

انتقال رسوبات در لوله های تحت فشار فاضلاب، تعیین پیوسته مشخصه های نشست و فرسایش بوسیله نظارت TSDS در محل در یک لوله تحت فشار در شمال آلمان

حسین پورسلحشوری^۱. آرمان ختار^۲

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران

۲- استادیار

آدرس پست الکترونیک: hossein.logan.skyboy@gmail.com

چکیده

سیستم های اندازه گیری پیوسته، کاربرد گسترده ای در فاضلاب ها، بخصوص در سیستم هایی که تحت فشار نیستند، دارند. حسگرهای توربیداتی، بخاطر هزینه نسبتاً کم خود اغلب به عنوان یک جایگزین برای شاخص های دیگر (جامدات، فلزات سنگین، ترکیبات آلی)، مورد استفاده قرار می گیرند. اما، تلاش اندکی تاکنون برای حسگرهای توربیداتی در سیستم های تحت فشار، صورت گرفته است. این مقاله، نتایج نظارت در محل یکساله توربیداتی/«کل جامدات معلق» (TSS) درون یک لوله تحت فشار (قطر ۶۰۰ میلی متر) در یک منطقه شهری در شمال آلمان را ارائه می دهد. نتایج درمحل بدست آمده از اندازه گیری حسگرها، با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در مطالعات قبل، مشابه می باشند. TSS که به صورت نمایی در پمپ کاهش می یابد، تحت شرایط آب و هوایی خشک، باعث جریان درون سو با میانگین $0.23 \text{ mg}/(\text{Ls})$ می شود [جمله انگلیسی مبهم]. در طی توالی های پمپ، جامدات کاملاً فرسایش یافته در یک تنش برشی بستر $0.5 \text{ N}/\text{m}^2$ ، بوجود آمدند. رفتار ته نشینی و فرسایش با دبی جریان ورودی، تغییر پیدا می کند. جامدات با افزایش دبی جریان ورودی، سریعتر ته نشین می شوند: در جریان ورودی آب طوفان با میانگین $0.9 \text{ mg}/(\text{Ls})$ و در تغییرات جریان ورودی روزانه تا حداکثر $0.6 \text{ mg}/(\text{Ls})$ در ساعت ۱۲:۰۰ صبح. نتایج به عنوان داده کالیبراسیون برای شبیه سازی انتقال رسوبات در قسمت ۲، مورد استفاده قرار می گیرند.

کلمات کلیدی: کل جامدات معلق؛ در محل؛ فرسایش؛ ته نشینی؛ لوله تحت فشار؛ فاضلاب

۱. مقدمه

مشخصه یابی فیزیکی فاضلاب برای بهینه سازی در همه زمینه های مدیریت فاضلاب، الزامی است. فرآیندهای پمپاژ معمولاً در انتقال آب فاضلاب و طوفان، لازم می باشند. بخاطر کاربرد غالب آنها، همه فرآیندهای مرتبط، پتانسیل بهینه سازی زیادی دارند که از جمله می توان انتقال رسوبات، مصرف انرژی و مدیریت سیلاب را نام برد. راه کار اصلی درک و بهینه سازی فرآیند، در کیفیت و کمیت داده ها می باشد. ابزارهای بهینه سازی پیشرفته (برای مثال، شبیه سازی های عددی)، بسیار حریص به داده ها می باشند. کیفیت و کمیت براساس روش گردآوری داده ها، تغییر می کند، چه روش خارج از محل چه در محل. روش های خارج از محل، عمدتاً تجربیات آزمایشگاهی می باشند. آزمایش های تجربی،

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

شرایط واقعی را با حداکثر دقت ممکن شبیه سازی می کنند و سپس نتایج را به یک منطقه مدل نماینده، منتقل می کنند. برای مثال، اکثر آزمون های جریان تلاش می کنند شرایط کم و بیش واقعی را شبیه سازی کنند.

مزیت روش های درمحل، نزدیکی به زندگی و شرایط واقعی است. بنابراین، تقلید لازم نیست. برای اندازه گیری فرآیندهای مختل نشده، تاثیر بر سیستم باید در یک حداقل حفظ شود.

فرسایش و ته نشینی مواد ذره ای در فاضلاب، اثرات فیزیکی حاکم از نظر مضامین ذکر شده در بالا (انتقال رسوبات، مصرف انرژی، مدیریت آب بارندگی) می باشند. در گذشته، رفتار ته نشینی و فرسایش بوسیله آزمایش های تجربی خارج از محل تعیین می شده اند [۷-۱]. در [۱، ۲]، چندین اجرای آزمایشگاهی برای توصیف رفتار فرسایش و ته نشینی جریان ورودی خام فاضلاب به یک ایستگاه پمپاژ (PS) در یک سیستم زه کشی شهری در روستوک (شمال آلمان)، انجام شده اند. در نتیجه، نتایج استخراج شده تنها نماهای لحظه ای و موقتی از فرآیندهای فاضلاب بسیار دینامیک و پیوسته می باشند. یک توصیف پیوسته براساس اندازه گیری دائمی (در محل)، تاکنون اظهار نظرهای بیشتری در مورد رفتار انتقال فاضلاب خام را ممکن ساخته است. در این مطالعه، رفتار انتقال درون یک لوله تحت فشار، مورد توجه می باشد. بنابراین، اندازه گیری مستقیماً درون لوله تحت فشار، واقع شده است. در نتیجه، خود لوله به عنوان محیط واکنش برای آزمایشات تجربی عمل می کند.

هدف این مقاله، مشخصه یابی دقیق رفتار فرسایش و ته نشینی فاضلاب خام در اندازه گیری برخط در محل «جامدات معلق کل» (TSS) برای دوره یک ساله می باشد. فراهم کردن حجم زیادی از داده ها به افزایش دقت شبیه سازی های انتقال کمک می کند و بازده سیستم فاضلاب را بهبود می دهد. سه هدف زیر تعریف می شوند:

- تعیین کاربردی بودن و کیفیت سیستم اندازه گیری برخط در محل TSS درون یک لوله تحت فشار
- مشخصه یابی رفتار فرسایش و ته نشینی فاضلاب خام تحت شرایط جریان ورودی در آب و هوای خشک به صورت پیوسته با استفاده از نظارت برخط بر TSS.
- شناسایی مکانیزم های تغییر دهنده رفتار انتقال و مشخصه یابی فرسایش و رسوب اصلاح شده.

مرور ادبی

اندازه گیری های «در محل» زهکشی شهری معمولاً بر روی سیستم های غیر تحت فشار (جریان کانال باز)، اغلب در زمینه سرریز فاضلاب ترکیبی (CSO) و بارهای آلاینده به صورت ترکیبی یا فاضلاب های بارندگی، تمرکز کرده اند (برای مثال، [۸-۱۳]). سیستم های نظارت پیوسته، تقریباً بطور انحصاری برای محاسبه بارها یا شارها (*flux*)، مورد استفاده قرار می گیرند. تحلیل داده های بیشتر در مورد رفتار انتقال جامدات، اغلب انجام نشده است. یک استثناء توسط [۱۲-۱۴] ارائه شده است، که همه منحنی های جرم را از داده های آنلاین، محاسبه می کنند. یک مطالعه نظارتی «درمحل»، که با اندازه گیری پیوسته TSS در سیستم های تحت فشار سروکار دارد، تا آنجا که نویسندگان می دانند، هنوز منتشر نشده است.

مشخصه یابی رسوبات بوسیله اندازه گیری پیوسته، عمدتاً در آزمایش های آزمایشگاهی خارج از محل، بکار گرفته می شوند [۶]، تست های خارج از محل با آب فاضلاب انجام داد تا تجمع رسوبات در ناوه پیلوت ($d = 300 \text{ mm}$ جریان کانال باز، تخلیه میانگین 4 L/s) با استفاده از همان حسگر TSS استفاده شده در این مطالعه (*Hach Lange Solitax*)، انجام داد. مثال دیگر، [۷] است که در این مقاله، رسوبات برای آزمایش های فلاشینگ در آزمایشگاه، مجهز به یک سیستم اندازه گیری

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

توربیدایتی پیوسته، گردآوری شدند. مشابه با [۱]، اندازه گیری توربیدایتی پیوسته برای تعیین مشخصه های فرسایش درون یک دستگاه آزمایشگاهی «خارج از محل»، استفاده شد.

همان حسگر (*Hach Lange Solitax*) نیز توسط [۹] درون یک فاضلاب ترکیبی (در محل) مورد استفاده قرار گرفت تا دینامیک های رویدادهای فرسایش و رسوب (محاسبه بار) ارزیابی شود.

ترکیبی های بین «خارج از محل» و «در محل» در [۱۱، ۱۲] ارائه شده اند. در این کارها، حسگرهای نظارت کننده در مخازن یا ناوه های بیرونی تامین شده بوسیله یک پمپ از یک فاضلاب، سوار شده اند.

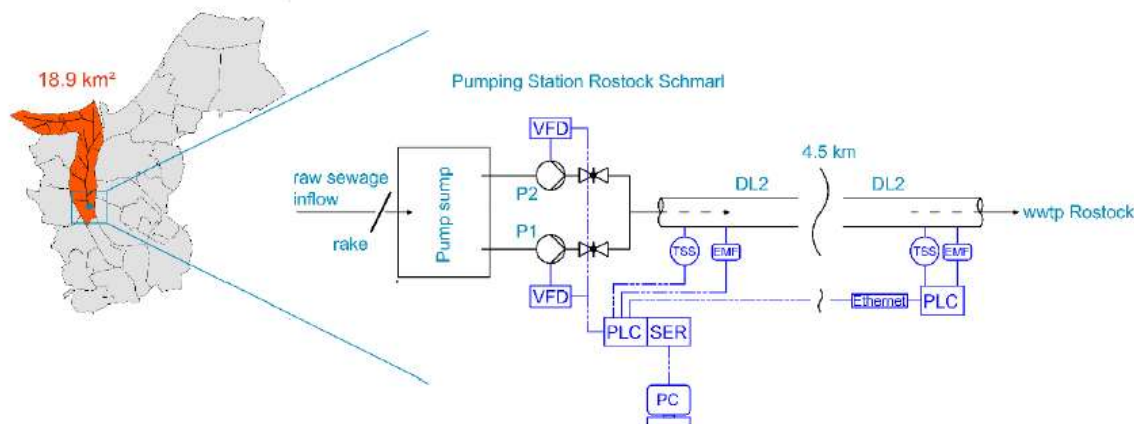
کاربردی بودن داده های حسگر برخط برای مسائل زهکشی شهری و عدم قطعیت مرتبط با تلاش زیادی توسط [۱۰-۱۲] و [۱۴-۱۶]، مورد بررسی قرار گرفته است. اکثریت روش های پردازش داده ها در این مطالعه، براساس این مقالات می باشند.

یکی از تفاوت های اصلی نسبت به مطالعات قبلی، در بازه اندازه گیری است (در اینجا، ۵ ثانیه). گاهی، اندازه گیری های روزانه استفاده شدند (برای مثال در [۶])، اما با توجه به دینامیک های سیستم، اکثر مطالعات از بازه های کوتاه (۱۱ یا [۱۴]) با گام زمانی ۲ دقیقه ای، با گام زمانی ۲۰ ثانیه ای [۷] یا ۱۵ ثانیه ای [۹]، استفاده کرده اند.

۲. مواد و روش ها

۱.۲. انجام مطالعه

یکی از *PS* های اصلی در شهر روستوک (با تقریباً ۲۰۰ هزار نفر جمعیت)، *PS* روستوک-شمارل است که فاضلاب خام را از تقریباً ۴۰ هزار نفر جمعیت، منتقل می کند. یکی از ویژگی های فنی ویژه بالادست، که معمولاً سیستم فاضلاب را تفکیک می کند، اتصال به رواناب بارندگی جاده های اصلی، می باشد. سیستم آب بارندگی خودش رواناب را از تخلیه بام و جاده های ثانویه، جمع آوری می کند. شرایط جریان ورودی برای *PS* روستوک-شمارل هرچه که باشد، فاضلاب ورودی در ابتدا بوسیله یک شن کش (*rake*) با دهانه میله ای فضای عریض (۲۰ میلی متر)، صافی می شود قبل از اینکه مستقیماً به تاسیسات تصفیه فاضلاب مرکزی (*wwtp*)، بوسیله چهار پمپ (هر کدام ۵۵ کیلووات) در دو خط لوله چدنی (قطر = ۶۰۰ میلی متر)، هر کدام با طول بیش از ۴۵۰۰ متر، منتقل می شوند. یک نمای شماتیک از حوزه آبریز و *PS* در شکل ۱، منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.



شکل ۱. تصویری از ناحیه آبریز (18.9 km^2) در شهر روستوک (آلمان) شامل یک نمای شماتیک از سیستم کنترل و نظارت در طی مطالعه. جریان ورودی فاضلاب خام، از شن کش می گذارد و داخل چاه پمپ گردآوری می شوند. پمپ های P1 و P2

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

که مستقیماً منتقل کننده فاضلاب خام به **wwtp** مرکزی در لوله تحت فشار ۲ (DL2)، می روند. P1 و P2. با استفاده از یک درایو فرکانس متغیر (VFD) از یک کامپیوتر (متصل با استفاده از یک پورت سریال (SER) به کنترلر منطقی برنامه پذیر (PLC)) کنترل می شوند. VFD، سرعت موتور پمپ ها را طبق استراتژی کنترل، تنظیم می کند [۱، ۲، ۱۷]. همه مقادیر بدست آمده از حسگرهای TSS (TSS) و فلومترهای الکترومغناطیسی (EMF) در کامپیوتر ذخیره می شوند.

۲.۲. نظارت «درمحل» بر TSS

برای یک دوره مطالعه یک ساله، پمپ های P1 و P2 بوسیله یک کامپیوتر کنترل می شوند تا یک استراتژی کنترل مبتنی بر قانون و صرفه جویی کننده در انرژی، اجرا شود [۱، ۲، ۱۷]. شار رسوبات بوسیله اندازه گیری برخط TSS در طرف جریان ورودی و جریان خروجی لوله تحت فشار DL2، مورد نظارت قرار گرفت. جدول ۱، داده های فنی حسگرهای TSS را نشان می دهد. خود حسگرها در شکل ۲ نشان داده شده اند.

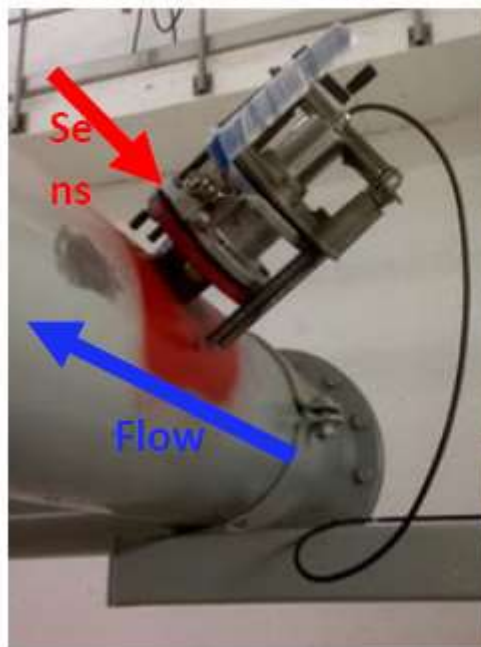
جدول ۱. داده های فنی حسگرهای TSS

Sensor	Controller	Parameter	Measuring Range	Installed and Measured Duration	Interval	Service	Num. of Calibration Processes	Wiper Self-Cleaning Interval
Hach Lange Solitax inline Sc	Hach Sc 200 & Sc 1000	Turbidity, TSS	0.001-4000 FNU, 0.00-150.000 mg/L	343 days installed; 292 days measured	5 s	1 per month	5 processes with 73 samples	15 min

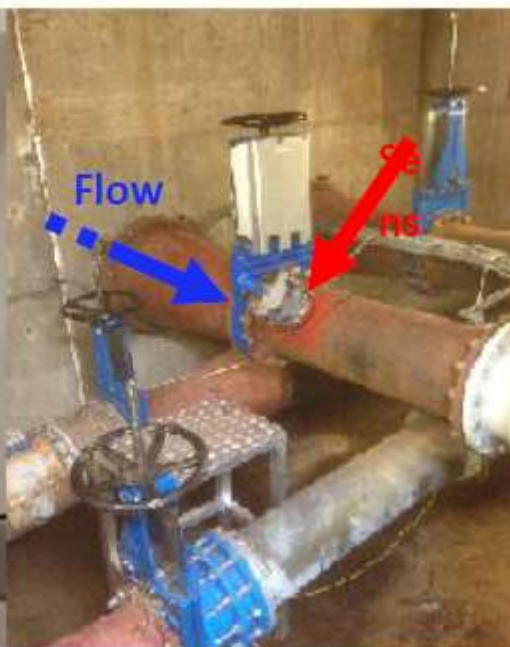
علاوه بر آن، پارامترهای زیر، هر ۵ ثانیه در ۱ سال مورد نظارت قرار گرفتند: سطح چاه پمپ (m)، جریان ورودی به PS (L/s)، توان خروجی پمپ ها (kW)، فرکانس $VFD(F)$ (Hz)، سرعت موتور (l/min)، فشار در $DL2$ مستقیماً بعد از پمپ (بار)، جریان $DL2$ (Q_{pipe}) (L/s).

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

a) TSS sensor in PS
Rostock-Schmarl



b) TSS sensor in the
wwtp Rostock



شکل ۲. حسگرهای TSS برای نظارت بر شار رسوبات در پمپ های تحت فشار (الف) حسگر TSS در PS روستوک-شمارل در طرف تحت فشار پمپ (ب) حسگر TSS در wwtp مرکزی روستوک در طرف جریان خروجی پمپ تحت فشار

۳.۲. کالیبراسیون حسگر نمونه خاص

اصول کار اندازه گیری حسگرهای توربیدیتی، یک روش نور پراکنده شده مادون قرمز است [۱۸]. TSS در نهایت از توربیدایته بوسیله یک فرمول کالیبره شده داخلی کارخانه، محاسبه می شود. معمولاً، خاک دیاتومی برای فرآیند کالیبراسیون داخلی، استفاده می شود.

برای تنظیم مقادیر حسگر TSS به ترکیب فاضلاب خام محلی PS روستوک-شمارل، یک کالیبراسیون نمونه خاص براساس یک روش همبستگی ۵ بار با در مجموع ۷۳ نمونه فاضلاب خام جداگانه، تکرار شد. نمونه ها با یک ملاقه از کانال جریان ورودی، درست قبل از شن کش، گردآوری شدند. پس از آن، نمونه ها طبق دهانه فضای شن کش ۲۰ میلی متری، صافی شدند و سپس به استوانه هایی با حجم کم (۲/۵ لیتر)، تقسیم شدند. در مرحله دوم، غلظت TSS به صورت مصنوعی تغییر داده شد تا سیلندرهای مختلف با مقادیر TSS مختلف بدست آید. بنابراین، غلظت TSS با مخلوط کردن چندین رقیق شده با استفاده از آب پاک، کاهش داده شد، درحالی که نشست و ته نشینی، مقادیر TSS را افزایش می دهد. این روال، دامنه گسترده ای از مقادیر TSS را برای فرآیند کالیبراسیون فراهم می کند. بنابراین، کارکرد کالیبراسیون حاصله برای یک طیف گسترده از مقادیر TSS بدون برون یابی، قابل استفاده است. پس از آن، یک نمونه در سیلندر کالیبراسیون پر می شود و به صورت پیوسته با یک همزن مغناطیسی، مخلوط می شود. سپس، حسگرها از لوله فشار برداشته می شوند و درون استوانه کالیبراسیون قرار می گیرند. سپس،

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

سه مقدار TSS حسگر از بورد کنترلر، ثبت می شوند. در نهایت، هر نمونه برای TSS بوسیله تعیین سه برابر در آزمایشگاه تحلیل می شود (تحلیل طبق [۱۹]، بوسیله صافی کردن و کاهش وزن).

۴.۲. کارکرد کالیبراسیون و تحلیل داده های حسگر

داده های حسگر باید قبل از پردازش بیشتر در مورد رفتار فرسایش و رسوب، اعتباریابی شوند. مقاله های متعددی به ارزیابی خطا و اعتباریابی داده های حسگر پرداخته اند تا یک تابع همبستگی و حداقل یک ناحیه واقعی از مقادیر اندازه گیری شده با توجه به عدم قطعیت ها بدست آید (یعنی [۱۲] یا [۱۵]). طبق این مقالات، تعیین عدم قطعیت ها طبق «راهنمای بیان عدم قطعیت در اندازه گیری» (GUM)، پردازش شد [۲۰]. بنابراین، طرح تحلیل داده زیر بکار گرفته شد:

- ۱- برازش دادن تابع کالیبراسیون (TSS به TSS) با خطاهایی در جهت y و x با استفاده از رگرسیون حداقل مربعات کلی؛
- ۲- محاسبه عدم قطعیت های پارامترهای تابع بوسیله شبیه سازی مونته کارلو برای سطح اطمینان ۹۵٪.
- ۳- تبدیل داده های حسگر اصلی TSS_{sens} بوسیله تابع کالیبراسیون به داده های حسگر کالیبره شده TSS_{cal} ؛
- ۴- حذف مقادیر $TSS_{cal} > 1000 \text{ mg/L}$ ، براساس تخصص اپراتورهای محلی
- ۵- سپس، ارزیابی خطا بوسیله آزمون برونهشته والش ($Walsh$).

ابتدا، عمل کالیبراسیون بوسیله رگرسیون حداقل مربعات کلی، انجام می شود. به این علت، خطاها در هر دو جهت، ناشی از تعیین TSS درون آزمایشگاه (y)، و اندازه گیری TSS بوسیله حسگر (x)، برای مسئله بهینه سازی در نظر گرفته شدند. تابع رگرسیون حاصله، یک تابع چندجمله ای مرتبه اول با شیب ($-$) b و عرض از مبدا a (mg/L) می باشد. این تابع، مقادیر TSS کالیبره شده یعنی TSS_{cal} (mg/L) را از داده های اصلی حسگر TSS_{sens} (mg/L)، محاسبه می کند:

$$f(TSS_{sens}) = b \cdot TSS_{sens} + a \quad (1)$$

دوم اینکه، عدم قطعیت های پارامترهای تابع برای سطح اطمینان ۹۵٪ بوسیله شبیه سازی مونته کارلو در نرم افزار $MATLAB$ محاسبه می شوند (همچنین به [۱۲] مراجعه فرمایید). محاسبه عدم قطعیت ترکیبی ناشی از اندازه گیری های حسگر و تاثیرات میدانی (یعنی مکان نصب)، در اینجا توضیح داده نمی شود. فرض می شود که تاثیرات میدانی، قبلاً در خروجی حسگر شامل شده اند. علاوه بر آن، فرض می شود که تاثیر میدانی رخ داده در طی اندازه گیری درون لوله، برابر با تاثیر میدانی رخ داده در طی فرآیند کالیبراسیون خارج از لوله تحت فشار است.

سوم اینکه، خروجی اصلی حسگر TSS_{sens} به داده های حسگر کالیبره شده TSS_{cal} تبدیل می شوند تا مقادیر TSS برآورد شده بوسیله معادله (۱) بدست آیند. علاوه بر آن، بازه اطمینان ۹۵٪ براساس عدم قطعیت های پارامترهای تابع، محاسبه می شود.

در مرحله چهارم، همه مقادیر $TSS > 1000 \text{ mg/L}$ از مجموعه داده های کالیبراسیون حذف می شوند. این ضابطه براساس تخصص اپراتور محلی است.

در مرحله پنجم، خطاهای اندازه گیری بوسیله آزمون برونهشته والش، رفع می شوند. این تست نیاز به توزیع خاصی ندارد، به آسانی قابل کد نویسی است، محاسبات سریع را ممکن می سازد و برون هشته های بزرگتر کوچکتر از مقادیر باقیمانده را شناسایی می کند.



شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

۵.۲. تعیین داده های ته نشینی و فرسایش

بعد از کالیبراسیون و ارزیابی خطا، پردازش داده نهایی انجام می شود قبل از اینکه تعیین داده های ته نشینی و فرسایش، انجام شود. مشخصات انتقال، براساس مقادیر حسگر *TSS* در *PS* روستوک-شمارل، تحلیل می شوند. مقادیر حسگر *TSS* از *wwtp* مرکزی در قسمت ۲ به عنوان مرجع برای مدل انتقال رسوبات، استفاده می شوند.

طرح پردازش داده ها در شکل ۳ ترسیم شده است و در زیر توضیح داده می شود. برای نگهداری داده ها جهت تعیین، مجموعه داده کامل (شکل ۳ الف)) باید به دو قسمت تفکیک شود: (۱) قسمت داده های فرسایش (شکل ۳ ب))، شامل داده های مربوط به کار کردن یکی از دو پمپ (۲) قسمت داده های ته نشینی (شکل ۳ ج))، شامل داده هایی مربوط به خاموش شدن پمپ ها. هر کدام از قسمت های داده ها (قسمت فرسایش و قسمت ته نشینی)، در ادامه به رویدادهای فرسایش (شکل ۳ د)) و ته نشینی (شکل ۳ ه))، جداگانه تفکیک می شوند. این لازم است، زیرا مشخصه یابی حداقل یک تقریب ریاضیاتی از یک رویداد فرسایش و ته نشینی می باشد. این تک رویدادها اکنون براساس توصیفات ریاضیاتی می باشند.

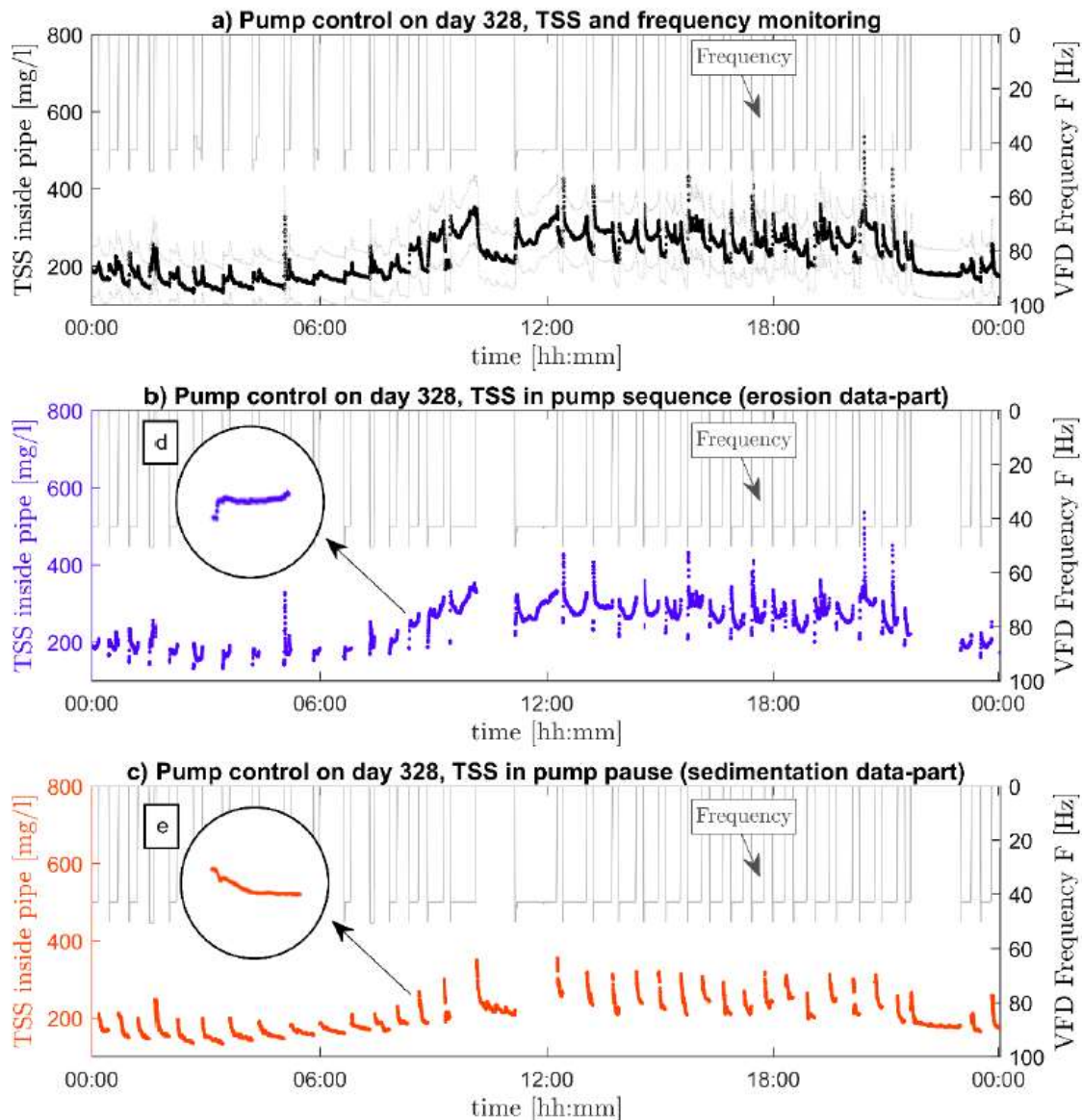
ته نشینی کسر جامدات درون یک سیال را می توان بوسیله توزیع سرعت ته نشینی، توصیف نمود (برای مثال به [۱ یا ۴] مراجعه نمایید). اما، از آنجایی که حسگرهای توربیدایتی، قادر به شناسایی کسرهای تک ذره ای نیستند، تقریب زیر بکار گرفته می شود. رویدادهای ته نشینی به صورت یک فرآیند واپاشی یا تجزیه، مدل سازی شده بوسیله یک معادله دیفرانسیل زیر توصیف می شوند:

$$\frac{dC}{dt} = -\alpha \cdot C \quad (2)$$

جواب آن، یک واپاشی نمایی به نام نرخ ته نشینی $C(t)$ (mg/L) می باشد (معادله ۳). با استفاده از زمان t (ثانیه)، مدت ته نشینی در هر توقف پمپ، C_0 (mg/L)، یک مقدار ثابت مرتبط با غلظت *SS* اول در هر رویداد ته نشینی، C_{rest} (mg/L)، غلظت نهایی جامدات در انتهای هر رویداد ته نشینی و نرخ واپاشی نمایی α ($1/s$)، که پارامتر کلیدی برای توصیف رفتار ته نشینی به صورت زیر می باشد:

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} + C_{rest} \quad (3)$$

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۳. طرح تفکیک داده ها: داده های TSS نظارت شده (الف) به یک قسمت فرسایش (ب) و یک قسمت ته نشینی (ج)، تفکیک می شود. داده های فرکانس از هر دوی VFD (برای P1 و P2)، در یک ضابطه تصمیم برای تفکیک داده ها استفاده می شود (اگر $VFD1 \& VFD2=0$ ، آنگاه ترتیب ته نشینی، در غیر اینصورت ترتیب فرسایش است). تفکیک به رویدادهای فرسایش (د) و ته نشینی (ه) براساس یک اختلاف زمان بین هر مقدار است. اگر اختلاف زمان از بازه گزارش گیری ۵ ثانیه بیشتر باشد (جدول ۱)، یک رویداد شناسایی و تفکیک می شود.

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

در هر گام زمانی t ، یک قسمت از غلظت اولیه TSS (C_0) طبق نرخ واپاشی α که با حل معادله بهینه سازی در معادله (۴) بدست می آید، به اینورت (آبگذر) لوله ها ته نشین می شود. با داشتن n تعداد مقادیر در هر توالی ته نشینی، و TSS_{cal} و (mg/L) ، غلظت اندازه گیری شده و کالیبره شده TSS درون لوله تحت فشار، به صورت زیر بدست می آید:

$$\min_{\alpha} \sum_{i=1}^n (TSS_{cal,i} - C_i)^2 \quad (4)$$

رویدادهای فرسایش طبق [۱] توصیف می شوند. نرخ فرسایش اندازه گیری شده e_a ($kg/(m s)$) درون لوله از غلظت TSS بعد از روشن شدن پمپ ها (نشان داده شده در شکل ۳ (د))، بوسیله معادله (۵)، محاسبه می شود. که در آن $TSS_{cal,i} - TSS_{cal,i-1}$ (mg/L)، اختلاف TSS بین اندازه گیری ها، Δt (ثانیه)، اختلاف زمان بین اندازه گیری ها و A_s (m^2)، مساحت سطحی فرسایش (برای مقایسه پذیری بهتر برابر با $1 m^2$ تنظیم می شود)، می باشند.

$$e_a = \frac{TSS_{cal,i} - TSS_{cal,i-1}}{\Delta t} \cdot A_s \quad (5)$$

نرخ فرسایش اندازه گیری شده e_a را می توان به صورت تابعی از تنش برشی بستر جریان، به نام نرخ فرسایش a (فعال سازی رسوبات) ($kg/(m s)$)، توصیف نمود (معادله ۶). که τ_{pipe} (N/m^2) تنش برشی بستر فعلی، τ_{crit} (N/m^2)، تنش برشی بستر بحرانی است که در آن فرسایش شروع می شود و d (ثانیه)، پارامتر فرسایش است که توصیف کننده قدرت فرسایش (برای با شیب تابع چندجمله ای مرتبه اول) می باشد.

$$a(\tau_{pipe}) = \max(0, d \cdot (\tau_{pipe} - \tau_{crit})) \quad (6)$$

τ_{pipe} ، بوسیله معادله (۷)، براساس چگالی سیال $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$ ، سرعت جریان v (m/s) و ضریب اصطکاک λ (محاسبه شده طبق معادله کولبروک-وایت)، محاسبه می شود.

$$\tau_{pipe} = \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (7)$$

ارتفاع τ_{crit} به چندین پارامتر، مانند مدت ته نشینی (هرچه مدت نشست بیشتر باشد مقادیر τ_{crit} بیشتر می شود) و ترکیب فاضلاب (اجزای آلی τ_{crit} را بخاطر تغییرات بیوژنیک افزایش می دهند)، بستگی دارد. برای مشاهده توضیحات تفصیلی در مورد τ_{crit} به [۱] مراجعه نمایید. نرخ فرسایش a به نرخ فرسایش اندازه گیری شده e_a با حل مسئله بهینه سازی در معادله (۸) تنظیم می شود.

$$\min_{d, \tau_{crit}} \sum_{i=1}^n (e_{a,i} - a_i \cdot w_i)^2 \quad (8)$$

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

برای ملاحظه شرایط واقعی درون لوله تحت فشار، W (کیلوگرم)، وزن ذره ای فعلی در کف لوله، در نرخ فرسایش a ضرب می شود. اگر بستر رسوبات خالی باشد ($W = 0$)، نرخ فرسایش a صفر می شود. با حل معادله (۸)، پارامتر تابع d و علاوه بر آن، تنش برشی بحرانی بستر τ_{crit} بدست می آید.

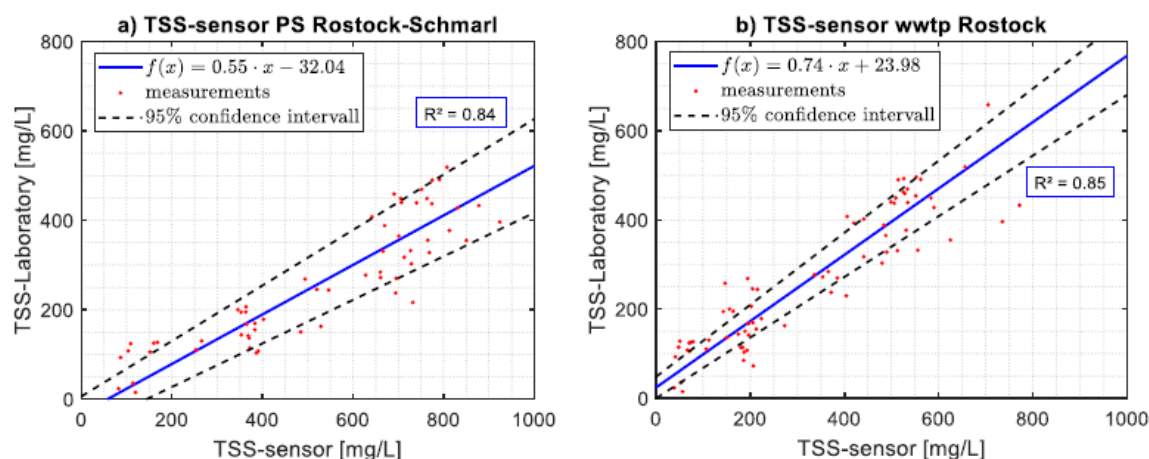
۳. نتایج و بحث

۱.۳. نتایج کالیبراسیون حسگر

نتیجه فرآیندهای کالیبراسیون در شکل ۴ نشان داده شده. TSS آزمایشگاهی بوسیله تابع چندجمله ای مرتبه اول، به هر حسگر، همبستگی داده می شود.

با تابع کالیبراسیون حاصله، مقادیر حسگر به مقادیر آزمایشگاهی تبدیل می شوند قبل از اینکه پردازش بیشتر انجام شود. توابع کالیبراسیون با یک مقدار $R^2 = 0.84$ برای حسگر TSS مربوط به PS روستوک-شمارل، و با یک مقدار $R^2 = 0.85$ برای حسگر TSS در $wwtp$ مرکزی روستوک، برازش داده می شوند. همانگونه که در مقالات انجام شده دیده شده، توابع کالیبراسیون معمول، از همان توابع با مقادیر R^2 بین 0.83 و 0.92 (کالیبراسیون برای توربیدایت) یا همانگونه که قبلاً در [۱۵] بیان شده، بین 0.80 و 0.95 [۱۵] (کالیبراسیون برای توربیدایت)، استفاده کرده اند. مرجع [۹]، یک تابع کالیبراسیون برای همان حسگر استفاده شده در این مطالعه، با مقدار R^2 برابر با 0.94 ، بدست آورده است.

همانگونه که در شیب توابع b می توان دید، مقادیر اندازه گیری شده هر دو حسگر بسیار زیاد می باشند. علاوه بر آن، دو تابع کالیبراسیون مختلف بدست آوردیم، اگرچه هر دو حسگر مشابه هستند و نمونه های TSS یکسانی برای کالیبراسیون استفاده کرده اند. یکی از دلایل آن ممکن است در تفاوت فرآیندهای کالیبراسیون داخلی باشد. مواد مورد استفاده برای کالیبراسیون داخلی با فاضلاب خام تفاوت دارد و همچنین ابعاد استوانه کالیبراسیون مختلف نیز ممکن است وجود داشته باشد. تفاوت پردازش سیگنال داخلی می تواند باعث بدست آمدن مقادیر مختلف و متفاوت شود.



شکل ۴. توابع کالیبراسیون برای محاسبه مقادیر TSS آزمایشگاهی از مقادیر TSS حسگر در محل، شامل خوبی برازش (R^2) و بازه اطمینان ۹۵٪ (الف) برای حسگر TSS در PS روستوک-شمارل (ب) برای حسگر TSS در $wwtp$ مرکزی روستوک

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

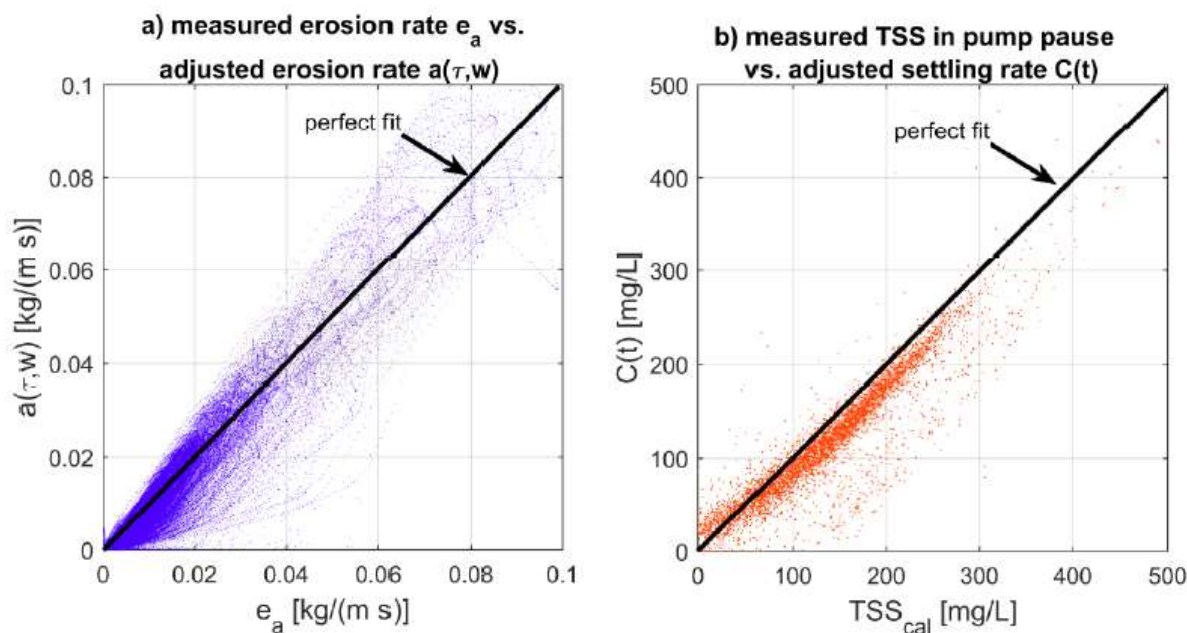
۲.۳. تقریب زدن فرسایش و ته نشینی

ارزیابی مشخصه های فرسایش و ته نشینی فاضلاب خام براساس مقدار هنگفتی از داده ها می باشد. در مجموع، حسگر TSS در PS روستوک-شمارل، مقدار ۴۲۳۸۱۲۱ (بازه ۵ ثانیه ای در یک سال) ثبت کرد. مقدار از آنها، ترتیب های فرسایش را نشان می دهند و ۲۰۳۴۵۰۳ مقدار از آن، ترتیب ها یا توالی ته نشینی را نشان می دهند. تعداد کل توالی های فرسایش برابر با ۶۶۵۳ می باشند، درحالی که ۶۷۳۳ رویداد ته نشینی ثبت شد. این باعث بدست آمدن تقریباً ۲۴ رویداد فرسایش و تقریباً ۲۴ رویداد فرسایش در روز است. بنابراین، پمپ ها هر نیم ساعت به مدت ۳۰ دقیقه، کار می کنند. برای هر رویداد فرسایش و ته نشینی، یک تابع ریاضیاتی برای مقادیر اندازه گیری شده TSS ، بوسیله یک برنامه $MATLAB$ ، به صورت خودکار تنظیم می شوند. این کار پردازش سریع، غیرپیچیده و تکرار پذیر را ممکن می سازد. خود تابع، بوسیله نرخ ته نشینی $C(t)$ ، معادله (۳) و بوسیله نرخ فرسایش نوشته شده به صورت $a(\tau, w)$ ، بیان می شود (طبق معادله (۸)).

ابتدا، ما تقریب های فرآیندهای فرسایش و ته نشینی را ارزیابی می کنیم. شکل ۵، نتایج برازش را به صورت گرافیکی نشان می دهد. در شکل ۵ الف، همه نرخ های فرسایش اندازه گیری شده e_a برحسب همه نرخ های فرسایش برازش شده $a(\tau, w)$ ترسیم می شوند. یک برازش کامل بوسیله $f(x) = x$ یا $a(\tau, w) = e_a$ بدست می آید. برای اکثریت مقادیر فرسایش، $a(\tau, w)$ مسیر برازش کامل با انحراف های بالا و پایین را دنبال می کند. نتایج برازش متعادل هستند. مقدار $R^2 \geq 0.9$ که ۷۳٪ از کل تقریب ها ($n = 481$ رویداد منفرد)، ۳۳٪/۵ ($n = 2100$)، را دارند، با مقادیر $R^2 \geq 0.75$ برازش شدند، درحالی که مقادیر $R^2 \geq 0.5$ دارای ۵۴٪ ($n = 3603$) داشتند. بنابراین، تقریب ریاضیاتی بوسیله نرخ فرسایش $a(\tau, w)$ برای توصیف فرآیند واقعی فرسایش، مناسب است. بخاطر انحراف رو به بالا و رو به پایین مشابه، یک توازن فرض می شود. شکل ۵ (ب) همه مقادیر TSS اندازه گیری شده در هنگام توقف پمپ برحسب همه تقریب های انجام شده بوسیله $C(t)$ را نشان می دهد. در اینجا، اکثریت مقادیر درست پایین تر از خط برازش کامل واقع شده اند. به این ترتیب، فرآیند ته نشینی به میزان جزئی اضافه تخمین می شود. برعکس فرسایش، یک برازش بهتر برای ته نشینی حاصل می شود. مقادیر $R^2 \geq 0.9$ ، در مجموع ۳۱٪ از همه تقریب ها ($n = 2084$) را دارا می باشند، ۵۸٪/۴ ($n = 3934$)، با مقادیر $R^2 \geq 0.75$ و ۷۶٪ با مقادیر $R^2 \geq 0.5$ ($n = 5161$) می باشند.

هر دو مدل قادر به توصیف مناسب شرایط واقعی هستند. کمبودها و نقایص در تقریب فرسایش ممکن است از فرآیند دینامیک آن بوجود آمده باشد. اگر حسگر TSS یک مقدار را فوراً اندازه گیری کند هنگامی که پمپ روشن می شود، ۵ ثانیه طول از پمپاژ طول می کشد تا مقدار بعدی ثبت شود. در این ۵ ثانیه، تعدادی از رسوبات قبلاً فرسایش یافته اند. این بدان معناست که بازه اندازه گیری کوتاه تر در مطالعات بعدی برای فرآیند فرسایش توصیه می شود. علاوه برآن، انعطاف پذیری محدود خود نرخ فرسایش $a(\tau, w)$ ، از آنجا که براساس تابع چندجمله ای مرتبه اول است (معادله (۶))، در نتایج متعادل آن مشارکت دارد. یک تبدیل به یک تابع توانی (برای مثال $a(\tau_{pipe}) = d. (\tau_{pipe} - \tau_{crit})^p$) باعث بدست آمدن نتایج قدری بهتر اما با حجم محاسبات بیشتر، برای مثال، برای یک شبیه سازی انتقال رسوبات، می شود.

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۵. ارزیابی تقریب فرسایش و ته نشینی (الف) همه نرخ های فرسایش اندازه گیری شده e_a بر حسب همه تقریب های ریاضیاتی بوسیله $a(\tau, w)$ (ب) همه رویدادهای ته نشینی اندازه گیری شده درون لوله بر حسب همه تقریب های ریاضیاتی بوسیله $C(t)$

۳.۳. مشخصه های ته نشینی و فرسایش درون لوله تحت فشار تحت جریان ورودی آب و هوای خشک

مشخصه های انتقال اساساً به شبیه سازی عددی انتقال رسوبات در جریان کانال باز یا اندازه یابی امکانات و تاسیسات تصفیه یا انتقال جامدات درون لوله های تحت فشار، بستگی دارند. بنابراین، اندازه گیری «درون لوله» به بهبود دقت مشخصه یابی انتقال و عریض کردن طیف نتایج به میزان قابل توجهی کمک می کند. علاوه بر آن، به عنوان مقایسه برای نتایج آزمایشگاهی (خارج از محل)، بدست آمده در [۱، ۲] عمل می کند.

مثال نشان داده شده در شکل ۶ (الف)، وضعیت معمول در PS روستوک-شمارل، در مقایسه با ایستگاه های پمپاژ زهکشی شهری معمول را نشان می دهد. تغییرات روزانه TSS طبق شکل ۳، به رویدادهای فرسایش (آبی) و رویدادهای ته نشینی (قرمز) تفکیک می شوند. تغییرات روزانه جریان ورودی فاضلاب خام بوسیله Q_{inflow} و جریان پمپ حاصله بوسیله Q_{pipe} (محورهای راست) نشان داده می شوند.

مقادیر TSS در طی شب نسبتاً کم هستند. اینها در ساعت حدود ۳:۳۰ صبح به حداقل ۲۰۰ میلی گرم بر لیت (در ترتیب پمپ) می رسند قبل از اینکه از ۶ تا ۱۲ صبح افزایش یابند و به 400 mg/L برسند. حداکثر میزان تا ۶۰۰ میلی گرم بر لیتر می تواند نتیجه تمیز کننده حسگر، که حسگر را از کثیفی سنگین تمیز می کند (برای مثال، با دستمال کاغذی)، باشد. تغییرات TSS ، از تغییرات جریان ورودی Q_{inflow} پیروی می کند. بنابراین، یک رابطه بین TSS و Q_{inflow} وجود دارد. جریان ورودی کم باعث بدست آمدن مقادیر TSS کم می شود و بالعکس. این بخاطر مصرف آب یا شرایط هیدرولیک در فاضلاب های بالادست



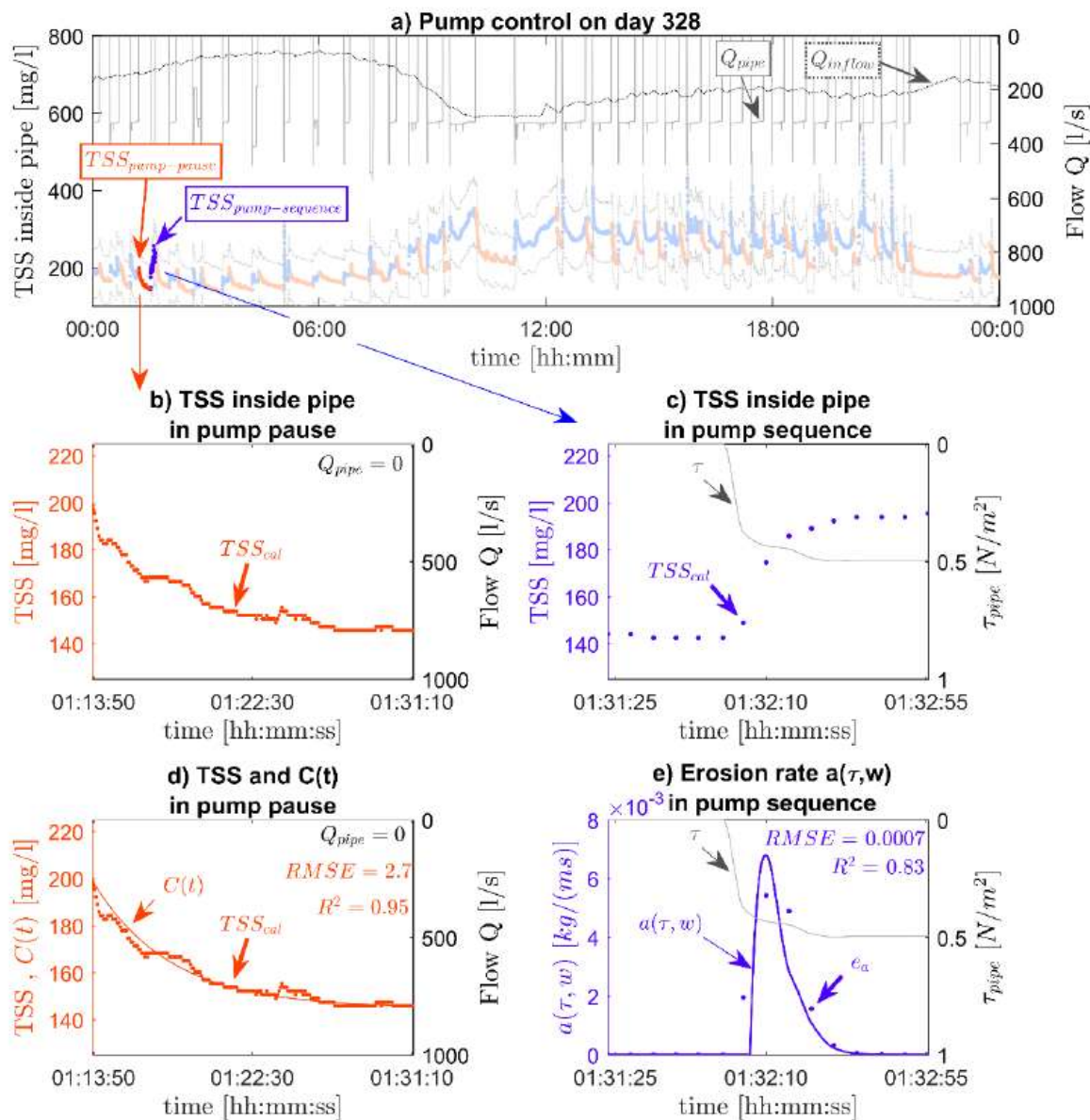
شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

است. مقادیر جامدات بیشتر به خاطر افزایش مصرف آب (دستشویی، پخت و پز و غیره) به PS می رسند. علاوه بر آن، مصرف زیاد آب، عملکرد هیدرولیک را در فاضلاب های بالادست را افزایش میدهد و رسوبات را فرسایش می دهد.

تغییرات TSS بوسیله دو دوره ته نشینی طولانی، نشان داده می شود. یک مشخصه ته نشینی خاص، در این دو دوره، مشهود می شود. ابتدا، TSS سریعاً کاهش می یابد، اما سپس سرعتش کم می شود. به این موضوع در [۲] نیز بررسی شده است، که در آنجا، همان مشخصه ها بدست آمدند. به این ترتیب، یک تابع نمایی (معادله (۳))، این فرآیند را مناسب ترین در نظر می گیرد. در نتیجه، TSS هرگز در توقف های پمپ، تا حداکثر کامل، کاهش نمی یابد.

شکل ۶ (ب)، به تفصیل تغییرات نمونه ته نشینی را نشان می دهد، درحالی که شکل ۶ (د)، نرخ ته نشینی حاصله را نشان می دهد. با اینکه توقف پمپ تنها حدود ۱۷ دقیقه طول می کشد، اما TSS درون سیال از تقریباً ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر در حدود ۲۷/۵٪ به تقریباً ۱۴۵ میلی گرم بر لیتر، کاهش می یابد. اثر این کاهش نهایی، نشان دهنده ریسک تشکیل یک لایه رسوبات ادغام شده درون لوله تحت فشار، حتی در توقف های کوتاه پمپ می باشند. اگر رسوبات بطور ناکامل درون توالی های پمپ بعدی فرسایش داشته باشند، احتمالاً رسوبات دائمی بوجود می آیند.

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۶. داده های نظارت شده در PS روستوک-شمارل برای روز ۳۲۸ (الف) شامل فرسایش نمونه و طرح تعیین ته نشینی (ب-ه) (الف) Q_{inflow} و Q_{pipe} (محور سمت راست) و داده های حسگر TSS شامل سطوح اطمینان ۹۵٪ (محور چپ) (ب) رویداد ته نشینی. مقادیر TSS_{cal} (ج) رویداد فرسایش: مقادیر TSS_{cal} (د) تعیین رویداد ته نشینی: مقادیر TSS_{cal} و نرخ ته نشینی تقریب زده شده $C(t)$ شامل شدن پمپ ها در شب (د) تعیین رویداد فرسایش: نرخ فرسایش e_a و نرخ فرسایش تقریبی $a(\tau, w)$ شامل نتایج برازش نتایج برازش (ه) تعیین رویداد فرسایش: نرخ فرسایش e_a و نرخ فرسایش تقریبی $a(\tau, w)$ شامل نتایج برازش

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

شکل ۶ (ج، ه)، ترتیب فرسایش بعدی و تعیین نرخ فرسایش را نشان می دهد. فرآیند فرسایش همیشه یک منحنی S شکل به خود می گیرد (شکل ۶ ج). این شکل یک شروع جلوگیری شده دارد و پس از آن یک فرسایش افزایش یافته. نقطه عطف منحنی S، شروع فاز کاهشی با یک فرسایش تضعیف شونده را نشان می دهد. جامدات قبلاً ته نشین شده، از تقریباً ۱۴۵ میلی گرم بر لیت تا تقریباً ۲۰۰ میلی گرم در لیتر در مدت ۳۰ ثانیه، فرسایش پیدا می کنند. نرخ فرسایش حاصله (شکل ۶ ه) افزایش ناگهانی در شروع را نشان می دهد، که این بخاطر نتایج برآزش متعادل آن می باشد ($R^2 = 0.83$). مشابه با تنزل هموارتر در انتهای رویداد فرسایش، افزایش تدریجی بیشتری برای ابتدا، فرض می شود. حداکثر فرسایش در تقریباً $0.43 N/m^2$ و بنابراین، قبل از اینکه سطح تنش برشی بیشینه $0.5 N/m^2$ حاصل شود، ظاهر می گردد. افزایش بیشتر تنش برشی (که بوسیله پمپاژ موازی PI و $P2$ انجام می شود)، باعث فرسایش بیشتر جامدات نمی شود، زیرا به حداکثر سطح فرسایش قبلاً رسیده است و کاهش، نشان دهنده خالی شدن لایه رسوبات است.

۴.۳. مقایسه با نتایج آزمایشگاهی (خارج از محل)

نتایج آزمایشگاهی خارج از محل در [۱] با فرآیندهای فرسایش اندازه گیری شده در محل در این مطالعه، مشابه هستند. هر دو روش، منحنی S معمول را هنگام فرسایش جامدات، نشان می دهند. بخصوص مدت محاسبه شده برای تعلیق مجدد کامل در [۱]، با توجه به شرایط هیدرولیک مشابه (تنش برشی بستر تقریباً $0.5 N/m^2$)، تقریباً برای با فرآیندهای واقعی است (مدت تقریباً ۳۰ ثانیه). بنابراین، هر دو روش (در محل و خارج از محل)، برای تعیین مشخصات خوردگی فاضلاب خام، قابل استفاده هستند.

اما، مشخصه یابی در محل رویدادهای فرسایش در مقایسه با روش خارج از محل در [۱] بسیار دشوارتر بوده است، زیرا جامدات درون لوله، در دو جهت اصلی (به سمت بالا و جلو، با نادیده گرفتن اثرات ریز) حرکت می کنند. بنابراین، در کنار جامدات قبلاً ته نشین شده مستقیماً تحت سنسور TSS ، ضرات ته نشین شده در بخش بالادست لوله تحت فشار، بر اندازه گیری ها تاثیر می گذارند. یک محفظه واکنش بسته، درون آزمایشات «خارج از محل» در [۱]، اندازه گیری ها را به میزان زیادی ساده می کنند، هنگامی که فرآیند فرسایش یک سوسپانسیون کنترل شده، شناسایی شود. این ممکن است دلیل دیگری برای نتایج برآزش متعادل می باشد (فصل قبلی را ببینید).

مقایسه مستقیم با آزمایش های ته نشینی «خارج از محل» در [۲]، امکان پذیر نیست. روش «در حمل»، کاهش TSS در فاز سیال (بوسیله یک حسگر توربیداتی کالیبره شده) را اندازه گیری می کند و روش خارج از محل، افزایش جرم کل در پایین یک استوانه را اندازه گیری می کند (بوسیله کاهش وزن). علاوه بر آن، توصیف ریاضیاتی با [۲] متفاوت است. اما، با تبدیل رشد جمعی از [۲] به اتلاف ذرات سیال، یک مسیر برابر با نرخ ته نشینی مشاهده می شود (شکل نمایی). علاوه بر آن، هر دو روش، تقریباً مقدار جامدات یکسان بعد از مدت ته نشینی مشابه، را بدست آوردند. $25/4\%$ از جرم جامدات در یک تست آزمایشگاهی در ۱۷ دقیقه ته نشین شدند در حالی که تقریباً $27/5\%$ از جامدات در همان مدت درون لوله تحت فشار ته نشین شدند.

اندازه گیری پیوسته جامدات، درون یک فاز مایع بوسیله یک حسگر، بسیار آسانتر و مطمئن تر از یک تعیین خارج از محل دستی رشد جرم جامدات، کاهش می یابند. تست های آزمایشگاهی در مقایسه با تعیین با حسگر تاخیر دارند، که این بخاطر تلاش زیاد در طراحی و ساخت، نمونه گیری، اجرای تجربی و شناسایی جرم است. اندازه گیری در محل پیوسته و خودکار بوسیله یک نصب منحصربفرد، تعمیر و نگهداری ساده و کالیبراسیون، اندازه گیری دقت بالا (بازه ۵ ثانیه ای) و پردازش داده خودکار، صورت می گیرد.

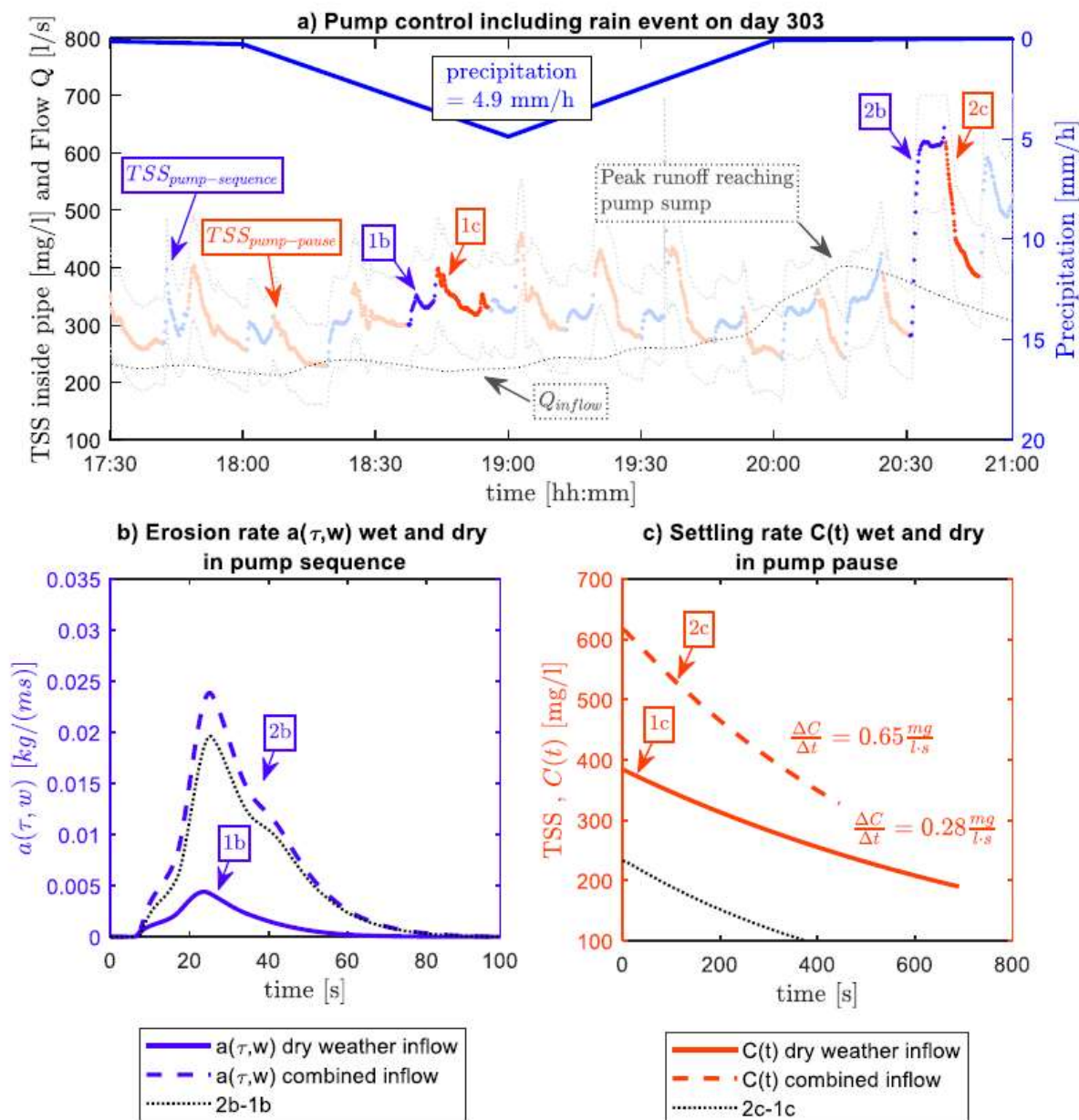


شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

۵.۳. اثر جریان ورودی آب بارندگی بر مشخصه های ته نشینی و فرسایش

بخاطر روان آب جاده متصل، تغییر رفتار فرسایش و رسوب بوسیله جریان ورودی آب بارندگی، فرض می شود. چندین رویداد طوفان در طی مدت مطالعه، اندازه گیری شدند. یکی از مثال ها در شکل ۷ نشان داده شده. شکل ۷ (الف) یک رویداد بارندگی در ساعت ۷:۰۰ بعد از ظهر با بارندگی 44 mm/h (محور راست) را نشان می دهد. منحنی جریان ورودی نشان دهنده این است که روان آب بارندگی، به آرامی به چاه پمپ می رسد (به Q_{inflow} ، مراجعه نمایید، منحنی چپ). مسیر TSS (محور چپ) به توالی های فرسایش (آبی) و ته نشینی (قرمز) تفکیک می شوند. غلظت TSS به میزان قابل توجهی تا تقریباً 600 mg/L افزایش می یابد بعد از اینکه پیک رواناب به چاه پمپ می رسد. شکل ۷ (ب)، یک نرخ فرسایش جریان ورودی آب و هوای خشک (۱ ب) را با یک نرخ فرسایش آب بارندگی (۲ ب) مقایسه می کند. حداکثر فرسایش با جریان ورودی بارندگی تقریباً به اندازه ۵ برابر، افزایش می یابد. یکی از دلایل، ترکیب رواناب بارندگی است. جامدات (ماسه، تکه های ساییده شده لاستیک و غیره) از جاده ها شسته می شوند و وارد فاضلاب می شوند. علاوه بر آن، افزایش تخلیه، رسوبات از قبل ته نشین شده و ادغام شده را افزایش می دهد و مخلوطی از جامدات روان آب و جامدات فاضلاب را به PS می ریزد.

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۷. اثر جریان ورودی آب بارندگی بر فرسایش و ته نشینی (الف) داده های TSS و Q_{inflow} (هر دو بر محور چپ) در طی بارندگی از ساعت ۶:۰۰ عصر تا ۸:۰۰ عصر، با بیشینه 4.9 mm/h (محور راست) (ب) نرخ فرسایش $a(\tau, w)$ در طی جریان ورودی آب بارندگی (۲ ب) در مقایسه با جریان ورودی آب و هوای خشک (۱ ج) شامل کاهش میانگین $\Delta C/\Delta t$ «خدمات آب و هوایی آلمان» (DWD)، داده های بارندگی را ارائه داده است.

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

به این ترتیب، فرآیند ته نشینی زیر (۲ ج) به میزان قابل توجهی با شرایط آب و هوایی خشک متفاوت است (۱ ج). افزایش جریان ورودی TSS ، مقدار شروع ته نشینی (C_0) از تقریباً 400 mg/L تا حداکثر 600 mg/L را افزایش می دهد. مقایسه بهتر فرآیندهای ته نشینی بوسیله کاهش میانگین ارائه می شود که به صورت باقیمانده تفاضل در بازه $[t_1; t_{end}]$ ، تعریف می شود

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{|C(t_{end}) - C(t_1)|}{t_{end} - t_1} \quad (9)$$

در این مثال، غلظت TSS به کمتر از جریان ورودی هوای خشک (۱ ج) با 0.28 mg/(L s) ، کاهش می یابد درحالی که تحت جریان ورودی آب بارندگی (۲ ج) دو برابر سریعتر 0.65 mg/(L s) کاهش می یابد. بنابراین، در کنار غلظت جامدات، ترکیب جامدات نیز تغییر می کند. این نشان دهنده افزایش جریان ورودی ذرات سنگینتر است (جامدات رواناب و جامدات فاضلاب). کاهش میانگین کل تحت جریان ورودی آب و هوای خشک، محاسبه شده بر روی 4520 رویداد ته نشینی، 0.25 mg/(L s) است درحالی که تحت جریان ورودی آب بارندگی 0.9 mg/(L s) است (محاسبه شده ۹ رویداد باران). بنابراین، بیش از $3/5$ برابر ته نشینی سریعتر تحت جریان ورودی آب بارندگی را می توان فرض نمود. این کار، ریسک انسداد را به میزان قابل توجهی افزایش می دهد. این ریسک به بیشترین میزان می رسد، هنگامی که جامدات وارد لوله تحت فشار می شوند. رواناب باران ۱ ساعت بعد از رویداد بارندگی به چاه پمپ می رسد و معمولاً $1/5$ ساعت بعد از رویداد باران به لوله تحت فشار وارد می شود. تجمع ذرات پر جاده ها و رسوب جامدات درون فاضلاب ها با دوره های خشک طولانی تر افزایش می یابد. این بخاطر از بین رفتن آب شویی و محدود شدن تخلیه است. بنابراین، ریسک انسداد در لوله تحت فشار برای رویدادهای باران کوتاه اما شدید بعد از مدت طولانی آب و هوای خشک، افزایش می یابد. اما، این اثر در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفت.

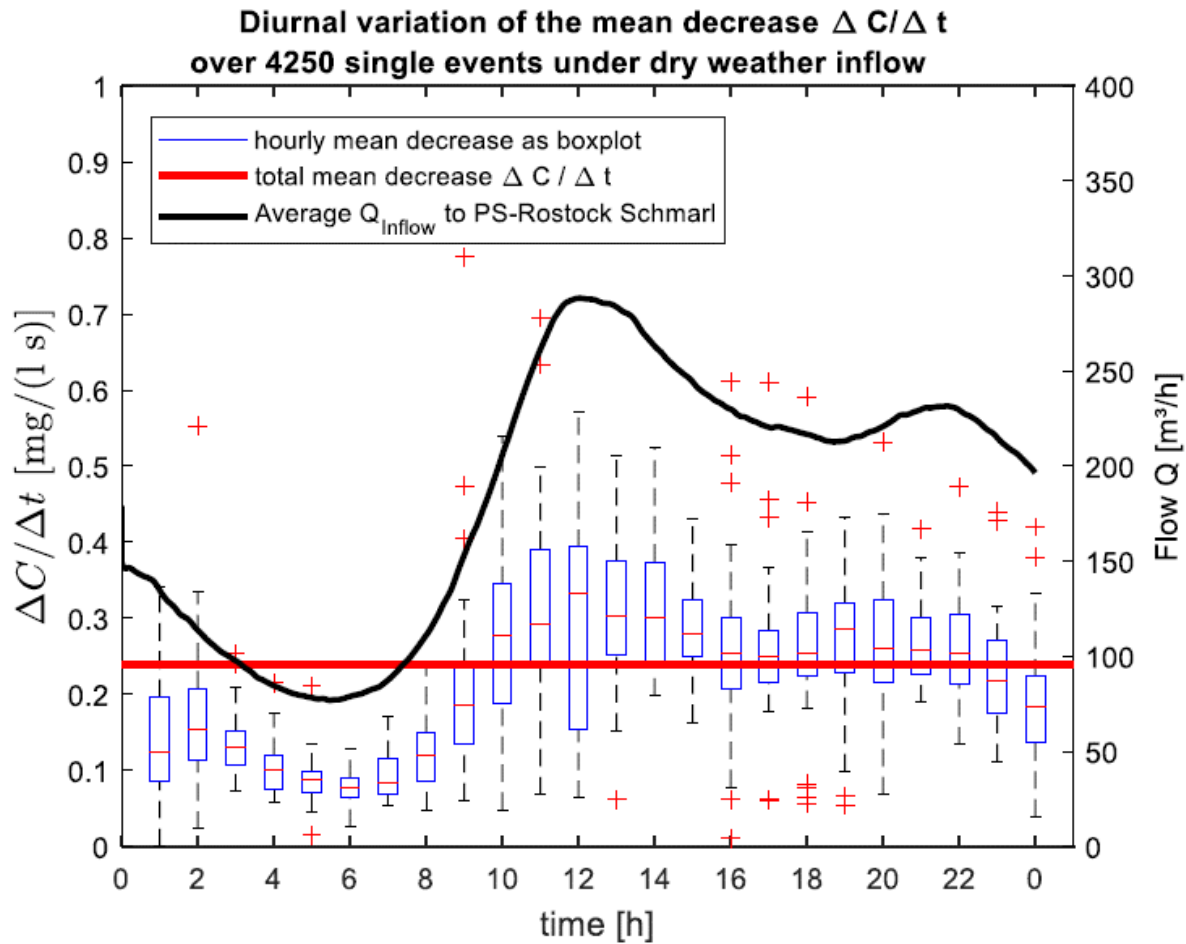
۶.۳. مقایسه با نتایج آزمایشگاهی (خارج از محل)

تغییر رفتار ته نشینی قبلاً در [۲] تشخیص داده شده است. نمونه ها، تحت ته نشینی جریان ورودی آب بارندگی به میزان بسیار سریعتر، گردآوری شدند. تست های آزمایشگاهی مشابه، نشان دهنده کاهش میانگین برای نمونه های آب بارندگی به میزان 1.1 mg/(L s) است درحالی که برای نمونه های آب و هوای خشک 0.18 mg/(L s) می باشد.

۷.۳. تغییرات روزانه ته نشینی و فرسایش

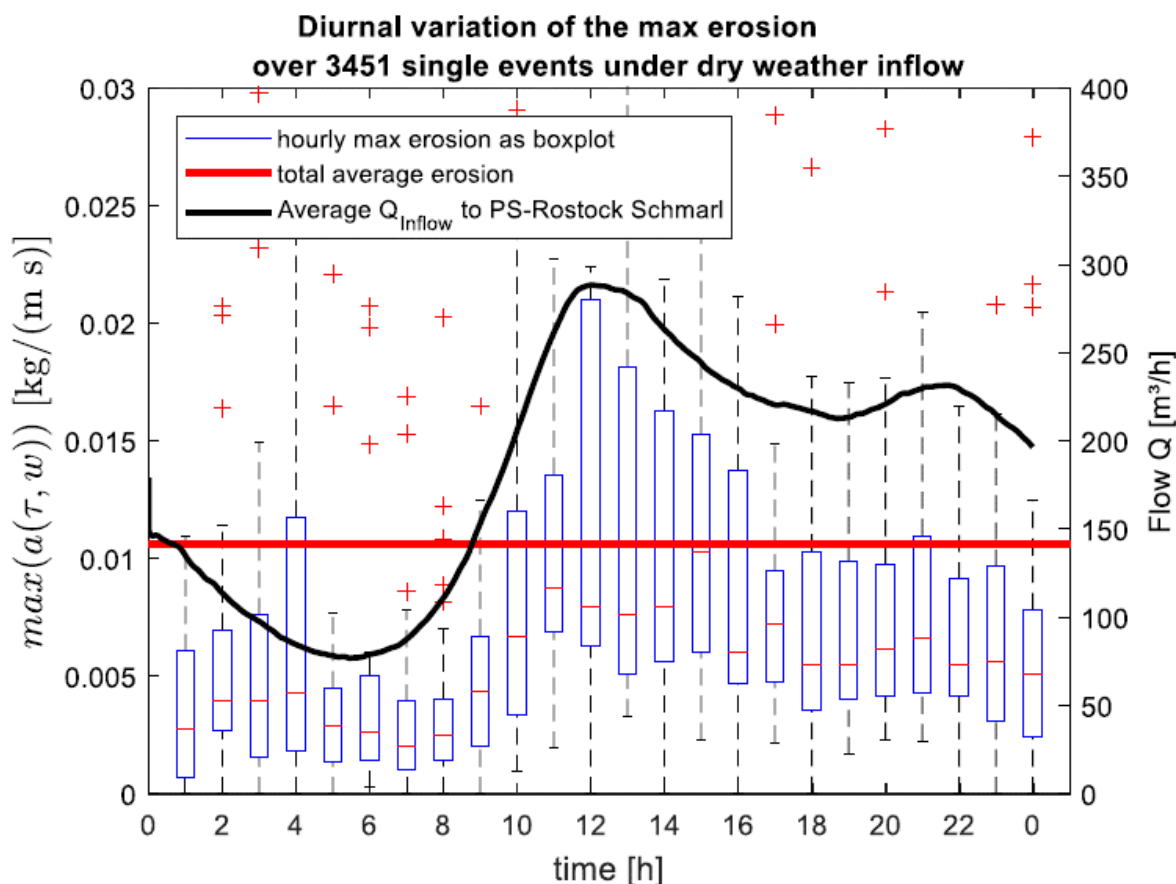
مشخصه های ته نشینی و فرسایش فقط با جریان ورودی آب بارندگی، تغییر نمی کنند. همانگونه که قبلاً ذکر شد، TSS مسیر جریان ورودی را دنبال می کند. از آنجایی که ته نشینی و فرسایش به TSS بستگی دارد، رفتارشان از TSS و در نتیجه جریان ورودی، پیروی می کند. بنابراین، همچنین فرض می شود که تغییرات بخاطر تغییرات جریان ورودی در روز می باشند. این رابطه در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده اند. هر دو نشان دهنده تغییرات میانگین روزانه جریان ورودی (خط مشکی)، شامل نمودارهای فرعی برای کاهش میانگین ساعتی (شکل ۸) و حداکثر فرسایش ساعتی برای هر رویداد (شکل ۹) می باشند.

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۸. تغییرات روزانه کاهش میانگین $\Delta C / \Delta t$ (نمودارهای فرعی) شامل کاهش میانگین کل در ۴۲۵۰ رویداد ته نشینی (خط قرمز) و Q_{inflow} میانگین برای شرایط آب و هوایی خشک (خط مشکی).

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۹. تغییرات روزانه حداکثر فرسایش (نمودارهای فرعی) شامل فرسایش میانگین کل در ۳۴۵۱ رویداد فرسایش (خط قرمز) و میانگین Q_{inflow} برای شرایط آب و هوایی خشک (خط مشکی)

هر دو شاخص (کاهش میانگین و حداکثر فرسایش)، مسیر رو به بالا و رو به جلوی جریان ورودی را دنبال می کنند. بخصوص در صبح، فاضلاب فرآیندهای ته نشینی کم (کمتر از $0.1 \text{ mg}/(L \text{ s})$) و نرخ فرسایش کم (کمتر از $0.0025 \text{ kg}/(m \text{ s})$) دارند. می توان آنرا با کاهش مصرف آب در شب (کاهش ورودی جامدات، کاهش عملکرد هیدرولیک در فاضلاب های بالادست) توجیه کرد. برعکس، بخاطر مصرف آب زیاد در ساعات صبح، پیک جریان ورودی در ظهر به PS می رسد فاضلاب را به مخلوط ته نشین کننده سریعتر (تا حداکثر $0.5 \text{ mg}/(L \text{ s})$) تغییر می دهد. به این ترتیب، نرخ فرسایش تا $0.02 \text{ kg}/(m \text{ s})$ افزایش می یابد. افزایش نرخ فرسایش نتیجه یک فرآیند ته نشینی سریعتر است. هرچه جامدات بیشتری در زمان توقف پمپ ته نشین شوند، جامدات بیشتری در فازهای پمپ، فرسایش پیدا می کنند. بنابراین، نرخ فرسایش به مدت توقف پمپ بستگی دارد. توقف بیشتر پمپ معمولاً در شب یا در صبح با نرخ جریان ورودی کم، رخ می دهد (به [۲] مراجعه نمایید). با این حال، بخاطر یک فاضلاب ته نشین کننده کم سرعت، مقدار جامدات قابل فرسایش، کم است. مقدار قابل فرسایش به حداکثر خود می رسد،



شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

هنگامی که فرآیند ته نشینی سریع باشد (معمولاً در ظهر)، مدت توقف پمپ هرچه که باشد. در نتیجه، مشخصات ته نشینی فاضلاب (کند یا سریع)، تشکیل رسوبات را بیشتر از مدت توقف پمپ ها، تعیین می کنند.

۴. نتیجه گیری

این مقاله، یک سیستم اندازه گیری TSS در محل پیوسته برای فاضلاب خام درون یک لوله تحت فشار و تعیین و مشخصه یابی رفتار ته نشینی و فرسایش براساس داده های حسگر دقت بالا را نشان می دهد. در نهایت، یافته های زیر بدست می آیند:

- حسگرهای نصب شده برای نظارت بر شارهای TSS درون لوله های تحت فشار فاضلاب، مناسب می باشند.
- کالیبراسیون و تعمیر و نگهداری دوره ای حسگرهای TSS باعث بدست آمدن داده های مطمئن می شود.
- داده های حسگر TSS ، مشخصه یابی رسوبات جامدات و رفتار فرسایش را ممکن می سازد.
- نتایج فرسایش و ته نشینی در محل اندازه گیری شده، با نتایج خارج از محل (آزمایشگاهی)، مشابه هستند.
- ته نشینی با افزایش دبی جریان ورودی زیاد (جریان ورودی آب بارندگی، پیک جریان ورودی روز) افزایش می یابد و با کاهش جریان ورودی (کاهش جریان ورودی TSS در شب) کاهش می یابد.
- نرخ فرسایش براساس مقدار جامدات موجود، افزایش یا کاهش می یابد، بنابراین رفتار ته نشینی تغییر می یابد.
- جامدات قبل از رسیدن به سطح تنش برشی بیشینه، فرسایش می یابند.

در اندازه گیری های پیوسته حسگر، مقدار زیادی داده تولید می شود. بخصوص با توجه به شبیه سازی آب شهری، فرصت کالیبراسیون دقیق تا سناریوهای مشخص شده را فراهم می کند. بنابراین، تغییرات فرسایش جامدات و ته نشینی ناشی از جریان ورودی آب بارندگی با شدت های مختلف یا با جریان ورودی روزانه، را می توان به صورت پویا در مدل ههای هیدرولیک با فراهم کردن یک طیف گسترده از پارامترهای کالیبراسیون مناسب، پیاده سازی نمود. نتایج ارائه شده عمدتاً برای شبیه سازی انتقال رسوبات درون لوله تحت فشار PS روستوک-شمارل، ارائه شده در قسمت ۲ از این مقاله: «انتقال رسوبات در لوله های تحت فشار فاضلاب، قسمت ۲: شبیه سازی عددی یک بعدی»، مورد استفاده قرار می گیرند.

1. Rinas, M.; Tränckner, J.; Koegst, T. Erosion characteristics of raw sewage: Investigations for a pumpingstation in northern Germany under energy efficient pump control. *Water Sci. Technol.* **2018**, 78, 1997–2007. [CrossRef] [PubMed]
2. Rinas, M.; Tränckner, J.; Koegst, T. Sedimentation of Raw Sewage: Investigations for a Pumping Station in Northern Germany under Energy-Efficient Pump Control. *Water* **2019**, 11, 40. [CrossRef]
3. Seco, I.; Gómez Valentín, M.; Schellart, A.; Tait, S. Erosion resistance and behaviour of highly organic in-sewer sediment. *Water Sci. Technol.* **2014**, 69, 672–679. [CrossRef] [PubMed]
4. Gromaire, M.C.; Kafi-Benyahia, M.; Gasperi, J.; Saad, M.; Moilleron, R.; Chebbo, G. Settling velocity of particulate pollutants from combined sewer wet weather discharges. *Water Sci. Technol.* **2008**, 58, 2453–2465. [CrossRef] [PubMed]
5. Chebbo, G.; Gromaire, M.-C.; Lucas, E. Protocole VICAS: Mesure de la vitesse de chute des MES dans les effluents urbains. *TSM Tech. Sci. Methodes Génie Urbain Génie Rural* **2003**, A98, 39–49.
6. Regueiro-Picallo, M.; Naves, J.; Anta, J.; Suárez, J.; Puertas, J. Monitoring accumulation sediment characteristics in full scale sewer physical model with urban wastewater. *Water Sci. Technol.* **2017**, 76, 115–123. [CrossRef] [PubMed]
7. Xu, Z.; Wu, J.; Li, H.; Liu, Z.; Chen, K.; Chen, H.; Xiong, L. Different erosion characteristics of sediment deposits in combined and storm sewers. *Water Sci. Technol.* **2017**, 75, 1922–1931. [CrossRef] [PubMed]
8. Bersinger, T.; Le Hécho, I.; Bareille, G.; Pigot, T.; Lecomte, A. Continuous Monitoring of Turbidity and Conductivity in Wastewater Networks. *Rev. Des Sci. De L'eau* **2015**, 28, 9. [CrossRef]
9. Bersinger, T.; Le Hécho, I.; Bareille, G.; Pigot, T. Assessment of erosion and sedimentation dynamic in a combined sewer network using online turbidity monitoring. *Water Sci. Technol.* **2015**, 72, 1375–1382. [CrossRef] [PubMed]
10. Lacour, C.; Joannis, C.; Chebbo, G. Assessment of annual pollutant loads in combined sewers from continuous turbidity measurements: Sensitivity to calibration data. *Water Res.* **2009**, 43, 2179–2190. [CrossRef] [PubMed]
11. Métadier, M.; Bertrand-Krajewski, J.-L. From mess to mass: A methodology for calculating storm event pollutant loads with their uncertainties, from continuous raw data time series. *Water Sci. Technol.* **2011**, 63, 369–376. [CrossRef] [PubMed]
12. Métadier, M.; Bertrand-Krajewski, J.-L. The use of long-term on-line turbidity measurements for the calculation of urban stormwater pollutant concentrations, loads, pollutographs and intra-event fluxes. *Water Res.* **2012**, 46, 6836–6856. [CrossRef] [PubMed]
13. Lacour, C.; Joannis, C.; Gromaire, M.-C.; Chebbo, G. Potential of turbidity monitoring for real time control of pollutant discharge in sewers during rainfall events. *Water Sci. Technol.* **2009**, 59, 1471–1478. [CrossRef] [PubMed]

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

14. Sun, S.; Barraud, S.; Castebrunet, H.; Aubin, J.-B.; Marmonier, P. Long-term stormwater quantity and quality analysis using continuous measurements in a French urban catchment. *Water Res.* **2015**, *85*, 432–442. [CrossRef] [PubMed]
15. Bertrand-Krajewski, J.-L. TSS concentration in sewers estimated from turbidity measurements by means of linear regression accounting for uncertainties in both variables. *Water Sci. Technol.* **2004**, *50*, 81–88. [CrossRef][PubMed]
16. Bertrand-Krajewski, J.-L.; Bardin, J.-P. Evaluation of uncertainties in urban hydrology: Application to volumes and pollutant loads in a storage and settling tank. *Water Sci. Technol.* **2002**, *45*, 437–444. [CrossRef] [PubMed]
17. Knubbe, A.; Fricke, A.; Ecktädt, H.; Neymeyr, K.; Schwarz, M.; Tränckner, J. Energieeffizienter Betrieb von Abwasserfördersystemen Energy efficient strategies for wastewater pumping systems. *Gwf. Wasser|Abwasser* **2014**, *155*, 640–646.
18. HACH-LANGE GmbH. SOLITAX sc User Manual: Edition 4A; HACH LANGE GmbH: Düsseldorf, Germany, 2009; Available online: https://de.hach.com/asset_get.download.jsa?id=25593604876 (accessed on 12 October 2019).
19. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasserund Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H); Bestimmung des Gesamttrockenrückstandes, des Filtrattrockenrückstandes und des Glührückstandes (H 1) (German Standard Methods for the Examination of Water, Waste Water and Sludge; General Measures of Effects and Substances (Group H); Determination of the Total Solids Residue, the Filtrate Solids Residue and the Residue on Ignition (H 1)); DIN ISO 38414-S; Beuth Verlag GmbH: Berlin, Germany, 1987.
20. International Organization for Standardization (ISO). Uncertainty of Measurement—Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995); ISO/IEC Guide 98-3:2008(E); ISO: Geneva, Switzerland, 2008.