

## بهره گیری از نوسانات فشار در رصد هیدرودینامیک بسترهای سیال

فرهاد کریمی<sup>۱</sup>، رحمت ستوده قره باغ<sup>۲</sup>، رضا ضرغامی<sup>۳</sup>، نوید مستوفی<sup>۴\*</sup>  
 دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی شیمی  
 ۱- استاد، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی شیمی  
 ۲- استاد یار، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی شیمی  
 ۳- استاد، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی شیمی  
 دریافت: ۹۱/۰۴/۰۹ پذیرش: ۹۱/۰۶/۲۷

### چکیده

پیچیدگی هیدرودینامیک بسترهای سیال و فقدان روشی که به صورت برخط و همزمان بستر را رصد کند به عنوان مانعی بر کنترل بهتر این گونه بسترها مورد توجه بسیاری از محققین می‌باشد. به طور کلی هیدرودینامیک بسترهای سیال با نوسان در سرعت هوای ورودی و تغییر مشخصات فیزیکی ذرات تغییر می‌کند. با تغییر هیدرودینامیک پارامترهای فیزیکی قابل اندازه گیری مانند فشار مطلق بستر نیز تغییر می‌کند. از این رو نوسانات فشار بستر سیال به منظور تعیین روشی که به صورت لحظه ای تغییرات هیدرودینامیک بستر را نمایش دهد، در یک خشک کن بستر سیال مورد ارزیابی قرار گرفته است. خشک کن‌های بستر سیال به دلیل افزایش دانسیته و چروکیدگی ذرات تغییرات هیدرودینامیکی زیادی در طول مدت خشک شدن به همراه خواهد داشت و از این رو نمونه خوبی برای مطالعه هیدرودینامیک محسوب می‌شود. بدین منظور ذرات مرطوب برنج در بستر سیالی با قطر داخلی ۱۵ cm خشک شد و در طول این مدت نوسانات فشار بستر در فرکانس مناسب اکتساب شدند. بررسی داده‌ها در حوزه زمان نشان داد که با کاهش حجم ذرات حباب‌ها کوچکتر و بر تعداد آن افزوده می‌شود. ارزیابی داده‌ها در حوزه فرکانس نیز این روند تغییر هیدرودینامیک را تأیید نمود. همچنین به کمک آنالیز موجک بخشی از سیگنال که دقیقاً به هیدرودینامیک بستر مرتبط می‌شود تعیین و مشخص شد که با کاهش حجم بستر انرژی حباب‌های بزرگ به حباب‌های کوچکتر و خوشه‌ها انتقال می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** هیدرودینامیک بستر سیال، رصد برخط، نوسانات فشار

### مقدمه

کشاورزی و داروسازی برای خارج کردن محتوای رطوبت اضافی ذرات در مراحل پایانی فرآوری محصول استفاده می‌شود. هم اکنون در کنترل خشک کن‌های بستر سیال از روش‌هایی مبتنی بر پارامترهای قابل اندازه‌گیری مثل دما و رطوبت هوای خروجی بستر در شرایط ثابت ورودی استفاده می‌شود. از آنجا که دمای بستر به محتوای رطوبتی بستر

بسترهای سیال بدلیل نرخ انتقال جرم و حرارت بالا مورد استفاده روز افزون در صنایع مختلف قرار گرفته است. از این رو بررسی و پیش بینی رفتار آن‌ها مورد توجه بسیاری از محققین می‌باشد. خشک کن‌های بستر سیال به عنوان یکی از کاربردهای عمده این نوع تجهیز در صنایعی مثل پتروشیمی،

\* mostoufi@ut.ac.ir

ماندن دبی هوای ورودی کلیه تغییرات هیدرودینامیک تنها به دلیل تغییر دانسیته و چروکیدگی ذرات ناشی از کاهش رطوبت می‌باشد. با کاهش رطوبت ذرات سبک‌تر شده و آزادانه حرکت خواهند کرد. از این رو با اکتساب نوسانات فشار یا سایر نوسانات منتج از نوسانات فشار مثل ارتعاش بستر و آنالیز آن‌ها امکان رصد تغییرات هیدرودینامیک و رطوبت ذرات فراهم خواهد شد. آنالیز داده‌ها با روش‌های متعددی در حوزه‌های زمان، فرکانس و حالت صورت می‌گیرد [۱۵].

بیشتر روش‌های ارزیابی سیگنال فشار بستر سیال در حوزه زمان به مطالعه انتقال رژیم جریانی می‌پردازد و روش‌هایی که بر پایش بستر متمرکزند، محدودند. اکثر محققین از انحراف معیار نوسان‌های دامنه فشار برای تعیین انتقال رژیم بستر سیال با افزایش سرعت ظاهری گاز بهره برده‌اند [۱۶-۱۸]. در سال‌های اخیر نیز استفاده از طیف فرکانسی جهت تحلیل اتفاقات بستر به کمک مطالعه انرژی نواحی مختلف فرکانسی بسیار رایج بوده است [۱۹]. ارزیابی سری زمانی در حوزه فرکانس به ندرت جهت پایش وضعیت سیالی بستر سیال به کار می‌روند. در این حوزه همچنین تبدیل موجک قابلیت زیادی در تحلیل سیگنال دارد و به صورت گسترده‌ای در بستر سیال مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۰-۲۲]. بیشتر کارهای انجام شده در این زمینه بر شناخت ساختارهای بستر استوار بوده و کمتر به تعیین نقطه انتقالی رژیم جریانی و یا پایش بستر می‌پردازند. مثلاً یانگ و همکارانش [۲۲] با مطالعه رفتار دینامیکی بستر به کمک تبدیل موجک به این نتیجه رسیدند که سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در بستر سیال را می‌توان به سه مؤلفه مقیاس میکرو (در حد و اندازه ذرات)، مقیاس مزو (در اندازه خوشه‌های ذرات) و مقیاس ماکرو (در حد و اندازه بستر) تجزیه کرد. در تحقیق پیشرو نیز با اکتساب داده‌های فشار مطلق بستر و آنالیز در حوزه‌های زمان و فرکانس، توانایی این روش در رصد برخط شرایط هیدرودینامیکی خشک‌کن‌های بستر سیال ارزیابی شده است.

مربوط است، رسیدن به دمای مشخص را می‌توان به‌عنوان نشانه‌ای از کامل شدن فرآیند خشک‌شدن در نظر گرفت [۱]. در این روش‌ها امکان بروز خطا به دلیل تاثیر پذیری از شرایط آب و هوایی وجود دارد. از این رو توسعه روش‌های مستقل از شرایط محیطی و برخط<sup>۱</sup> می‌تواند سهولت استفاده از این نوع تجهیزات را بیش از پیش افزایش دهد. در این رابطه روش‌های متعددی توسط محققین مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در توسعه روش‌های برخط رصد هیدرودینامیک بستر سیال از تکنیک‌هایی مانند اندازه‌گیری نوسانات فشار [۴-۲] اکتساب صوت بستر [۸-۵] ارتعاشات بستر [۱۱-۹] تصویر برداری اشعه X [۱۲] اندازه‌گیری الکتروسیته ساکن [۱۳-۱۴] استفاده شده است. این روش‌ها به طور کلی به دو دسته اصلی تداخلی و غیر تداخلی تقسیم می‌شوند. روش‌های تداخلی<sup>۲</sup> به آن دسته از روش‌ها اطلاق می‌شود که حسگر مستقیماً وارد بستر می‌شود و روش‌های غیر تداخلی<sup>۳</sup> روش‌هایی است که حسگر بدون وارد شدن به بستر به اکتساب داده می‌پردازد. آنچنان که از سابقه تحقیقات در زمینه بررسی هیدرودینامیک بسترهای سیال پیداست روش تحلیل نوسانات فشار به عنوان روشی کارآمد و دقیق در این حوزه شناخته می‌شود. ورولت و همکاران [۱۵] نیز سیگنال‌های صوت و ارتعاش را با نوسانات فشار در رصد خشک‌کن‌های بستر سیال مقایسه و نتیجه گرفتند روش‌های صوت و ارتعاش نمی‌توانند به خوبی روش فشار در رصد هیدرودینامیک بستر مفید باشند.

نوسان‌های فشار بستر سیال حاصل برخی پدیده‌های داخل بستر مانند عبور حباب و امواج فشاری<sup>۴</sup> (ناشی از تشکیل حباب، به هم پیوستن، ترکیدن و فوران حباب‌ها، حرکت نوسانی بستر و سرعت گاز) می‌باشد. در خشک‌کن‌های بستر سیال با از دست رفتن محتوی رطوبت ذرات، تغییر دانسیته و چروکیدگی آن‌ها هیدرودینامیک بستر متحمل تغییرات پیوسته‌ای است که منجر به نوسانات فشار در بستر می‌شود. در تحقیق حاضر با ثابت

1. On line  
2. Intrusive

3. Non-Intrusive  
4. Compression Wave

شد و به ازای سرعت هوای ورودی  $1.1 \text{ m/s}$  خشک کردن ذرات به مدت کافی که بیش از مدت زمان لازم تا رسیدن به رطوبت تعادلی ذرات می‌باشد، دنبال شد.

در اکتساب داده‌ها مدت زمان نمونه برداری باید به گونه‌ای انتخاب شود که پدیده مورد نظر به طور کامل رخ دهد. از آن جایی که فرایند کاهش رطوبت به طور پیوسته صورت می‌گیرد، لذا حتی الامکان بایستی نمونه برداری به طور پیوسته انجام شود. اما به دلیل محدودیت‌های سخت‌افزاری امکان نمونه برداری پیوسته فراهم نبود. بنابراین نمونه برداری‌ها در بازه‌های  $512 \text{ s}$  در طول آزمایش (حدود  $1/5$  ساعت) انجام شد و با قطع جریان هوا فرایند کاهش رطوبت قطع می‌شد تا فرصت کافی برای ذخیره اطلاعات و اندازه‌گیری‌های لازم بدست آید و پس از آن مجدداً جریان هوا برقرار می‌شد تا بازه زمانی بعدی مورد ارزیابی قرار گیرد. در فرصت زمانی بدست آمده ضمن ذخیره اطلاعات بدست آمده از حسگر فشار، اندازه‌گیری ارتفاع بستر ساکن جهت بررسی کاهش حجم ذرات و نمونه‌گیری جهت تعیین رطوبت انجام می‌شد. نمونه مرطوب به مدت سه روز در گرم کن با دمای  $50^\circ \text{C}$  خشک می‌شد و از اختلاف وزن قبل و بعد از خشک شدن میزان رطوبت ذرات بر مبنای خشک محاسبه می‌شد. در واقع با قطع جریان هوا فرایند خشک شدن متوقف شده و فرصت کافی برای ذخیره اطلاعات و سایر اندازه‌گیری‌های بدست می‌آید، بدین ترتیب نگرانی از نمونه‌گیری به صورت ناپیوسته مرتفع می‌گردد.

### روش‌های ارزیابی سیگنال

ساده‌ترین روش تجزیه و تحلیل سیگنال، رسم نقاط متوالی ثبت شده در فواصل معین زمانی است اما این روش عموماً نتایج مناسبی ارائه نمی‌دهد و داده‌ها بایستی در حوزه‌های زمان، فرکانس و حالت آنالیز شود. حوزه زمان به مطالعه دامنه<sup>۴</sup> سیگنال در قالب انحراف استاندارد (ممان دوم آماری)، چولگی<sup>۵</sup>

### تجهیزات و روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها در یک بستر سیال شده با مقیاس آزمایشگاهی از جنس Plexiglass با قطر داخلی  $15 \text{ cm}$  و ارتفاع  $2 \text{ m}$  انجام می‌شد. ستون مجهز به توزیع‌کننده‌ای شامل یک صفحه فولادی نازک با  $435$  سوراخ با فاصله‌های  $7 \text{ mm}$  از یکدیگر در آرایش مربعی می‌باشد. محفظه‌ی توزیع‌کننده کیفی شکل بوده و در زیر صفحه توزیع‌کننده قرار گرفته است. شکل این محفظه موجب یکنواختی سرعت هوای ورودی از طریق لوله پایین محفظه، قبل از ورود به صفحه توزیع‌کننده می‌شود. هوای مورد نیاز برای سیال‌سازی توسط کمپرسور تأمین می‌گردد و شدت جریان هوا توسط یک کنترل کننده جرمی جریان تنظیم می‌شود.

نوسانات فشار توسط یک حسگر فشار مطلق اکتساب شدند. به‌طور کلی حسگرهای فشار به دو نوع مطلق و نسبی تقسیم می‌شوند. بسته به شرایط بستر و هدف از اندازه‌گیری نتایجی که از هر یک از آن‌ها حاصل می‌شود می‌تواند متفاوت از دیگری باشد. حسگر معمولاً به کمک یک پویسگر که در واقع لوله اندازه‌گیری فشار می‌باشد به بستر متصل می‌گردد. حسگرها می‌توانند هم در سطح دیواره و هم داخل بستر قرار گیرند. در این تحقیق حسگر مستقیماً به سطح دیواره بستر متصل شده است که منجر به کاهش اثرات رزونانس حسگر می‌گردد. حسگر فشار مورد استفاده در این تحقیق از نوع فشارسنج مطلق پیروززیستیو<sup>۱</sup> مدل SEN-3248(B075) کمپانی کوبولد<sup>۲</sup> می‌باشد. خروجی حسگر فوق از نوع جریان مستقیم<sup>۳</sup> می‌باشد که در محدوده  $4$  تا  $20$  میلی آمپر قابلیت اندازه‌گیری فشار مطلق  $0$  تا  $10$  بار (مطلق) را دارد. نمونه برداری‌ها با رعایت نرخ نایکوئیست [۲۳] در فرکانس  $400 \text{ Hz}$  انجام شد.

آزمایش‌ها در بستر متراکمی حاوی برنج مرطوب به ارتفاع  $15 \text{ cm}$  ( $L/D=1$ ) در رژیم حبایی صورت گرفت. در این روش حسگر فشار در فاصله  $5 \text{ cm}$  از صفحه توزیع‌کننده قرار داده

1. Piezoresistive  
2. Kobold  
3. Direct Current (DC)

4. Amplitude  
5. Skewness

و متوسط طیف توان از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{xx}(f) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L P_{xx}^i(f) \quad (2)$$

جانسون و همکاران [۱۹] از نمودار طیف فرکانسی نوسانات فشار بستر در تعیین وضعیت حباب بهره بردند. قدرت تفکیک پائین نمودار طیف فرکانس به دلیل طول ثابت پنجره در تمام بازه فرکانس بسیاری از محققین را بر آن داشته تا از آنالیز موجک<sup>۴</sup> با طول پنجره متغییر و قدرت تفکیک بالا استفاده نمایند. هر کاربردی را که مبتنی بر تبدیل سریع فوریه است می‌توان با استفاده از موجکها فومول بندی کرد و اطلاعات فضایی (یا زمانی) موضعی بیشتری بدست آورد. به طور کلی، این موضوع بر پردازش سیگنال و تصویر و الگوریتم‌های عددی سریع برای محاسبه‌ی عملگرهای انتگرالی اثر می‌گذارد.

در زمینه جریان‌های گاز-جامد، سیالیت بوسیله آنالیز موجک به عنوان یک پدیده چندمقیاسی با حضور اجزاء در سه مقیاس فرکانسی: فرکانس‌های پایین مربوط به فضاهای خالی، فرکانس‌های متوسط مربوط به تشکیل خوشه‌ها و فرکانس‌های بالا مربوط به حرکت منفرد ذرات، مورد بحث قرار گرفته است. تبدیل موجک یک سیگنال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$W_s f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(u) \varphi_s(x-u) du \quad (3)$$

$$\varphi_s = \frac{1}{s} \varphi\left(\frac{x}{s}\right)$$

در این تعریف  $\varphi_s$  تابع موجک مادر می‌باشد.

برای بیشتر سیگنال‌ها، فرکانس‌های پائین مهمترین بخش سیگنال هستند که سیگنال را کاملاً مشخص می‌کنند. از سوی دیگر فرکانس‌های بالا نکات ظریف و جزئیات را مشخص می‌کنند. در تبدیل موجک تقریب و جزئیات بسیار مهم هستند. تقریب مربوط به مقیاس بالا (اجزاء با فرکانس پائین) و جزئیات مربوط به مقیاس پائین (اجزاء با فرکانس بالا) است. طبق تئوری تحلیل چند تفکیکه [۲۵ و ۲۶] سیگنال  $x(i)$  در هر سطح<sup>۵</sup>  $j$  به

(ممان سوم آماری) یا  $S$  و درجه اوج یا کشیدگی<sup>۱</sup> (ممان چهارم آماری) یا  $K$  می‌پردازد. این پارامترها در تشخیص پدیده‌های بستر سیال از جمله تغییر رژیم مورد استفاده قرار می‌گیرند. چگونگی تغییرات هر یک از پارامترهای فوق وابسته به شرایط عملیاتی آزمایش و روش اندازه‌گیری است [۱۸]. در تحقیق پیش رو تنها از انحراف استاندارد و متوسط فرکانس دوره استفاده شده است. انحراف استاندارد به عنوان شاخصی کیفی از اندازه حباب‌ها در بستر شناخته می‌شود [۲۴]. انحراف استاندارد با افزایش قطر حباب‌ها افزایش می‌یابد. متوسط فرکانس دوره  $ACF$  از تقسیم کردن تعداد دوره‌ها<sup>۲</sup> بر زمان کل سری زمانی بدست می‌آید. تعداد دوره‌ها برابر با نصف تعداد دفعاتی است که سری زمانی میانگین خود را قطع می‌کند و فرض می‌شود که هر دوره در سیگنال نمایان‌گر عبور یک حباب در بستر سیال می‌باشد [۱] با افزایش میانگین فرکانس دوره میزان حباب عبوری افزایش می‌یابد.

نمایش سیگنال در حوزه زمان بهترین صورت نمایش سیگنال نیست و اغلب اطلاعات مهم و با ارزشی در محتویات فرکانسی سیگنال نهفته است. در حوزه فرکانس مشخص می‌شود که چه فرکانس‌هایی در سیگنال وجود دارند و در نتیجه می‌توان فرکانس مربوط به هر پدیده را به دست آورد. اگر هر پدیده‌ای (فیزیکی-شیمیایی) تغییرات سریعی داشته باشد، آن متغیر فرکانس بالایی دارد و برعکس اگر تغییرات کندی داشته باشد، فرکانس پایینی دارد و اگر اصلاً تغییر نکند، فرکانسش صفر خواهد بود. تابع چگالی طیف توان<sup>۳</sup> (PSDF) یا طیف فرکانس یکی از ابزارهای کارآمد حوزه فرکانس در تعیین هیدرودینامیک بستر، سیگنال را از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل می‌کند و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{xx}^i(f) = \frac{1}{\sum_{n=1}^N w^2(n)} \left[ \sum_{n=1}^N x_i(n) w(n) e^{-j2\pi n f} \right]^2 \quad (1)$$

1. Kurtosis

2. Cycles

3. Power Spectral Density Function

4. wavelet

5. Level

### نتایج و بحث

در طول بیش از یک ساعت آزمایش با قطع کردن جریان هوای ورودی طی بازه‌های زمانی ۵۱۲ ثانیه‌ای، میزان رطوبت ذرات با نمونه‌گیری از بستر و ارتفاع بستر ساکن اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است. میزان رطوبت در شکل ۱ نشان می‌دهد که ذرات مرطوب تا رسیدن به رطوبت تعادلی دو مرحله رطوبتی را طی می‌کنند:

**سرعت ثابت خشک شدن:** در این بازه شیب خط برازش شده از نقاط رطوبتی به دلیل وجود فیلم مایع بر سطح ذرات ثابت می‌باشد. این بازه بر اساس شکل تا دقیقه ۲۵ ادامه یافته و به رطوبت در این زمان رطوبت بحرانی اطلاق می‌شود.

**سرعت نزولی خشک شدن:** پس از پایان یافتن رطوبت سطحی، فیلم پیوسته رطوبت در سطح ذرات از بین رفته و رطوبت بدنه ذرات است که به تدریج به سطح رسیده و تبخیر می‌شود. با گذشت زمان از سرعت نفوذ رطوبت به دلیل افزایش فاصله‌ای که رطوبت تا سطح ذره باید طی کند، کاسته می‌شود و از این روست که شیب خط برازش شده از نقاط رطوبتی به تدریج کم می‌شود. کاهش شیب خط تا رسیدن به رطوبت تعادلی جایی که شیب خط به صفر نزدیک شود، ادامه خواهد یافت. زمان رسیدن به شیب صفر یا رطوبت تعادلی ذرات، تابع دما و رطوبت هوای مورد استفاده می‌باشد.

شکل ۱ نشان می‌دهد که رطوبت بحرانی و تعادلی دانه‌های برنج به ترتیب ۲۰/۶٪ و ۷/۸٪ می‌باشند.

بر اساس مشاهدات، حبابی تا پایان رطوبت سطحی تشکیل نمی‌شود. در این مدت پل‌های مایع مانع از حرکت آزادانه ذرات در بستر شده و هوای ورودی با ایجاد کانال‌هایی از بستر عبور می‌کند. پس از اتمام رطوبت بحرانی بستر به تدریج خاصیت سیالی پیدا کرده و در طول عملیات با سبکتر شدن ذرات حرکت آن‌ها سریعتر می‌گردد همچنین حجم بستر ساکن شده کاهش می‌یابد. بستر ساکن شده به بستری

دو دسته سیگنال متعامد تقریب  $A_j(i)$  و دقیق  $D_j(i)$  که بیانگر مولفه‌های  $X(i)$  در مقیاس و وضوح مختلف می‌باشند، تجزیه می‌شود که جمع آن‌ها بایستی تقریباً با سیگنال اصلی برابر باشد:

$$x(t) \approx a_j(t) + D_j(t) + D_{j-1}(t) + \dots + D_1(t) \quad (4)$$

در واقع سیگنال اصلی ابتدا از فیلتر بالا گذر عبور کرده، در نتیجه می‌توان گفت که زیر سیگنال‌های دقیق، اجزای فرکانس بالا هستند. پس از عبور از یک فیلتر بالا گذر، سیگنال خروجی از یک فیلتر پائین گذر عبور کرده و زیر سیگنال‌های تقریب با محدوده‌های فرکانسی پائین بدست می‌آیند. بنابراین طبق قانون بقای انرژی می‌توان گفت که انرژی سیگنال اصلی بایستی با مجموع انرژی زیر سیگنال‌های تجزیه شده از طریق تبدیل موجک برابر باشد.

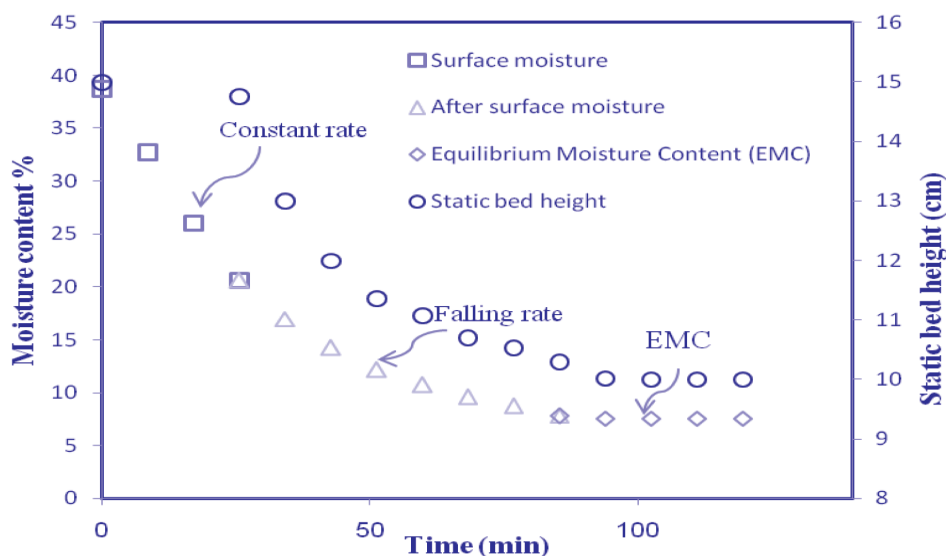
$$E \approx \sum_{t=1}^N |x(t)|^2 \approx \sum_{t=1}^N |a_j(t)|^2 + \sum_{t=1}^N \sum_{j=1}^J |D_j(t)|^2 \quad (5)$$

انواع موجک‌های مادر همچون هار<sup>۱</sup>، دابچیز<sup>۲</sup>، دو متعامدی<sup>۳</sup>، مورلت<sup>۴</sup> و سایملت<sup>۵</sup> وجود دارد که از بین آن‌ها موجک مادر دابچیز در این پروژه به دلیل عملکرد بهتر در نویزیابی سیگنال‌های بستر سیال استفاده شده است. بیشتر کارهای انجام شده در زمینه تبدیل موجک در بستر سیال به مقایسه انرژی سیگنال‌ها پرداخته‌اند. همچنین از تبدیل موجک برای شناخت بهتر پدیده‌های مربوط به ساختارهای میکرو، مزو و ماکرو استفاده کرده‌اند [۲۱]. لو و لی [۲۷] سیگنال فشار را به چهار سطح تجزیه کرده و سپس زیر سیگنال سطح چهارم را معرف مشخصه حباب دانسته و تغییر اندازه حباب و فرکانس حباب را بررسی نموده‌اند.

روش‌های ارائه شده در بالا، روش‌های متداول و کاربردی در تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها در حوزه زمان و فرکانس می‌باشند. میزان کاربردی بودن هر یک از این روش‌ها تا حد زیادی به دستگاه اندازه‌گیری داده‌ها و شرایط آزمایش وابسته است.

1. Haar  
2. Daubechies  
3. Biorthogonal

4. Morlet  
5. Symlet



شکل ۱. نمودار کاهش رطوبت محتویات بستر با سرعت. هوای ورودی  $1.1 \text{ m/s}$  در مدت آزمایش

افزایش خواهد گذاشت و این پدیده بدلیل ارتباط حجم گاز در فرم حباب، با تفاضل سرعت ظاهری از سرعت حداقل سیالیت می‌باشد.

$$u_{mf}^2 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g)}{1.75 \rho_g} \varepsilon_{mf}^3 \phi_s \quad (6)$$

موارد اشاره شده در بالا حاکی از آن است که در طول مدت خشک شدن به دلیل کاهش ارتفاع بستر شانس برخورد حباب‌ها و درشت‌تر شدن آنها کمتر شده و به ناچار افزایش سهم حباب‌ها به صورت افزایش تعداد حباب‌ها نمایان می‌شود. البته چنانچه کاهش ارتفاع بستر ساکن نا محسوس باشد آن چنان که ورمزبکر و همکاران [۱] گزارش کردند حباب‌ها بزرگتر خواهند شد.

به نحوی که در بالا اشاره شد تغییرات تدریجی هیدرودینامیک خشک‌کن‌های بستر سیال با تغییر رطوبت ذرات اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. از این رو کاهش رطوبت و به طبع آن کاهش اندازه ذرات نوساناتی در پارامترهای فیزیکی از قبیل فشارمطلق بستر را به همراه خواهد داشت. نمودار سیگنال خام حاصل اندازه‌گیری نوسانات فشار مطلق در شکل ۲ ارائه شده است.

اطلاق می‌شود که با قطع جریان گاز ورودی تشکیل می‌شود. کاهش ۳۳٪ ای ارتفاع بستر ساکن در طول عملیات خشک کردن نتیجه انقباض ذرات جامد به دلیل افزایش دانسیته و کوچک شدن ذرات با از دست دادن رطوبت‌شان تا رطوبت تعادلی می‌باشد. با اتمام رطوبت سطحی همزمان با سیال شدن بستر اولین حباب‌ها در مرکز و سطح بستر مشاهده می‌شود و پس از آن هر چه به پایان عملیات خشک کردن نزدیک‌تر می‌شویم به تدریج حباب‌ها در سطح بستر گسترده می‌شوند.

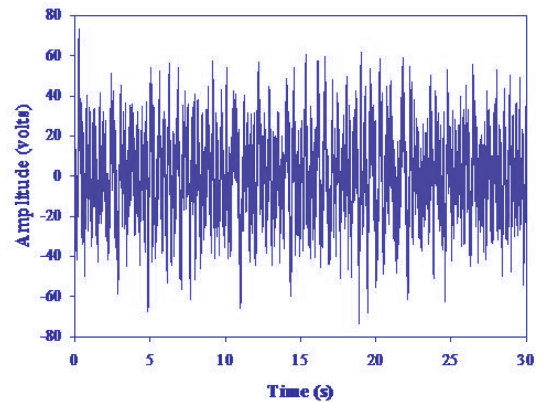
در طول مدت آزمایش علاوه بر تغییر محل عبور حباب‌ها قطر و تعداد حباب‌ها نیز متحمل تغییراتی است که این تغییرات تحت تاثیر دو عامل صورت می‌گیرد:

۱. کاهش نسبت ارتفاع بستر به قطر به دلیل انقباض ذرات که مانع از رشد و برخورد حباب‌ها جهت تشکیل حباب‌های بزرگتر می‌گردد.

۲. کاهش رطوبت ذرات که موجب سبکتر شدن ذرات می‌گردد. بدین ترتیب بستر بر اساس رابطه ۶ با کمتر شدن دانسیته ذرات  $\phi_s$  به سرعت کمتری برای سیالیت حداقلی نیاز خواهد داشت. از این رو سهم حباب در بستر رو به

دلیل این عدم انطباق نتایج مربوط به اثر کاهش حجم ذرات در سری آزمایش‌های انجام شده در تحقیق پیش‌روست. چنانچه اشاره شد میزان انحراف استاندارد نوسانات فشار در رژیم حبابی متناسب با اندازه حباب‌ها می‌باشد. سرعت حداقل سیالیت مورد نیاز بستری از ذرات خشک کمتر از ذرات مرطوب می‌باشد آن چنان که تحقیقات ریز [۲۸] بر بستری از قطعات هویج نشان داد با افزایش رطوبت سرعت بیشتری برای حداقل سیالیت مورد نیاز است. بنابراین با خشک شدن ذرات بخش بزرگتری از هوای ورودی که متناسب با اختلاف سرعت هوای ورودی و سرعت حداقل سیالیت می‌باشد به فاز حبابی اختصاص می‌یابد آن چنان که ورزمبکر و همکاران نیز [۱] نتیجه مشابهی گزارش کردند. اما در سری آزمایش‌های صورت گرفته ارتفاع بستر ساکن روند کاهشی را به دلیل کوچک شدن ذرات طی می‌کند که مانع به هم پیوستن و بزرگتر شدن حباب‌ها در بستر می‌شود. لذا بر هم نهدی این دو اثر متضاد بر اندازه حباب‌ها منجر به کاهش ناچیز  $10 \text{ kPa}$  ای در انحراف معیار نوسانات فشار می‌گردد. بنابراین در موادی که کاهش ارتفاع قابل توجهی در بستر طی عملیات خشک شدن مشاهده می‌شود اظهار نظری در رابطه به تغییرات رطوبت بر اساس انحراف استاندارد نمی‌توان داشت.

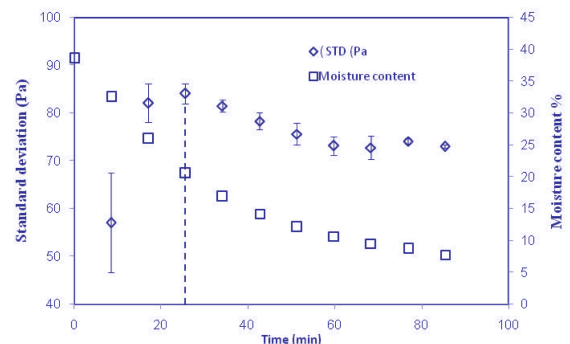
در ادامه به تحلیل متوسط فرکانس دوره پرداخته شده و از بررسی چولگی و برجستگی سیگنال به دلیل نتایج مشابه با انحراف استاندارد در عدم تطابق مناسب با روند رطوبتی ذرات چشم‌پوشی شده است. شکل ۴ میانگین فرکانس دوره در زمان‌های متفاوت را به نمایش می‌گذارد. این روند آنگونه که انتظار می‌رفت به دلیل افزایش سهم هوا در فاز حباب نه به صورت افزایش اندازه بلکه به صورت افزایش در تعداد حباب‌ها روند صعودی طی می‌نماید. میانگین فرکانس دوره که ناظر به تعداد حباب عبوری از مقابل حسگر فشار می‌باشد [۱] با کاهش رطوبت در بستر افزایش یافته و با رسیدن به رطوبت تعادلی ثابت می‌شود که گواه ثابت شدن تعداد حباب‌ها در پایان عملیات می‌باشد.



شکل ۲. نمونه‌ای از داده‌های خام نوسانات فشار اکتساب شده از خشک‌کن بستر سیال

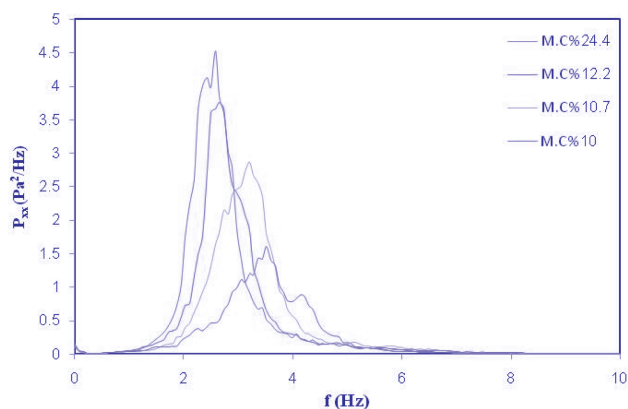
### تحلیل آماری

آن چنان که پیداست نمودار سیگنال خام اطلاعات مفیدی بدست نمی‌دهد. لذا با تحلیل آماری و حوزه فرکانس سیگنال زمانی مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل آماری داده‌های خام عموماً با انحراف استاندارد، متوسط فرکانس دوره، برجستگی و چولگی صورت می‌گیرد. در شکل ۳ انحراف استاندارد در هر یک از بازه‌های ۵۱۲ ثانیه‌ای محاسبه و ارائه شده است. این نمودار نشان می‌دهد که انحراف استاندارد هیچگونه مطابقتی با روند رطوبتی ذرات ندارد. این در حالی است که ورزمبکر و همکاران [۱] بیان داشتند انحراف استاندارد تا پایان رطوبت سطحی ثابت مانده و پس از آن تغییر  $400 \text{ Pa}$  از  $100 \text{ Pa}$  تا  $500 \text{ Pa}$  را تا رسیدن به رطوبت تعادلی متحمل می‌گردد. اما آن چنان که در این شکل پیداست، انحراف استاندارد داده‌ها پس از یک افزایش  $35 \text{ Pa}$  تا پایان رطوبت سطحی رو به کاهش گذاشته و نهایتاً به فشار  $75 \text{ Pa}$  در رطوبت تعادلی ختم می‌شود.



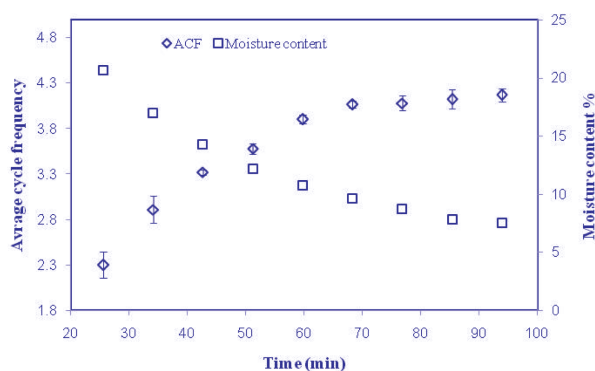
شکل ۳. تغییرات انحراف استاندارد و رطوبت در مدت زمان آزمایش

اندازه حباب‌ها و محل پیک متناسب با تعداد حباب‌ها می‌باشد زیرا به ترتیب روندی نزولی و صعودی را طی می‌کند و به ترتیبی که نتایج تحلیل آماری نشان داد اندازه حباب‌ها کاهش و تعداد آنها افزایش می‌یابد. آن چنان که از شکل ۵ پیداست با کاهش رطوبت ذرات در طول فرآیند دامنه پیک‌ها کوچکتر شده و محل پیک‌ها به سمت فرکانس‌های بزرگتر تغییر مکان می‌دهد. به عبارت دیگر کاهش دامنه و افزایش فرکانس پیک غالب تولید حباب‌های کوچکتر با تعداد بیشتر را در روند انجام آزمایش بیان می‌دارد.



شکل ۵. طیف فرکانسی نوسانات فشار در رطوبت‌های مختلف

با هدف تحلیل دقیق‌تر طیف فرکانسی، سیگنال‌های خام فشار با استفاده از تحلیل موجک با موجک مادر دابچیز به ده



شکل ۴. تغییرات میانگین فرکانس دوره (ACF) و رطوبت در مدت زمان انجام آزمایش‌ها

### تحلیل در حوزه فرکانس

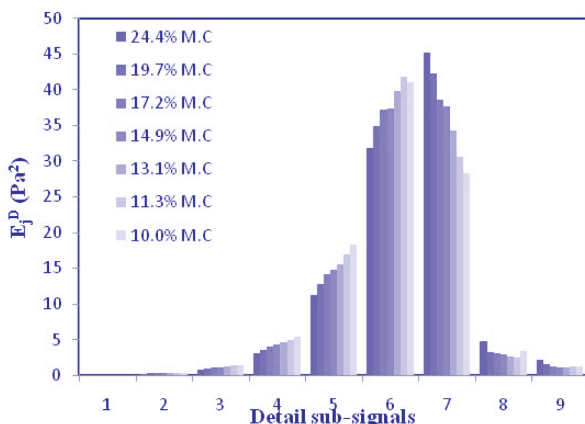
با هدف استخراج اطلاعات بیشتر از اثر کاهش اندازه و افزایش دانسیته بر هیدرودینامیک در ادامه از تحلیل حوزه فرکانس بهره گرفته شد. شکل ۵ طیف فرکانسی سیگنال‌های فشار را در برخی بازه‌های زمانی ابتدا تا انتها نمایش می‌دهد. از آن جایی که بستر در رژیم حبابی مورد بررسی قرار گرفته و فرکانس حباب در بستر سیال بین ۱ تا ۱۰ Hz می‌باشد، نمودار طیف فرکانسی در این محدوده نمایش داده شده است. با توجه به نتایج مراحل پیشین و این که فرکانس‌های اصلی بستر مربوط به ساختارهای بزرگ تر بستر (مانند حباب‌ها) می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت که دامنه پیک‌ها متناسب با

J	Structure	$A(j)$	$D(j)$
۱	micro	۰-۱۰۰	۱۰۰-۲۰۰
۲		۰-۵۰	۵۰-۱۰۰
۳		۰-۲۵	۲۵-۵۰
۴	meso: small bubbles, voids and clusters	۰-۱۲.۵	۱۲.۵-۲۵
۵		۰-۶.۲۵	۶.۲۵-۱۲.۵
۶		۰-۳.۱۲۵	۳.۱۲۵-۶.۲۵
۷	macro: large bubbles	۰-۱.۵۶۲۵	۱.۵۶۲۵-۳.۱۲۵
۸		۰-۰.۷۸۱۲۵	۰.۷۸۱۲۵-۱.۵۶۲۵
۹		۰-۰.۳۹۰۶۲۵	۰.۳۹۰۶۲۵-۰.۷۸۱۲۵

جدول ۱. محدوده فرکانسی سیگنال فشار به تفکیک سطح بر حسب Hz



مختلف که در بازه‌های زمانی متفاوت حادث شده نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که سهم بزرگی از انرژی سیگنال مربوط به زیر سیگنال‌های  $D_6$ ،  $D_5$  و  $D_7$  می‌باشد.



شکل ۷. انرژی زیرسیگنال‌های جزئی در رطوبت‌های مختلف

بر اساس جدول ۱ این سطوح مربوط به حباب‌ها و خوشه ذرات در بستر می‌باشد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که تنها این سطوح هستند که با تغییر رطوبت تغییرات قابل توجهی دارند بنابراین با بررسی این سطوح می‌توان به خوبی تغییرات هیدرودینامیک ناشی از کاهش رطوبت بستر را دنبال کرد. بر اساس شکل انرژی  $D_7$  با تغییرات  $20 \text{ Pa}^2$  حساسیت بیشتری به تغییرات رطوبت نشان داده است و در رده‌های بعدی  $D_6$  و  $D_5$  به ترتیب با  $10 \text{ Pa}^2$  و  $7 \text{ Pa}^2$  قرار گرفته‌اند. همچنین روند تغییرات انرژی در این شکل نشان می‌دهد انرژی  $D_7$  با خشک شدن بستر روندی کاهشی دارد این در حالی است که انرژی سطوح  $D_5$  و  $D_6$  روندی صعودی طی می‌کند. این نتیجه تصدیق می‌کند که انرژی ساختارهای ماکرو به ساختارهای مزو انتقال می‌یابد بدین معنا با خشک‌تر شدن بستر از نقش حباب‌های بزرگ در بستر کاسته شده و نقش حباب‌های ریزتر و خوشه‌ها پررنگ‌تر می‌شود. این نتیجه مهر تأییدی بر نتایج مراحل پیشین مبنی بر ریز شدن حباب‌ها با نزدیک شدن به رطوبت تعادلی است.

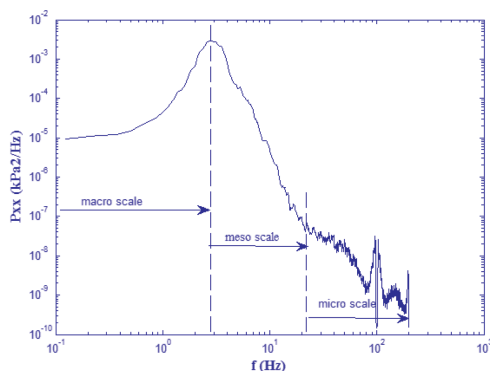
زیر سیگنال تجزیه شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. ده زیر سیگنال مشتمل بر ۹ زیر سیگنال دقیق<sup>۱</sup> ( $D_1$  to  $D_9$ ) و ۱ زیر سیگنال تقریب<sup>۲</sup> ( $A_1$ ) می‌باشد. محدوده فرکانسی هر یک از زیر سیگنال‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

هر یک از زیر سیگنال‌ها وابسته به یکسری از پدیده‌ها در بستر می‌باشد که بنا به روش پیشنهادی جانسون و همکاران [۱۹] نمودار لگاریتمی طیف فرکانسی در شکل ۶ رسم شد تا پدیده‌های مرتبط با هر یک از زیر سیگنال‌ها مشخص گردد. سه ناحیه تفکیک‌پذیر در این نمودار وجود دارد:

۱. ناحیه اول که مرتبط با ساختارهای ماکرو<sup>۳</sup> یا حباب‌های درشت می‌باشد و در محدوده صعودی نمودار نمایان شده است. این ناحیه از ۰ تا فرکانس ۳ Hz ادامه پیدا می‌کند که سطوح  $D_7$ ،  $D_8$  و  $D_9$  را در بر می‌گیرد.

۲. ناحیه ساختار مزو<sup>۴</sup> در محدوده نزولی نمودار بین ۳ تا ۲۰ Hz گسترده می‌شود و به حباب‌های کوچک و خوشه‌ها ارتباط می‌یابد. زیر سیگنال‌های  $D_5$  و  $D_6$  در این ناحیه قرار می‌گیرد.

۳. ناحیه ساختارهای میکرو<sup>۵</sup> که از ۲۰ تا ۲۰۰ Hz ادامه می‌یابد. زیر سیگنال‌های  $D_1$ ،  $D_2$  و  $D_3$  در این ناحیه قرار می‌گیرد و عموماً بدلیل نویزهایی است که به هر دلیل وارد اطلاعات شده است. این ناحیه ارتباط آشکاری با رژیم سیالیت ندارد.



شکل ۶. طیف فرکانسی سیگنال فشار در مقیاس لگاریتمی

شکل ۷ انرژی ۹ زیر سیگنال دقیق را در رطوبت‌های

1. detailed sub-signals  
2. approximate sub-signal  
3. macro-structure

4. meso-structure  
5. micro-structures

## نتیجه‌گیری

داده‌های فشار اکتساب شده به منظور دنبال کردن تغییرات هیدرودینامیک بستر در حوزه زمان و فرکانس بررسی شد. انحراف استاندارد دامنه نوسانات برخلاف انتظار نشان داد که اندازه حباب‌ها روندی کاهشی را در مدت خشک شدن طی می‌کند که علت آن در واقع کاهش ارتفاع بستر به دلیل چروکیده شدن ذرات و افزایش دانسیته آنها می‌باشد که اجازه به هم پیوستن و رشد حباب‌ها را نمی‌دهد. از دیگر سو روند صعودی میانگین فرکانس دوره نشان داد که سهم رو به افزایش فاز حبابی بستر طی عملیات اگر نمی‌تواند با افزایش اندازه حباب‌ها نمایان شود به صورت افزایش در تعداد نمایان می‌شود. تحلیل در حوزه فرکانس نیز نتایج تحلیل حوزه زمان را مورد تأیید قرار داد اما به منظور تمرکز بر بخشی از سیگنال که بیانگر رفتار هیدرودینامیک بستر در فاز حبابی است سیگنال با آنالیز موجک به بخش‌های جزئی‌تر تفکیک شد. انرژی بخش‌های جزئی‌تر سیگنال نشان داد که زیر سیگنال‌های پنجم، ششم و هفتم سهم عمده انرژی سیگنال را به خود اختصاص داده‌اند. این زیر سیگنال‌ها که مربوط به حباب‌ها و خوشه‌های ذرات است در تحلیلی جداگانه نشان دادند که با کاهش سهم انرژی حباب‌های بزرگ سهم انرژی حباب‌های ریز و خوشه‌ها روندی صعودی طی می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با چروکیدگی و افزایش دانسیته ذرات علاوه بر ریزتر و پر تعدادتر شدن حباب‌ها سهم خوشه‌ها در بستر سیال نیز پررنگ‌تر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد نوسانات فشار به خوبی تغییرات هیدرودینامیک بسترهای سیال را رصد می‌کند و می‌تواند به صورت برخط در شرایط عملیاتی وسیعی مورد استفاده قرار گیرد.

## علامت‌های اختصاری

$A_j$	زیر سیگنال تقریب
$ACF$	میانگین فرکانس دوره سری زمانی
$D_j$	زیر سیگنال جزء
$E_j^a$	انرژی زیر سیگنال تقریب صوت ( $mV\text{olt}^2$ ) و فشار ( $Pa^2$ )
$E_j^D$	انرژی زیر سیگنال جزء صوت ( $mV\text{olt}^2$ ) و فشار ( $Pa^2$ )
$f$	فرکانس، $1/s$
$k$	ضریب تاخیر زمانی
$K$	برجستگی سری زمانی
$L$	تعداد بخش‌های سری زمانی
$MC$	محتوی رطوبت
$n$	شمارنده
$N$	طول سری زمانی
$P_{xx}^i$	تقریب طیف توان هر بخش
$P_{xx}$	میانگین طیف توان
$s$	ظریب مقیاس
$S$	چولگی
$t$	زمان
$u$	سرعت ظاهری گاز، $m/s$
$w(n)$	تابع پنجره
$x_i$	دامنه سیگنال‌های سری فشار ( $Pa$ )

1. Wormsbecker, M., T. Pugsley, H. Tanfara (2009), Interpretation of the hydrodynamic behaviour in a conical fluidized bed dryer, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 64, pp. 1739 \_ 1746
2. Schouten, J.C., C.M. van den Bleek (1998), Monitoring the quality of fluidization using the short-term predictability of pressure fluctuations, *AIChE J.*, Vol. 44, pp. 48–60.
3. Sasic, S., B. Leckner, F. Johnsson (2007), Characterization of fluid dynamics of fluidized beds by analysis of pressure fluctuations, *Prog. Energ. Combust.*, Vol. 33, pp. 453–496.
4. Zarghami, R., 2009. Conditional Monitoring of Fluidization Quality in Fluidized Beds, Ph.D. Dissertation, University of Tehran, Tehran, Iran.
5. Tsujimoto, H., Toyokazu Yokoyama, C.C. Huang, Isao Sekiguchi, 1999, Monitoring particle fluidization in a fluidized bed granulator with an acoustic emission sensor, *Powder Technol.*, Vol. 113, pp. 88–96
6. Briongos, J.V., J.M. Aragón and M.C. Palancar, 2006, Fluidised bed dynamics diagnosis from measurements of low-frequency out-bed passive acoustic emissions, *Powder Technol.*, Vol. 162, pp. 145–156.
7. Salehi-Nik, N., R. Sotudeh-Gharebagh, N. Mostoufi, R. Zarghami and M.J. Mahjoob, 2009, Determination of hydrodynamic behavior of gas–solid fluidized beds using statistical analysis of acoustic emissions, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 35, pp. 1011-1016.
8. Karimi, F., Sotudeh-Gharebagh, R., Zarghami, R., Abbasi, M. and Mostoufi, N., Conditional Monitoring of Moisture Contents in a Fluidized Bed Dryer by the Acoustic Emission Signature. *Korean J. Chem. Eng.* In Press, 2011.
9. Abbasi, M., R. Sotudeh-Gharebagh, N. Mostoufi , M.J. Mahjoob, 2009, Non-intrusive monitoring of bubbles in a gas-solid fluidized bed using vibration signature analysis, *Powder Technol.*, Vol. 196, pp. 278–285.
10. Abbasi, M., R. Sotudeh-Gharebagh, N. Mostoufi , M.J. Mahjoob, 2010, Nonintrusive characterization of fluidized bed hydrodynamics using vibration signature analysis, *AIChE J.*, Vol. 56, pp. 597-603.
11. Azizpour, H., R. Sotudeh-Gharebagh, R. Zarghami, M. Abbasi, N. Mostoufi, M. J. Mahjoob (2011), Characterization of gas–solid fluidized bed hydrodynamics by vibration signature analysis, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 56, pp. 257-269.
12. Mudde, R.F., P.R.P. Bruneau, T.H.J.J. van der Hagen, 2005, Time-resolved gamma-densitometry imaging within fluidized beds, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 44, pp. 6181–6187.
13. Chen, A., H.T. Bi, J.R. Grace, 2007, Charge distribution around a rising bubble in a two-dimensional fluidized bed by signal reconstruction, *Powder Technol.*, Vol. 177, pp. 113–124.
14. Demirbas, B., J. Nijenhuis, C.U. Yurteri, J.R. van Ommen, 2008, *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 86, pp. 493–505.
15. Vervloet, D., J. Nijenhuis, J.R. van Ommen, 2009, Monitoring a lab-scale fluidized bed dryer: A comparison between pressure transducers, passive acoustic emissions and vibration measurements, *Powder Technol.*, Vol. 197, pp. 36–48
16. Bi, H. T., Grace, J. R., “Effect of measurement method on the velocities used to demarcate the onset of turbulent fluidization”, *Chem. Eng. J.* 57, 261, 1995a.
17. Bi, H. T., Abba, I. A., Ellis, N. and Grace, J. R., “A state-of-the-art review of gas-solids turbulent fluidization”, *Chem. Eng. Sci.*, 55, 4789, 2000.
18. Bi, H. T., Chen, A., “Pressure fluctuations and transition from bubbling to turbulent fluidization”, *Powder Technology*, 133, 2003, 237- 246.

19. Johnsson, F., R.C. Zijerveld, J.C. Schouten, C.M. van den Bleek, B. Leckner, 2000, Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 26, pp. 663-715.
20. Li, H., "Application of wavelet multi-resolution analysis to pressure fluctuations of gas-solid two-phase flow in a horizontal pipe", *Powder Technology*, 125, 61, 2002.
21. Zhao, G. B., Yang, Y. R., "Multiscale resolution of fluidized-bed pressure fluctuations", *AIChE J.*, 49, 4, 2003.
22. Yang, T. Y., Leu, L., "Study of transition velocities from bubbling to turbulent fluidization by statistic and wavelet multi-resolution analysis on absolute pressure fluctuations", *Chem. Eng. Sci.*, 63, 2008, 1950-1970.
23. Oppenheim, A.V. and Willsky, A.S., *Signal and Systems*, Prentice-Hall, 2nd Edition., 1997.
24. Van der Schaaf, J., J.C. Schouten, F. Johnsson and C.M. van den Bleek, 2002, Non-intrusive determination of bubble and slug length scales in fluidized beds by decomposition of the power spectral density of pressure time series, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 28, pp. 865–880.
25. van Ommen, J. R., Schouten, J. C., and van den Bleek, C. M., "An early-warning-method for detecting bed agglomeration in fluidized bed combustors," Paper No. FBC99-0150, Proc. 15th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, R. B. Reuther, ed., ASME, New York, 1999a.
26. Bi, H. T., Grace, J. R., Lim, K. S., "Transition from bubbling to turbulent fluidization", *Ind. Chem. Res. Dev.*, 34, 1995b, 4003-4008.
27. Lu, X., Li, H., Wavelet analysis of pressure fluctuation signals in bubbling fluidized bed, *Chem. Eng. Sci.*, 75, 113, 1999.
28. Reyes; A., P. I. Alvarez; F. H. Marquardt, 2002, Drying of carrots in a fluidized bed. I. effects of drying conditions and modeling, *Dry. Technol.*, Vol. 20(7), pp. 1463–1483.