

## طراحی و ارزیابی سیستم اندازه گیری جریان آب مبتنی بر صدا

علیرضا اکبری<sup>۱\*</sup>، مسعود آریانپور<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> ایران، تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۴۵۸۸۸۹۶۹۴، کارشناسی ارشد

<sup>۲</sup> تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۴۴۵۸۸۸۹۶۹۴، استادیار

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [ar.akbari@mech.sharif.edu](mailto:ar.akbari@mech.sharif.edu)

### چکیده

کاربردهای روز افزون سیالات، در مناطق مسکونی و بسیاری از صنایع، نیازمند پیشرفت در کنترل بهینه سیالات و دانستن دبی سیال در هر لحظه است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری دبی سیالات و به خصوص آب وجود دارد. در پژوهش حاضر، از روش مبتنی بر اکوستیک برای تخمین دبی استفاده می‌شود. هدف این پژوهش طراحی و ساخت یک دستگاه ساده اندازه‌گیری دبی و تحلیل تئوری عوامل ایجاد صوت در آن است. پس از ثبت سیگنال‌های صوتی، با استفاده از ۲ روش تحلیل در حوزه‌ی زمان و تحلیل در حوزه‌ی فرکانس، دبی جریان تخمین زده می‌شود. روش اول برای اعتبارسنجی دریافت صوت از دستگاه آزمایش مانند پژوهشی بر روی لوله آب انجام شد و نتایج نشان می‌دهد که همانند پژوهش می‌توان شدت صوت را بر حسب دبی جریان با یک منحنی درجه ۲ برازش کرد. در روش دوم، برای بالا بردن نسبت سیگنال هدف به نویز در نمونه برداری‌ها، آزمایشی انجام شد و شیر به عنوان منبع صوت منتشر شده مشخص شد. دریافت سیگنال صوتی از محل شیر انجام شد و با استفاده از تحلیل مل - فرکانس<sup>۱</sup> ویژگی‌ها بدست آمدند. در نهایت طبقه‌بند لجستیک<sup>۲</sup> رگرسیون<sup>۲</sup> با دقت ۹۰ درصد بهترین مدل انتخاب شد.

**کلمات کلیدی:** صوت ایجاد شده توسط جریان؛ دستگاه صوتی؛ تشخیص صدا؛ تشخیص جریان.

### ۱- مقدمه

نیاز روز افزون به منابع طبیعی باعث شده است که محققان به دنبال راهکارهایی برای مصرف بهینه مواد باشند. یکی از راهکارهای مصرف بهینه، کنترل دبی سیال است و اگر این کنترل در زمان‌های گسسته و دستی انجام گیرد باعث نامنظم شدن داده‌های دستگاه دبی‌سنج خواهد شد. پیشرفت تکنولوژی باعث شده است کنترل دبی سیال به صورت اتوماتیک و لحظه‌ای انجام شود تا

<sup>۱</sup> Mel-Frequency

<sup>۲</sup> Logistic Regression

نیازی به اپراتور انسانی نباشد [۱]. یکی از روش‌های موثر بهینه‌سازی در زمینه‌ی کنترل مصرف مایعات به صورت دینامیک، استفاده از صدای لحظه‌ای جریان در لوله است. مزیت استفاده از داده‌ی صوتی نسبت به تصویری برای اندازه‌گیری دبی در کاربرد آن‌ها در تاریکی است [۲]. استفاده از سیگنال‌های آکوستیک، نه تنها به دلیل حجم عظیمی از اطلاعاتی که در مورد محیط دارد، بلکه به دلیل ارزان بودن، کیفیت بالا و حساسیت سنسورهای مربوطه، یکی از امیدوارکننده‌ترین روش‌ها هستند. در عین حال، به دلیل وجود انواع زیادی از صداها مانند صدای افراد، محیط خارج، وسایل الکترونیکی و...، تشخیص صدای حاصل از عبور سیال کار دشواری است. با استفاده از روش‌های مختلف پردازش سیگنال می‌توان سیگنال‌های صوتی را تحلیل کرد و در نهایت داده‌ها را با مدلی مناسب آموزش داد و دبی‌های مختلف را با یک سیستم نسبتاً ارزان و آسان تخمین زد [۳].

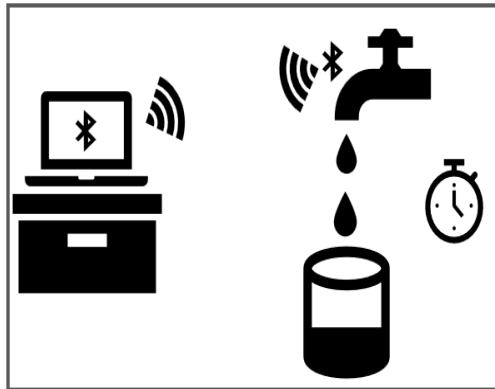
در چند دهه‌ی گذشته، بسیاری از محققان روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری نرخ جریان به کار بردند. ۳ روش رایج مورد استفاده در اندازه‌گیری‌ها استفاده از سنسور آکوستیک، سنسور شتاب‌سنج و دستگاه سرعت‌سنجی با داپلر لیزری هستند [۴]. روش استفاده از سنسور آکوستیک نسبت به دو روش دیگر بدلیل گسترده‌تر بودن دامنه‌ی اطلاعات عملکرد بهتری دارد؛ این امکان فراهم می‌شود که بتوان با تعداد سنسورهای کمتری نمونه از محیط اطراف جمع‌آوری کرد. میکروفون ساده بلوتوثی خصوصاً که به عنوان یک سنسور آکوستیک عمل می‌کند هزینه‌ی کمتری نسبت به دو روش دیگر دارد که این مزیت بسیار مهمی است. روش‌های مختلفی در پیش پردازش صدا، استخراج مشخصات مهم، و استفاده‌ی بهینه از مشخصات استخراج شده، پیشنهاد شده‌اند که در نهایت تخمین دبی جریان با دقت خوبی انجام می‌شود. هانگ و همکاران [۱] با استفاده از مدل ماشین‌بردار پشته‌یابی توانستند با دقت ۹۸ درصد دبی سنجی حوضه‌های رودخانه انجام دهند. ایبارز و همکاران [۵] با نصب میکروفون بر روی لوله آب خانه با استفاده از مدل کی-نزدیک-ترین همسایه سطح دبی آب را با دقت ۹۰ درصد تخمین زدند. صفری و توسلی [۶] با انجام تست بر روی قسمت افقی لوله و زانویی دریافتند که نوع همبستگی ارتعاشات لوله با دبی جریان آب (خطی یا سهموی) به محل نصب میکروفون بستگی دارد. جیکوب و همکاران [۷] از قسمت خروجی شیر آب نمونه برداری کردند و با میانگین خطای ۱۵ درصد دبی جریان آب را تخمین زدند. گوکسو [۸] با نصب میکروفون بر روی لوله آب خانه با استفاده از تحلیل آنژیومی و مدل شبکه‌عصبی مصنوعی با دقت ۹۸.۶ درصد دبی جریان تخمین زده شد. ایوانز و همکاران [۹] نشان دادند که دبی جریان با دامنه ارتعاشات عرضی لوله رابطه‌ی درجه ۲ دارد. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که دامنه‌ی ارتعاشات عرضی منتشر شده به جنس و قطر لوله وابسته است.

پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی شناخت فعالیت‌های زندگی روزمره با استفاده از تکنیک انگشت‌نگاری صوتی توسط سنسور آکوستیک انجام شده‌اند [۱۰] ولی تاکنون تعداد اندکی نقاط مختلف مسیر جریان را نمونه‌برداری کرده‌اند. صفری و توسلی [۶] دو تست بر روی قسمت افقی و زانویی لوله انجام دادند و مشاهده کردند که در قسمت زانویی دامنه فرکانس سیگنال منتشر شده از آب بیشتر است. در این مقاله ۶ نقطه از مسیر جریان نمونه برداری شد و برای آزمایش نهایی میکروفون در نزدیکی منابع صوت نصب شد. این عمل باعث شد نسبت سیگنال هدف به نویز به حداکثر برسد و پردازش سیگنال با دقت خوبی انجام شود. هم چنین اکثر آزمایشاتی که بر روی لوله و شیر انجام شده‌اند میکروفون‌ها در محفظه‌ای جهت عایق کاری صوتی قرار می‌گرفتند ولی در این مقاله با بالابردن نسبت سیگنال هدف به نویز نیازی به محفظه نشد.

## ۲- مدل کلی دستگاه

از هندزفری بلوتوثی جهت ضبط صدا استفاده شد. نصب هندزفری تنها نیاز به چسب دارد و در زمان خالی شدن باتری به راحتی می‌توان آن را شارژ و دوباره نصب کرد. همچنین چون قسمت مکانیکی ندارد، عمر بالایی دارد. پس از نصب با اتصال بلوتوثی به مرکز محاسبه، میکروفون صدا را ضبط و سیگنال صوتی را ارسال می‌کند. شکل (۱) نمای توصیفی دستگاه آزمایشگاه را نشان می‌دهد. ابتدا جهت افزایش نسبت سیگنال هدف به نویز آزمایشاتی انجام شد و دستگاه تا حد ممکن نزدیک به منبع صوت نصب شد. سپس آزمایشات اصلی برای پیاده‌سازی مدل یادگیری ماشین بر روی دستگاه صورت گرفت. توسط نرم‌افزار ابتدا سیگنال‌های صوتی پردازش شدند و بعد داده‌های آموزشی با مدل‌های مختلف یادگیری ماشین آموزش داده شدند و سطح دبی جریان تخمین زده شد. با استفاده از داده‌های آموزش، مدل می‌تواند شش سطح مختلف جریان آب و حالت سکوت را تخمین بزند. سطوح مختلف جریان آب در جدول ۱ مشاهده می‌شود. پس از بررسی خطاها، بهترین مدل یادگیری ماشین برای دستگاه صوتی انتخاب شد. در نهایت دقت دستگاه

با تعدادی داده‌های جدید تست شد. با توجه به محدودتر بودن بازه‌های هر سطح در این مقاله نسبت به مطالعات قبل، دستگاه می‌تواند با دقت بیشتری دبی واقعی را تخمین بزند.



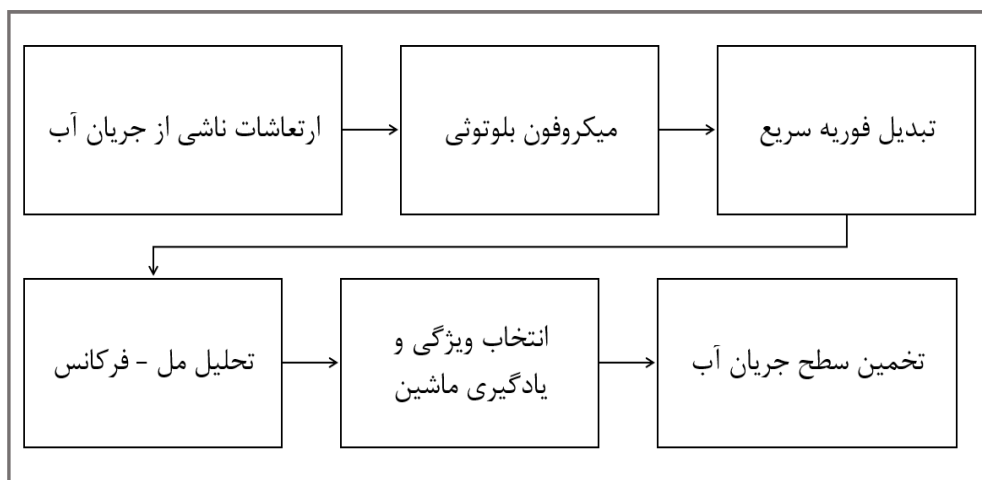
شکل ۱. نمای توصیفی دستگاه آزمایش برای ثبت فشار صوتی ناشی از جریان آب

جدول ۱. سطوح مختلف جریان آب (دبی در نظر گرفته شده میانگین بازه‌ها در هر سطح است).

سطح آب	دبی آب (میلی لیتر بر ثانیه)
۱	۰-۳۰
۲	۳۰-۵۰
۳	۵۰-۷۰
۴	۷۰-۹۰
۵	۹۰-۱۱۰
۶	۱۱۰-۱۲۵

### ۳- پیاده‌سازی سیستم

روند کلی تخمین سطوح مختلف آب در شکل (۲) آورده شده است. در ادامه به توضیح مختصر مراحل پرداخته خواهد شد.



شکل ۲. مراحل کلی انجام شده برای تخمین سطح جریان آب

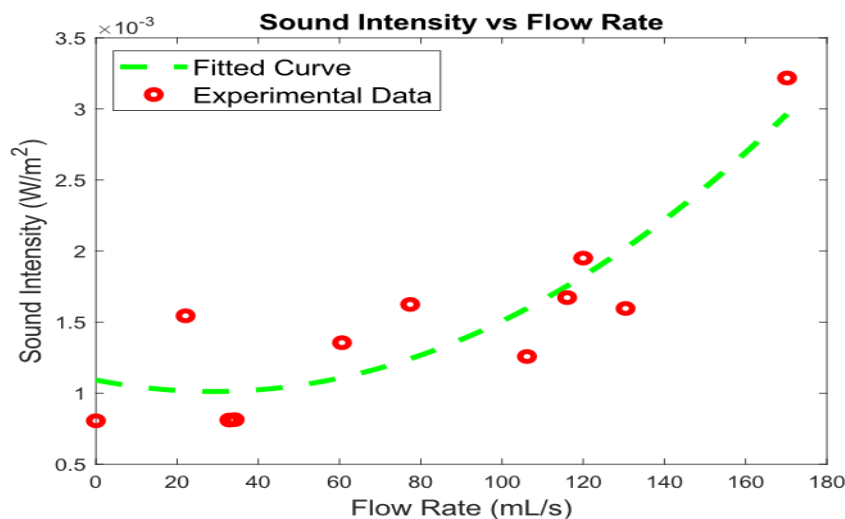
### ۱-۳ میکروفون بلوتوثی

با اتصال بلوتوثی میکروفون هندزفری به لپ‌تاپ ضبط صدا انجام شد. مشخصات ضبط صدای برنامه کامپیوتری در جدول (۲) آورده شده‌اند. در انتخاب طول هر فریم، اگر فریم خیلی کوتاه باشد نمونه‌های کافی برای پردازش دقیق و قابل اعتماد نداریم و اگر طولانی باشد، سیگنال در کل فریم بیش از حد تغییر می‌کند. برای تشخیص گفتار، بازه‌ی ۱۵-۳۵ میلی ثانیه بهینه است [۱۱]. داده های صوتی صحبت کردن انسان‌ها نسبت به داده‌های صوتی جریان آب در لوله، تغییرات بیشتری نسبت به زمان دارد. پس، هر دقت برداشت داده‌ای که برای تشخیص گفتار انسان‌ها خوب باشد، برای جریان آب در لوله نیز خوب است. با توجه به استاندارد، طول هر فریم ۱۰۲۴ نمونه در نظر گرفته‌شد. با توجه به نرخ داده‌برداری ۴۴۱۰۰ هرتز، طول هر فریم حدود ۲۳ میلی ثانیه می‌شود.

جدول ۲. ورودی‌های ضبط صدا به برنامه کامپیوتری

مقدار	ورودی
طول فریم	۱۰۲۴ نمونه
عمق بیت	۱۶ بیت
تعداد کانال دریافتی	۱ کانال
نرخ داده‌برداری	۴۴۱۰۰ هرتز
مدت زمان	۶ ثانیه

ابتدا آزمایشی جهت اعتبارسنجی عملکرد میکروفون و ایزوله بودن محیط آزمایش انجام شد. در شکل (۳) نمونه‌های تجربی در دبی‌های مختلف بر حسب شدت صوت هستند. مانند پژوهشی که ایوانز و همکاران [۹] انجام دادند می‌توان شدت صوت را بر حسب دبی جریان با یک منحنی درجه دو برازش کرد.



شکل ۳. نمودار درجه دو برازش شده بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده شدت صوتی

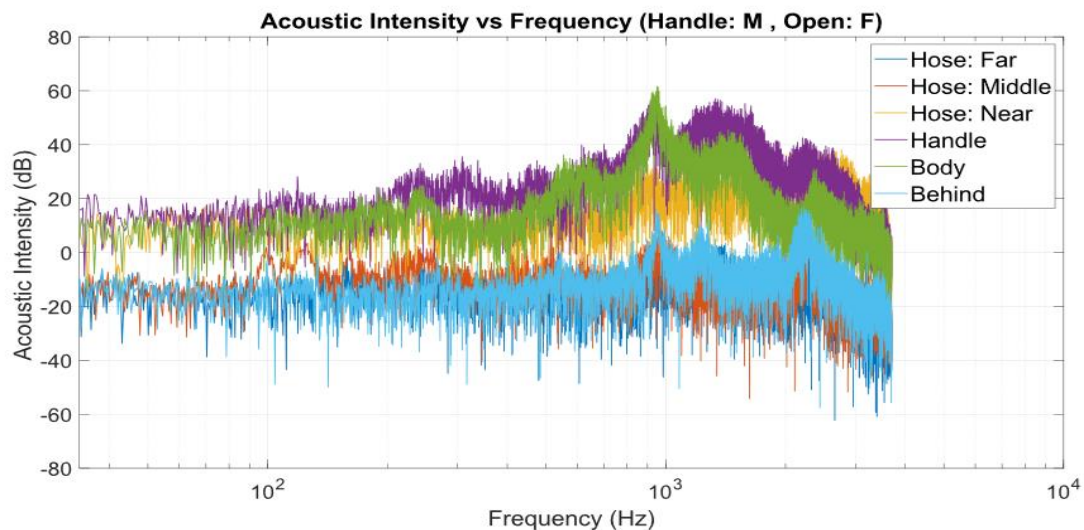
در سال ۱۹۶۲، رایبنر [۱۲] با توجه به رویکردی جدید بیان کرد: این که صدا چگونه تولید می‌شود، به دلیل اثرات جریان آشفته، نیروهای حجمی در مرز یا منابع جرمی، مهم نیست. فشار آکوستیک تولید شده در محیط تحت تاثیر قدرت فشار نوسانی هیدرولیکی است. سیگنال صوتی تولید شده از صدای آب، طبق قانون مربع معکوس در میکروفون دریافت می‌شود [۱۱]. با توجه به این قانون و شدت پایین صوت تولید شده از جریان آب، میکروفون باید تا حد ممکن به منبع صوت نزدیک شود. طی آزمایشی میکروفون از ورودی شیر آب تا خروجی شلنگ آب قرار داده‌شد. در تحقیقات آکوستیک این روش کاربرد زیادی در شبیه‌سازی و پژوهش تجربی دارد [۱۳].

شیر آب باز است و میکروفون در ۶ نقطه از دورترین فاصله نسبت به شیر آب (سر شلنگ آب) تا پشت بدنه شیر آب جایگذاری شد.

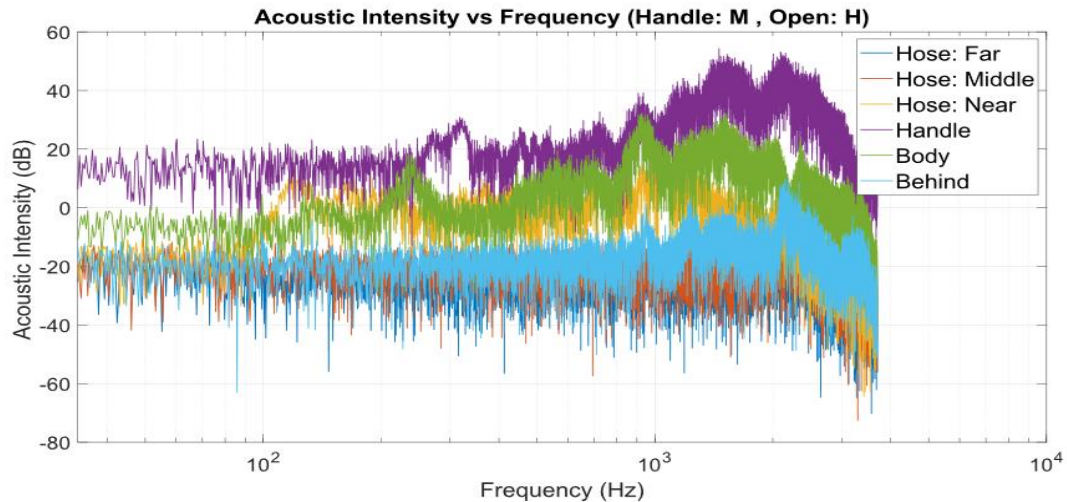


شکل ۴. نقاط قرارگیری میکروفون در آزمایش تشخیص منابع صوتی (نقاط قرارگیری میکروفون بر روی شلنگ با فلش مشخص شده‌اند).

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود سه نقطه بر روی شلنگ (نقطه‌ی نزدیک، نقطه‌ی میانی و نقطه‌ی دور) و سه نقطه بر روی کلگی شیر، بدنه‌ی شیر و پشت شیر بر روی دیوار قرار دارند. آزمایش در چهار حالت کلگی شیر انجام می‌شد. در دو موقعیت کلگی در میانه قرار دارد و آب سرد و گرم هر دو خارج می‌شوند؛ در دو موقعیت دیگر کلگی در سمت راست قرار دارد و تنها آب سرد خارج می‌شود. هر کدام از این موقعیت‌ها شامل حالت کاملاً باز شیر و حالت نیمه باز هستند. پس از پردازش سیگنال و تحلیل فرکانس نمودار شدت آکوستیک بر حسب دسی بل نسبت به فرکانس محاسبه می‌شود. نتیجه‌ی حالت کلگی شیر میانه وضعیت کاملاً باز و نیمه باز به ترتیب در شکل (۵) و شکل (۶) مشاهده می‌شوند.



شکل ۵. نمودار شدت صوت نسبت به فرکانس در شش نقطه (کلگی شیر : میانه، وضعیت: کاملاً باز)

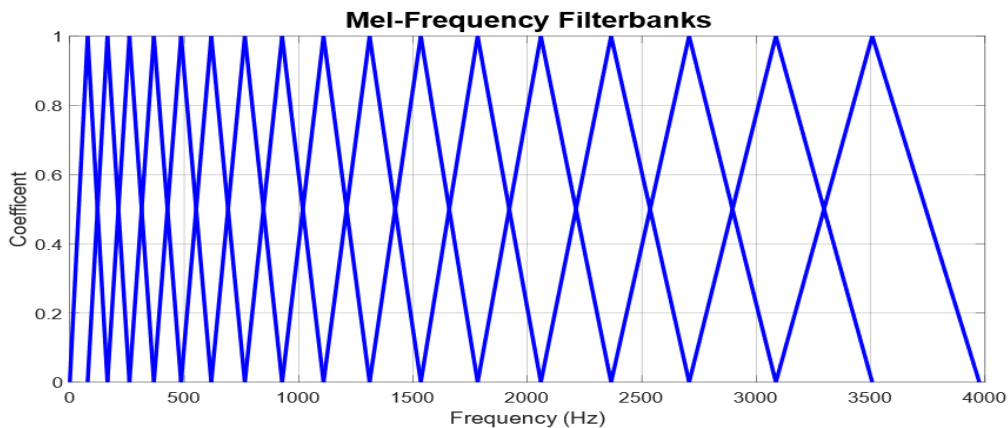


شکل ۶. نمودار شدت صوت نسبت به فرکانس در شش نقطه (کلگی شیر: میانه، وضعیت: نیمه باز)

بدلیل اینکه قسمت کلگی و بدنه شیر از بیشترین شدت‌های صوتی برخوردارند و در نقاط دورتر دامنه شدت صوت کاهش می‌یابد می‌توان نتیجه گرفت منبع صوت غالب از کلگی و بدنه شیر است. جهت تخمین سطح جریان آب میکروفون بر روی شیر نصب شد.

### ۲-۳ تبدیل فوریه سریع و تحلیل مل - فرکانس

برای پردازش سیگنال دو ثانیه از میانه‌ی داده‌های ثبت شده که نویز کمتری دارد، انتخاب شد. بدلیل اینکه ابتدا و انتهای سیگنال بدلیل وصل و قطع شدن میکروفون دارای مقداری نویز است. سپس، تبدیل فوریه سریع هر فریم از این محدوده محاسبه شد و طیف فرکانسی مربوطه بدست آمد. برای تقسیم‌بندی سیگنال و بدست آوردن ویژگی‌ها از فیلتربانک<sup>۳</sup> مل استفاده شد. همانند شکل (۷) این فیلتربانک تشکیل شده‌است از تعدادی فیلتر مثلثی شکل که از ضریب صفر تا یک تغییر می‌کنند.



شکل ۷. فیلتر بانک‌های اعمال شده بر نمودار فرکانسی جهت بدست آوردن ویژگی‌ها (۱۷ فیلتربانک اول در شکل مشاهده می‌شود).

سپس فیلتربانک‌ها بر هر طیف فرکانسی اعمال شدند و در نهایت میانگین هر کدام از فیلترهای مثلثی محاسبه شد. خروجی هر فیلتر مثلثی شکل یک ویژگی بود که در نهایت ۳۲ فیلتربانک بدست آمد [۱۴]. جهت اعمال فیلترها ابتدا با فرمول (۱) فرکانس  $f$  به مل  $M$  تبدیل شد.

$$M(f) = 1125 \times \ln(1 + f / 700) \quad (1)$$

<sup>۳</sup> Filter banks

سپس محدوده‌ی مل به تعداد مدنظر به طور مساوی تقسیم‌بندی شد و مل‌ها با استفاده از فرمول (۲) به فرکانس برگردانده شدند. با ۳۲ تقسیم‌بندی، مقدار فرکانسی داریم که اندیس  $i$  از شمارنده‌ی صفر شروع می‌شود و در نهایت به ۳۲ می‌رسد.

$$f_i(M) = 700 \times (\exp(M / 1125) - 1) \quad (2)$$

معادله‌ی فیلترهای مثلثی شکل با استفاده از فرمول (۳) محاسبه شدند. در این فرمول  $i$  شماره‌ی فیلتر و  $k$  فرکانس هر نمونه در طیف فرکانسی است. با دانستن فرکانس هر نمونه و قرار دادن در ضابطه‌ها ضریب اعمالی بر آن نمونه بدست آمد و در مقدار شدت صوت نمونه ضرب شد.

$$H_i(k) = \begin{cases} 0 & k < f_{i-1} \\ \frac{k - f_{i-1}}{f_i - f_{i-1}} & f_{i-1} \leq k \leq f_i \\ \frac{f_{i+1} - k}{f_{i+1} - f_i} & f_i \leq k \leq f_{i+1} \\ 0 & k > f_{i+1} \end{cases} \quad (3)$$

میانگین هر تقسیم‌بندی محاسبه شد و با فرمول (۳) بر حسب دسی بل بدست آمد.  $I$  شدت صوتی پس از اعمال فیلتربانک است و  $I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$  شدت صوتی هوای مرجع است [۱۵].

$$IL = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (4)$$

### ۳-۳ انتخاب ویژگی‌ها و دسته‌بندی

جهت کاهش هزینه محاسبات و حذف داده‌های پرت ابتدا داده‌ها استاندارد ( میانگین صفر و واریانس ۱) شدند و سپس از تحلیل مؤلفه‌های اصلی<sup>۴</sup> استفاده شد. پس از انتخاب ویژگی‌های مهم‌تر، از پنج روش طبقه‌بندی ماشین‌بردار پشتیبانی<sup>۵</sup>، رگرسیون لجستیک، آنالیز افتراقی خطی<sup>۶</sup>، درخت تصمیم<sup>۷</sup> و الگوریتم کی-نزدیک‌ترین همسایه<sup>۸</sup> استفاده شد. هر کدام از مدل‌ها دارای هایپرپارامترهایی هستند که روند یادگیری مدل بر روی داده‌ها را تنظیم می‌کنند. با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل چندلایه (Cross-Validation) هایپرپارامتر مناسب انتخاب شد [۱۶].

## ۴- نتایج

### ۴-۱ هایپرپارامترها

آزمایش بر روی شیر آب با فرکانس ۴۴۱۰۰ هرتز انجام شد. طول زمانی هر فریم ۲۳ میلی‌ثانیه معادل ۱۰۲۴ نمونه است. ابتدا با تبدیل فوریه سریع طیف فرکانسی سیگنال صوتی بدست آمد. سپس با تحلیل مل-فرکانس و اعمال فیلتربانک‌ها ۳۲ ویژگی برای هر دبی جریان محاسبه شد. چند نمونه از نتایج در شکل (۸) مشاهده می‌شود. به دلیل اینکه در فرکانس‌های بالا شدت صوت و تغییراتش

<sup>۴</sup> Principal component analysis (PCA)

<sup>۵</sup> Support Vector Machine (SVM)

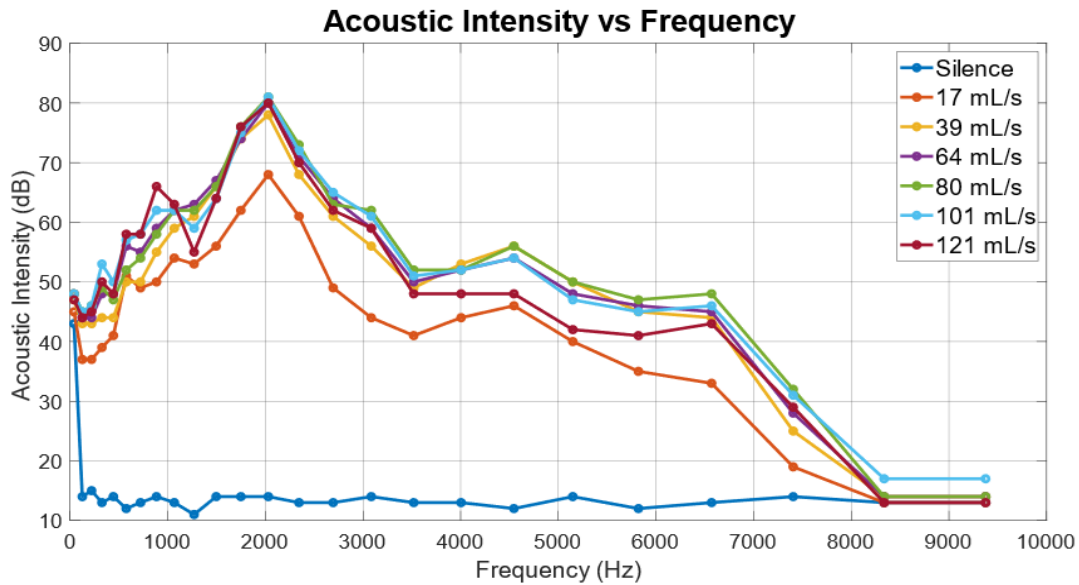
<sup>۶</sup> Linear discriminant analysis (LDA)

<sup>۷</sup> Decision Tree

<sup>۸</sup> K-Nearest Neighbours Algorithm (KNN)

<sup>۹</sup> Hyperparameter

کم است فیلترهای اعمالی در فرکانس های بالا شامل بازه‌ی وسیع تری از فرکانس می‌شوند. سپس با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های مهم‌تر انتخاب شدند. تعداد ویژگی‌ها از ۳۲ عدد به ۱۲ عدد کاهش یافت. این عمل باعث شد تحلیل ویژگی‌ها آسان‌تر صورت بگیرد و زمان یادگیری مدل بر روی داده‌های آموزش نیز کوتاه‌تر شود. همان‌طور که در شکل (۸) نیز مشاهده می‌شود در قسمت‌های ابتدا و انتهای ویژگی‌ها اختلاف کمی با یکدیگر دارند، پس می‌توان از این ویژگی‌ها صرف نظر کرد. پس از انتخاب ویژگی‌ها با اعمال پنج مدل یادگیری ماشین با هایپرپارامترهای مختلف، مناسب‌ترین آن‌ها با بیشترین دقت در جدول (۳) آورده شده‌اند. مشاهده می‌شود که برای یادگیری طبقه‌بند رگرسیون لجستیک بیشترین دقت را در تخمین سطح دبی جریان دارد.



شکل ۸. نمودار ویژگی‌های بدست آمده پس از اعمال فیلتربانک‌ها بر حسب دسی بل نسبت به فرکانس در چند نمونه از دبی‌های مختلف (برای نمایش بهتر تغییرات تا فرکانس ۱۰۰۰۰ آورده شده است).

جدول ۳. نتایج هایپرپارامترهای مناسب در هر دسته‌بندی

طبقه بند	هایپرپارامتر	دقت آموزش (%)	دقت اعتبارسنجی (%)
SVM	Linear C=۱	۸۸	۸۴
LR	C=۱۰۰	۱۰۰	۸۹
LDA	SVD	۹۲	۸۷
Decision Tree	Max_Depth=۵	۹۸	۸۶
KNN	K=۳	۸۲	۵۴

## ۲-۴ تست دستگاه صوتی

پس از انتخاب هایپرپارامترهای مناسب و یادگیری طبقه‌بندها با نمونه‌های آموزش مدل‌ها با نمونه‌های جدید، که تعدادشان حدود یک سوم نمونه‌های آموزش است، تست شدند و مدلی که دارای بیشترین دقت بود انتخاب شد. نتایج تست‌ها در جدول (۴) مشاهده می‌شوند. دقت تست تفاوت کمی با دقت اعتبارسنجی دارد و این نشان می‌دهد که بیش‌برازش<sup>۱۰</sup> رخ نداده است. طبقه‌بندهای ماشین‌بردار پشتیبانی، رگرسیون لجستیک و آنالیزاترراقی خطی دارای دقت‌های بالای ۸۵ درصد هستند؛ که طبقه‌بند رگرسیون لجستیک با دقت ۹۰ درصد نسبت به باقی طبقه‌بندها از دقت بیشتری برخوردار است.

<sup>۱۰</sup> Overfitting



جدول ۴. نتایج هایپرپارامترهای مناسب برای هر دسته بندی

طبقه‌بند	هایپرپارامتر	دقت تست (%)
SVM	Linear C=۱	۸۶
LR	C=۱۰۰	۹۰
LDA	SVD	۸۶
Decision Tree	Max_Depth=۵	۷۶
KNN	K=۳	۶۰

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به طراحی و ارزیابی سیستم اندازه‌گیری جریان آب مبتنی بر صدا پرداخته شده است. ابتدا دستگاه صوتی با توجه به پژوهشی اعتبارسنجی شد و سپس جهت بالا بردن نسبت سیگنال هدف به نویز به تشخیص منابع صوتی پرداخته شد. پس از بررسی نمودارها قسمت کلگی شیر بیشترین شدت صوتی را نسبت به باقی نقاط داشت. دستگاه صوتی بر روی شیر نصب شد و آزمایشات اصلی برای یادگیری مدلی با بهترین دقت بر روی دستگاه صوتی صورت گرفت. پس از انتخاب هایپرپارامتر مناسب برای هر طبقه‌بند، مدل‌ها با داده‌های جدید تست شدند. در نهایت طبقه‌بند لجستیک رگرسیون با دقت ۹۰ درصد در تخمین سطح دبی جریان بهترین مدل انتخاب شد. با توجه به مقاله‌های قبل که آزمایش را بر روی لوله آب انجام داده بودند، الگوریتم کی-نزدیک‌ترین همسایه و ماشین بردار پشتیبانی بهترین طبقه‌بند انتخاب شده بودند، در این مقاله آزمایش بر روی شیر آب بدون نیاز به محافظه انجام شد و لجستیک رگرسیون بیشترین دقت را داشت. نشان می‌دهد که محل قرارگیری میکروفون در آموزش مدل بر روی داده‌ها و هم‌چنین نسبت به سیگنال هدف به نویز می‌تواند موثر باشد. با اینکه این روش سطح دبی جریان را تخمین می‌زند، در مسائل خانگی که دبی دقیق جریان مسئله‌ی مهمی نیست، بدلیل ارزان بودن، نصب آسان و نیازمند نبودن به سیستم محاسباتی پیشرفته می‌تواند مناسب باشد.

## مراجع

- [۱] T. Hang, J. Feng, X. Li, L. Yan, Water Sound Recognition Based on Support Vector Machine, in: Proceedings of the ۱۳th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM) ۲۰۱۹, Springer, Cham, ۲۰۱۹: pp. ۹۸۶-۹۹۵. [https://doi.org/10.1007/978-3-03-19063-7\\_77](https://doi.org/10.1007/978-3-03-19063-7_77).
- [۲] M. Iwaki, S. Nakayama, A sound recognition method with incrementally taking sound stream into consideration, in: ۲۰۱۶ IEEE ۵th Global Conference on Consumer Electronics, ۲۰۱۶: pp. ۱-۲. <https://doi.org/10.1109/GCCE.2016.7800401>.
- [۳] T. Hayashi, M. Nishida, N. Kitaoka, K. Takeda, Daily activity recognition based on DNN using environmental sound and acceleration signals, in: ۲۰۱۵ ۲۳rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), ۲۰۱۵: pp. ۲۳۰۶-۲۳۱۰. <https://doi.org/10.1109/EUSIPCO.2015.7362796>.
- [۴] M.V. Valencia, F.L.V. Restrepo, C.S. Gonzalez, E. Delgado-Trejos, Metrological Advantages of Applying Vibration Analysis to Pipelines: A Review, Scientia et Technica. ۲۶ (۲۰۲۱) ۲۸-۳۵.
- [۵] A. Ibarz, G. Bauer, R. Casas, A. Marco, P. Lukowicz, Design and Evaluation of a Sound Based Water Flow Measurement System, in: D. Roggen, C. Lombriser, G. Tröster, G. Kortuem, P. Havinga (Eds.), Smart Sensing and Context, Springer, Berlin, Heidelberg, ۲۰۰۸: pp. ۴۱-۵۴. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-88793-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88793-5_4).
- [۶] R. Safari, B. Tavassoli, Initial test and design of a soft sensor for flow estimation using vibration measurements, in: Instrumentation and Automation The ۲nd International Conference on Control, ۲۰۱۱: pp. ۸۰۹-۸۱۴. <https://doi.org/10.1109/ICCIAutom.2011.6356765>.
- [۷] J. He, S. Y. B. Mj, M. C. Correlating Sound and Flow Rate at a Tap, Procedia Engineering. ۱۱۹ (۲۰۱۵) ۸۶۴-۸۷۳. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.953>.

- [۸] H. Göksu, Flow Measurement by Wavelet Packet Analysis of Sound Emissions, *Measurement and Control*. ۵۱ (۲۰۱۸) ۱۰۴-۱۱۲. <https://doi.org/10.1177/0020294018768340>.
- [۹] R.P. Evans, J.D. Blotter, A.G. Stephens, Flow Rate Measurements Using Flow-Induced Pipe Vibration, *Journal of Fluids Engineering*. ۱۲۶ (۲۰۰۴) ۲۸۰-۲۸۵. <https://doi.org/10.1115/1.1667882>.
- [۱۰] I.M. Pires, R. Santos, N. Pombo, N.M. Garcia, F. Flórez-Revuelta, S. Spinsante, R. Goleva, E. Zdravevski, Recognition of Activities of Daily Living Based on Environmental Analyses Using Audio Fingerprinting Techniques: A Systematic Review, *Sensors*. ۱۸ (۲۰۱۸) ۱۶۰. <https://doi.org/10.3390/s18010160>.
- [۱۱] K.K. Paliwal, J.G. Lyons, K.K. Wójcicki, Preference for ۲۰-۴۰ ms window duration in speech analysis, in: ۲۰۱۰ ۴th International Conference on Signal Processing and Communication Systems, ۲۰۱۰: pp. ۱-۴. <https://doi.org/10.1109/ICSPCS.2010.5709770>.
- [۱۲] H.S. Ribner, The Generation of Sound by Turbulent Jets, in: H.L. Dryden, Th. Von Kármán (Eds.), *Advances in Applied Mechanics*, Elsevier, ۱۹۶۴: pp. ۱۰۳-۱۸۲. [https://doi.org/10.1016/S0065-2156\(08\)70354-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70354-5).
- [۱۳] P. Thibbotuwawa Gamage, Modeling of flow generated sound in a constricted duct at low Mach number flow, *Electronic Theses and Dissertations*. (۲۰۱۷). <https://stars.library.ucf.edu/etd/5668>.
- [۱۴] X. Huang, A. Acero, H.-W. Hon, R. Reddy, *Spoken Language Processing: A Guide to Theory, Algorithm, and System Development*, ۱st ed., Prentice Hall PTR, USA, ۲۰۰۱.
- [۱۵] L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, ۴th edition, Wiley, New York, NY Weinheim, ۲۰۰۰.
- [۱۶] T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, Second Edition, ۲nd edition, Springer, New York, NY, ۲۰۱۶.