامانه‌های انتقال و تجهیزات هیدرومکانیک نیروگاه‌های برقایی تأثیرگذار است (این قسمت را شما نوشتید لطفاً رفرنس بدهید). پایداری کانال‌های انتقال آب یا آبراه‌های طبیعی در برابر فرسایش و رسوبگذاری از موضوع‌های مهم حفاظت و بهره‌برداری سامانه‌های انتقال آب است (Partheniades, 2009). چرا که ته‌نشینی رسوبات در کانال‌های انتقال علاوه بر کاهش حجم انتقال، هزینه‌های لایروبی و زمان لازم برای آن را نیز به دنبال دارد (وجدانی و قمشی، 1385).

به طور کلی رسوبات چسبنده مواد آلی و غیرآلی نظیر ذرات رس و سیلت با قطر کوچکتر از 0/075 میلی‌متر را شامل می‌شوند که دارای نیروی بین ذره‌ای و خاصیت چسبندگی می‌باشند. نیروهای قوی بین ذره‌ای ناشی از یون‌های الکتریکی روی ذرات می‌باشد. کاهش اندازه ذرات سبب افزایش سطح آن‌ها در واحد حجم (سطح ویژه) می‌شود و در حقیقت این نیروی بین ذره‌ای است که حرکت ذرات را کنترل می‌کند و نیروی گرانش تقریباً بی‌تأثیر است (Partheniades, 2009; Huang et al., 2006). نیروی بین ذره‌ای سبب هم‌آوری (فلوکولاسیون¹) ذرات می‌شود که عامل تغییر ویژگی‌های فیزیکی در فلوک‌ها، از قبیل قطر ذرات، دانسیته و سرعت ته‌نشینی نسبت به ذرات اولیه، می‌باشد. به طور کلی هم‌آوری زمانی اتفاق می‌افتد که مجموعه تأثیرات نیروهای جاذب و دافع بین دو ذره قابل توجه باشد. در فرایند هم‌آوری، ذرات تمایل به داشتن بار منفی در سطح مسطح یا در لبه‌ها دارند که منجر به یک آرایش لبه - سطح در ذرات می‌گردد. گرایش به سمت توده‌ای شدن با افزایش غلظت الکترولیت و دما، و کاهش سایز یون‌های هیدراته شده، pH و جذب آنیون، افزایش می‌یابد (Lambe and Whitman, 1979).

توده‌های رسوبی تشکیل شده شبیه یک اجتماع کوچک ویژه هستند که دارای رفتار و فعل و انفعالات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مختص به خود می‌باشند و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوتی با ذرات اولیه دارند (Milbuurn and Krishnappan, 2001). اندازه

¹ Flocculation

$$K = 4 \times 10^{-6} e^{4/11} \quad (1)$$

$$e = 29 / 43 \delta^{t-0/29} \quad (2)$$

در روابط فوق K نفوذ پذیری بر حسب فوت بر روز و δ' تنش مؤثر بر حسب پوند بر فوت مربع و e نسبت پوکی می‌باشد.

Samadi et al. (2004) آزمایش‌هایی را با استفاده از سیلندر ته‌نشینی و تحکیم بر روی رسوبات سد مخزنی دز که از نوع رسوبات چسبنده و شامل 40 درصد رس و 60 درصد سیلت بوده‌اند، انجام دادند. نتایج این محققان نشان داد با گذشت زمان سرعت نشست و تحکیم رسوبات چسبنده کاهش می‌یابد و در نهایت روابط (3) تا (4) را به دست آوردند:

$$k = 1 \times 10^{-9} e^{3.9466} \quad (3)$$

$$\Delta H = 36.5 \times e^{-0.00327} \quad (4)$$

$$e = 374 / 43 \times \sigma'^{-0.6412} \quad (5)$$

در روابط فوق ΔH فشار آب منفذی (متر-بلندای آب) می‌باشد.

همچنین این محققان اظهار داشتند که قطر مدل ته‌نشینی در شرایط ارتفاع، غلظت اولیه، و درجه حرارت ثابت، تأثیری بر روند ته‌نشینی رسوبات ندارد.

Edward et al. (2014) آزمایش‌های تحکیم و فرسایش را با استفاده از ستون‌های ته‌نشینی بر روی رسوباتی که از عمق یک متری غرب دریاچه لاری⁵ تهیه شد و دارای مقادیر زیادی مواد آلی بوده‌اند، انجام دادند. آزمایش‌ها تحت دوره تحکیم‌های ۱، ۲، و ۴ هفته و غلظت‌های جرمی 105، 54/7، 30/1، 22/8، 21/5، و 14 کیلوگرم بر متر مکعب انجام شدند. نتایج این محققان نشان داد پس از 48 ساعت به جز در عمق 10 سانتی‌متری، غلظت با عمق کاهش یافت. ارزیابی آزمایش‌ها نشان داد کاهش نرخ تحکیم با ارتفاع رسوبات ته‌نشین شده، با افزایش غلظت اولیه کاهش می‌یابد.

در سال‌های اخیر به دلیل خشکسالی‌های مکرر و کمبود منابع آبی ناشی از این شرایط، رویکرد به استفاده از منابع آب تجدید پذیر همچون کاربرد پساب تصفیه شده شهری در جهت تأمین بخشی از منابع آبی مورد نیاز افزایش

مرحله به تدریج آب‌های محبوس شده از لابه‌لای فلوک‌ها خارج شده و بخشی از فلوک‌ها به واسطه نیروی وزن لایه‌های بالایی درهم شکسته و عمل تحکیم آغاز می‌گردد. در مرحله پنجم آب منفذی به دلیل تراکم بیش از حد قادر به تخلیه سریع از لابه‌لای رسوبات نبوده و روند تحکیم در این مرحله کند شده و در صورتی که آزمایش برای مدت طولانی ادامه داشته باشد، عمل تحکیم با روند کندتر صورت می‌گیرد و به آن تحکیم ثانویه نیز می‌گویند. Bloomquist and Townsend (1984) معتقد بودند فرایند ته‌نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده می‌تواند در چهار فاز تحت عناوین فاز استقرار ایستا¹، فاز رسوبگذاری²، فاز ته‌نشینی تاخیری³ و فاز تحکیم تحت وزن خود رسوبات⁴ تقسیم بندی شود. برخی از محققان با ترکیب فاز ته‌نشینی و ته‌نشینی تاخیری، سه مرحله مختلف برای ته‌نشینی رسوبات چسبنده شامل، ناحیه زلال که اغلب شامل آب زلال با ذرات بسیار ریز یا فاقد ذرات جامد است، ناحیه تعلیق (اغلب ناحیه ته‌نشینی نامیده می‌شود) و ناحیه تحکیم معرفی کرده‌اند (Holdich and Butt, 1995, 1996; Coe and Clevenger, 1916; Fitch, 1962; Diplas, 1997) برای بررسی سرعت ته‌نشینی رسوبات یکی از تکنیک‌هایی که توسط اون (1976) توسعه یافت، استفاده از سیلندری با ارتفاع 1 متر و قطر 0/05 متر دارای شیرهای نمونه‌گیری در عمق‌های مختلف است که توزیع سرعت ته‌نشینی رسوبات با استفاده از معادله تعادل جرم ارزیابی گردید. به منظور شناخت پدیده ته‌نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده، علاوه بر روند نشست رسوبات لازم است پارامترهای تحکیم نیز مورد توجه قرار گیرد. محققان مختلف بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و اندازه‌گیری روابط تجربی زیادی را برای بیان پارامترهای تحکیم ارائه نموده‌اند. Carrier and Bromwell (1983) بر مبنای آزمایش‌های ته‌نشینی و تحکیم رس فوسفاتیک فلوریدا در یک مخزن به عمق 6 متر روابط (1) و (2) را به دست آورد:

¹ Stabilization Agglomeration

² Sedimentation

³ Hindered Settling

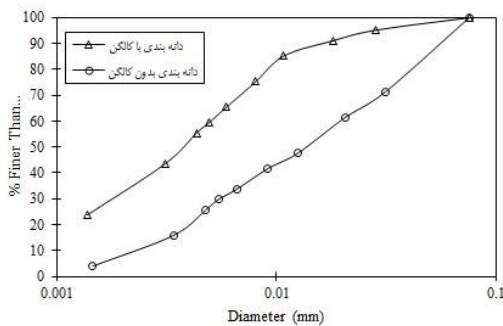
⁴ Self-weight Consolidation

⁵ Lake Lery

رسوبات ریزدانه می‌باشد، رسوبات مورد نظر از الک شماره 200 استاندارد ASTM عبور داده شد. دانه‌بندی رسوبات به روش هیدرومتری در دو حالت با و بدون کالگن که نتایج آن در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 1 نمای کلی از سیلندر ته‌نشینی و تحکیم رسوبات



شکل 2 دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده

اختلاف بین نمودارهای دانه‌بندی با و بدون کالگن نشان دهنده خاصیت چسبندگی رسوبات مورد استفاده می‌باشد. رسوبات عبوری پس از خشک شدن حاوی 24 درصد رس، 76 درصد سیلت و با قطر متوسط 0/004 میلی‌متر بود. پساب مورد نیاز از تصفیه‌خانه شهرکرد تهیه گردید که برخی از خصوصیات آن در جدول 1 قابل مشاهده است.

2-2- مراحل انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر پساب تصفیه‌شده شهری بر فرایند تحکیم از سه غلظت 0، 30 و 60 درصد پساب و غلظت‌های رسوب 200، 300 و 400 گرم بر لیتر استفاده شد. آزمایش‌های ستون ته‌نشینی در دوره‌های تحکیم 1، 3، 14 و 28 روز انجام گرفت. جدول 2 نام و مشخصات آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

یافته است. استفاده از پساب شهری در بخش کشاورزی تاکنون بطور معمول صورت می‌گرفته، اما استفاده برنامه‌ریزی شده و انتقال آن از طریق شبکه‌های آبیاری و اختلاط آن با آب حاوی رسوب چسبنده که از طریق انحراف از رودخانه‌ها صورت می‌گیرد، مشکلات متعددی همچون رسوب‌گذاری ذرات چسبنده در سازه‌های انتقال را افزایش داده است. مواد آلی موجود در پساب شهری و تمایل رسوبات چسبنده به واکنش‌پذیری، باعث تغییر در رفتار رسوبات چسبنده می‌شود. از این رو در این تحقیق تأثیر پساب شهری بر روند ته‌نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده که پیش از این کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. آگاهی از رفتار رسوبات چسبنده و روند تغییرات فرایند تحکیم رسوبات چسبنده موجب اجرای طرح‌های موفق شبکه‌های انتقال و بهره‌برداری اصولی‌تر از آن‌ها می‌شود.

2- مواد و روش‌ها

یکی از روش‌های متداول بررسی فرایند ته‌نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده، استفاده از مدل‌های فیزیکی و انجام آزمایش‌های مربوط می‌باشد. کارهای آزمایشگاهی انجام شده توسط محققان مختلف جهت تعیین روند ته‌نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده، عمدتاً با استفاده از ستون حاوی مخلوط آب و رسوب بوده است (Krizek et al., 1984; Schiffman et al., 1984; Tunguy et al., 1995; Samadi, 2004)

در این تحقیق نیز از ستون‌های ته‌نشینی استفاده شد که نمایی از آن در شکل 1 قابل مشاهده است. ستون‌های ته‌نشینی با توجه به شرایط کانال‌های انتقال طبیعی، با قطر داخلی 6 سانتی‌متر، ارتفاع کلی 60 سانتی‌متر و از جنس پلی اتیلن ساخته شدند. به منظور قرائت و بررسی تغییرات ارتفاع رسوبات، قسمتی از سیلندر با طلق پوشانده شد و شیرهای نمونه‌گیری با فواصل 3 سانتی‌متر از یکدیگر به منظور نمونه‌برداری رسوبات و بررسی خصوصیات فیزیکی آن‌ها، در دیواره ستون‌ها تعبیه شد.

2-1- رسوبات و پساب مورد استفاده

با توجه به هدف تحقیق که بررسی تحکیم و ته‌نشینی

جدول 1 برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پساب و آب آزمایشگاه

ویژگی	واحد	پساب	آب آزمایشگاه	محدوده استاندارد
هدایت الکتریکی	ds/m	1	0/17	-
واکنش (PH)	-	8/07	7/99	6/5 – 9/0
چگالی	Kg/m ³	989/5	997/1	-
غلظت کل جامدات حل شده	mg/L	441	-	2500
پتاسیم	ppm	18	7	بدون حد
سدیم	ppm	92	1	بدون حد
کلسیم	ppm	64	34	-
منیزیم	ppm	25/2	0	100
نیترات	mg/L	15/48	3/96	20-85
اکسیژن خواهی بیولوژیکی (BOD)	mg/L	21	2/61	بدون حد
اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)	mg/L	49	-	200-500
کلراید	mg/L	85	-	600
نسبت جذب سدیم (SAR)	$\left(\frac{\text{momoL}}{\text{L}}\right)^{\frac{1}{2}}$	2/45	0/04	-

جدول 2 شرایط آزمایش‌های ته‌نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده

غلظت اولیه 200 گرم بر لیتر (C ₁)			غلظت اولیه 300 گرم بر لیتر (C ₂)			غلظت اولیه 400 گرم بر لیتر (C ₃)		
نام آزمایش	دوره تحکیم (روز)	درصد پساب (w)	نام آزمایش	دوره تحکیم (روز)	درصد پساب (w)	نام آزمایش	دوره تحکیم (روز)	درصد پساب (w)
C ₁ Cs ₁ W ₀	1	0	C ₂ Cs ₁ W ₀	1	0	C ₃ Cs ₁ W ₀	1	0
C ₁ Cs ₃ W ₀	3	0	C ₂ Cs ₃ W ₀	3	0	C ₃ Cs ₃ W ₀	3	0
C ₁ Cs ₁₄ W ₀	14	0	C ₂ Cs ₁₄ W ₀	14	0	C ₃ Cs ₁₄ W ₀	14	0
C ₁ Cs ₂₈ W ₀	28	0	C ₂ Cs ₂₈ W ₀	28	0	C ₃ Cs ₂₈ W ₀	28	0
C ₁ Cs ₁ W ₃₀	1	30	C ₂ Cs ₁ W ₃₀	1	30	C ₃ Cs ₁ W ₃₀	1	30
C ₁ Cs ₃ W ₃₀	3	30	C ₂ Cs ₃ W ₃₀	3	30	C ₃ Cs ₃ W ₃₀	3	30
C ₁ Cs ₁₄ W ₃₀	14	30	C ₂ Cs ₁₄ W ₃₀	14	30	C ₃ Cs ₁₄ W ₃₀	14	30
C ₁ Cs ₂₈ W ₃₀	28	30	C ₂ Cs ₂₈ W ₃₀	28	30	C ₃ Cs ₂₈ W ₃₀	28	30
C ₁ Cs ₁ W ₆₀	1	60	C ₂ Cs ₁ W ₆₀	1	60	C ₃ Cs ₁ W ₆₀	1	60
C ₁ Cs ₃ W ₆₀	3	60	C ₂ Cs ₃ W ₆₀	3	60	C ₃ Cs ₃ W ₆₀	3	60
C ₁ Cs ₁₄ W ₆₀	14	60	C ₂ Cs ₁₄ W ₆₀	14	60	C ₃ Cs ₁₄ W ₆₀	14	60
C ₁ Cs ₂₈ W ₆₀	28	60	C ₂ Cs ₂₈ W ₆₀	28	60	C ₃ Cs ₂₈ W ₆₀	28	60

شده بر روی جدار سیلندر انجام گرفت. تغییرات عمق رسوبات در 6 ساعت اول هر نیم ساعت یکبار و پس از آن روزی دو بار قرائت شد. همچنین پس از اتمام دوره تحکیم مورد نظر نمونه‌گیری رسوب از شیرهای تعبیه شده در اعماق مختلف انجام و با استفاده از روش خشک کردن و توزین، غلظت در ارتفاع‌های مختلف به دست آمد.

برای انجام آزمایش‌ها ابتدا مخلوط آب و رسوب با غلظت‌های مشخص پساب و رسوب در مخزنی تهیه و پس از آماده‌سازی ستون‌های ته‌نشینی، مخلوط در ستون‌ها ریخته شد که با توجه به اهداف آزمایش، برای هر دوره زمانی تحکیم، از 9 ستون ته‌نشینی به صورت هم‌زمان استفاده شد. قرائت سطح رسوب از طریق نوار مدرج نصب

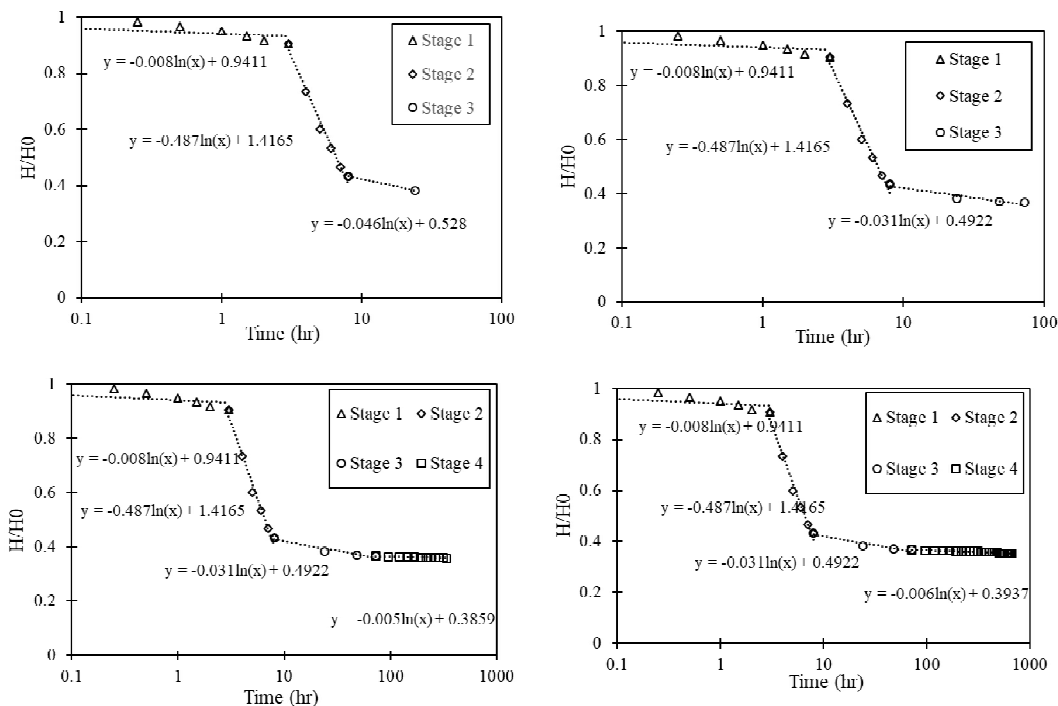
3- نتایج و بحث

3-1- تأثیر زمان بر مراحل تحکیم

نتایج آزمایش‌های ستون ته‌نشینی نشان داد پس از گذشت حدود یک ساعت از شروع آزمایش‌ها، تفکیک عمق رسوب در ستون‌های ته‌نشینی قابل اندازه‌گیری و بررسی روند تحکیم امکان پذیر است. به همین منظور از تغییرات عمق نسبت به عمق اولیه در برابر زمان استفاده شد که بر اساس نتایج بدست آمده، مراحل ته‌نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده به طور نمونه برای غلظت اولیه 300 گرم بر لیتر و آب خالص (بدون پساب) در زمان‌های مختلف تحکیم در شکل 3 ارائه شده است. با توجه به شکل 3 مشخص است در دوره تحکیم‌های 1 و 3 روز فرایند ته‌نشینی به مرحله آخر که تحکیم تحت وزن خود ذرات است نرسیده اما در دوره‌های 14 و 28 روز هر چهار مرحله تحکیم وجود دارد. همچنین قابل مشاهده است که در مرحله سوم از تحکیم که با اصطلاح ته‌نشینی با تأخیر شناخته می‌شود، شیب خط برای تحکیم یک و سه روز متفاوت است، این موضوع نشان می‌دهد که در دوره یک

روز گرچه روند تحکیم وارد مرحله سوم شده اما این مرحله از تحکیم کامل نشده است.

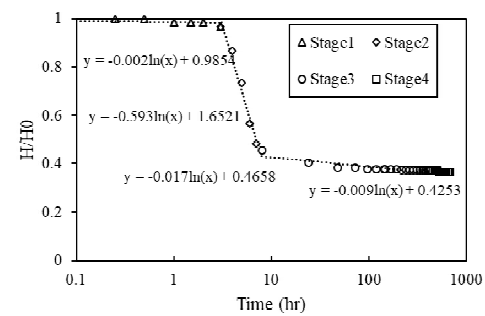
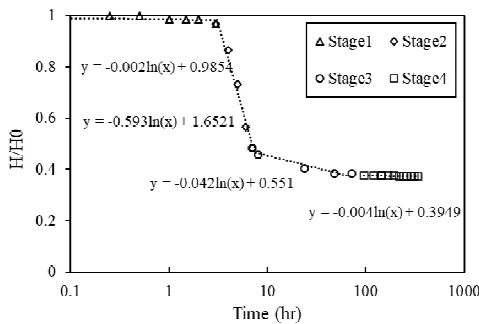
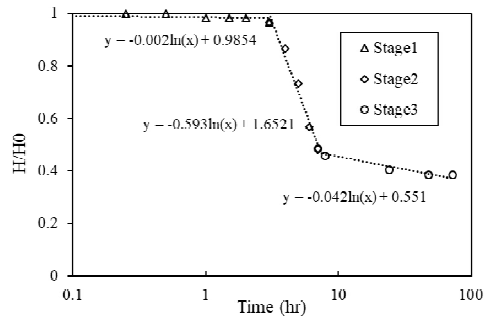
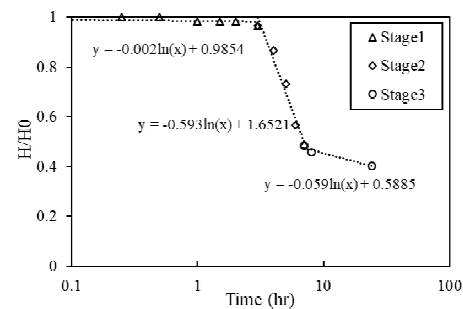
میانگین ضریب a (شیب منحنی) برای غلظت اولیه 300 گرم بر لیتر و شرایط آب خالص (بدون پساب) در دوره تحکیم 28 روز در هر یک از چهار مرحله به ترتیب برابر است با $-0/028$ ، $-0/487$ ، $-0/037$ و $-0/006$ است. در واقع منفی بودن مقادیر نشان دهنده این واقعیت است که نرخ شیب تحکیم در طول زمان کاهش می‌یابد، بنابراین نرخ ته‌نشینی/تحکیم در مرحله دوم بیشینه مقدار و در مرحله آخر زمانی که رسوبات به تحکیم می‌رسند کمینه و در حال ثابت شدن است. با مقایسه شیب مراحل تحکیم برای غلظت ثابت 300 گرم بر لیتر در سطوح مختلف پساب نشانگر این امر است که با درصدهای مختلف پساب در مراحل اول، سوم و چهارم تحکیم، اختلاف معنی‌داری در شیب منحنی ته‌نشینی و تحکیم ملاحظه نشد ولی در مرحله دوم با افزایش پساب شیب منحنی ملایم‌تر شده و این نشان می‌دهد تأثیر پساب در مرحله دوم تحکیم، خودش را نشان داده است.



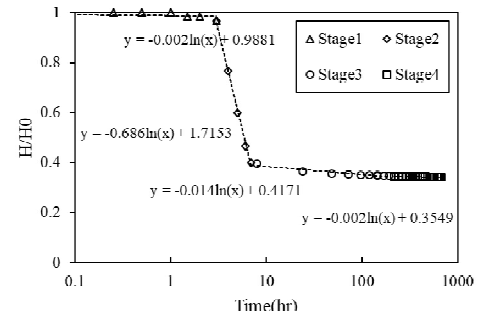
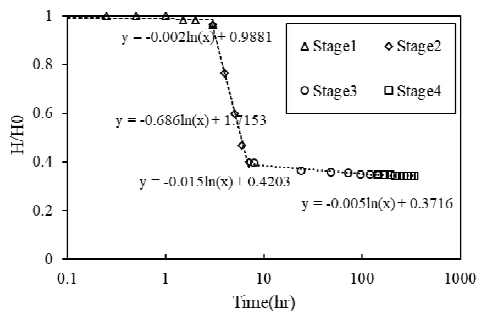
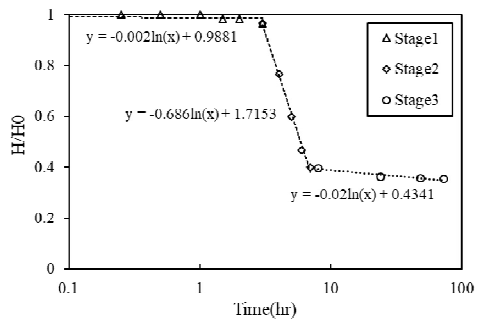
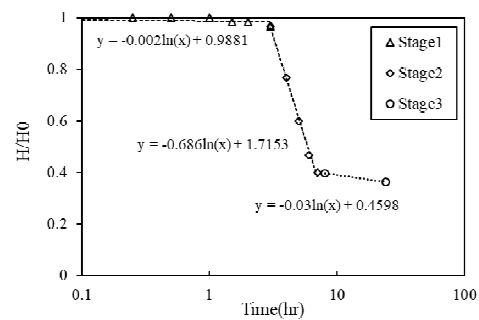
شکل 3 روند ته‌نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده در شرایط سکون بدون حضور پساب در دوره تحکیم‌های 1، 3، 14 و 28 روز

مشابه آب خالص می‌باشد، با این تفاوت که در سیال حاوی پساب (30 و 60 درصد)، مرحله سوم زمان بیشتری طول کشیده و مرحله چهارم تحکیم نسبت به آب خالص دیرتر آغاز شده است.

شکل‌های 4 و 5 نیز بترتیب مراحل ته‌نشینی و تحکیم رسوبات را برای غلظت اولیه 300 گرم بر لیتر و سیال حاوی 30 و 60 درصد پساب نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است، روند تأثیر زمان بر مراحل تحکیم



شکل 4 روند ته‌نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده در شرایط سکون با غلظت پساب 30% در دوره تحکیم‌های 1، 3، 14 و 28 روز



شکل 5 روند ته‌نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده در شرایط سکون با غلظت پساب 60% در دوره تحکیم‌های 1، 3، 14 و 28 روز

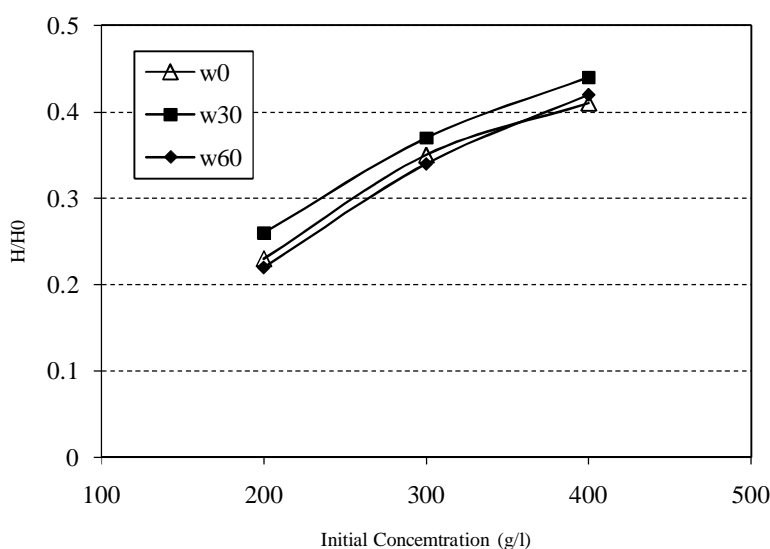
سرعت تغییرات مراحل تحکیم تأثیرگذار است. به همین منظور میانگین شیب خطوط برای غلظت‌های اولیه 200، 300 و 400 گرم بر لیتر برای تمامی آزمایش‌ها در جدول 3 ارائه شده است.

3-2- تأثیر غلظت اولیه بر روند تحکیم رسوبات

شکل 7 تأثیر غلظت اولیه بر روند تحکیم رسوبات را به طور نمونه برای دوره 28 روز نشان می‌دهد.

با این حال همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود مقادیر H/H_0 در غلظت‌های مختلف رسوب برای آب خالص و سیال 60 درصد پساب تقریباً یکسان است اما برای سیال 30 درصد پساب، این مقادیر افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد درصد پساب تأثیر متفاوتی بر تحکیم رسوبات ریزدانه دارد.

لازم به توضیح است که در دیگر غلظت‌های اولیه رسوب، روند و مراحل تحکیم مشابه غلظت اولیه 300 گرم بر لیتر بدست آمد. اما نتایج نشان داد که غلظت اولیه رسوب بر

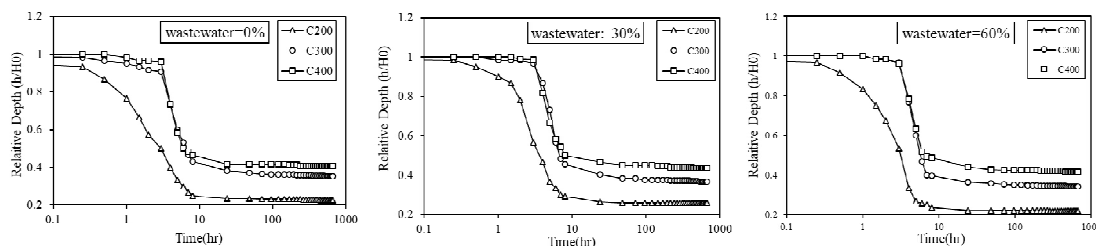


شکل 6 تغییرات H/H_0 در برابر غلظت اولیه رسوبات و مقادیر مختلف پساب

جدول 3 میانگین شیب خطوط مراحل تحکیم رسوبات در غلظت‌های مختلف رسوب و پساب

مرحله سوم	مرحله دوم		مرحله اول		غلظت اولیه رسوب (g/l)	درصد پساب				
	H/H_0	شیب	H/H_0	شیب			H/H_0	شیب		
0/23	-0/004	0/25	-0/095	0/33	-0/256	0/77	-0/1	200	w_0	
0/35	-0/006	0/37	-0/037	0/43	-0/487	0/91	-0/028			300
0/41	-0/005	0/42	-0/038	0/50	-0/672	0/96	-0/013			400
0/26	-0/005	0/29	-0/135	0/47	-0/368	0/9	-0/046	200	w_{30}	
0/37	-0/006	0/38	-0/045	0/48	-0/581	0/97	-0/009			300
0/44	-0/008	0/45	-0/023	0/54	-0/541	0/99	-0/005			400
0/22	-0/003	0/22	-0/051	0/33	-0/348	0/83	-0/071	200	w_{60}	
0/34	-0/007	0/36	-0/025	0/40	-0/651	0/97	-0/009			300
0/42	-0/004	0/43	-0/0365	0/52	-0/615	0/96	-0/009			400

* مقادیر H/H_0 مربوط به انتهای بازه مورد نظر می‌باشد.



شکل 7 تأثیر غلظت اولیه رسوبات بر مراحل تحکیم در غلظت‌های مختلف پساب

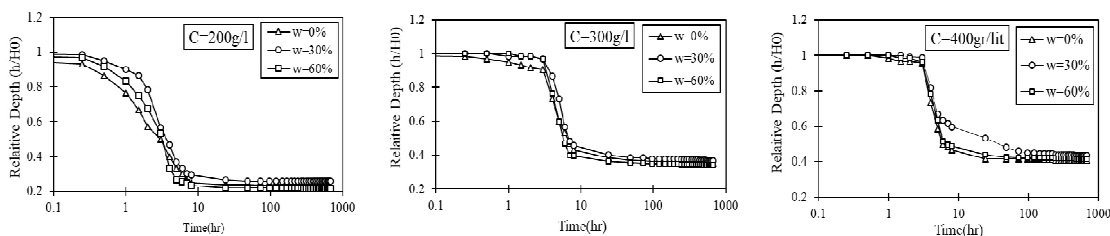
مقادیر (H/H_0) بیشتر از حالت‌های بدون پساب و 60 درصد پساب است. در غلظت‌های اولیه 300 و 400 گرم بر لیتر نیز تغییرات به همین ترتیب است با این تفاوت که با افزایش غلظت اولیه، اختلاف عمق رسوب در سیال 30 درصد پساب با آب خالص و سیال 60 درصد، کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان در خصوصیات الکتروشیمیایی سیال و تأثیر آن بر فرایند همآوری رسوبات چسبنده جستجو کرد.

3-3- تأثیر پساب بر روند تحکیم رسوبات

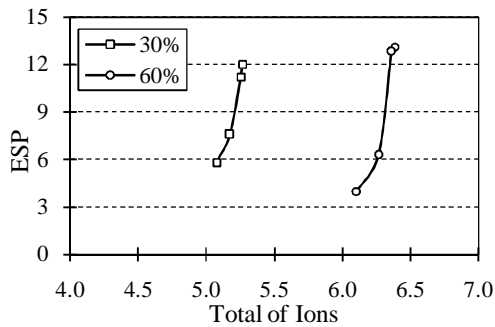
شکل 8 تأثیر پساب تصفیه شده شهری بر روند تحکیم رسوبات چسبنده را در غلظت‌های یکسان نشان می‌دهد. قابل مشاهده است در تمام غلظت‌ها منحنی سیال حاوی 30 درصد پساب بالاتر قرار می‌گیرد و این موضوع در غلظت‌های پایین مشهودتر است. البته در بحث تحکیم ثانویه، پارامتری که اهمیت دارد سرعت تحکیم و به عبارت دیگر شیب منحنی تحکیم است. در تمامی شکل‌های مورد بحث، شیب سیال دارای 30% پساب، با دو سیال دیگر تفاوتی ندارد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش غلظت اولیه موجب می‌شود منحنی تغییرات (H/H_0) به سمت بالا جابه‌جایی داشته باشد. نتایج نشان می‌دهد برای آب خالص غلظت اولیه رسوبات تا 300 گرم بر لیتر بر فرایند تحکیم تأثیرگذار است؛ به طوری که تفاوت چندانی بین غلظت اولیه 300 تا 400 گرم بر لیتر مشاهده نمی‌شود. برای سیال حاوی 30 و 60 درصد پساب نیز تغییرات به همین ترتیب است. اما قابل مشاهده است که در مرحله پایانی فرایند تحکیم اختلاف بین منحنی‌های غلظت 300 و 400 گرم در سیال حاوی پساب نسبت به اختلاف این دو منحنی در آب خالص بیشتر است نکته قابل توجه این که در سیال حاوی پساب منحنی‌های 300 و 400 گرم بر لیتر از پایان مرحله دوم و در مرحله تحکیم وزنی تغییر پیدا کرده‌اند و پیش از آن غلظت اولیه رسوبات تقریباً بی‌تأثیر بوده است.

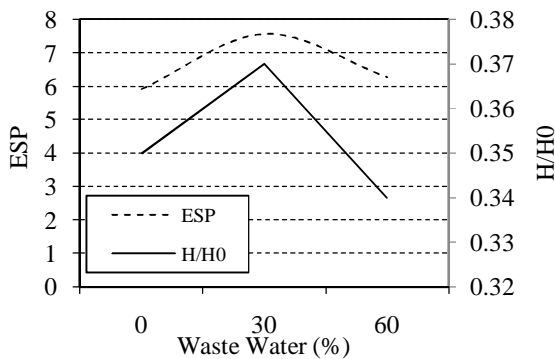
با توجه به مقادیر متوسط (H/H_0) در جدول 3 می‌توان اظهار نمود که در غلظت اولیه 200 گرم بر لیتر، در مراحل اول و دوم، حضور پساب موجب پراکنش ذرات رسوبی گردیده و پس از آن رسوبات بیشتر تحکیم شدند. در تمام مراحل تحکیم برای سیال حاوی 30 درصد پساب



شکل 8 تأثیر پساب بر مراحل تحکیم در غلظت‌های مختلف رسوب



شکل 9 بررسی تغییرات شاخص پراکندگی رسوبات در سیال حاوی رسوب



شکل 10 تغییرات مقادیر ESP و H/H_0 در مقادیر مختلف پساب

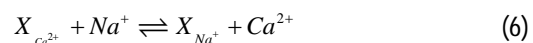
به منظور اطمینان بیشتر از تأثیر پدیده پراکندگی در عمق رسوبات در پایان دوره تحکیم، مقادیر پوکی و دانه‌بندی رسوبات (بدون حضور کالگن) تهیه و نتایج به ترتیب در شکل‌های 11- الف و ب ارائه شده است. قابل مشاهده است میزان پوکی در رسوبات سیال حاوی 30 درصد پساب بیشتر از آب خالص و 60 درصد پساب است. همچنین با توجه به منحنی دانه‌بندی مشخص است که در سیال حاوی 30 درصد پساب قطر ذرات بیشتر از 60 درصد پساب است که این موضوع نشان می‌دهد به دلیل پراکنده‌تر بودن محلول حاوی 30 درصد پساب، درصد میزان ذرات ریز ته‌نشین شده کمتر از محلول 60 درصد پساب است. به عبارت دیگر میزان ذرات معلق در محلول بالای قسمت ته‌نشین شده در ستون حاوی 30 درصد پساب بیشتر است.

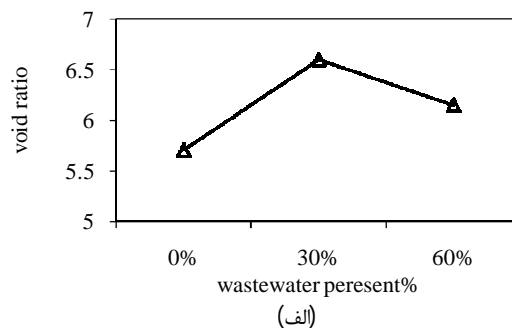
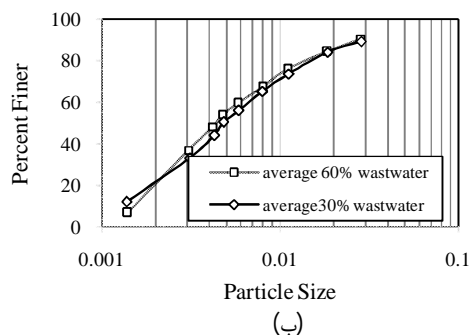
نکته قابل توجه دیگر این که در تمام غلظت‌های اولیه منحنی تغییرات (H/H_0) برای سیال حاوی 60 درصد پساب تا میانه مرحله دوم از آب خالص بالاتر قرار می‌گیرد و پس از آن تغییرات (H/H_0) پایین‌تر از آب خالص قرار می‌گیرد و رفتاری کاملاً مخالف با سیال حاوی 30 درصد پساب دارد. با افزایش پساب شیب منحنی در مرحله دوم تحکیم، برای تمام غلظت‌ها ملایم‌تر شده است که بیانگر این است که تأثیر پساب در مرحله دوم تحکیم خودش را نشان داده است. بر اساس آزمون F فیشر این اختلاف‌ها در سطح 1 و 5 درصد معنی دار نیستند.

3-4- تأثیر خصوصیات شیمیایی بر فرایند تحکیم ته‌نشینی

به منظور ارزیابی رفتار متفاوت رسوبات چسبنده در سیال حاوی 30 درصد پساب، خصوصیات شیمیایی عصاره اشباع رسوبات در پایان آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور از شاخص ESP که نشانگر پراکندگی ذرات می‌باشد، استفاده شد. میزان ESP در مقابل کل یون‌ها برای عصاره اشباع 30 و 60 درصد تهیه و در شکل 9 ارائه شده است. بر اساس یافته‌های محققان مقادیر یونی هر خاکی که به محور ESP نزدیکتر باشد، اصطلاحاً پراکنده‌تر است (زهکشی اراضی، علیزاده). بر این اساس می‌توان دریافت که رسوبات در قسمت بالای منطقه ته‌نشین شده در سیال حاوی 30 درصد پساب از پراکندگی بیشتری برخوردار هستند و این امر موجب عمق بیشتر رسوبات در دوره‌های مختلف تحکیم است.

به منظور بررسی بیشتر متوسط مقادیر شاخص ESP برای درصدهای مختلف پساب و در پایان تحکیم 28 روز تهیه شد که نتایج در شکل 10 ارائه شده است. قابل مشاهده است که روند تغییرات H/H_0 برای درصدهای مختلف پساب با تغییرات شاخص ESP یکسان است. علت پدیده پراکنش در سیال حاوی 30 درصد پساب را می‌توان با جانشینی کلسیم به جای یون سدیم در ذرات رسی توجیه نمود که جانشینی کلسیم با سدیم بر اساس غلظت کاتیون‌ها با توجه به معادله گاپن (6) می‌باشد.





شکل 11 الف) منحنی دانه‌بندی رسوبات در سیال حاوی پساب پس از پایان دوره تحکیم، ب) تغییرات پوکی رسوبات در غلظت‌های مختلف پساب

خالص ندارد.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی سطوح مختلف پساب بر فرایند ته‌نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده پرداخته شده است. نتایج این تحقیق نشان داد زمان لازم برای تکمیل سه فاز اول تحکیم حدوداً 4 روز است که بر این اساس در آزمایش‌های یک و سه روز مرحله چهارم فرایند تحکیم که تحکیم وزنی است، صورت نمی‌گیرد. به طور کلی می‌توان بیان داشت که با افزایش غلظت رسوبات مقدار پارامتر H/H_0 کاهش می‌یابد و این روند نه تنها بر فرایند تحکیم، بلکه بر کل فرایند رسوب‌گذاری حاکم است. با بررسی شاخص پخشیدگی (ESP) مشخص شد که رسوبات در سیال 30 درصد پساب نسبت به سیال 60 درصد از پراکندگی بیشتر برخوردار هستند. به طوری که این موضوع در تغییرات پوکی و منحنی دانه‌بندی رسوبات نیز مشهود بود. از اینرو رفتار متفاوت رسوبات در سیال 30 درصد پساب را می‌توان با خصوصیات شیمیایی سیال و مقادیر کاتیون و آنیون‌ها در ارتباط دانست؛ چرا که نتایج نشان داد روند تغییرات H/H_0 در پایان دوره 28 روز برای درصدهای مختلف پساب با تغییرات شاخص ESP یکسان است.

در حقیقت بالاتر بودن پخشیدگی در سیال 30 درصد پساب موجب می‌شود تا فاز بالای قسمت ته‌نشین شده شامل ذرات ریز بیشتری نسبت به ستون‌های آب خالص و پساب 60 درصد باشد. از اینرو با توجه به نتایج می‌توان استنباط نمود که درصد پساب تا حدی می‌تواند موجب بالا رفتن ESP گردد و از حدی به بعد دیگر تفاوتی با آب

5- فهرست علائم

BOD	اکسیژن خواهی بیولوژیکی
C	غلظت
COD	اکسیژن خواهی شیمیایی
C_s	تحکیم
e	پوکی
ESP	درصد سدیم قابل تبادل
H/H_0	نسبت عمق ته‌نشینی به عمق کل
k	نفوذ پذیری
pH	اسیدیته
SAR	نسبت جذب سدیم
W_0	سیال بدون پساب (آب خالص)
W_{30}	سیال حاوی 30 درصد پساب
W_{60}	سیال حاوی 60 درصد پساب
ΔH	فشار آب منفذی
δ'	تنش مؤثر

6- منابع

- [1] علیزاده، ا. (1383). *زهکشی اراضی* (چاپ ششم)، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
- [2] وجدانی، ن. و قمشی، م. (1385). "تنش‌برشی بحرانی فرسایش رسوبات چسبنده و نقش آن در طراحی کانال‌های باز". همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- [3] Amelia, V.C.M. Teixeira, C.F.J. and Senhorinha. (2010). "Physical characterization

- [12] Holdic, R.H. and Butt, G. (1996). Compression and channeling in gravity sedimenting systems". *Minerals Engineering*, 9: 115-131.
- [13] Huang, J., Hilldate, R.C., Greiman, B.P. (2006). "Erosion and sedimentation manual". U.S. Department of the interior. United States Bureau of Reclamation.
- [14] Krizek, R.J. and Somogyi, F. (1984). "Perspective on modeling consolidation of dredged materials". ASCE Symposium on Sedimentation/Consolidation Models, San Francisco.
- [15] Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1979). "Soil mechanics". SI version. John Wiley and Sons, New York.
- [16] Milburn, D. and Krishnappan, B.G. (2001). "Modeling erosion and deposition of cohesive sediment from Hay River". Northwest Territories, Canada. Paper presented at the 13th Northern Res. Basins/Workshop, Aug. 19-24.
- [17] Morris, G.L. and Fan, J. (1998). "Reservoir Sedimentation Handbook". McGraw-Hill Pub., New York.
- [18] Partheniades, E. (2009). "Cohesive Sediments in Open Channels". (1st Ed), Elsevier Inc, Burlington, USA.
- [19] Samadi-Boroujeni, H. (2004). "Modelling of Sedimentation/consolidation of cohesive sediments". Ph.D. Thesis, Shahid Chamran University, Iran.
- [20] Schiffman, R.L. Pane, V. and Gibson, R.E. (1984). "An overview of nonlinear finite strain sedimentation and consolidation". ASCE Symposium on Sedimentation/ Consolidation Models, San Francisco.
- [21] Tanguy, J.M. and Rouas, G. (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.
- [4] Bloomquist, D.G. and Townsend, F.C. (1984). "Centrifugal modeling of phosphatic clay consolidation". ASCE Symposium on Sedimentation/Consolidation Models, San Francisco.
- [5] Carrier, W.D. and Bromwell, L.G. (1983). "Disposal and Reclamation of Mining and Dredging Wastes". Proceedings of the Seventh Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vancouver, Canada.
- [6] Coe, H.S. and Clevenger, G.H. (1916). "Methods for determining the capacities of slimes settling tanks". *Transactions of the American Institute of Mining Engineers*, 55: 356-384.
- [7] Diplas, P. and Papanicolaou, A.N. (1997). "Batch analysis of slurries in zone settling regime". *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 123(7): 659-667.
- [8] Edward, L. and Bentley, S.J. (2014). "Experimental study of cohesive sediment consolidation and resuspension identifies approaches for coastal restoration: Lake Lery, Louisiana". *Geo Marine Letters*.
- [9] Fedrico M. (2005). "Flocculation dynamics of cohesive sediment". *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering' of the Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology*.
- [10] Fitch, B. (1962). "Sedimentation process fundamentals". *Transactions of the American Institute of Mining Engineers*. 55: 129-137.
- [11] Holdic, R.H. and Butt, G. (1995). "An experimental study of channeling and soil concentration during the batch sedimentation of calcite suspension". *Transactions of the Institution of Chemical Engineering*, 73(7): 833-841.