

# بررسی کارایی ته‌نشین کننده لوله‌ای شیب‌دار چند مرحله‌ای در کاهش کدورت آب

عباس شویدی<sup>۱</sup>      علی اکبر عظیمی<sup>۲</sup>      غلامرضا نبی بیدهندی<sup>۳</sup>  
مجتبی فاضلی<sup>۴</sup>      غلامرضا اسدالله‌فردی<sup>۵</sup>

(دریافت ۸۸/۹/۲۵ پذیرش ۸۹/۴/۲۰)

## چکیده

کاهش قطر لوله‌ها در ته‌نشین کننده‌های لوله‌ای باعث بهبود کارایی آنها می‌شود. اما به دلیل احتمال گرفتگی، کاهش قطر آنها محدودیت دارد. در این تحقیق امکان بهبود کارایی ته‌نشین کننده‌های لوله‌ای به وسیله کاهش قطر لوله‌ها بررسی شد. مطالعات نظری نشان داد که اگر در حجم ثابت، ته‌نشین کننده‌های لوله‌ای به صورت چند مرحله‌ای مورد استفاده قرار گیرند و قطر لوله‌ها در مرحله آخر کاهش داده شود، کارایی بهبود می‌یابد. همچنین شرایط هیدرولیکی برای ته‌نشینی در واحدهای چند مرحله‌ای، از واحد یک مرحله‌ای مناسب‌تر است. نتایج مطالعات پایلوتی صورت گرفته، نظریه بالا را تأیید نمود. واحد ته‌نشینی لوله‌ای یک و دو مرحله‌ای در حجم یکسان، برای حذف کدورت ناشی از خاک رس از آب، در مرحله اول بدون انجام فرایند انعقاد و لخته‌بندی و در مرحله دوم با انجام فرایند انعقاد و لخته‌بندی، مورد استفاده قرار گرفتند. قطر لوله‌ها در ته‌نشین کننده یک مرحله‌ای ۵ سانتی‌متر و در مرحله اول و دوم ته‌نشین کننده دو مرحله‌ای به ترتیب ۵ و ۱/۲ سانتی‌متر بود. نتایج حاصل نشان داد که کارایی واحد ته‌نشینی دو مرحله‌ای نسبت به واحد یک مرحله‌ای در حذف کدورت آب در هر دو مرحله آزمایش‌ها بیشتر است. همچنین در طول آزمایش‌ها، گرفتگی ناشی از تجمع رسوبات در لوله‌های ته‌نشین کننده دو مرحله‌ای مشاهده نگردید.

واژه‌های کلیدی: تصفیه آب، ته‌نشینی، ته‌نشین کننده لوله‌ای چند مرحله‌ای، انعقاد، کدورت

## Application of Multi-stage Inclined Tube Settlers for Water Turbidity Removal

Abbas Shevidi<sup>1</sup>      Ali Akbar Azimi<sup>2</sup>      Gholamreza Nabi Bidhendi<sup>3</sup>  
Mojtaba Fazeli<sup>4</sup>      Gholamreza Asadollahfardi<sup>5</sup>

(Received Dec. 16, 2009    Accepted July 11, 2011)

### Abstract

The efficiency of particle settling in tube settlers can be improved by reducing tube diameter; however, this has limits due to the clogging at low diameters. In this study, effect of reduced tube diameters on enhanced efficiency of tube settlers was investigated. This improvement was achieved by staging of the operation and reducing tube diameter in the last stage of the multi-stage tube settlers. Theoretical analysis indicated that the efficiency of tube settlers would improve if tube settlers were used in different stages in series and that if their diameter was reduced in the last stage. The predictions from the theoretical analysis were tested in a pilot study. One- and two-stage tube settler pilot plants were used to remove water turbidity caused by clay in the first and second phases of tests with and without adding coagulant, respectively. The tube diameter in the one-stage tube settler were 5.0 cm, and those in those the first and second stages of the two-stage tube settler were 5.0 and 1.2 cm, respectively. The results of both phases showed that the two-stage tube settler was more efficient than the one-stage for turbidity removal with no clogging observed because the majority of the particles had been removed in the first stage.

**Keywords:** Water Treatment, Sedimentation, Multi-stage Tube Settler, Coagulation, Turbidity.

- 1.Ph.D. Student, Dept. of Environmental Eng., University of Tehran, and Faculty Member of Water Eng., Power and Water University of Technology, Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 73932471 shevidi@pwut.ac.ir
- 2.Assist. Prof., Dept. of Environmental Eng., Azad University, Branch of Ahar
- 3.Assoc. Prof., Dept. of Environmental Eng., University of Tehran, Tehran
- 4.Assist. Prof., Dept. of Water Eng., Power and Water University of Technology, Tehran
- 5.Assist. Prof. of Environmental Eng., Dept. of Eng., Tarbiat Moallem University, Tehran

- ۱- دانشجوی دکتر، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی آب، دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور، تهران (نویسنده مسئول) (+۹۸ ۲۱) ۷۳۹۳۲۴۷۱ shevidi@pwut.ac.ir
- ۲- استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران و دانشگاه آزاد اسلامی اهر
- ۳- دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران
- ۴- استادیار دانشکده مهندسی آب، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، تهران
- ۵- استادیار گروه محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربیت معلم، تهران

مخازن ته‌نشینی پر بار به دلیل سطح کم و کارایی زیاد، کاربرد وسیعی در صنعت تصفیه آب و فاضلاب دارند. ترابیان و هدایی طی مطالعات صورت گرفته در مقیاس واقعی، دریافته‌اند که استفاده از ته‌نشین کننده پر بار، زمان ماند حوض ته‌نشینی برای تصفیه آب زاینده‌رود را یک چهارم تا یک سوم کاهش می‌دهد [۱۱ و ۱۲]. همچنین در دو تحقیق مجزای دیگر در مقیاس پایلوت، نتایج مشابهی به دست آمده است [۱۳ و ۱۴].

به‌طور معمول از ته‌نشین کننده‌های لوله‌ای به‌صورت یک مرحله‌ای و با آرایش موازی استفاده می‌شود [۱۵]. اما تکنیک مرحله‌ای کردن در برخی عملیات و فرایندهای تصفیه مانند صافی‌سازی چندمرحله‌ای، راکتورهای بیولوژیکی اختلاط کامل و عملیات شناورسازی، معمول بوده و باعث بهبود کارایی می‌گردد [۱۶-۱۸]. ایده این تحقیق نیز مرحله‌ای کردن عملیات ته‌نشینی و کاهش قطر لوله در مراحل دوم به بعد بود. مطابق رابطه ۱ با کاهش قطر لوله‌ها کارایی واحد ته‌نشینی لوله‌ای افزایش می‌یابد، اما به دلیل امکان گرفتگی در ته‌نشین کننده‌های متعارف، قطر لوله‌ها بیش از پنج سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود [۱۵]. بنابراین در مرحله اول، قطر لوله‌ها می‌تواند پنج سانتی‌متر در نظر گرفته شود تا از گرفتگی جلوگیری گردد و در مراحل بعدی قطر کاهش داده می‌شود. اما مرحله‌ای کردن باعث افزایش سرعت جریان در لوله‌ها می‌شود که بر کارایی اثر منفی دارد. به‌منظور تعیین برآیند دو عامل بالا، در این تحقیق ابتدا به‌کمک روابط نظری، کارایی ته‌نشین کننده لوله‌ای چندمرحله‌ای با ته‌نشین کننده‌های متعارف یک مرحله‌ای مقایسه گردید. سپس عملکرد ته‌نشین کننده چندمرحله‌ای با ساخت واحدهای ته‌نشینی یک و دومرحله‌ای در مقیاس نیمه صنعتی مطالعه شد.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- واحدهای پایلوت ته‌نشینی لوله‌ای

در این تحقیق، مطالعه بر روی واحد پایلوت ته‌نشین کننده لوله‌ای یک و دو مرحله‌ای انجام گردید. در شکل ۱ طرح واحد پایلوت ته‌نشینی لوله‌ای دو مرحله‌ای نشان داده شده است. واحد ته‌نشینی دو مرحله‌ای از دو مرحله ته‌نشین کننده لوله‌ای با جریان هم‌جهت و به‌صورت پشت سرهم، تشکیل شد. بدنه اصلی ته‌نشین کننده از لوله با جنس پلی‌وینیل کلرید<sup>۱۵</sup> به قطر ۲۰ سانتی‌متر ساخته شده و با زاویه ۴۵ درجه نصب گردید. در داخل بدنه اصلی، لوله‌هایی با قطر

عملیات ته‌نشینی در تصفیه آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حدود یک سوم از هزینه سرمایه‌گذاری برای یک تصفیه‌خانه متعارف آب، مربوط به عملیات ته‌نشینی است [۱]. براساس قانون هیزن<sup>۱</sup> کارایی یک حوض ته‌نشینی به سطح افقی حوض بستگی داشته و با افزایش سطح افقی که متناظر با کاهش نرخ بار سطحی<sup>۲</sup> است، کارایی بهبود می‌یابد. این هدف با افزودن لوله‌های موازی به حوض ته‌نشینی امکان‌پذیر است. به این مخازن ته‌نشینی، ته‌نشین کننده لوله‌ای<sup>۳</sup> گفته می‌شود. افزودن این لوله‌ها، کاهش عدد رینولدز و افزایش عدد فرود<sup>۴</sup> را نیز در پی دارد. کاهش عدد رینولدز باعث نزدیک تر شدن رژیم جریان به رژیم آرام<sup>۵</sup> گردیده و افزایش عدد فرود باعث پایداری بیشتر جریان می‌شود. این مطلب اساس کار حوض‌های ته‌نشینی پر بار<sup>۶</sup> را تشکیل می‌دهد [۱-۴].

معمولاً لوله‌ها با زاویه ۴۵ تا ۶۰ درجه نصب می‌شوند. مواد ته‌نشین شده در این زاویه به لوله نچسبیده و به پایین می‌لغزند و در نتیجه عمل لجن‌روبی به‌شکل خودکار صورت می‌گیرد [۴]. در ته‌نشین کننده‌های لوله‌ای، آب و رسوبات به دو صورت می‌توانند نسبت به هم جریان داشته باشند: متقابل<sup>۷</sup> و هم‌جهت<sup>۸</sup>. نحوه جریان هم‌جهت این مزیت را ایجاد می‌کند که لجن‌روبی خودبه‌خودی بهتر انجام شده و امکان نصب لوله‌ها با زاویه کمتر از ۶۰ درجه فراهم می‌آید [۵]. سارکار و همکاران<sup>۹</sup> برای ته‌نشین کننده با جریان متقابل، زاویه بهینه را ۴۵ درجه تعیین نمودند [۶].

عوامل مؤثر بر کارایی ته‌نشین کننده لوله‌ای عبارت‌اند از طول، زاویه و قطر لوله‌ها، سرعت متوسط جریان و سرعت سقوط ذرات [۷ و ۱۰].

$$V_s (\sin \theta - \frac{L}{d} \cos \theta) = V_a \quad (1)$$

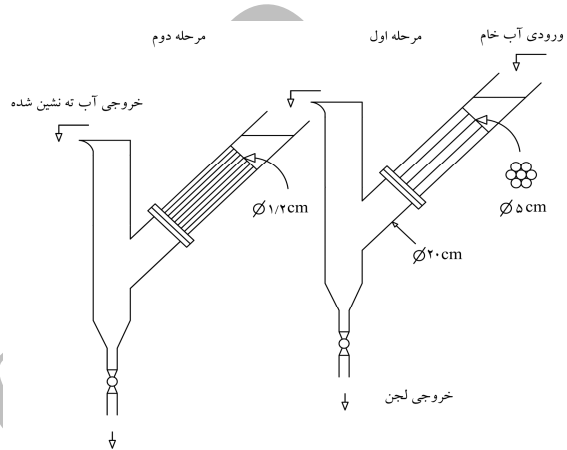
که در آن

$V_s$  سرعت سقوط ذره برحسب متر در ثانیه،  $\theta$  زاویه نصب لوله‌ها،  $L$  طول لوله‌ها برحسب متر،  $d$  قطر لوله‌ها برحسب متر، و  $V_a$  سرعت متوسط جریان برحسب متر در ثانیه است. محققانی چون یائو<sup>۱۰</sup>، ویلیس<sup>۱۱</sup>، فادل<sup>۱۲</sup>، بامن<sup>۱۳</sup> و زیولو<sup>۱۴</sup> در کارهای خود رابطه اساسی فوق را مورد اصلاح قرار داده‌اند [۸-۱۰].

- 1 Hazen's Law
- 2 Surface Loading Rate
- 3 Tube Settler
- 4 Froude Number
- 5 Laminar
- 6 High Rate Settling Tanks
- 7 Counter-current
- 8 Co-current
- 9 Sarkar et al.
- 10 Yao
- 11 Willis

<sup>12</sup> Fadel  
<sup>13</sup> Baumann  
<sup>14</sup> Ziolo  
<sup>15</sup> Poly Vinyl Chloride (PVC)

کمتربه‌طور موازی و از جنس PVC پر شده بود. طول همه این لوله‌ها ۶۰ سانتی‌متر بود. قطر این لوله‌ها در واحد اول، ۵ و در دومین واحد ۱/۲ سانتی‌متر بود. در هر مرحله، سطح بالایی لوله ورودی (بنده اصلی) کمی بالاتر از لوله خروجی در نظر گرفته شد، لذا با توجه به افت فشار کم در واحد، آب به راحتی در آن جریان می‌یافت. واحدها بر روی یک چارچوب فلزی نصب شده بودند و ارتفاع نصب آنها به‌گونه‌ای بود که جریان خروجی از مرحله اول به مرحله دوم سرریز کند. واحد ته‌نشینی یک مرحله‌ای (شاهد) از نظر ابعاد و جنس، همانند مرحله اول از واحد دوم مرحله‌ای بود و قطر لوله‌های داخل آن نیز ۵ سانتی‌متر بود.



شکل ۱- طرح واحد پایلوت ته‌نشینی پربار دو مرحله‌ای

قبل از انجام آزمایش‌ها ابتدا امکان‌پذیری نظریه ته‌نشینی لوله‌ای چندمرحله‌ای به‌کمک معادلات حاکم بررسی شد. به این منظور قطر ذرات قابل ته‌نشینی در واحدهای ته‌نشینی لوله‌ای متعارف و چندمرحله‌ای محاسبه و مقایسه شد. در این محاسبات سرعت متوسط جریان داخل لوله‌ها از رابطه زیر به‌دست آمد

$$V_a = \frac{L}{t} \quad (2)$$

که در این رابطه

$t$  زمان ماند در واحد ته‌نشینی و در هر لوله بر حسب ثانیه است. سرعت سقوط ذراتی که به‌طور کامل در واحد ته‌نشینی حذف می‌شود از رابطه ۱ به‌دست آمد و قطر ذراتی که به‌طور کامل حذف شده و دارای سرعت ته‌نشینی معادل  $V_s$  هستند از رابطه استوکس و با فرض کروی بودن ذرات و برای اعداد رینولدز کمتر از یک محاسبه شد [۲]

$$V_s = \frac{g(S_p - S_w)d_p^2}{18\nu} \quad (3)$$

که در این رابطه  $S_p$  چگالی ذره ته‌نشین شونده،  $S_w$  چگالی آب،  $d_p$  قطر ذره بر حسب متر، و  $\nu$  گرانشی سینماتیک آب بر حسب متر مربع بر ثانیه است. در محاسبات انجام شده، با توجه به آن که ابعاد واحدهای ته‌نشینی در هر مرحله یکسان بود، سرعت متوسط در واحد ته‌نشینی کننده دو مرحله‌ای، دو برابر یک مرحله‌ای و در واحد سه مرحله‌ای، سه برابر واحد تک مرحله‌ای، در نظر گرفته شد. همچنین با فرض آن که در واحدهای ته‌نشینی مرحله‌ای، مرحله آخر تعیین‌کننده کارایی کلی واحد است، رابطه ۳ برای مرحله دوم در واحد ته‌نشینی دوم مرحله‌ای و مرحله سوم در واحد سه مرحله‌ای به‌کار رفت.

همچنین به‌منظور مطالعه اثر مرحله‌ای کردن عملیات ته‌نشینی بر شرایط هیدرولیکی جریان در لوله‌ها، عدد رینولدز با استفاده از رابطه ۴ و عدد فرود با استفاده از رابطه ۵ برای ته‌نشینی کننده لوله‌ای متعارف و مرحله آخر ته‌نشینی کننده چندمرحله‌ای محاسبه و با هم مقایسه گردید [۲]

$$Re = \frac{V_a d}{\nu} \quad (4)$$

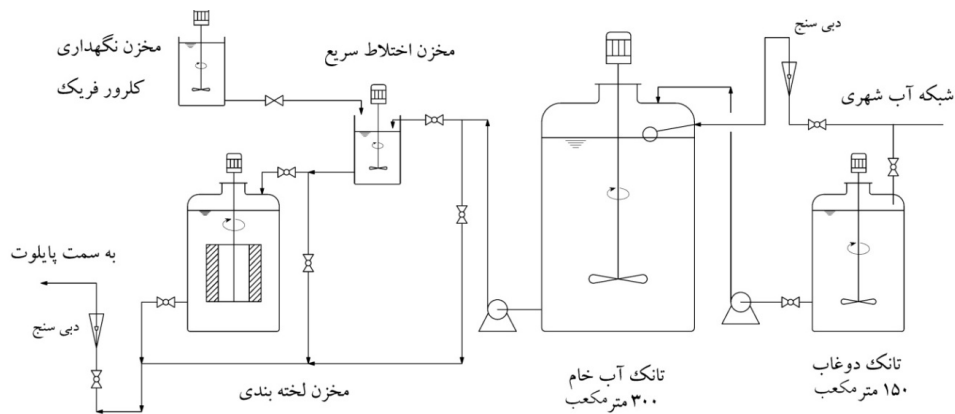
که در آن  $Re$  عبارت است از عدد رینولدز جریان

$$Fr = \frac{2V_a^2}{gd} \quad (5)$$

که در آن  $Fr$  عدد فرود جریان است.

## ۲-۲- واحد تهیه آب خام و انعقاد و لخته‌بندی

در شکل ۲ طرح واحد تهیه آب خام و انعقاد و لخته‌بندی نشان داده شده است. آب خام ورودی به واحدهای ته‌نشینی به‌طور مصنوعی تهیه شد و برای ایجاد کدورت از خاک رس مورد استفاده در بنایی استفاده گردید. به‌منظور ایجاد شرایط یکسان در دفعات مختلف بهره‌برداری از پایلوت، ابتدا خاک رس از الک شماره ۲۰۰ استاندارد، عبور داده شده و در یک ظرف با آب شبکه شهری مخلوط شد و سپس به‌داخل مخزن دوغاب ریخته شد. اندازه ذرات خاک به‌روش هیدرومتری تعیین گردید [۱۹]. حدود ۸۰ درصد مواد کدورت‌زا، دارای قطر معادل یک تا ۷۵ میکرون، ۹/۵ درصد کوچک‌تر از یک میکرون و ۱۰/۴ درصد بزرگ‌تر از ۷۵ میکرون بود. با توجه به آنکه ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر، در گروه رس، ذرات از ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۲ میلی‌متر در گروه سیلت و ذرات بزرگ‌تر از آن در گروه ماسه طبقه‌بندی می‌شود، لذا با توجه به اندازه ذرات، این خاک مخلوطی از رس، سیلت و ماسه ریز بود [۲۰]. کدورت دوغابی که از این خاک تهیه شد، بین ۲۰۰ تا



شکل ۲- تأسیسات تهیه آب خام و انعقاد و لخته‌بندی

به ترتیب معادل ۷/۵، ۳/۹ و ۵/۱۱ میلی‌گرم در لیتر برحسب  $Fe^{3+}$  به دست آمد.

حجم مفید مخزن اختلاط سریع، ۱۰ لیتر و حجم مفید مخزن لخته‌بندی، ۳۰۰ لیتر بود. هر دو تانک مجهز به همزن دور متغیر بوده و حجم آنها نیز قابل تنظیم بود. با توجه به آن که کارایی مخازن انعقاد و لخته‌بندی به حاصل ضرب گرادیان سرعت در زمان ماند این مخازن ( $G \times t$ ) بستگی دارد و این مقدار در مخازن انعقاد بین ۳۰۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ و در مخازن لخته‌بندی بین ۱۰۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰۰ پیشنهاد شده است، لذا در طول آزمایش‌ها به منظور ایجاد امکان مقایسه در نتایج آزمایش‌ها، دور همزن و حجم مخازن به گونه‌ای تنظیم گردید تا مقدار حاصل ضرب گرادیان سرعت در زمان ماند در حوض اختلاط سریع، در حدود ۳۵۰۰۰ و در حوض لخته‌بندی ۵۰۰۰۰ باشد [۲۲].

آب با کدورت‌ها و شدت جریان‌های مختلف وارد واحدهای ته‌نشینی یک و دو مرحله‌ای گردیده و با اندازه‌گیری کدورت آب ورودی و خروجی به واحدها، کارآمدی آنها در حذف کدورت آب تعیین و با هم مقایسه شد. کدورت آب از روش استاندارد نفلومتری و به وسیله یک دستگاه کدورت‌سنج مدل HACH-2100 اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها براساس کتاب روش‌های استاندارد انجام گردید [۲۳]. در هر دفعه بهره‌برداری از واحد پایلوت، نمونه‌برداری از خروجی پایلوت پس از دو زمان ماند، آغاز شده و در فاصله زمانی بین پنج تا ده برابر زمان ماند، ادامه یافت و میانگین کدورت خروجی تعیین شد. در مورد هر کدورت ورودی، آزمایش‌ها سه بار تکرار گردید.

### ۳- نتایج و بحث

در شکل ۳ نتایج حاصل از محاسبات مربوط به محاسبه قطر ذرات قابل ته‌نشینی در ته‌نشینی کننده لوله‌ای یک، دو و سه مرحله‌ای نشان

۴۰۰۰ NTU<sup>۱</sup> متغیر بود. جریانی از این دوغاب توسط یک پمپ دوزینگ با دبی مشخص به مخزن آب خام ارسال گردید. حجم این مخزن ۱۰۰۰ لیتر بود و در داخل آن، دوغاب ورودی به وسیله جریان شبکه آب شهری به نسبت مشخص رقیق گردید تا کدورت مورد نظر به دست آید. هر دو مخزن به منظور معلق نگه‌داشتن دانه‌های رس مجهز به همزن بود. آب با کدورت‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ واحد تهیه و وارد پایلوت‌ها می‌گردید. دلیل استفاده از کدورت‌های بالا در این تحقیق این بود که بعضاً در برخی از رودخانه‌های کشور، به ویژه در مواقع سیلابی، مقادیر بالای کدورت ایجاد شده و ممکن است وارد تصفیه‌خانه آب گردد [۱۱-۱۳] و [۲۱]. از طرف دیگر در کدورت‌های بالا، درصد کاهش کدورت بیشتر بوده و پیگیری روند اختلاف بین کارایی دو پایلوت با سهولت بیشتری امکان پذیر است.

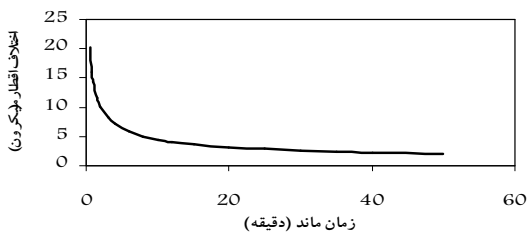
در مرحله اول تحقیق، آب خام تولید شده مستقیماً وارد پایلوت شد و در مرحله دوم، آب خام پس از فرایند انعقاد و لخته‌بندی وارد پایلوت گردید. در این مرحله از کلرور فریک به عنوان ماده منعقدکننده استفاده شد. کلرور فریک در داخل کشور تولید شده و قیمت آن نسبتاً ارزان‌تر از بقیه مواد منعقدکننده است. با توجه به در دسترس بودن و ارزانی و پرکاربرد بودن کلرور فریک در تصفیه‌خانه‌های آب شهر تهران و برخی نقاط کشور، این ماده برای انجام تحقیقات انتخاب شد. گرچه باید توجه داشت که نوع ماده منعقدکننده برای هر نوع منبع آب باید با انجام آزمون جار<sup>۲</sup> و با در نظر گرفتن مسائل فنی و اقتصادی تعیین شود. غلظت اولیه کلرور فریک ۴۰ درصد بود که در هنگام تزریق به ۵ تا ۱۰ درصد رقیق گردید. مقدار بهینه مصرف کلرور فریک با استفاده از آزمون جار تعیین شد. این مقدار در کدورت‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ واحد

<sup>۱</sup> Nephelometric Turbidity Unit

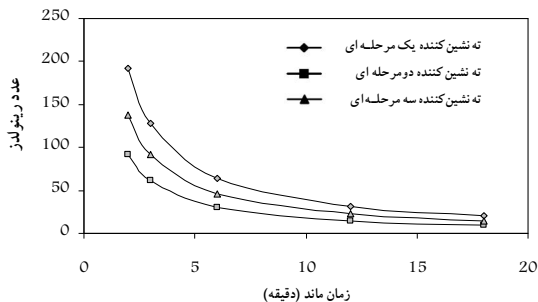
<sup>۲</sup> Jar Test

مرحله آخر این واحدهاست که افزایش سرعت در رابطه تعیین عدد رینولدز را جبران می نماید. بنابراین مرحله ای کردن عملیات ته نشینی لوله ای، از نظر شاخص عدد رینولدز باعث بهبود عملکرد واحد ته نشینی می گردد. در مقایسه بین واحد دو و سه مرحله ای، واحد دومرحله ای عدد رینولدز کمتری دارد.

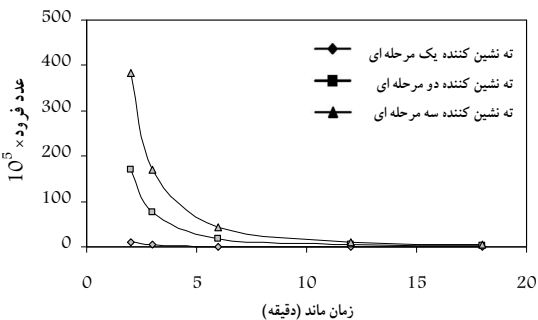
شکل ۶ نتایج محاسبات عدد فرود جریان را نشان می دهد. با توجه به این شکل، افزایش سرعت متوسط جریان در لوله ها و نیز



شکل ۴- مقایسه عملکرد ته نشین کننده لوله ای یک و دو مرحله ای در زمان ماندهای مختلف (طول لوله ها ۶۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است، بقیه فرضیات همانی است که برای شکل ۱ به کار رفته است)



شکل ۵- مقایسه عدد رینولدز در ته نشین کننده های یک مرحله ای و مرحله دوم و سوم از ته نشین کننده های دو و سه مرحله ای. (طول لوله ها ۶۰ سانتی متر و گرانروی سینماتیک آب در دمای ۱۰ درجه سلسیوس برابر  $10^{-6} \times 1/3$  متر مربع در ثانیه در نظر گرفته شده است [۲])

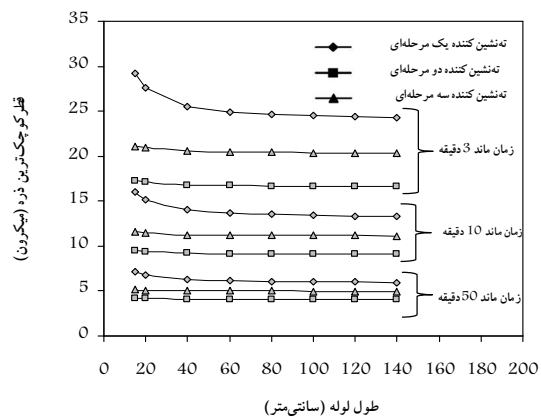


شکل ۶- مقایسه عدد فرود در ته نشین کننده های لوله ای یک مرحله ای و آخرین مرحله از ته نشین کننده های دو و سه مرحله ای (تمام فرضیات مطابق شکل ۳ می باشد)

داده شده است. در این شکل قطر کوچک ترین ذره ای که به طور کامل در ته نشین کننده حذف می شود نسبت به طول لوله نمایش داده شده است. شکل ۳ نشان می دهد که به دلیل کاهش قطر لوله ها در مرحله دوم، واحد دومرحله ای قادر است ذرات با قطر کمتری را حذف نماید، لذا کارایی بهتری نسبت به واحد یک مرحله ای دارد. به همین ترتیب کارایی واحد ته نشینی سه مرحله ای از یک مرحله ای بهتر است، اما در مقایسه با واحد دومرحله ای، قابلیت کمتری برای حذف ذرات کوچک تر دارد. دلیل این مطلب را می توان در افزایش سرعت متوسط جریان در واحد سه مرحله ای دانست.

زاویه نصب لوله ها ۴۵ درجه، چگالی نسبی ذرات ته نشین شونده ۲/۶۵ و گرانروی مطلق آب در دمای ۱۰ درجه سلسیوس برابر  $10^{-6} \times 1/3$  متر مربع در ثانیه در نظر گرفته شد [۲].

شکل ۳ همچنین نشان می دهد که اختلاف بین کارایی ته نشین کننده های یک، دو و سه مرحله ای در زمان ماندهای کم، بیشتر است. شکل ۴ این مطلب را بهتر نمایش می دهد. همان گونه که در شکل دیده می شود، در زمان ماندهای کمتر از ۱۰ دقیقه، اختلاف بین ته نشین کننده یک و دو مرحله ای از نظر قطر ذرات قابل حذف به سرعت افزایش می یابد، بنابراین ته نشین کننده دومرحله ای نسبت به افزایش بار هیدرولیکی ناشی از نوسانات دبی مقاومت بیشتری از خود نشان داده و در زمان ماندهای کم، بهتر عمل می کند. این نکته از آن جهت قابل توجه است که به طور معمول زمان ماند ته نشین کننده های لوله ای نیز کمتر از ۱۰ دقیقه است [۲-۵].

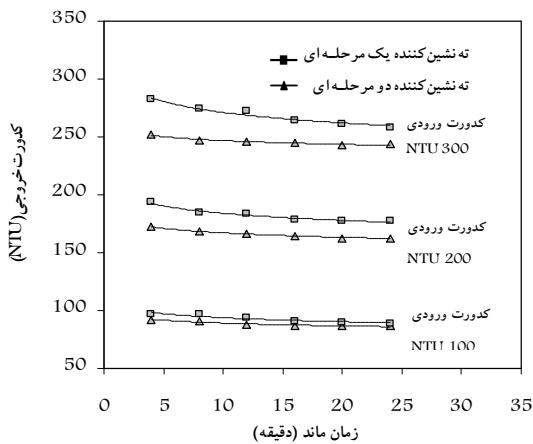


شکل ۳- مقایسه عملکرد ته نشین کننده لوله ای یک، دو و سه مرحله ای

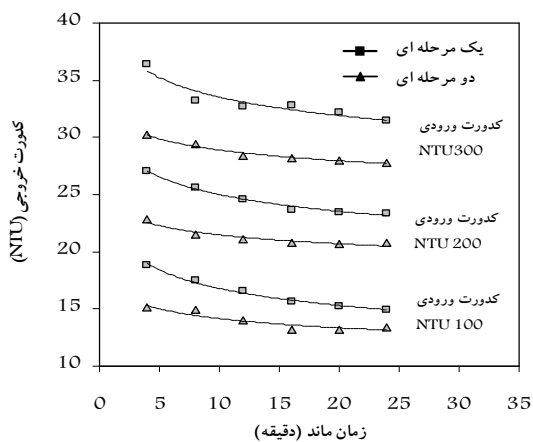
شکل ۵ اختلاف بین اقطار کوچک ترین ذراتی که در ته نشین کننده یک و دو مرحله ای قابل حذف هستند را نسبت به زمان ماند نشان می دهد. نتایج محاسبات نشان می دهد که علی رغم افزایش سرعت متوسط جریان در ته نشین کننده های دو و سه مرحله ای، عدد رینولدز در مرحله آخر آنها نسبت به ته نشین کننده یک مرحله ای کاهش می یابد (شکل ۵). این مسئله به دلیل کاهش قطر لوله ها در

در این صورت مرحله دوم کارایی چندانی نداشت و اختلاف قابل توجهی نیز بین کارایی واحدهای یک و دومرحله‌ای مشاهده نمی‌شد. اما با توجه به آن که ذرات موجود در آب و فاضلاب معمولاً دامنه وسیعی از اندازه را شامل می‌شوند، به نظر می‌رسد نتایج حاصل برای واحدهای ته‌نشینی یک و دومرحله‌ای در کاربردهای عملی معتبر باشد.

در شکل‌های ۷ و ۸ نتایج حاصل از اندازه‌گیری کدورت ورودی و خروجی واحدها که از جدول‌های ۱ و ۲ استخراج شد، نشان داده شده است. در هر دو شکل، نمودارها نشان می‌دهند که واحد ته‌نشینی دومرحله‌ای نسبت به واحد یک مرحله‌ای کارایی بیشتری در کاهش کدورت آب دارد. همچنین با افزایش کدورت آب ورودی، تفاوت بیشتری بین کارایی واحدهای یک و دو مرحله‌ای مشاهده می‌شود.



شکل ۷- مقایسه کارایی واحد ته‌نشینی لوله‌ای یک و دومرحله‌ای در حذف کدورت آب بدون افزایش ماده منعقدکننده



شکل ۸- مقایسه کارایی واحد ته‌نشینی لوله‌ای یک و دو مرحله‌ای در حذف کدورت آب با انجام فرایند انعقاد و لخته‌بندی

کاهش قطر لوله‌ها باعث گردیده است که عدد فرود جریان در ته‌نشین کننده‌های دو و سه مرحله‌ای بیشتر از ته‌نشین کننده یک مرحله‌ای باشد. بنابراین جریان در ته‌نشین کننده لوله‌ای چندمرحله‌ای پایدارتر از واحد یک مرحله‌ای خواهد بود. در جدول‌های ۱ و ۲ نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته بر روی واحدهای ته‌نشینی لوله‌ای یک و دومرحله‌ای ذکر شده است. همان‌گونه که در جدول دیده می‌شود، در تمام موارد کدورت آب خروجی، کمتر از واحد ته‌نشینی لوله‌ای یک مرحله‌ای است. به این ترتیب نتایج آزمایش‌ها بر روی واحدهای پایلوت، نتایج حاصل از محاسبات نظری را تأیید نمود. در مرحله اول آزمایش‌ها و بدون افزایش ماده منعقدکننده، کدورت خروجی از واحد ته‌نشین کننده لوله‌ای دومرحله‌ای بین ۳ تا ۱۲ درصد و به‌طور میانگین ۷/۵ درصد کمتر از واحد یک مرحله‌ای بود. در مرحله دوم آزمایش‌ها که با انجام فرایند انعقاد و لخته‌بندی همراه بود، کدورت خروجی از واحد ته‌نشینی لوله‌ای دومرحله‌ای بین ۱۰ تا ۲۰ درصد و به‌طور میانگین ۱۴ درصد پایین‌تر از واحد یک مرحله‌ای بود. این در حالی است که در زمان ماند هشت دقیقه که حدود زمان ماند معمول حوض‌های ته‌نشینی لوله‌ای است، کدورت خروجی از واحد دومرحله‌ای ۱۵ تا ۱۷ درصد پایین‌تر بود که نشان‌دهنده برتری قابل توجه واحد ته‌نشینی دومرحله‌ای نسبت به واحد ته‌نشینی لوله‌ای متعارف است.

در جدول ۳ میزان حذف کدورت در مراحل اول و دوم در ته‌نشین کننده لوله‌ای دومرحله‌ای با هم مقایسه شده است. اطلاعات جدول نشان می‌دهد که در مرحله اول آزمایش‌ها که از ماده منعقدکننده استفاده نشد، مرحله دوم از واحد ته‌نشینی لوله‌ای دومرحله‌ای نسبت به مرحله اول کارایی بیشتری در حذف کدورت داشت. اما در مرحله دوم آزمایش‌ها که آب قبل از ورود به واحدهای ته‌نشینی، تحت فرایند انعقاد و لخته‌بندی قرار گرفت، مرحله اول کارایی بیشتری در حذف کدورت آب نشان داد. دلیل این مطلب را می‌توان ایجاد لخته‌های درشت و سنگین پس از فرایند انعقاد و لخته‌بندی دانست. این ذرات که دارای سرعت ته‌نشینی زیادتری هستند، در مرحله اول از واحد ته‌نشینی دومرحله‌ای ته‌نشین می‌شوند و چون بیشتر ذرات به این ترتیب در مرحله اول حذف می‌شوند، لذا کدورت بیشتری در مرحله اول کاهش می‌یابد. از این مطلب می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که کارآمدی واحد ته‌نشینی لوله‌ای دومرحله‌ای در حذف کدورت آب به توزیع اندازه ذرات در آب بستگی دارد. با توجه به آنکه کدورت آب به توزیع اندازه ذرات تشکیل دهنده آن وابسته است، لذا در صورتی که از ذرات درشت‌تری در تهیه آب کدر ورودی به پایلوت استفاده می‌شد، ممکن بود همه ذرات در مرحله اول ته‌نشین شوند.

جدول ۱- نتایج حاصل از آزمایش‌های بهره‌برداری از پایلوت یک و دومرحله‌ای تهنشینی لوله‌ای (بدون فرایند انعقاد و لخته‌بندی)

بهبود* (درصد)	کدورت خروجی (NTU)									شرایط بهره‌برداری			
	واحد تهنشینی لوله‌ای دومرحله‌ای						واحد تهنشینی لوله‌ای یک مرحله‌ای			کدورت آب خام (NTU)	سرعت متوسط جریان (سانتی متر در دقیقه)		زمان ماند (دقیقه)
	مرحله دوم			مرحله اول			انحراف معیار	میانگین	دامنه		یک مرحله‌ای	دو مرحله‌ای	
انحراف معیار	میانگین	دامنه	انحراف معیار	میانگین	دامنه	انحراف معیار				میانگین			دامنه
۵/۱	۱/۴۰	۹۲/۳	۹۰/۸-۹۴/۵	۱/۲۲	۹۸/۵	۹۶/۱-۹۹/۴	۱/۲۳	۹۷/۳	۹۶/۲-۹۸/۹	۱۰۰			
۱۲/۰	۲/۳۱	۱۷۲/۲	۱۶۲/۳-۱۷۹/۲	۲/۲۱	۱۹۶/۳	۱۹۱/۸-۱۹۸/۷	۲/۴۸	۱۹۳/۵	۱۹۰/۱-۱۹۶/۵	۲۰۰	۹۶	۴۸	۴
۱۰/۷	۳/۴۳	۲۵۲/۲	۲۴۳/۲-۲۵۸/۶	۱/۸۷	۲۹۲/۳	۲۸۸/۴-۲۹۷/۵	۲/۷۶	۲۸۲/۳	۲۷۷/۵-۲۸۸/۳	۳۰۰			
۶/۲	۲/۰۸	۹۰/۸	۸۸/۳-۹۲/۷	۲/۹۸	۹۷/۸	۹۵/۳-۹۸/۸	۲/۸۷	۹۶/۸	۹۴/۳-۹۸/۴	۱۰۰			
۸/۷	۱/۹۱	۱۶۸/۴	۱۵۸/۹-۱۶۹/۰	۱/۵۶	۱۹۰/۸	۱۸۲/۶-۱۹۴/۳	۳/۳۱	۱۸۴/۴	۱۷۹/۵-۱۸۸/۶	۲۰۰	۴۸	۲۴	۸
۱۰/۱	۲/۰۵	۲۴۶/۶	۲۴۰/۷-۲۵۰/۱	۲/۸۷	۲۸۱/۲	۲۷۸/۷-۲۸۴/۸	۳/۰۶	۲۷۴/۲	۲۶۸/۹-۲۸۰/۵	۳۰۰			
۵/۹	۲/۳۰	۸۸/۱	۸۵/۰-۹۰/۳	۱/۲۳	۹۳/۱	۹۲/۵-۹۵/۷	۱/۷۰	۹۳/۶	۹۲/۳-۹۴/۸	۱۰۰			
۹/۳	۲/۱۲	۱۶۶/۴	۱۶۲/۷-۱۷۰/۹	۱/۲۲	۱۸۵/۴	۱۸۱/۷-۱۸۸/۴	۲/۲۱	۱۸۳/۴	۱۸۰/۴-۱۸۶/۶	۲۰۰	۳۲	۱۶	۱۲
۹/۸	۳/۷۹	۲۴۵/۷	۲۳۷/۷-۲۵۵/۵	۲/۱۲	۲۷۶/۶	۲۷۴/۱-۲۸۱/۹	۳/۵۴	۲۷۲/۵	۲۶۵/۳-۲۸۰/۱	۳۰۰			
۴/۰	۱/۷۳	۸۷/۲	۸۵/۵-۹۱/۰	۱/۲۴	۹۰/۵	۸۹/۳-۹۲/۱	۲/۲۳	۹۰/۸	۸۷/۶-۹۳/۴	۱۰۰			
۷/۶	۲/۷۸	۱۶۴/۶	۱۵۸/۹-۱۶۹/۶	۲/۶۶	۱۷۴/۴	۱۶۸/۴-۱۸۱/۴	۱/۴۳	۱۷۸/۲	۱۷۴/۱-۱۸۱/۵	۲۰۰	۲۴	۱۲	۱۶
۷/۶	۱/۵۶	۲۴۴/۵	۲۳۹/۴-۲۵۷/۳	۳/۵۴	۲۶۴/۹	۲۵۳/۲-۲۷۰/۶	۲/۳۴	۲۶۴/۷	۲۵۷/۰-۲۷۱/۹	۳۰۰			
۳/۷	۲/۰۷	۸۶/۹	۸۴/۸-۹۰/۳	۱/۲۲	۹۲/۶	۹۰/۶-۹۴/۸	۱/۰۱	۹۰/۲	۸۹/۸-۹۲/۶	۱۰۰			
۸/۵	۲/۰۷	۱۶۲/۶	۱۵۱/۱-۱۶۷/۵	۲/۷۶	۱۸۰/۱	۱۷۵/۵-۱۸۵/۱	۲/۱۲	۱۷۷/۸	۱۷۳/۱-۱۸۱/۲	۲۰۰	۲۰	۱۰	۲۰
۷/۰	۲/۱۰	۲۴۳/۲	۲۳۹/۲-۲۵۳/۴	۰/۹۸	۲۶۲/۳	۲۵۸/۹-۲۶۶/۴	۲/۹۱	۲۶۱/۴	۲۵۴/۱-۲۷۰/۲	۳۰۰			
۲/۸	۱/۳۴	۸۶/۷	۸۴/۸-۹۰/۷	۱/۶۷	۹۰/۱	۸۹/۱-۹۲/۶	۰/۹۱	۸۹/۲	۸۸/۱-۹۰/۳	۱۰۰			
۸/۴	۰/۸۹	۱۶۲/۶	۱۶۰/۶-۱۶۵/۱	۲/۴۳	۱۷۸/۸	۱۷۵/۶-۱۸۳/۴	۲/۰۴	۱۷۷/۶	۱۷۳/۰-۱۸۱/۷	۲۰۰	۱۶	۸	۲۴
۵/۶	۱/۱۰	۲۴۳/۹	۲۳۹/۲-۲۴۷/۴	۱/۹۸	۲۶۱/۹	۲۵۹/۵-۲۶۷/۸	۱/۲۴	۲۵۸/۴	۲۵۱/۷-۲۶۴/۳	۳۰۰			

\* درصد بهبود کدورت خروجی از تهنشینی یک به دو مرحله‌ای

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمایش های بهره برداری از پایلوت یک و دومرحله ای ته نشینی لوله ای (با انجام فرایند انعقاد و لخته بندی)

بهبود* (درصد)	کدورت خروجی (NTU)									شرایط بهره برداری			
	واحد ته نشینی لوله ای دومرحله ای						واحد ته نشینی لوله ای یک مرحله ای			کدورت آب خام (NTU)	سرعت متوسط جریان (سانتی متر در دقیقه)		زمان ماند (دقیقه)
	مرحله دوم			مرحله اول			انحراف معیار	میانگین	دامنه		یک مرحله ای	دو مرحله ای	
انحراف معیار	میانگین	دامنه	انحراف معیار	میانگین	دامنه	انحراف معیار				میانگین			دامنه
۱۹/۷	۱/۲۵	۱۵/۱	۱۴/۳-۱۵/۸	۱/۷۸	۲۴/۱	۲۳/۵-۲۵/۸	۱/۶۷	۱۸/۸	۱۷/۸-۱۹/۳	۱۰۰			
۱۵/۹	۲/۰۹	۲۲/۸	۲۱/۳-۲۳/۷	۲/۸۹	۳۵/۱	۳۴/۳-۳۶/۸	۱/۸۹	۲۷/۱	۲۵/۹-۲۸/۴	۲۰۰	۹۶	۴۸	۴
۱۷/۰	۲/۰۳	۳۰/۲	۲۸/۸-۳۱/۲	۳/۲۵	۴۵/۵	۴۴/۷-۴۷/۱	۲/۹۸	۳۶/۴	۳۴/۶-۳۷/۳	۳۰۰			
۱۴/۹	۱/۳۴	۱۴/۹	۱۳/۷-۱۵/۳	۱/۳۴	۲۱/۱	۶/۲۰-۲۲/۳	۱/۲۵	۱۷/۵	۱۶/۱-۱۸/۶	۱۰۰			
۱۶/۰	۱/۷۶	۲۱/۵	۲۰/۸-۲۲/۰	۲/۵۶	۳۱/۸	۲۹/۹-۳۲/۳	۱/۳۴	۲۵/۶	۲۳/۴-۲۶/۷	۲۰۰	۴۸	۲۴	۸
۱۱/۴	۱/۸۹	۲۹/۴	۲۸/۴-۳۱/۲	۱/۴۷	۴۲/۱	۴۱/۳-۴۴/۶	۱/۶۵	۳۳/۲	۳۲/۵-۳۵/۴	۳۰۰			
۱۵/۷	۱/۱۰	۱۴/۰	۱۳/۲-۱۴/۷	۱/۹۸	۱۹/۵	۱۸/۳-۲۰/۲	۱/۲۹	۱۶/۶	۱۶/۰-۱۸/۱	۱۰۰			
۱۴/۲	۱/۶۰	۲۱/۱	۲۰/۴-۲۱/۸	۱/۴۶	۲۸/۸	۲۷/۱-۳۰/۹	۱/۷۸	۲۴/۶	۲۳/۹-۲۵/۸	۲۰۰	۳۲	۱۶	۱۲
۱۳/۱	۲/۰۳	۲۸/۴	۲۷/۸-۲۹/۱	۱/۷۶	۴۱/۲	۳۹/۹-۴۲/۶	۲/۲۱	۳۲/۷	۳۰/۳-۳۵/۶	۳۰۰			
۱۵/۹	۰/۷۸	۱۳/۲	۱۲/۸-۱۳/۷	۱/۳۴	۱۸/۳	۱۷/۸-۱۹/۵	۱/۱۰	۱۵/۷	۱۵/۱-۱۶/۴	۱۰۰			
۱۲/۲	۱/۴۰	۲۰/۸	۱۹/۲-۲۱/۳	۱/۸۹	۲۸/۱	۲۶/۴-۲۹/۶	۲/۳۱	۲۳/۷	۲۲/۴-۲۵/۵	۲۰۰	۲۴	۱۲	۱۶
۱۴/۰	۱/۹۱	۲۸/۲	۲۷/۹-۲۹/۶	۲/۰۲	۳۹/۶	۳۸/۳-۴۱/۵	۱/۷۵	۳۲/۸	۳۰/۹-۳۴/۴	۳۰۰			
۱۳/۱	۱/۶۰	۱۳/۲	۱۲/۵-۱۳/۸	۱/۵۶	۱۷/۹	۱۶/۱-۱۸/۶	۱/۰۱	۱۵/۲	۱۴/۱-۱۶/۷	۱۰۰			
۱۱/۹	۱/۸۷	۲۰/۷	۱۹/۵-۲۱/۳	۱/۳۹	۲۷/۵	۲۶/۴-۲۸/۶	۱/۷۸	۲۳/۵	۲۲/۶-۲۴/۸	۲۰۰	۲۰	۱۰	۲۰
۱۳/۰	۱/۵۴	۲۸/۰	۲۷/۳-۲۸/۷	۱/۷۹	۳۸/۴	۳۷/۵-۴۰/۱	۲/۳۱	۳۲/۲	۳۰/۸-۳۵/۱	۳۰۰			
۱۰/۰	۱/۰۲	۱۳/۴	۱۲/۹-۱۴/۱	۱/۱۰	۱۷/۴	۱۶/۳-۱۸/۸	۰/۸۹	۱۴/۹	۱۴/۰-۱۵/۸	۱۰۰			
۱۱/۱	۱/۳۴	۲۰/۸	۱۹/۶-۲۱/۵	۱/۲۳	۲۷/۱	۲۶/۶-۲۷/۷	۱/۱۸	۲۳/۴	۲۱/۷-۲۴/۶	۲۰۰	۱۶	۸	۲۴
۱۱/۷	۱/۷۶	۲۷/۸	۲۷/۳-۲۸/۴	۱/۶۷	۳۷/۲	۳۶/۱-۳۷/۹	۱/۵۸	۳۱/۵	۳۰/۷-۳۲/۶	۳۰۰			

\* درصد بهبود کدورت خروجی از ته نشینی یک به دو مرحله ای



جدول ۳- مقایسه کارایی مراحل اول و دوم در ته‌نشین کننده لوله‌ای شیب‌دار دو مرحله‌ای

شرایط بهره‌برداری		درصد حذف کدورت		کدورت آب خام (NTU)	زمان ماند (دقیقه)
بدون افزایش منعقد کننده واحد ته‌نشینی دو مرحله‌ای مرحله اول	با افزایش منعقد کننده واحد ته‌نشینی دو مرحله‌ای مرحله اول	کل واحد	کل واحد		
۱/۵	۷/۷	۸۴/۹	۷۵/۹	۱۰۰	
۱/۸	۱۳/۹	۸۸/۶	۸۲/۴	۲۰۰	۴
۲/۶	۱۵/۹	۸۹/۹	۴۸/۸	۳۰۰	
۲/۲	۹/۲	۸۵/۱	۷۸/۹	۱۰۰	
۴/۶	۱۵/۸	۸۹/۲	۸۴/۱	۲۰۰	۸
۶/۳	۱۷/۸	۹۰/۲	۸۶/۰	۳۰۰	
۶/۹	۱۱/۹	۸۶/۰	۸۰/۵	۱۰۰	
۷/۳	۱۶/۸	۸۹/۴	۸۵/۶	۲۰۰	۱۲
۷/۸	۱۸/۱	۹۱/۷	۸۶/۳	۳۰۰	
۹/۵	۱۲/۸	۸۶/۸	۸۱/۷	۱۰۰	
۱۰/۸	۱۷/۷	۸۹/۶	۸۹/۱	۲۰۰	۱۶
۱۱/۷	۱۸/۵	۹۰/۶	۸۶/۸	۳۰۰	
۷/۴	۱۳/۱	۸۶/۸	۸۲/۱	۱۰۰	
۹/۹	۱۸/۷	۸۹/۶	۸۶/۲	۲۰۰	۲۰
۱۲/۶	۱۸/۹	۹۰/۱	۸۷/۲	۳۰۰	
۹/۹	۱۳/۳	۸۶/۶	۸۲/۶	۱۰۰	
۱۰/۶	۱۸/۷	۸۹/۶	۸۶/۴	۲۰۰	۲۴
۱۲/۷	۱۹/۰	۹۰/۷	۸۷/۶	۳۰۰	

عمده کاهش کدورت مربوط به مرحله اول از ته‌نشین کننده دو مرحله‌ای بود. بنابراین عمده ذرات در مرحله اول حذف شدند. عدم گرفتگی در این مرحله را می‌توان ناشی از زیاد بودن قطر لوله‌ها در واحد اول دانست که به ذرات درشت اجازه عبور می‌دهد. از طرفی چون ذرات درشت در مرحله اول ته‌نشین شدند، میزان لجن در مرحله دوم کاهش یافت و اندازه ذرات ته‌نشین شده در مرحله دوم نیز کم شد و به این ترتیب احتمال گرفتگی در مرحله دوم که دارای لوله‌هایی با قطر ۱/۲ سانتی‌متر بود، کاهش یافت. انتخاب جریان هم‌جهت در لوله‌ها که باعث بهبود عملیات خود شستشویی می‌شود نیز می‌تواند عامل دیگری در جلوگیری از گرفتگی لوله‌ها در نظر گرفته شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

محاسبات صورت گرفته در این تحقیق که با استفاده از معادلات حاکم بر عملکرد ته‌نشین کننده‌های لوله‌ای انجام شد، نشان داد که استفاده از ته‌نشین کننده‌های لوله‌ای شیب‌دار به صورت چندمرحله‌ای می‌تواند باعث بهبود عملیات ته‌نشینی شود. بهبود عملیات ته‌نشینی با این شرط صورت می‌گیرد که قطر لوله‌ها در مرحله آخر کاهش داده شود. در این صورت مرحله‌ای کردن عملیات

چنانچه از شکل‌های ۷ و ۸ برمی‌آید، در زمان ماند‌های بیش از شش دقیقه، کاهش قابل توجهی در کدورت خروجی از واحد ته‌نشینی دو مرحله‌ای مشاهده نمی‌شود. در حالی‌که این مقدار برای واحد ته‌نشینی یک مرحله‌ای ۱۰ تا ۱۵ دقیقه است. در حین بهره‌برداری از پایلوت، لوله‌ها به‌منظور بررسی احتمال گرفتگی به دفعات مورد بازدید قرار گرفتند. در طی این بررسی‌ها موردی از تجمع رسوبات که موجب گرفتگی شود در واحد یک یا دو مرحله‌ای مشاهده نشد. به‌منظور اطمینان از این مطلب، واحد ته‌نشینی دو مرحله‌ای به مدت دو هفته به‌طور ممتد با کدورت ورودی ۳۰۰ واحد و با انجام فرایند انعقاد و لخته‌بندی مورد بهره‌برداری قرار گرفت. در این شرایط انتظار می‌رفت که بیشترین میزان لجن به‌همراه لخته‌های درشت ایجاد شود. پس از این مدت مجدداً کلیه لوله‌ها مورد بازبینی قرار گرفتند. موردی از تجمع رسوبات که عامل گرفتگی باشد دیده نشد. دلیل این مطلب را در مرحله اول آزمایش‌ها، می‌توان کم بودن لجن حاصله دانست. در مرحله اول به‌دلیل عدم استفاده از مواد منعقد کننده، میزان کاهش کدورت و مواد معلق آب و در نتیجه میزان لجن تولیدی کم بود. اما در مرحله دوم آزمایش‌ها به‌دلیل انجام فرایند انعقاد و لخته‌بندی، حجم لجن تولیدی بیشتر بود. همان‌گونه که در جدول ۳ دیده می‌شود، در این قسمت از آزمایش‌ها بخش

ته‌نشینی در ته‌نشین‌کننده‌های لوله‌ای باعث بهبود شرایط هیدرولیکی ته‌نشینی نیز می‌گردد.

نتایج حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی در تحقیق، نتیجه‌گیری بالا را تأیید می‌نماید. به طوری که در طی آزمایش‌های عملی در زمان ماند هشت دقیقه که حدود زمان ماند معمول حوض‌های ته‌نشینی لوله‌ای است، کدورت خروجی از واحد دوم‌رحله‌ای ۱۵ تا ۱۷ درصد پایین‌تر از ته‌نشین‌کننده لوله‌ای متعارف اندازه‌گیری شد که نشان دهنده برتری قابل توجه واحد ته‌نشینی دوم‌رحله‌ای نسبت به واحد ته‌نشینی لوله‌ای متعارف است.

به منظور جلوگیری از گرفتگی لوله‌ها، حداقل قطر در مرحله اول پنج سانتی‌متر پیشنهاد گردید. با توجه به آنکه قسمت عمده مواد در مرحله اول ته‌نشین می‌گردند، قطر لوله‌ها در مرحله دوم تا حدود یک سانتی‌متر هم می‌تواند در نظر گرفته شود. همچنین نتایج نشان می‌دهند که زمان ماند حدود شش دقیقه برای مجموعه واحد

دوم‌رحله‌ای برای اطمینان از عملکرد مناسب عملیات، کفایت می‌کند. این زمان برای ته‌نشین‌کننده یک مرحله در کدورت‌های مختلف بین ۱۰ تا ۱۵ دقیقه مشاهده شد.

گرچه نتایج این تحقیق بیانگر برتری قابل توجه ته‌نشین‌کننده لوله‌ای دوم‌رحله‌ای نسبت به واحد یک مرحله‌ای است، اما به نظر می‌رسد برای اثبات این مطلب و نیز برای مطالعه امکان گرفتگی در لوله‌ها، بررسی‌های بیشتری خصوصاً با استفاده از آب خام واقعی و با انواع مواد منعقدکننده لازم باشد.

#### ۵- قدردانی

این تحقیق در کارگاه عملیات واحد گروه مهندسی آب و فاضلاب در دانشگاه صنعت آب و برق و با امکانات آزمایشگاه شیمی آب و فاضلاب این دانشگاه انجام گرفته است. لذا از ریاست گروه مهندسی آب و فاضلاب، جناب آقای دکتر جلیلی قاضی‌زاده و همکاران ایشان تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

#### ۶- مراجع

- 1- Fadel, A. A., and Baumann, E. R. (1990). "Tube settler modeling." *J. of Environmental Engineering*, 116(1), 107-123.
- 2- AWWA. (1990). *Water quality and treatment, A Handbook of Community Water Supplies*, 4<sup>th</sup> Ed., McGraw-Hill Inc., USA.
- 3- Hansen, S. P., and Culp, G. L. (1967). "Applying shallow depth sedimentation theory." *J. of AWWA*, 59, 1134-1148.
- 4- Culp, G.L., Hansen, S., and Richardson, G. (1968). "High-rate sedimentation in water treatment works." *J. of AWWA*, 60, 681-698.
- 5- Huisman, L. (1986). *Sedimentation and flotation*, IHE, Delft, the Netherland.
- 6- Sarkar, S., Kamilya, D., and Mal, B.C. (2007). "Effect of geometric and process variables on the performance of inclined plate settlers in treating aquacultural waste." *Water Research*, 41, 993-1000.
- 7- Fujisaki, K., and Terashi, M. (2007). "Tube settlers for the enhancement of settling tank capacity." *Filtration*, 7, 168-172.
- 8- Yao, K.M. (1973). "Design of high-rate settlers." *J. of the Environmental Engineering Division*, 99, 621-637.
- 9- Willis, R. M. (1978). "Tubular settlers - A technical review." *J. of AWWA*, 70, 331-335.
- 10- Ziolo, J. (1996). "Influence of the system geometry on the sedimentation effectiveness of lamella settlers." *Chemical Engineering Science*, 51(1), 149-153.
- 11- Torabian, A., and Hodaei, M. (1998). "Effectiveness of high rate settling tanks on the treatment of Zayandehrood river water." *J. of Water and Wastewater*, 26, 16-23. (In Persian)
- 12- Hodaei, M. (1996). "High rate settling." M.Sc. Thesis, Azad University, Sciences and Research Branch, Tehran, Iran. (In Persian)
- 13- Rajabzadeh Darzini, A. (1996). "Assessment of the effectiveness of high rate settling tank for reduction of suspended materials from karoon river water." M.Sc. Thesis, Faculty of Environmental, Tehran, Iran. (In Persian)

- 14- Tajbakhsh Tabar, J. (1993). "Assesment of the effectiveness of high rate settlers." M.Sc. Thesis, Faculty of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Iran. (In Persian)
- 15- MWH. (2005). *Water treatment principle and design*, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley and Sons Inc., NY.
- 16- Nabizadeh, R., Nadafi, K., Vaezi, F., Khazaei, M., and Safdari, M. (2008). "Efficiency of horizontal roughing filter (HRF) in coliform removal from aerated lagoon effluent." *J. of Water and Wastewater*, 66, 2-9. (In Persian)
- 17- Tchobanoglous, G., and Burton, F. (2002). *Wastewater engineering: Treatment and reuse*, 4<sup>th</sup> Ed., McGraw-Hill, Metcalf and Eddy Inc., New York.
- 18- Eckenfelder, W.W., Ford, D. L., and Englande, A.J. (2008). *Industrial water quality*, 4<sup>th</sup> Ed., WEF Press, the US.
- 19- ASTM. (1995). *ASTM test method for particle-size analysis of soils*, Annual Book of ASTM Standards, Soil and Rock (I), American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 04.08 (D 422-63).
- 20- Memarian, H. (2009). *Engineering geology and geotechnics*, University of Tehran Pub., Tehran, Iran. (In Persian)
- 21- Rahimi, Y., and Ghavipankeh, Z. (2004). "Feasibility maintaining of the Orumieh water treatment plant in the case of flooding." *J. of Water and Wastewater*, 52, 71-75. (In Persian)
- 22- Qasim, S.R., Motley, E.M., and Zhu, G. (2000). *Water works engineering*, Prentice-Hall, India.
- 23- APHA, AWWA, WEF. (1992). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 18<sup>th</sup> Ed., American Public Health , Washington DC.