

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشگاه صنعتی شریف

دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی شیمی و نفت

پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش فرآیندهای جداسازی

تحلیل هیدرودینامیکی حرکت ذرات سوخت در یک بستر سیال به کمک روش زنجیره‌های مارکوف

نگارش

امیرحسین علی‌وندلای

استاد راهنما

دکتر فرزاد فتوت

شهریور ۱۴۰۲

تصویب نامه

به نام خدا

دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی شیمی و نفت

پایان نامه کارشناسی ارشد

این پایان نامه به عنوان تحقق بخشی از شرایط دریافت درجه کارشناسی ارشد است.

عنوان: تحلیل هیدرودینامیکی حرکت ذرات سوخت در یک بستر سیال به کمک روش -

های زنجیره‌های مارکوف

نگارش: امیرحسین علی‌وندلای

کمیته ممتحنین:

امضاء..... استاد راهنما: دکتر فتوت

امضاء..... استاد راهنمای همکار:.....

امضاء..... استاد مشاور:.....

تاریخ:.....



اظهارنامه

(اصالت متن و محتوای پایان نامه کارشناسی ارشد)

عنوان پایان نامه: _____

نام استاد راهنما: _____ نام استاد راهنمای همکار: _____ نام استاد مشاور: _____

این جانب _____ اظهار می دارم:

- ۱- متن و نتایج علمی ارائه شده در این پایان نامه اصیل بوده و منحصرأ توسط این جانب و زیر نظر استادان (راهنما، همکار و مشاور) نام برده شده در بالا تهیه شده است.
- ۲- متن پایان نامه به این صورت در هیچ جای دیگری منتشر نشده است.
- ۳- متن و نتایج مندرج در این پایان نامه، حاصل تحقیقات این جانب به عنوان دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف است.
- ۴- کلیه مطالبی که از منابع دیگر در این پایان نامه مورد استفاده قرار گرفته، با ذکر مرجع مشخص شده است.

نام دانشجو: _____

تاریخ

امضا

نتایج تحقیقات مندرج در این پایان نامه و دستاوردهای مادی و معنوی ناشی از آن (شامل فرمول‌ها، توابع کتابخانه‌ای، نرم‌افزارها، سخت‌افزارها و مواردی که قابلیت ثبت اختراع دارد) متعلق به دانشگاه صنعتی شریف است. هیچ شخصیت حقیقی یا حقوقی بدون کسب اجازه از دانشگاه صنعتی شریف حق فروش و ادعای مالکیت مادی یا معنوی بر آن یا ثبت اختراع از آن را ندارد. همچنین کلیه حقوق مربوط به چاپ، تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه، اقتباس و نظائر آن در محیط‌های مختلف اعم از الکترونیکی، مجازی یا فیزیکی برای دانشگاه صنعتی شریف محفوظ است. نقل مطالب با ذکر ماخذ بلامانع است.

نام دانشجو: _____

تاریخ

امضا

نام استادان راهنما: _____

تاریخ

امضا

تقدیم به

مادر و پدر گرانقدرم که صرف نظر از سختی‌های مسیر زندگی، در حمایت و پشتیبانی فرزندشان هیچ کوتاهی‌ای مرتکب نشدند و نشانه لطف الهی در زندگی این حقیر هستند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از زحمات و حمایت‌های استاد گرانقدر، دکتر فتوت، که در طی مدت این پژوهش، با صبر و حوصله از هیچ کمکی در راستای پیشروی این پروژه فروگزاری نکردند. همچنین از دوستان عزیز که با صبری مثال‌زدنی از پشتیبانی و حمایت معنوی اینجانب در طی این مدت، دست‌نکشیدند.

بسترهای سیال با توجه به قابلیت‌های منحصربفرد خود در اختلاط ذرات جامد و همچنین کیفیت انتقال حرارت صورت گرفته، در صنعت مورد استفاده گسترده قرار گرفته‌اند. در برخی موارد که سیال‌سازی به کمک دو جنس از ذرات جامد با تفاوت چشمگیری در خواص فیزیکی آن‌ها انجام می‌گیرد، نحوه حرکت ذرات بزرگتر از اهمیت بسیاری برخوردار است. این قبیل سیستم‌ها به طور گسترده‌ای در صنایع فرآوری زیست‌توده‌ها و یا فرآیندهای پتروشیمیایی استفاده می‌شوند. با وجود اهمیت این سیستم‌ها و کاربری گسترده‌شان، در مقایسه با سیستم‌های سیال‌سازی تک‌ذره‌ای رایج کمتر مورد مطالعه و پژوهش قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های حاصل از ردیابی رادیواکتیو ذرات، به بررسی رفتار ذرات جامدی با خواص مشابه با ذرات زیست‌سوخت و مدل‌سازی آن‌ها پرداخته شده است. با توجه به اینکه هیدرودینامیک رفتار ذرات در این سیستم‌ها به طور کامل مشخص نیست، مکانیسم جامعی برای بررسی رفتار آن‌ها در دست نیست. به این منظور برای مدل‌سازی از روش‌های آماری از قبیل زنجیره‌های مارکوف برای مدل‌سازی این سیستم‌ها استفاده شده است. نوآوری مورد استفاده در این مدل‌ها مربوط به محاسبه میزان احتمال حرکت ذره در راستای طولی به کمک روابط تئوری یا نیمه-تجربی توصیف‌کننده حرکت ذرات در بستر سیال، محاسبه می‌شود. از طرفی میزان احتمال تغییر فاز ذره بین فازهای حباب و متراکم (امولسیون)، به دلیل عدم وجود رابطه‌ای برای بیان آن، به صورت تجربی و با استفاده از داده‌های موجود محاسبه شد. بر این اساس، با استفاده از مفاهیمی مانند جابجایی مقید و نامقید ذرات و بررسی توزیع زمان ماند آن‌ها در بستر سیال، از فرم‌های مختلف روش زنجیره‌های مارکوف از قبیل یکپارچه، دو فازی و سه فازی برای مدل‌سازی حرکت و پراکندگی ذره درشت (شیء) در بستر سیال حاوی ذرات ریز پرداخته شد و در نهایت میزان دقت این فرم‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در یک اقدامی نوین، برای بررسی و مقایسه میان نتایج از فاصله آماری میان توزیع مسافت و زمان جابجایی‌های مقید و نامقید استفاده شده است و بر اساس آن مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی از بیشترین دقت برای تخمین رفتار جابجایی‌های مقید برخوردار است و در رابطه با جابجایی‌های نامقید، مدل‌های دوفازی و سه فازی هر دو از دقت بالایی برخوردارند اما نمی‌توان از مدل یکپارچه استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: سیال‌سازی گاز-جامد، زنجیره‌های مارکوف، بسترهای سیال حبابی، توزیع زمان ماند، جابجایی‌های محصور و نامحصور

فهرست مطالب

چکیده ۵

فهرست جدول‌ها ط

فهرست تصویرها ک

فصل ۱: مقدمه ۱

۱-۱ اهمیت موضوع و بیان مسئله ۱

۱-۲ اهداف پژوهشی ۲

۱-۳ ساختار پایان‌نامه ۳

فصل ۲: مبانی نظری و مروری بر پژوهش‌های پیشین ۴

۲-۱ سیال‌سازی و بسترهای سیال ۴

۲-۲ دسته‌بندی گلدارت ذرات در سیال‌سازی گازی ۸

۲-۳ بهبود سیال‌سازی ذرات گروه D به کمک ذرات گروه A و B ۱۰

۲-۴ جریان چندفازی در بسترهای سیال ۱۱

۲-۴-۱ سرعت‌های مشخصه ۱۱

۲-۴-۲ توزیع حبابها ۱۱

۲-۴-۳ مکانیسم حرکت ذرات در بستر ۱۲

۲-۵ مدل‌سازی جابجایی ذرات در طول بستر ۱۳

۲-۵-۱ توزیع زمان ماند و محاسبه آن ۱۳

۲-۵-۲ مدل نفوذ و جابجایی برای ذرات در بستر سیال ۱۴

۲-۶ جابجایی‌های مقید و نامقید ۱۶

فصل ۳: مدل‌سازی و روش‌ها ۲۰

۳-۱ مقدمه ۲۰

۳-۲ سیستم مورد بررسی ۲۰

| | | |
|----|--|-------|
| ۲۲ | گسسته‌سازی هندسه | ۳-۳ |
| ۲۳ | هیدرودینامیکی سیستم | ۳-۴ |
| ۲۴ | سیال | ۳-۵ |
| ۲۵ | مارکوف | ۳-۵-۱ |
| ۲۶ | سیال حبابی | ۳-۵-۲ |
| ۲۷ | یکپارچه | ۳-۵-۳ |
| ۲۸ | (بدون جریان خلیج) | ۳-۵-۴ |
| ۳۰ | (همراه با جریان خلیج) | ۳-۵-۵ |
| ۳۲ | مدل با پدیده‌های فیزیکی | ۳-۶ |
| ۳۳ | مدل‌سازی | ۳-۷ |
| ۳۴ | با استفاده از مدل‌سازی‌های موجود در مقالات برای حرکت ذره | ۳-۷-۱ |
| ۳۷ | λ | ۳-۷-۲ |
| ۳۸ | انتقال | ۳-۷-۳ |
| ۳۹ | مختلف | ۳-۸ |
| ۳۹ | یکپارچه | ۳-۸-۱ |
| ۴۰ | دو فازی | ۳-۸-۲ |
| ۴۰ | سه فازی | ۳-۸-۳ |
| ۴۲ | فصل ۴: نتایج و بحث | |
| ۴۲ | مقدمه | ۴-۱ |
| ۴۲ | با داده‌ها و آماده‌سازی برای تحلیل آن‌ها | ۴-۲ |
| ۴۲ | مورد بررسی | ۴-۳ |
| ۴۳ | سیستم | ۴-۳-۱ |
| ۴۴ | نفوذ | ۴-۴ |
| ۴۴ | نفوذ | ۴-۴-۱ |
| ۴۶ | جابجایی | ۴-۵ |
| ۴۶ | نامقید | ۴-۵-۱ |
| ۴۸ | زمان ماند | ۴-۵-۲ |
| ۵۰ | یکپارچه | ۴-۶ |

| | |
|-----|---|
| ۶۴ | ۴-۷ بررسی نتایج روش زنجیره‌های مارکوف دوفازی |
| ۷۷ | ۴-۸ بررسی نتایج روش زنجیره‌های مارکوف سه فازی |
| ۹۰ | ۴-۹ اعتبارسنجی مدل‌ها |
| ۹۰ | ۴-۹-۱ مقایسه نتایج |
| ۹۶ | ۴-۱۰ بررسی توزیع طولی حضور ذرات در بستر |
| ۱۰۲ | ۴-۱۱ نتیجه‌گیری |
| ۱۰۲ | ۴-۱۲ محدودیت‌ها |
| ۱۰۳ | ۴-۱۳ پیشنهادها و موضوعات آتی |
| ۱۰۵ | مراجع |
| ۱۰۸ | ضمیمه |

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ برخی از کاربردهای صنعتی بسترهای سیال گازی [۱]..... ۷
- جدول ۲-۲ برخی بازه‌های عملیاتی رایج برای راکتورهای بستر سیال گازی برای واکنش‌های گاز با کاتالیست جامد [۱]..... ۸
- جدول ۱-۳ خواص ذرات درشت مورد استفاده در آزمایش‌ها [۱۰]..... ۲۱
- جدول ۲-۳ خواص ذرات ریز مورد استفاده در آزمایش‌ها [۱۰]..... ۲۱
- جدول ۳-۳ آزمایشات انجام شده و مورد بررسی در این پایان‌نامه [۱۰]..... ۲۲
- جدول ۳-۴ خلاصه تعداد سلول‌های بستر، فازهای سیستم و حالات ممکن در روش‌های مختلف. ۳۹
- جدول ۴-۱ تعداد جابجایی‌های محصور در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه ۱۰۸.....
- جدول ۴-۲ تعداد جابجایی‌های نامحصور در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه ۱۰۸.....
- جدول ۴-۳ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت پایین در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه..... ۱۰۹
- جدول ۴-۴ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت پایین در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه..... ۱۱۰
- جدول ۴-۵ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه..... ۱۱۱
- جدول ۴-۶ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه..... ۱۱۲
- جدول ۴-۷ تعداد مسیرهای محصور در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی..... ۱۱۳
- جدول ۴-۸ تعداد مسیرهای نامحصور در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی... ۱۱۳
- جدول ۴-۹ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت پایین در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی..... ۱۱۴

| | |
|---|-----|
| جدول ۴-۱۰ میانگین و واریانس زمان جابجایی های محصور به سمت بالا در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف دوفازی | ۱۱۵ |
| جدول ۴-۱۱ میانگین و واریانس زمان جابجایی های نامحصور به سمت پایین در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف دوفازی | ۱۱۶ |
| جدول ۴-۱۲ میانگین و واریانس زمان جابجایی های نامحصور به سمت بالا در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف دوفازی | ۱۱۷ |
| جدول ۴-۱۳ تعداد مسیرهای محصور در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف سه فازی .. | ۱۱۷ |
| جدول ۴-۱۴ تعداد مسیرهای نامحصور در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف سه فازی | ۱۱۸ |
| جدول ۴-۱۵ میانگین و واریانس زمان جابجایی های محصور به سمت پایین در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف سه فازی | ۱۱۹ |
| جدول ۴-۱۶ میانگین و واریانس زمان جابجایی های محصور به سمت بالا در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف سه فازی | ۱۲۰ |
| جدول ۴-۱۷ میانگین و واریانس زمان جابجایی های نامحصور به سمت پایین در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف سه فازی | ۱۲۱ |
| جدول ۴-۱۸ میانگین و واریانس زمان جابجایی های نامحصور به سمت بالا در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف سه فازی | ۱۲۱ |

فهرست تصویرها

- شکل ۱-۱-۱ سرمایه‌گذاری‌های ۵ سال اخیر در بخش انرژی [۱]..... ۱
- شکل ۱-۲-۱ رژیم‌های سیالیت مختلف در سیستم‌های بستر سیال گاز-جامد [۸]..... ۵
- شکل ۲-۲-۲ تقسیم‌بندی گلدارت برای ذرات مورد استفاده در سیال‌سازی در هوا و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ اتمسفر [۸]..... ۱۰
- شکل ۲-۳-۳ شماتیک حرکت ذرات در سه ناحیه متفاوت در بستر (۱) فاز امولسیون گاز-جامد عاری از حباب با حرکت عمده ذرات جامد به سمت پایین، (۲) ناحیه دنباله حباب‌ها، (۳) ناحیه پرتاب ذرات واقع در بالای سطح بستر [۱۳]..... ۱۳
- شکل ۲-۴-۴ نمونه‌ای از جابجایی‌های مقید الف) در مسیر حرکت به بالا. ب) در مسیر حرکت به پایین [۱۵]..... ۱۷
- شکل ۲-۵-۵ نمونه‌ای از جابجایی‌های نامقید الف) در مسیر حرکت به بالا. ب) در مسیر حرکت به پایین [۱۵]..... ۱۸
- شکل ۳-۱-۱ بستر سیال گسسته‌شده که در آن احتمالات حرکات مختلف ذره با استفاده از پیکان نمایش داده شده‌اند..... ۲۶
- شکل ۳-۲-۲ شماتیک روش زنجیره‌های مارکوف دوفازی برای جابجایی ذره در یک بستر سیال حبابی..... ۲۹
- شکل ۳-۳-۳ شماتیک روش زنجیره‌های مارکوف سه فازی برای جابجایی ذره در یک بستر سیال حبابی..... ۳۱
- شکل ۳-۴-۴ فلوچارت روند مدل‌سازی..... ۳۴
- شکل ۴-۱-۱ نمونه‌ای از مسیر حرکت ذره در راستای طولی به مدت ۳۰ ثانیه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه)..... ۴۳
- شکل ۴-۲-۲ الف) فرکانس طولی ذره در بستر. ب) فرکانس تجمعی راستای طولی ذره در بستر (استال بزرگ در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه)..... ۴۴

- شکل ۴-۳ میانگین مربعات جابجایی طولی برای ۵ نقطه مختلف بستر (استال بزرگ در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه)..... ۴۶
- شکل ۴-۴ هیستوگرام زمان جابجایی های مقید به سمت بالا (ذره استال بزرگ در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه)..... ۴۷
- شکل ۴-۵ هیستوگرام زمان جابجایی های نامقید به سمت بالا (ذره استال بزرگ در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه)..... ۴۸
- شکل ۴-۶ نمودار تست واریانس برای بدست آوردن مکانیسم حرکت در جابجایی های محصور (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه)..... ۴۹
- شکل ۴-۷ نمودار تست واریانس برای بدست آوردن مکانیسم حرکت در جابجایی های نامحصور (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه)..... ۴۹
- شکل ۴-۸ هیستوگرام مسافت جابجایی های مقید به سمت پایین برای داده های تجربی و مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۱
- شکل ۴-۹ هیستوگرام زمان جابجایی های مقید به سمت پایین برای داده های تجربی و مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۲
- شکل ۴-۱۰ هیستوگرام مسافت جابجایی های مقید به سمت بالا برای داده های تجربی و مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۲
- شکل ۴-۱۱ هیستوگرام زمان جابجایی های مقید به سمت بالا برای داده های تجربی و مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۳
- شکل ۴-۱۲ هیستوگرام مسافت جابجایی های نامقید به سمت پایین برای داده های تجربی و مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۳
- شکل ۴-۱۳ هیستوگرام زمان جابجایی های نامقید به سمت پایین برای داده های تجربی و مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۴

شکل ۴-۱۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۴

شکل ۴-۱۵ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۵

شکل ۴-۱۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۵

شکل ۴-۱۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۶

شکل ۴-۱۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۶

شکل ۴-۱۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۷

شکل ۴-۲۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۷

شکل ۴-۲۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۸

شکل ۴-۲۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۹

شکل ۴-۲۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۵۹

شکل ۴-۲۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۰

شکل ۴-۲۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۰

شکل ۴-۲۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۱

شکل ۴-۲۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۱

شکل ۴-۲۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۲

شکل ۴-۲۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۲

شکل ۴-۳۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۳

شکل ۴-۳۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۳

شکل ۴-۳۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۵

شکل ۴-۳۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۵

شکل ۴-۳۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۶

شکل ۴-۳۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۶

شکل ۴-۳۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۷

شکل ۴-۳۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۷

شکل ۴-۳۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۸

شکل ۴-۳۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۸

شکل ۴-۴۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۹

شکل ۴-۴۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۶۹

شکل ۴-۴۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۰

شکل ۴-۴۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۰

شکل ۴-۴۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۱

شکل ۴-۴۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۱

شکل ۴-۴۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۲

شکل ۴-۴۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۲

شکل ۴-۴۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۳

شکل ۴-۴۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۳

- شکل ۴-۵۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۴
- شکل ۴-۵۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۴
- شکل ۴-۵۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۵
- شکل ۴-۵۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۵
- شکل ۴-۵۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۶
- شکل ۴-۵۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۶
- شکل ۴-۵۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۸
- شکل ۴-۵۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۸
- شکل ۴-۵۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۹
- شکل ۴-۵۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۷۹

شکل ۴-۶۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر مایه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۰

شکل ۴-۶۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۰

شکل ۴-۶۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۱

شکل ۴-۶۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۱

شکل ۴-۶۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۲

شکل ۴-۶۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۲

شکل ۴-۶۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۳

شکل ۴-۶۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۳

شکل ۴-۶۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۴

- شکل ۴-۶۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۴
- شکل ۴-۷۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۵
- شکل ۴-۷۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۵
- شکل ۴-۷۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۶
- شکل ۴-۷۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۶
- شکل ۴-۷۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۷
- شکل ۴-۷۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۷
- شکل ۴-۷۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۸
- شکل ۴-۷۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۸

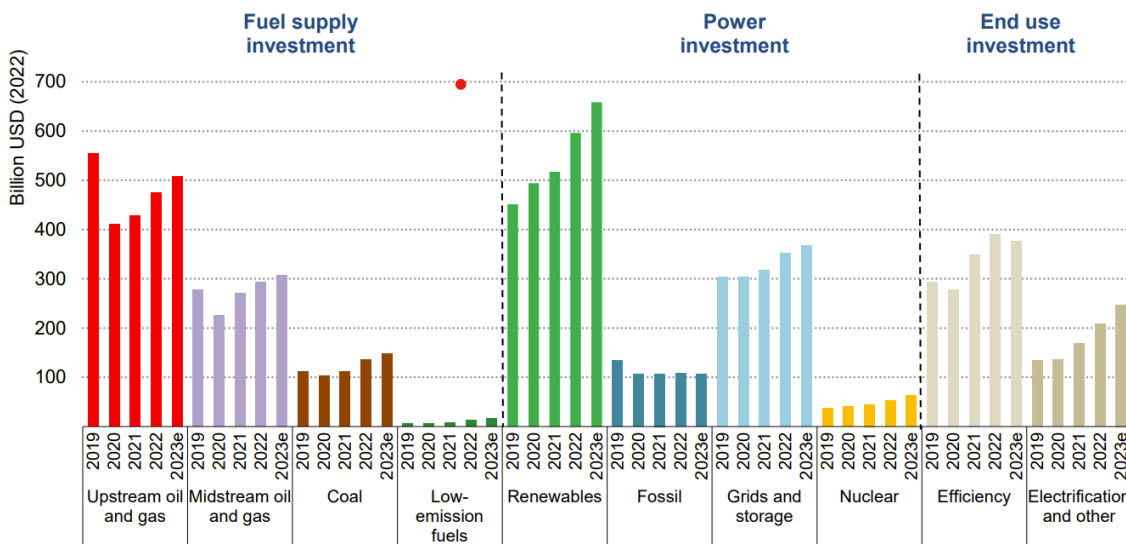
- شکل ۴-۷۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۹
- شکل ۴-۷۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۸۹
- شکل ۴-۸۰ مقایسه فاصله آماری برای توزیع مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۹۱
- شکل ۴-۸۱ مقایسه فاصله آماری برای توزیع زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۹۱
- شکل ۴-۸۲ مقایسه فاصله آماری برای توزیع مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۹۲
- شکل ۴-۸۳ مقایسه فاصله آماری برای توزیع زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۹۲
- شکل ۴-۸۴ مقایسه فاصله آماری برای توزیع مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۹۳
- شکل ۴-۸۵ مقایسه فاصله آماری برای توزیع زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۹۳
- شکل ۴-۸۶ مقایسه فاصله آماری برای توزیع مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۹۴
- شکل ۴-۸۷ مقایسه فاصله آماری برای توزیع زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)..... ۹۴
- شکل ۴-۸۸ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه درشت و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه)..... ۹۷
- شکل ۴-۸۹ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر کاتالیست FCC و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه)..... ۹۸
- شکل ۴-۹۰ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه ریز و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه)..... ۹۸

- شکل ۴- ۹۱ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه درشت و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی)..... ۹۹
- شکل ۴- ۹۲ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر کاتالیست FCC و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی)..... ۹۹
- شکل ۴- ۹۳ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه ریز و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی)..... ۱۰۰
- شکل ۴- ۹۴ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه درشت و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی)..... ۱۰۰
- شکل ۴- ۹۵ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر کاتالیست FCC و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی)..... ۱۰۱
- شکل ۴- ۹۶ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه ریز و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی)..... ۱۰۱

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ اهمیت موضوع و بیان مسئله

با توجه به تغییرات اساسی در حوزه تولید انرژی در مسیر حرکت به سمت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، فناوری‌های احتراق ذغال، نفت و گاز در حال از دست دادن محبوبیت خود هستند؛ در حالی که انرژی حاصله از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی‌های بادی و خورشیدی شاهد رشدی مثال‌زدنی در ۵ سال اخیر بوده‌اند و پیش‌بینی می‌شود تا این رشد ادامه داشته باشد. (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱ - سرمایه‌گذاری‌های ۵ سال اخیر در بخش انرژی [۱]

موسساتی مانند آژانس انرژی بین‌المللی، افزایش ظرفیت نصب‌شده برای فرآیندهای تولید انرژی بادی، خورشیدی و آبی را با ضریب ۲,۵ از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۳ میلادی را پیش‌بینی می‌کنند. [۲] با این حال، راه‌های متفاوتی برای کاهش انتشار گاز کربن دی‌اکسید در تولید انرژی و حرارت وجود دارند و وضعیت انرژی فعلی جهانی، نیازمند یک راه‌حل منحصربفرد است. نسبت بالای تناوب در منابع تولید انرژی، منجر به نوساناتی در شبکه می‌شود، که منجر به دشوار شدن تنظیم تولید بار و در نتیجه سیستم تولید انرژی نامتعادل که خود نیازمند تعمیم شبکه، فناوری‌های کنترل مدرن و یا متعادل‌سازی توزیع انرژی می‌باشد. [۳]

مثالی برای متعادل سازی بار گاز کربن دی اکسید خنثی، استفاده از زیست توده^۱ برای تولید انرژی به صورت نامتناوب می باشد. به علاوه، جایگزینی یا تعمیم فناوری های حال حاضر برای تبدیل شدن به محیطی خنثی از کربن - به معنای سائیتی برای تولید انرژی با استفاده از سوخت فسیلی، به همراه فناوری های به دام اندازی و انبار کربن - بسیار هزینه بر است زیرا در حال حاضر در حال تالیف استانداردهای استفاده و نصب می باشند. [۴] از طرفی جایگزینی سوخت فسیلی مصرفی به زیست توده، هزینه کمتری را به همراه دارد. با این حال، تغییر سوخت برای فناوری های تولید انرژی حرارتی متصل به کاهش بهره وری نیز می باشد. این کاهش در بهره وری، به دلیل پایین بودن میزان ظرفیت گرمایی زیست توده حاصل از پسماند چوب و خانه ها که خود حاصل از رطوبت و سایر اجزای زیست توده می باشد. [۵]

به هنگام تبدیل سوخت های رده پایین، راکتورهای بسترسیال^۲ با مزایای بسیاری که دارند، انتخاب اصلی می باشند. این فناوری اولین بار به صورت تجاری در دهه ۱۹۷۰ برای تولید انرژی به کار گرفته شد [۱] و تا به حال افزایش چشمگیری در تعداد، اندازه و همچنین کاربردهای خود شاهد بوده است. با وجود استفاده بالای این تجهیز، همچنان یک خلا در درک جزئیات فرآیندهای اختلاط در این بسترها [۶] موجود است که این خلا به طور خاص در طراحی راکتور و بررسی عملکرد پلنت به هنگام کاربردهای متفاوت از اهمیت خاصی برخوردار خواهند بود. [۴]

راکتورهای بسترسیال مورد استفاده برای احتراق و گازی سازی^۳، مزایایی از قبیل انتشار پایین آلاینده ها، میزان انتقال حرارت بالا، بازدهی مناسب و دمای احتراق پایین را دارا می باشند. [۷] مدل سازی این راکتورها می تواند با هدف های متفاوتی انجام شود: برای مثال از مقیاس های کوچک آزمایشگاهی که برخی رفتارها من جمله نفوذ در راستای شعاعی در آن ها دیده نمی شود تا مقیاس های صنعتی و بزرگ که پیچیدگی های منحصر بفرد خود را دارند. از طرفی به طور خاص در مقیاس های بزرگ، انجام تست ها و آزمایش ها بسیار هزینه بر بوده و مدل سازی می تواند تا باعث صرفه جویی در هزینه و زمان شود و حتی ما را در مسیر بهینه سازی سیستم قرار دهد.

۲-۱ اهداف پژوهشی

با توجه به قابلیت های ویژه بسترهای سیال در اختلاط جامدات و انتقال جرم و حرارت، فرآیندهای

^۱Biomass

^۲Fluidized Bed Reactors

^۳Gasification

بسیاری از این نوع سیستم‌ها استفاده می‌کنند. از طرفی بسیاری از راکتورهای بسترسیالی که در صنعت برای گازی‌سازی زیست‌توده‌ها به کار می‌روند، شامل اجزای متفاوتی از قبیل خود زیست‌توده‌ها و همچنین ذرات ریز بستر هستند که از نظر شکل، اندازه و چگالی، تفاوت‌های زیادی با یکدیگر دارند. ذرات ریز در بستر، عموماً با هدف بهبود سیال‌سازی ذرات درشت، که از آنها با نام شیء هم یاد می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرند و به هنگام استفاده می‌تواند گستره وسیعی از تاثیرات را بر رفتار ذرات درشت درون بستر بگذارند. علی‌رغم اهمیت این سیستم‌ها، هیدرودینامیک آن‌ها در مقایسه با بسترهای سیال متشکل از ذرات ریز تنها کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در چنین سیستم‌هایی درک صحیح و درست از رفتار ذرات درشت و موقعیت و ترجیحات حرکتی آن در بستر نقش مهمی را در طراحی و کنترل این سیستم‌ها ایفا می‌کند. همچنین در بحث اصلی، یک مدل آماری بر اساس روش زنجیره‌های مارکوف برای مدل‌سازی حرکت ذرات درشت در بسترهای سیال حبابی ارائه و توانایی فرم‌های مختلف این مدل در پیش‌بینی میزان پراکندگی ذره درشت با استفاده از پارامترهایی که در این پژوهش تعریف می‌شوند، آزموده می‌شوند.

۳-۱ ساختار پایان‌نامه

در پژوهش حاضر، در فصل اول مقدمه‌ای مختصر در مورد کلیات پژوهش انجام شده آورده شده است. در فصل دوم، به معرفی بسترهای سیال، به طور خاص بسترهای سیال حبابی^۱ و چندجزئی^۲، معرفی حرکت‌های ذرات در بستر و مکانیسم‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی آن، و همچنین تعریف جابجایی-های مقید و نامقید^۳ پرداخته شده است. در فصل سوم، ابتدا به معرفی سیستم مورد بررسی و همچنین بررسی معادلات ابتدایی برای بررسی هیدرودینامیکی سیستم پرداخته شده است. سپس روش‌های آماری مورد استفاده برای مدل‌سازی حرکت ذرات مورد بررسی قرار می‌گیرند و سپس نحوه مدل‌سازی و تعیین پارامترهای آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. در فصل چهارم، ابتدا به بررسی نتایج ابتدایی و و آنالیز رفتار هیدرودینامیکی ذرات درشت در بستر پرداخته شده است. در ادامه به بررسی درستی مدل‌های نفوذی و جابجایی و در نهایت به بررسی نتایج مدل‌های بر اساس زنجیره مارکوف پرداخته شده است.

^۱Bubbling Fluidized Beds

^۲Multi-component Fluidized Beds

^۳Restricted and Unrestricted Movements

فصل ۲: مبانی نظری و مروری بر پژوهش‌های پیشین

۲-۱ سیال‌سازی^۱ و بسترهای سیال

سیال‌سازی هنگامی اتفاق می‌افتد که ذرات جامد موجود در یک بستر با حجم محدود توسط سیال (گاز یا جامد) مورد حمایت قرار گرفته و نسبت به ذرات دیگر در یک مسیر عمودی مورد انتقال قرار می‌گیرند. در رایج‌ترین حالت آن، سیال مورد نظر گازی است که به وسیله یک کمپرسور و از طریق یک صفحه سوراخ‌دار^۲ یا مجموعه‌ای از اوریفیس‌ها^۳ از سمت پایین به درون لوله‌ای فرستاده می‌شود. این تنها حالت یک بستر سیال نیست و یک بستر سیال می‌تواند تحت حالت‌های دیگری نیز تعریف شود. [۸]

پیدایش بسترهای سیال کاملاً واضح نیست اما سیال‌سازی به کمک مایعات از لحاظ تاریخی نسبت به سیال‌سازی به کمک گازها پیشی داشته است. اولین کاربرد گسترده صنعتی بسترهای سیال گازی در دهه ۱۹۲۰ میلادی و در آلمان بود. در این سال وینکلر لیسانس یک گازی‌ساز مدرن را ثبت کرد. [۸]

سیال‌سازی پدیده‌ای است که در آن ذرات جامد بدون زحمت توسط جریان گاز یا مایع به حرکت در می‌آیند. هنگامی که یک سیال از بستری از ذرات ریز عبور می‌کند، نیروی کشش بین سیال و ذرات به تدریج به نقطه‌ای می‌رسد که با نیروی گرانشی اعمال شده توسط وزن ذرات مطابقت دارد. در نتیجه، ذرات شروع به شناور شدن می‌کنند و افت فشار در بستر سیال با وزن ذرات در آن بخش خاص برابر می‌شود. این حالت خاص از بستر به عنوان "بستر سیال ابتدایی" یا "بستر در حداقل سیال شدن" نامیده می‌شود. سرعت رخ دادن این اتفاق به عنوان "سرعت حداقل سیالیت"^۴ شناخته می‌شود. همانطور که سرعت در سیستم‌های گاز-جامد از حداقل سرعت سیالیت فراتر می‌رود، ذرات معلق و تخلخل به طور همزمان افزایش می‌یابد. این منجر به تشکیل حباب‌های گاز می‌شود و نوعی بستر منحصربه‌فرد به نام بستر سیال حبابی ایجاد می‌کند. اگر سرعت سیال را باز هم زیادتر بکنیم، حباب‌های گاز همزمان با

^۱Fluidization

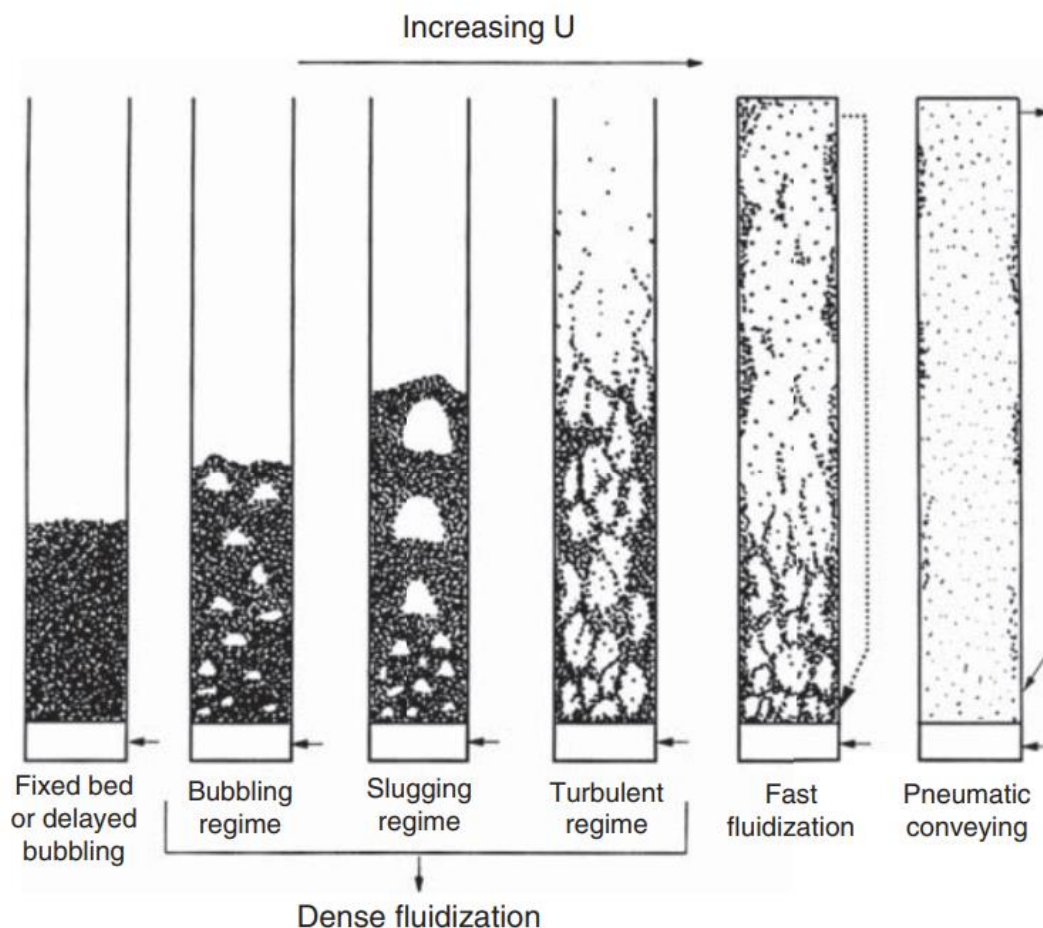
^۲Perforated Plate

^۳Orifices

^۴Fluidized Bed at Minimum Fluidization

^۵Minimum Fluidization Velocity

بالا رفتن به هم می‌پیوندند و حباب‌های بزرگتری را به صورت لخته‌ای ایجاد می‌کنند و در نهایت به اندازه قطر یا عرض لوله می‌رسند. این رژیم جریان خاص در داخل بستر را با نام بستر سیال لخته‌ای^۱ نامگذاری می‌کنند. در صورتی که سرعت سیال گازی از سرعت حدی سقوط ذرات نیز فراتر رود، مرز فضای بالایی بستر از بین می‌رود و بجای حرکت حباب‌های لخته‌ای، حرکتی آشفته از مجموعه‌ای از ذرات را به همراه فضاهای خالی‌ای با اندازه‌ها و اشکال متفاوت مشاهده خواهیم کرد. این نوع از بسترهای سیال با عنوان بسترهای سیال آشفته نامگذاری می‌شوند. با افزایش سرعت سیال گازی بیشتر از سرعت حدی ذرات، سیال اقدام به حمل ذرات جامد می‌کند و در این حالت ذرات جامد به صورت پراکنده‌ای در بستر حضور دارند. رژیم‌های عنوان‌شده برای بسترهای سیالی گوناگون گاز-جامد به صورت شماتیک در شکل ۱-۲ آمده‌اند. [۸]



شکل ۱-۲ رژیم‌های سیالیت مختلف در سیستم‌های بستر سیال گاز-جامد [۸]

^۱Slugging Fluidized Bed

^۲Turbulent Fluidized Bed

- بسترهای سیال گازی امروزه یکی از پرکاربردترین بسترهای سیال هستند. این بسترها در مقایسه با بسترهای آکنده ثابت، مزایای زیر را ارائه می‌دهند:
- توزیع یکسان دما (با تغییراتی در بازه زیر ۱۰ درجه سانتیگراد در قسمت چگال بستر و حذف احتمال تشکیل نقاط داغ)
 - بالا بودن ضرایب انتقال حرارت میان بستر و سطح (معمولاً یک درجه بزرگتر از میزان آن در بسترهای سیال قابت و دو درجه بزرگتر از میزان آن در ستون‌های خالی)
 - قابلیت افزودن و حذف ذرات به صورت پیوسته که بازیابی کاتالیست و فرآیندهای پیوسته را ممکن می‌سازد.
 - افت فشار نسبتاً پایین (تنها به اندازه‌ای که نسبت وزن بستر به ناحیه جانبی را پشتیبانی کند).
 - قابل تغییر مقیاس تا اندازه‌های بسیار بزرگ (برخی از راکتورهای بستر سیال تجاری بیش از دویست متر مربع سطح مقطع دارند)
 - فاکتورهای بالای اثرگذاری کاتالیست (حداقل مقاومت انتقال جرمی در هنگام انتقال به کاتالیست)
 - قابلیت تحمل مایعات (در برخی فرآیندها از جمله فرآیند شکست کاتالیستی سیال، مایعی به داخل بستر اسپری می‌شود و در آن تبخیر شده و واکنش می‌دهد)
- مزایای ذکر شده برای بسترهای سیال گازی کافی هستند تا از اثرات معایب این بسترها که در زیر ذکر می‌شوند، چشم‌پوشی کرده یا به دنبال بهینه‌سازی آن‌ها باشیم:
- اختلاط طولی قابل توجه گاز (گاز به همراه ذرات جامد در حال سقوط به درون بستر کشیده می‌شوند و اختلاط در راستای پشتی انجام می‌گیرد و باعث می‌شود تا این جریان از جریان پلاگ ایده‌آل فاصله بگیرد و عدد پکلت از مرتبه بزرگی ۵-۱۰ داشته باشد)
 - نفوذ قابل توجه ذرات جامد (جابجایی ذرات و خوشه‌های ذرات در کنار یکدیگر، منجر به این می‌شوند که برخی ذرات زمان بسیار کمتر و برخی زمان بسیار بیشتری را نسبت به میانگین زمان ماند ذرات در بستر سپری کرده‌اند)
 - کنارگذر گازی (بخشی از جریان گازی که چگالی فازی آن پایین‌تر است و غالب آن را حباب تشکیل داده است، با سرعت بیشتری از بستر عبور می‌کند و زمان کمتری برای تماس با ذرات دارند)
 - محدودیت در سیال‌سازی موفق ذرات (ذراتی با اندازه‌های نافرمان، به عنوان مثال سوزنی یا به

Hot-spots

Back-mixing

شکل دیسک، یا ذرات با قطر میانگین کوچکتر از ۳۰ میکرومتر را به سختی می‌توان به حالت سیال درآورد یا اصلاً نمی‌توان)

- همراه‌بری^۱ (ذرات، به خصوص در اندازه‌های ریز، همراه با جریان گازی به بالا برده می‌شوند و ممکن است بستر را ترک کنند. برای حداقل‌سازی همراه‌بری ذرات، باید ذرات به صورت پیوسته بازیابی شده و از پایین به بستر برگشت داده شوند)
 - پیچیدگی و ریسک (طراحی، تغییر مقیاس و هزینه‌های بستر سیال به مراتب بیشتر از بسترهای ثابت است. با این وجود، عملکرد بهتری را نیز از خود نشان می‌دهد)
- با در نظر گرفتن مزایا و معایب ذکر شده برای بسترهای سیال گازی، برخی از کاربردهای صنعتی آن در جدول ۱-۲ آمده است. همین‌طور برخی از از بازه‌های عملیاتی در راکتورهای بستر سیال واکنش‌های گازی با کاتالیست جامد در جدول ۲-۲ آمده است. [۸]

جدول ۱-۲ برخی از کاربردهای صنعتی بسترهای سیال گازی [۸]

| واکنش‌های گاز-جامد | واکنش‌های جامد کاتالیستی | عملیات فیزیکی |
|--------------------------|----------------------------------|---|
| احتراق | شکست کاتالیستی سیال ^۲ | خشک کردن ذرات |
| گازی‌سازی | تولید آکریلونیتریل | گرانول‌سازی |
| پیرولیز ^۴ | تولید اتیلن دی‌کلراید | پوشش‌دهی با استفاده از جانمایی بخار شیمیایی ^۳ |
| احیای اکسید آهن | احتراق کاتالیستی | اختلاط ذرات |
| تولید پلی‌الفین‌ها | نم‌زدایی اتانول | پیش‌حرارت‌دهی و حرارت- دهی |
| کک‌سازی سیال | ستز اتیلن | بخارزنی و بخاردهی |
| کلسینه‌سازی ^۶ | ستز فیشر-تروپس ^۵ | حمام‌های با دمای ثابت |
| بازیابی کاتالیست | تولید آنیلین | غربال ذرات |

^۱Entrainment

^۲Fluid Catalytic Cracking

^۳Coatation with Chemical Vapor Disposition

^۴Pyrolysis

^۵Fischer-Trops Synthesis

^۶Calcination

| | | |
|----------------|---------------------------|-------------------|
| تجزیه سیلان | فرآیندهای متانول به الفین | جذب گازهای خطرناک |
| تخمیر گاز-جامد | هیدروژن زدایی اکسایشی | |
| تولید ملامین | ریفرمینگ بخار | |

جدول ۲-۲ برخی بازه‌های عملیاتی رایج برای راکتورهای بستر سیال گازی برای واکنش‌های گاز با کاتالیست جامد [۸]

| متغیر | بازه و توضیحات |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| قطر میانگین ساتر ذره ^۱ | ۵۰-۱۰۰ میکرومتر |
| توزیع اندازه ذرات | گسترده، برای مثال ۰-۲۰۰ میکرومتر |
| قطر راکتور | تا ۷ متر |
| فشار | تا ۸۰ بار |
| دما | تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد |
| سرعت ظاهری گاز | ۰,۳-۱۲ متر بر ثانیه |
| عمق بستر ثابت | ۱-۱۰ متر |
| جداسازی گاز-جامد | وابستگی زیادی به سیکلون گازی |

۲-۲ دسته‌بندی گلدارت^۲ ذرات در سیال‌سازی گازی

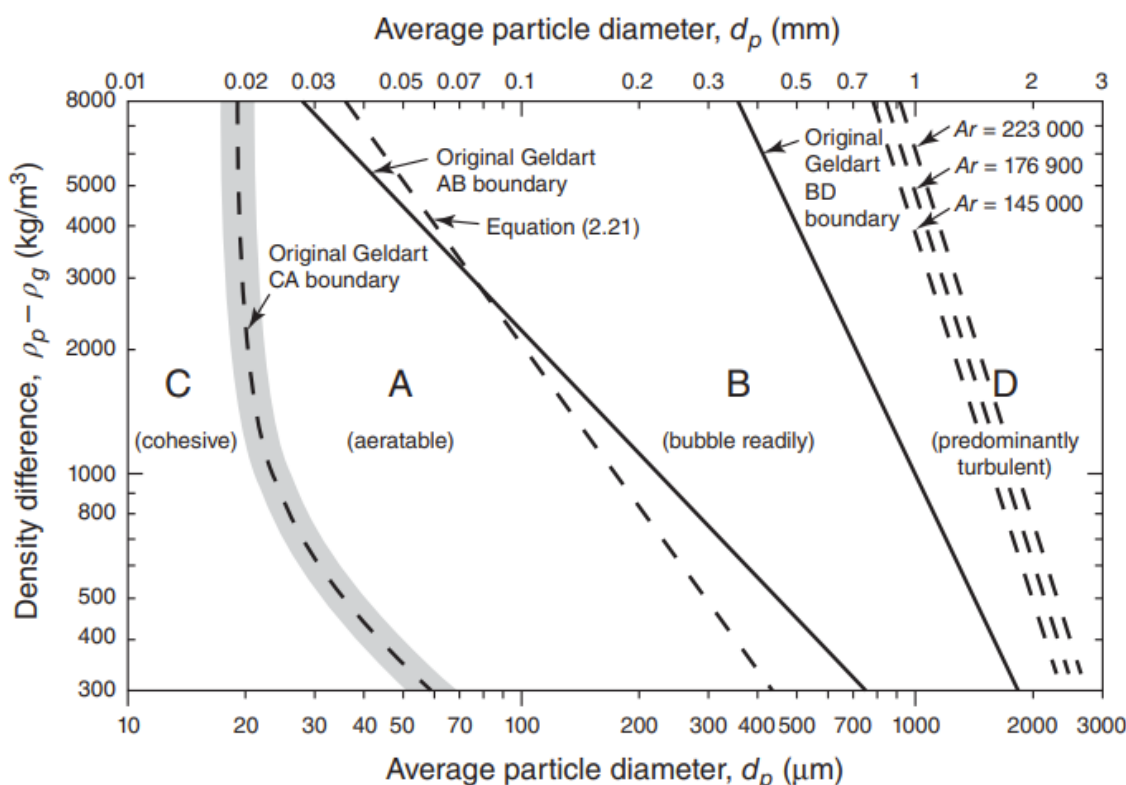
اندازه و چگالی ذرات تاثیر زیادی بر نحوه سیال‌شدن و رفتار سیال‌شدگی ذرات دارند. به عنوان مثال ذرات کوچک با چگالی پایین‌تر، در مقایسه با ذرات درشت‌تر با چگالی بالاتر، مقاومت کمتری برای سیال‌شدن دارند. این تفاوت عموماً به دلیل تاثیر نیروهای میان‌ذره‌ای می‌باشد. گلدارت [۹] در یک پژوهش بسیار مفید و پرکاربرد، به تمییز میان ذرات مورد استفاده برای سیال‌سازی بر اساس خواص سیال‌شدنی که از خود نشان می‌دهند پرداخته است و آن‌ها را به ۴ گروه اصلی تقسیم‌بندی کرده است. این تقسیم‌بندی

^۱Sauter-mean Diameter

^۲Geldart Classification

به صورت خلاصه در زیر آمده است:

- **گروه C (چسبنده).** اندازه ذرات این گروه عموماً کوچکتر از ۲۰ میکرومتر است. پودرهای گروه C، توسط نیروهای چسبندگی درون ذره‌ای احاطه شده‌اند و در نتیجه به راحتی سیال نمی‌شوند. با این حال، این ذرات تمایل دارند تا مسیری را باز کنند تا جریان گازی از آنجا عبور کند. ذرات آرد نمونه‌ای از این گروه هستند. البته این گروه از ذرات را می‌توان به دو گروه کوچکتر تقسیم کرد. در گروه اول، با افزایش سرعت سیال‌سازی، تغییر فاز به صورت بستر ثابت به بستر سیال به بستر حبابی انجام می‌گیرد در حالیکه در گروه دیگر، این تغییر به صورت بستر ثابت به بستر سیال به انتقال ذرات انجام می‌گیرد.
- **گروه A (قابل هوادهی).** این گروه عموماً شامل ذرات با میانگین اندازه کوچک و یا چگالی پایین هستند. در این گروه از ذرات، نیروهای میان‌ذره‌ای وجود دارند اما نیروی غالب نیستند. در صورت کافی بودن سرعت سیال ورودی به بستری از این ذرات، با بستری سیال مواجه خواهیم بود. در صورت افزایش سرعت سیال، ابتدا افزایش طول بستر بدون پدیده حباب‌زایی را مشاهده خواهیم کرد. برای ذرات این گروه، سرعت شاخص دیگری با نام سرعت حداقل حباب‌زایی تعریف می‌شود که پس از آن تشکیل حباب‌ها را خواهیم داشت.
- **گروه B (آماده حباب‌زایی).** اکثر ذرات این گروه در محدوده اندازه ۶۰-۵۰۰ میکرومتر و چگالی ۱۰۰۰-۴۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب هستند. در مورد این گروه، نیروهای میان‌ذره‌ای قابل صرف‌نظر هستند. در سیستم‌های شامل این ذرات، با گذر سرعت سیال از سرعت حداقل سیال‌سازی، حباب‌ها به سرعت شکل می‌گیرند. سیال‌سازی این ذرات عموماً (بجز در مقایسه با گروه A) از کیفیت مناسبی برخوردار است. بسیاری از ماسه‌های مورد استفاده برای بستر از این گروه هستند.
- **گروه D.** مواد این گروه از ذرات درشت‌تری تشکیل شده‌اند که توانایی سیال‌سازی را دارند اما نه به راحتی گروه‌های A و B. این ذرات عموماً در بسترهای جوشان مورد سیال‌سازی قرار می‌گیرند. این ذرات تمایل زیادی به ته‌نشینی دارند و همچنین احتمال زیادی وجود دارد که اندازه بزرگ این ذرات باعث تشکیل بلوکه‌هایی در مسیر حرکت این ذرات شود و مسیر جابجایی و حرکت آن‌ها محدود شود. ذرات ریزتر این گروه سیال‌شدگی و چرخش بهتری را در طول بستر مشاهده می‌کنند و بستر را یکپارچه می‌سازند.



شکل ۲-۲ تقسیم‌بندی گلدارت برای ذرات مورد استفاده در سیال‌سازی در هوا و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ اتمسفر [۸]

۲-۳ بهبود سیال‌سازی ذرات گروه D به کمک ذرات گروه A و B

سیال‌سازی ذرات گروه D با توجه به شکل، اندازه و چگالی‌شان به سختی انجام می‌شود و حتی می‌تواند غیرممکن باشد. برای حل این مشکل و همچنین بهبود انتقال حرارت در طول بستر، عموماً یک جامد بی‌اثر و خنثی به ذرات این گروه اضافه می‌شوند. برخی از این ذرات عبارتند از ماسه سیلیکا، آلومینا و دیگر ذرات. [۱۰]

سیال‌سازی دوجزئی، به معنای سیال‌سازی دو نوع ذره جامد با خواص مختلف، یک مسیر مفید برای بهبود خواص سیال‌شدگی ذراتی که به سختی سیال می‌شوند، مانند ذرات گروه D، ارائه می‌دهند. با اضافه کردن ذراتی از گروه‌های A و B به بستری شامل ذرات گروه D، یک اثر هم‌افزایی میان رفتار این ذرات رخ می‌دهد که باعث بهبود چرخش در طول بستر، کاهش تمایل به ته‌نشینی و همچنین بهبود عملکرد سیال‌سازی می‌شود. وجود ذرات گروه A و B باعث ایجاد ناحیه‌های سیال‌شدگی محلی در طول بستر می‌شوند. این مهم باعث جلوگیری از ته‌نشینی ذرات گروه D در بستر می‌شود.

۲-۴ جریان چندفازی در بسترهای سیال

ذرات زیست توده عموماً دارای اندازه بزرگ و همچنین ساختارهای شکلی نامنظمی (برای مثال ساختار طولانی و با پهنای کم) هستند. این تفاوت‌ها با سایر ذراتی که غالباً مورد سیال‌سازی قرار می‌گیرند عموماً حیاتی هستند و باعث سختی فرآوری و هندلینگ آنها می‌شود. با توجه به این توضیحات، مشخصه‌های جریان چندفازی این شامل این ذرات از اهمیت بالایی برخوردار است. درک و مدیریت جریان‌های چندفازی شامل این ذرات، در مرحله طراحی و بهینه‌سازی واحدهای فرآیندی شامل این ذرات بسیار حیاتی است.

۲-۴-۱ سرعت‌های مشخصه

بر خلاف ذرات در بسترهای تک‌جزئی، که سیال‌سازی در تمامی بستر با سرعت به‌خصوصی که با عنوان سرعت حدقل سیال‌شدن (U_{mf}) از آن یاد می‌شود رخ می‌دهد، سیال‌سازی در بسترهایی که از چند جزء جامد تشکیل شده‌اند، در بازه‌ای از سرعت‌های سیال‌سازی انجام می‌گیرد. سرعت آغازین این بازه، سرعت آغاز سیال‌سازی^۱ (U_{if})، و سرعتی که در آن تمامی ذرات بستر سیال شده‌اند، با نام سرعت نهایی سیال‌سازی^۲ (U_{ff}) نام‌گذاری می‌شوند. [۱۱]

پارامترهایی متعددی وجود دارند که الگوی سیال‌سازی ذرات در بسترهای شامل دو ذره جامد ناهمگن را تحت تاثیر قرار می‌دهند و این تغییرات به طور آشکار در تغییرات سرعت‌های سیال‌سازی قابل مشاهده هستند. برخی از این پارامترها عبارتند از خواص هر کدام از ذرات جامد، مانند چگالی، اندازه، ضریب شکلی ذرات و همچنین توزیع ذرات درون بستر و تخلخل بستر.

۲-۴-۲ توزیع حباب‌ها

حباب‌ها که عموماً با نام فضای خالی نیز از آن‌ها یاد می‌شود، به دلیل تداخلات ایجاد شده در یک بستر همگن به هنگام افزایش سرعت سیال‌سازی از سرعت حداقل حباب‌زایی^۳ (U_{mb})، در بسترهای سیال‌گازی ایجاد می‌شوند. در مورد ذرات گروه B و D در تقسیم‌بندی گلدارت برای ذرات - ذراتی از قبیل

^۱Initial Fluidization Velocity

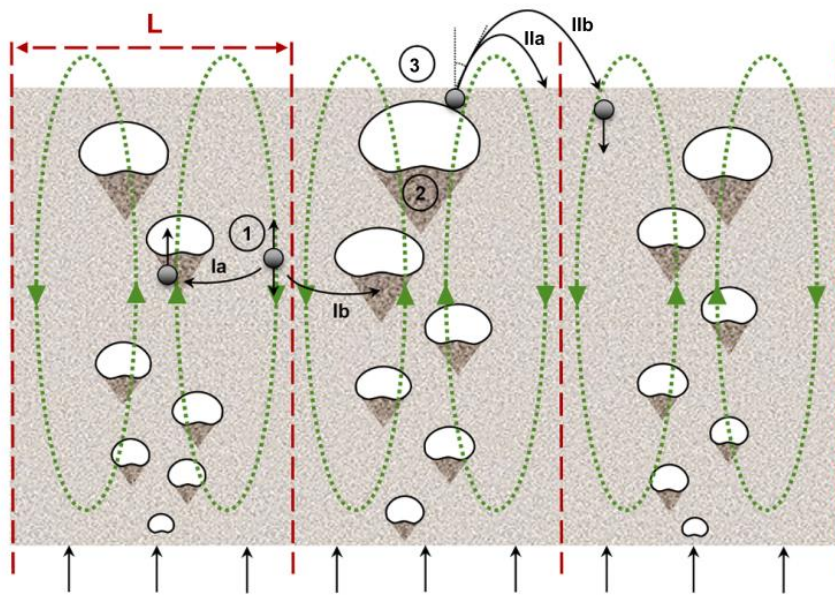
^۲Full Fluidization Velocity

^۳Minimum Bubbling Velocity

ماسه و ذرات زیست‌توده، سرعت حداقل حباب‌زایی و سرعت حداقل سیال‌سازی، یک میزان هستند. در این بسترها، حباب‌ها به وسیله یک فاز چگال و یا امولسیون شامل ذرات و جریان گازی، احاطه شده‌اند. این حباب‌ها در ابتدای بستر و در نزدیکی صفحه توزیع گاز تشکیل می‌شوند، سپس در راستای طولی بستر رشد می‌کنند و به یکدیگر می‌پیوندند و رشد می‌کنند. در برخی موارد، حباب‌های بزرگ، گسسته می‌شوند و به حباب‌های کوچکتری تبدیل می‌شوند. حباب‌ها با رسیدن به سطح بالایی بستر، می‌ترکند و ذرات جامد همراه خود را به بالا پرتاب می‌کنند. حرکت حباب‌ها در راستای طولی بستر باعث چرخش ذرات جامد در بستر سیال می‌شود. در پایین حباب‌ها و در دنباله آن‌ها، ذرات به سمت بالا حرکت می‌کنند و در اطراف حباب‌ها و به خصوص در نزدیکی دیواره‌ها، ذرات جامد به سمت پایین حرکت می‌کنند. حرکت حباب‌ها از اهمیت بالایی در آمیزش ذرات برخوردار است. [۱۲]

۳-۴-۲ مکانیسم حرکت ذرات در بستر

در رابطه با مکانیسم حرکت طولی ذرات جامد در بستر، ابتدا بستر را به چند ناحیه تقسیم می‌کنیم، شکل ۲-۳. در ناحیه ۱، که در کناره دیواره‌ها قرار دارد، ذرات حباب حضور ندارند و ذرات جامدی که به قسمت بالای بستر رسیده‌اند، در حال برگشت به سمت پایین بستر هستند. در ناحیه ۲، حباب‌ها در حال حرکت به سمت بالا هستند؛ ذرات جامد در دنباله این حباب‌ها گرفتار می‌شوند و به همراه آن‌ها به سمت بالا حرکت می‌کنند. به هنگامی که ذرات جامد به سطح بالای بستر می‌رسند، حباب مورد نظر از بستر خارج شده و می‌ترکد، ذرات جامدی که در دنباله آن قرار داشتند نیز تحت یک زاویه‌ای دوباره به سمت بستر پرتاب می‌شوند و پس از برخورد با آن به سمت پایین بستر حرکت می‌کنند. [۱۳]



شکل ۳-۲ شماتیک حرکت ذرات در سه ناحیه متفاوت در بستر. (۱) فاز امولسیون گاز-جامد عاری از حباب با حرکت عمده ذرات جامد به سمت پایین، (۲) ناحیه دنباله حباب‌ها، (۳) ناحیه پرتاب ذرات واقع در بالای سطح بستر [۱۳]

۲-۵ مدل‌سازی جابجایی ذرات در طول بستر

با توجه به اینکه استفاده از میانگین زمان ماند و توزیع آن، یک روش بسیار مناسب برای تحلیل حرکت ذرات در بستر است، ابتدا مفهوم آن مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس به بیان نحوه محاسبه آن پرداخته می‌شود. در ادامه این مفهوم برای روش‌های رایج و حدی جابجایی ذرات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۵-۱ توزیع زمان ماند و محاسبه آن

در بررسی دینامیک ذرات درون بسترهای سیال، محاسبه واریانس منحنی‌های میانگین زمان ماند از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این بخش به مبانی نظری آن و متد محاسبه آن می‌پردازیم. ابتدا باید فرضیات لازم را با توجه به سیستم مورد نظر بیان می‌کنیم. [۱۴]

- **فرض توزیع نرمال.** در این قسمت فرض می‌کنیم که توزیع میانگین زمان ماند ذرات در اینجا از حالت توزیع نرمال (گوسی) پیروی می‌کنند، که البته در صورت برقرار بودن مدل نفوذ، این

^۱Residence Time Distribution

^۲Gaussian

فرض کاملاً صادق است.

- **تعیین میانگین زمان ماند.** میانگین زمان ماند که به صورت μ_t نمایش داده می شود، از ممان اول نمودار میانگین زمان ماند بدست می آید.
- **محاسبه واریانس.** واریانس میانگین زمان ماند که به صورت σ_t^2 نمایش داده می شود، از محاسبه ممان مرکزی دوم میانگین زمان ماند محاسبه می شود.
- **خواص توزیع نرمال (گوسی).** در این توزیع، ممان مرکزی دوم به صورت مربع مجموع اختلافات هر داده از میانگین زمان ماند تعریف می شود.

محاسبه واریانس این مدل، با توجه به فرضیات بررسی شده، برابر خواهد بود با:

$$\sigma_t^2 = E[(t - \mu_t)^2] \quad (2-1)$$

تابع E بیانگر امید ریاضی مقادیر درون آن است. حال می توان از خواص توزیع نرمال استفاده کرد و عبارت بالا را ساده کرد:

$$\sigma_t^2 = E[t^2] - (E[t])^2 \quad (2-2)$$

برای ساده سازی بیشتر معادله بالا، می توانیم از تعریف ممان اول و دوم استفاده کرد:

$$E[t] = \int (t f(t)) dt \quad (2-3)$$

$$E[t^2] = \int (t^2 f(t)) dt \quad (2-4)$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$\sigma_t^2 = \int (t^2 f(t)) dt - \left(\int (t f(t)) dt \right)^2 \quad (2-5)$$

در صورت استفاده از این مدل و با داشتن تابعیت زمان ماند، می توان به راحتی واریانس میانگین زمان ماند را محاسبه کرد.

۲-۵-۲ مدل نفوذ و جابجایی برای ذرات در بستر سیال

مدل نفوذ برای جابجایی ذرات در بستر سیال که توسط لونشپیل [۱۴] ارائه شده است، فرض می کند تا پالسی از ذرات وارد بستر می شوند، این پالس درون بستر منتشر می شود و بر روی نحوه انتشار آن، می تواند در مدل سازی توزیع آنها به ما کمک کند. باید مد نظر داشت که در این صورت، پارامتر $\frac{D}{uL}$ گروه بدون بعدی است که بیانگر خواص انتشار پالس در سیستم است. در این پارامتر D ، u و L به ترتیب بیانگر ضریب نفوذ ذرات در شت در سیستم، سرعت حرکت ذرات در شت و طول مشخصه سیستم با در نظر گرفتن خواص نرمال توزیع در مدل نفوذی، خواهیم داشت:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \cong \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} \quad (2-6)$$

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 C_i \Delta t_i dt}{\int_0^{\infty} C dt} = \frac{\int_0^{\infty} t^2 C dt}{\int_0^{\infty} C dt} - \bar{t}^2 \quad (2-7)$$

$$\cong \frac{\sum_i (t_i - \bar{t})^2 C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} = \frac{\sum_i t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} - \bar{t}^2 \quad (2-8)$$

برای نفوذ مولکولی در راستای طولی، معادله دیفرانسیلی غالب بر سیستم، قانون فیک است، در نتیجه:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2-9)$$

به طور مشابه، می توان ضریب نفوذ داخل سیال را نیز به صورت زیر تعریف کرد:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2-10)$$

لازم به ذکر است که دو پارامتر \bar{D} و \bar{D} با یکدیگر متفاوت می باشند. در صورت بی بعدسازی این معادله با استفاده از روابط $\theta = \frac{t}{\bar{t}} = \frac{tu}{L}$ ، $Z = \frac{ut+x}{L}$ می توان به رابطه زیر رسید:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \left(\frac{D}{uL} \right) \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (2-11)$$

حال، در صورت کوچک بودن ضریب نفوذ، می توان جواب این معادله را بر یک توزیع نرمال برازش کرد که پاسخ آن را به فرم زیر بدست خواهیم آورد:

$$C = \frac{1}{\sqrt{\pi \frac{D}{uL}}} \exp\left(-\frac{(1-\theta)^2}{4\left(\frac{D}{uL}\right)}\right) \quad (2-12)$$

و به همین صورت می توان مقدار واریانس را نیز محاسبه کرد که برابر خواهد بود با:

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2} = 4\left(\frac{D}{uL}\right) \quad (2-13)$$

$$\sigma_t^2 = 4\left(\frac{DL}{u^3}\right) \quad (2-14)$$

که در اینجا از رابطه آخر برای محاسبه واریانس میانگین زمان ماند در مدل نفوذ استفاده شده است. از طرفی، رابطه بالایی آن نیز یک رابطه مادر است که صرف نظر از فرضیات مدل نفوذ برقرار خواهد بود و از آن برای مدل جابجایی استفاده شده است.

لازم به ذکر است که در روابط ارائه شده، σ_t^2 بیانگر واریانس میانگین زمان ماند و همچنین σ_{θ}^2 برابر

Fick's Rule

Diffusion Coefficient

Dispersion Coefficient

واریانس میانگین زمان ماند به صورت بدون بعد می باشد.

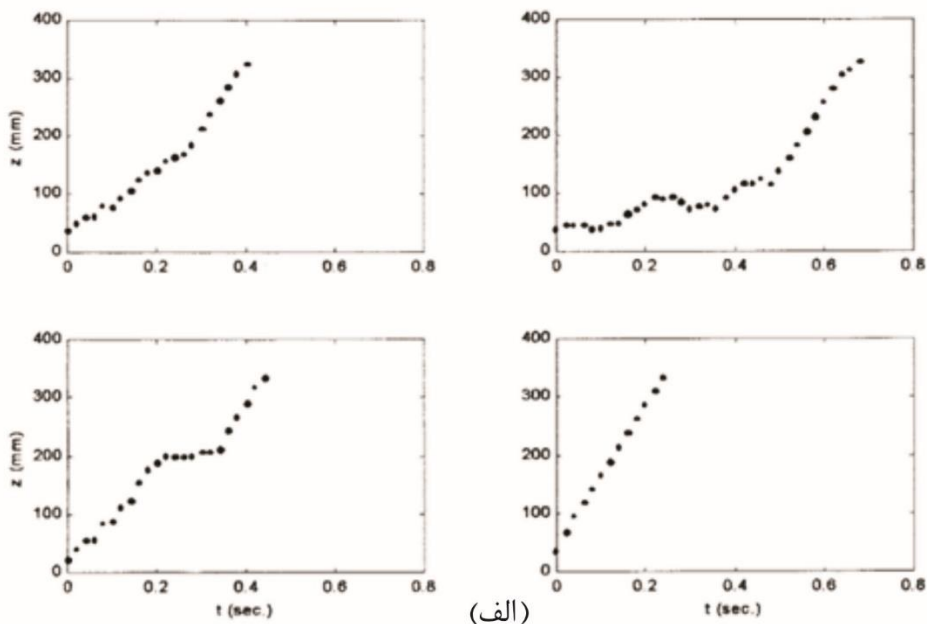
۶-۲ جابجایی های مقید و نامقید^۱

یکی از مهم ترین اقدام ها در بررسی حرکت ذرات در بسترهای سیال، آنالیز جابجایی های طولی ذرات است. برای انجام این آنالیز می توان ذرات جامدی را به عنوان ردیاب به داخل بستر تزریق کرد و مسیر حرکت آن ها را زیر نظر گرفت. در بررسی این حرکت ها، بررسی میانگین زمان ماند نیز از اهمیت بالایی برخوردار است.

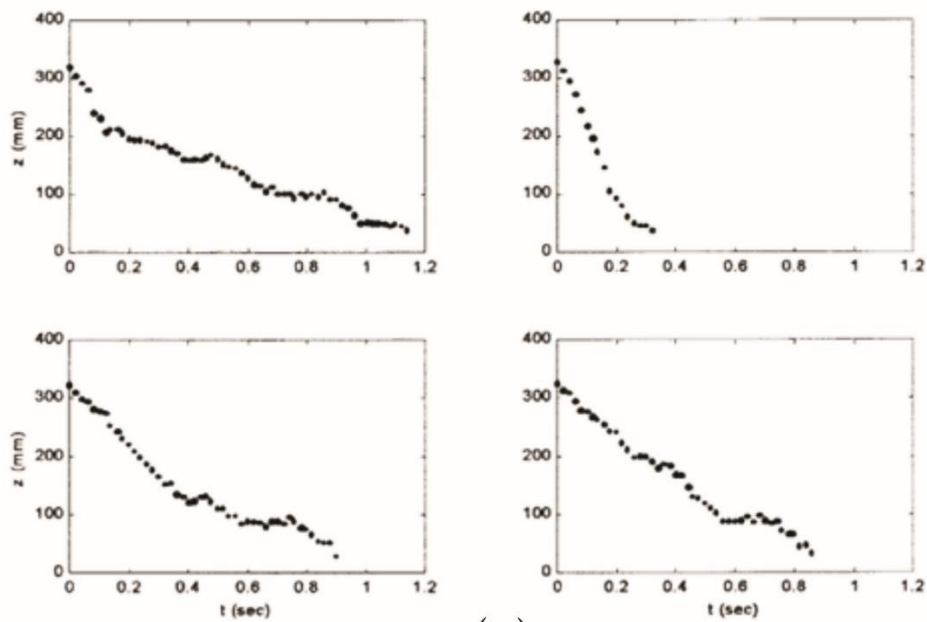
در این قسمت از پایان نامه مفهومی را معرفی کرده و بکار می گیریم که در سال ۲۰۰۰ میلادی و توسط مستوفی و چائوکی معرفی شد. [۱۵] مفهوم جابجایی طولی مقید به جابجایی هایی اشاره دارد که از یک سمت بستر (سمت بالا و یا پایین بستر) شروع شده و با حداقل انحراف طولی به سمت دیگر بستر (سمت پایین در صورت شروع از سمت بالا و سمت بالا در صورت شروع از پایین) می رسند. برای شناسایی این جابجایی ها می توان از متد زیر استفاده کرد.

۱. مسیر ذره ردیابی شده دنبال می شود تا به یک سمت بستر برسد.
۲. موقعیت ابتدایی ذره ذخیره می شود و ذره را دنبال می کنیم تا به سمت دیگر بستر برسد.
۳. در صورتی که انحرافات در مسیر جابجایی طولی وجود داشته باشد، آن ها را یادداشت می کنیم تا اگر از یک حد بحرانی بیشتر شد، کل آن جابجایی رد می شود و رفتار محصور را از خود نشان نمی دهد. (جابجایی نامقید محسوب می شود)

لازم به ذکر است که حد بحرانی لحاظ شده برای انحرافات در جابجایی طولی، میزان ۲۰ میلی متر می باشد و اگر حرکت ذره در خلاف مسیر طولی از این مقدار بیشتر شد، آن مسیر دیگر نشانگر یک جابجایی محصور نیست. اشکال ۲-۴ و ۵-۲ به عنوان نمونه هایی از مسیر حرکت مقید و نامقید ذرات آورده شده اند.



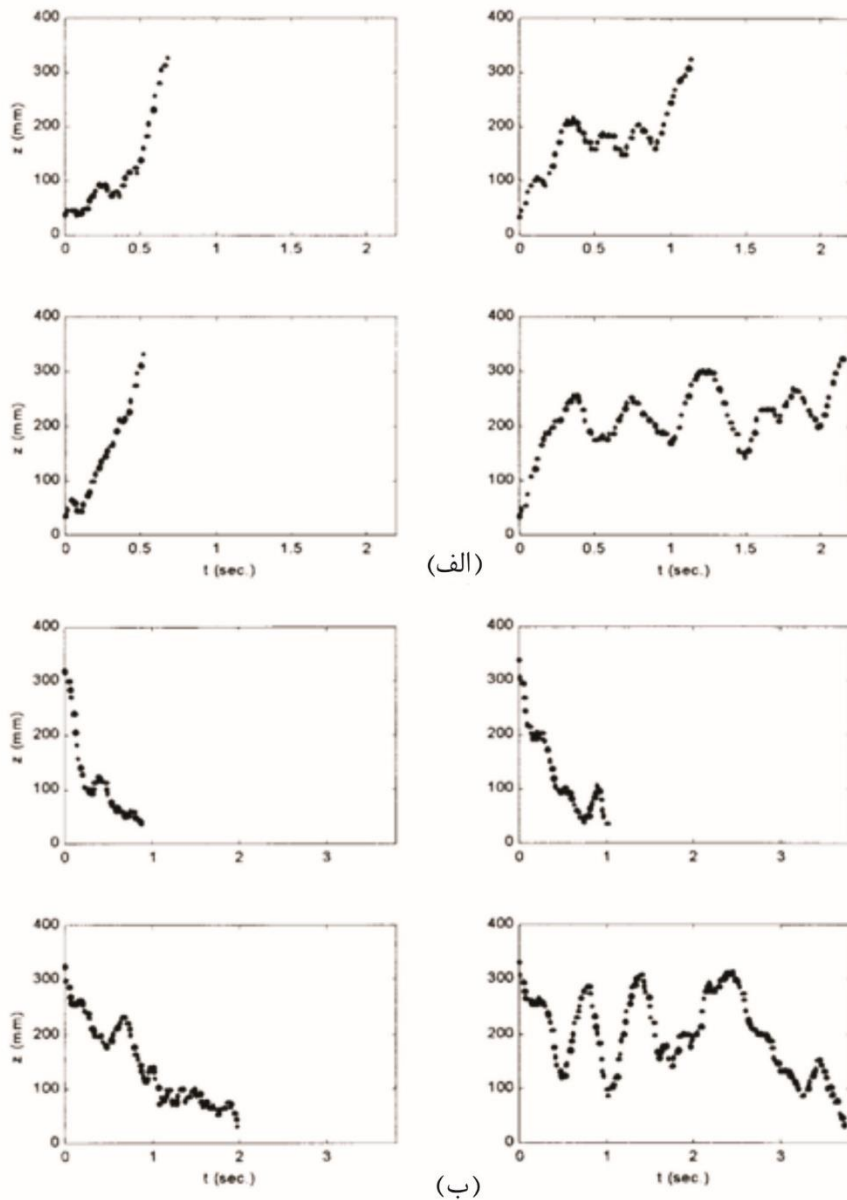
(الف)



(ب)

شکل ۲-۴ نمونه‌ای از جابجایی‌های مقید الف) در مسیر حرکت به بالا. ب) در مسیر حرکت به پایین [۱۵]

استفاده‌ای که می‌توان از این مفهوم کرد، تعیین میانگین زمان ماند ذرات در جابجایی‌های محصور و نامحصور و مقایسه آن‌ها با مقادیر حاصل از مدل‌های استاندارد جابجایی در طول یک راکتور بستر سیال می‌باشد. به طور خاص می‌توان نتایج حاصل را با نتایج حاصل از مدل‌های نفوذ و جابجایی مقایسه کرد.



شکل ۲-۵ نمونه‌ای از جابجایی‌های نامقید الف) در مسیر حرکت به بالا. ب) در مسیر حرکت به پایین [۱۵]

لونشپیل و فیتزجرالد [۱۶] یک روش مفید برای محاسبه میانگین زمان ماند‌های این مدل‌ها و خواص آن پیشنهاد کرده‌اند که از آن‌ها برای محاسبه واریانس این مدل‌ها و مقایسه با داده‌ها استفاده شده است. در مدل نفوذ، واریانس میانگین زمان ماند با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_t^2 = \left(\frac{D_{sz}}{V_s} \right) L \quad (2-15)$$

در این رابطه، D_{sz} ، V_s و σ_t^2 به ترتیب بیانگر میزان ضریب نفوذ ذرات درشت در بستر، سرعت موثر حرکت و واریانس میانگین زمان ماند هستند. همچنین برای محاسبه واریانس میانگین زمان ماند در مدل جابجایی نیز از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\sigma_t^2 = \left(\frac{\sigma_\theta}{V_s}\right)^2 L^2 \quad (2-16)$$

در رابطه اشاره شده، σ_θ بیانگر میانگین زمان ماند بدون بعد است.

نکته‌ای که در مورد این معادلات مدنظر بوده است، رابطه واریانس میانگین زمان ماند با طول بستر سیال است که در مدل نفوذ این وابستگی به صورت خطی و در مدل جابجایی این وابستگی از مرتبه دو می‌باشد. در نتیجه اگر نمودار داده‌های واریانس میانگین زمان ماند را در مقابل موقعیت طولی بستر در مختصات تمام لگاریتمی رسم کنیم، شیب نمودار برای مدل نفوذی مقدار ۱ و برای مدل جابجایی، مقدار ۲ خواهد بود.

فصل ۳: مدل‌سازی و روش‌ها

۳-۱ مقدمه

در این فصل از پایان‌نامه، پس از معرفی آزمایشات مورد بررسی، به نحوه پردازش داده‌های این آزمایشات و گسسته‌سازی هندسه بستر و همچنین به بررسی روش‌های آماری مورد استفاده برای مدل‌سازی حرکت ذرات در بسترهای سیال می‌پردازیم. خانواده‌های مختلفی از روش زنجیره‌های مارکوف^۱ برای مدل‌سازی حرکت ذرات در بسترهای سیال، مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین نحوه تعیین پارامترهای این روش‌ها با استفاده از روابط حاکم بر بسترهای سیال حبابی و همچنین داده‌های آزمایشات بررسی خواهد شد. در انتها نیز تفاوت‌های ذاتی میان این روش‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد. در انتها لازم به ذکر است که این آزمایش‌ها توسط فتوت و چائوکی [۱۰] انجام شده است و داده‌های مربوط به آن‌ها برای انجام این پایان‌نامه در اختیار بنده قرار گرفتند.

۳-۲ سیستم مورد بررسی

تمامی آزمایشات فتوت و چائوکی [۱۰]، در یک ستون پلکسی گلس با قطر ۱۵۲ میلی‌متر که از یک صفحه سوراخ‌دار به عنوان توزیع‌کننده هوا بهره می‌برد، انجام شده‌اند. تحت شرایط محیطی، هوا از طریق ۱۶۳ سوراخ توزیع‌کننده به درون بستر فرستاده می‌شود. سوراخ‌های بر روی صفحه توزیع‌کننده هر کدام ۱ میلی‌متر قطر دارند و در یک آرایش مثلثی شکل قرار گرفته‌اند. برای ذرات ریز تشکیل‌دهنده بستر از ذرات مختلفی از قبیل ماسه ریز^۲، ماسه درشت^۳ و کاتالیست FCC استفاده شده است. همچنین برای ذرات درشت بستر، از ذرات مختلفی از قبیل استال کوچک^۴، استال متوسط^۵، استال بزرگ^۶، پلی‌اتیلن با چگالی بالا^۷ و PTFE به عنوان نماینده‌ای از رفتار زیست‌توده در سیستم استفاده شده است و همچنین

^۱Markov Chains Model

^۲Fine Sand

^۳Coarse Sand

^۴Acetal-Small

^۵Acetal-Medium

^۶Acetal-Large

^۷High-Density Poly Ethylene (HDPE)

سرعت افزوده جریان گازی ورودی (دو مقدار ۰,۲۵ و ۰,۵ متر بر ثانیه برای هر تست) می‌باشند. خواص مربوط به ذرات درشت بستر و ذرات ریز بستر به ترتیب در جدول ۳-۱ و جدول ۳-۲ آمده‌است.

جدول ۳-۱ خواص ذرات درشت مورد استفاده در آزمایش‌ها [۱۰]

| ردیف | ذره درشت | جنس ذره | قطر ذره (میلی‌متر) | چگالی ذره (کیلوگرم بر متر مکعب) |
|------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------------------------|
| ۱ | پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) | پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) | ۹,۵ | ۹۲۹ |
| ۲ | PTFE ^۲ | PTFE | ۹,۵ | ۲۱۶۶ |
| ۳ | استال کوچک | استال | ۴,۸ | ۱۳۸۱ |
| ۴ | استال متوسط | استال | ۹,۵ | ۱۳۶۸ |
| ۵ | استال بزرگ | استال | ۱۹,۰ | ۱۳۴۷ |

جدول ۳-۲ خواص ذرات ریز مورد استفاده در آزمایش‌ها [۱۰]

| ردیف | ذره ریز | بازه اندازه ذره (میکرومتر) | قطر ذره (میکرومتر) | چگالی ذره (کیلوگرم بر متر مکعب) | چگالی بالک ذرات (کیلوگرم بر متر مکعب) | تخلخل (-) (در بستر ثابت) | سرعت حداقل سیال-سازی (متر بر ثانیه) | تقسیم‌بندی گلداریت |
|------|--------------|----------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| ۱ | ماسه درشت | ۴۰۰-۲۰۰۰ | ۷۷۰ | ۲۶۵۰ | ۱۳۵۰ | ۰,۴۹ | ۰,۴۴ | B-D |
| ۲ | ماسه ریز | ۵۰-۷۰۰ | ۲۲۰ | ۲۶۵۰ | ۱۴۰۶ | ۰,۴۷ | ۰,۰۵ | B |
| ۳ | کاتالیست FCC | ۳۰-۳۰۰ | ۸۰ | ۱۶۹۰ | ۹۲۸ | ۰,۴۵ | ۰,۰۰۴ | A |

استفاده از روش ردیابی رادیواکتیو ذرات (RPT)^۳ برای مطالعه الگوی چرخش ذرات جامد در مخلوط‌های دو جزئی برای اولین بار توسط لاراچی و همکاران [۱۷] معرفی شد. آپادهیای و روی [۱۸]، از این روش برای بررسی اختلاط و رفتار هیدرودینامیکی بستری شامل جزء جرمی یکسان از ذراتی با

Literature review on RPT was added

^۱High Density Polyethylene

^۲Polytetraflouroethylene

^۳Radioactive Particle Tracking (RPT)

چگالی متفاوت استفاده کردند. در این روش، یک نمونه ذره با اندازه و چگالی مشابه ذرات درون بستر انتخاب شده و بعد از فعال شدن آن در یک راکتور هسته‌ای، در کنار سایر ذرات بستر قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از سنسورهایی، میزان تشعشعات حاصل از آن ذخیره شده و با استفاده از روابطی که توسط لاراچی و همکاران ارائه شد [۱۷]، به موقعیت ذره تبدیل می‌شوند.

خروجی روش RPT به صورت موقعیت ذره می‌باشد که در مختصات کارتیزی و به فاصله زمانی ۰,۰۱ ثانیه مرتباً ذخیره شده و در نهایت برای هر آزمایش بیش از ۱,۵ میلیون ردیف موقعیت ذره موجود است که نشانگر ذخیره داده‌های آزمایش در یک بازه زمانی بیش از ۴ ساعته می‌باشد.

جدول ۳-۳ آزمایشات انجام شده و مورد بررسی در این پایان‌نامه [۱۰]

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال‌سازی (متر بر ثانیه) |
|------|-------------|-----------|--------------------------------------|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ |
| ۶ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۵ |
| ۷ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۵ |
| ۸ | HDPE | FCC | ۰,۲۵ |
| ۹ | استال کوچک | FCC | ۰,۲۵ |
| ۱۰ | استال متوسط | FCC | ۰,۵ |
| ۱۱ | استال کوچک | FCC | ۰,۵ |
| ۱۲ | استال کوچک | ماسه ریز | ۰,۲۵ |

۳-۳ گسسته‌سازی هندسه

نمایش صحیح هندسه بستر سیال و گسسته‌سازی صحیح آن یک مرحله حیاتی در انجام بررسی‌های

بعدی است. گسسته‌سازی یک چارچوب فضایی ابرای مشخصه‌سازی رفتار ذرات و دینامیک میان آن و سیال را فراهم می‌کند. از آنجایی که داده‌های RPT به صورت مختصات کارتیزی در سه بعد ذخیره می‌شوند و بستر مورد مطالعه، ساختاری استوانه‌ای دارد، پس از محاسبه سرعت لحظه‌ای ذرات، داده‌ها را به مختصات استوانه‌ای تغییر می‌دهیم و سپس اقدام به گسسته‌سازی بستر می‌نماییم. تغییر مختصات از کارتیزین به استوانه‌ای بدلیل وجود نظم در راستای زاویه‌ای، حجم محاسبات را کمتر و همچنین تحلیل آن‌ها را راحت‌تر می‌سازد.

برای گسسته‌سازی بستر، در راستای طولی، بستر را به سلول‌هایی با ضخامت ۱ سانتی‌متر تقسیم می‌کنیم. در راستای شعاعی نیز با توجه به شعاع کم بستر (نسبت به طول آن)، بستر را به سلول‌هایی با ضخامت ۰,۵ سانتی‌متر تقسیم می‌کنیم. اما در راستای زاویه‌ای، با توجه به عدم تاثیر پدیده‌های مدنظر از تغییرات در این راستا، بستر را به دو ناحیه که هر کدام ۱۸۰ درجه را پوشش می‌دهند تقسیم‌بندی می‌کنیم.

۳-۴ معادلات ابتدایی بررسی هیدرودینامیکی سیستم

با توجه به نحوه ذخیره داده‌ها توسط RPT به سراغ مدل لاگرانژی ابرای تحلیل حرکت ذرات می‌رویم. در این نوع مدل تحلیل حرکت ذرات، مختصات ثابت تصور می‌شوند و موقعیت زمانی ذره مورد ردیابی توسط داده‌ها بررسی می‌شوند. بدین منظور با توجه به در دست داشتن موقعیت ذره در هر لحظه، می‌توان با استفاده از رابطه ۳-۱ به محاسبه سرعت آن در هر لحظه پرداخت:

$$V_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} \quad (3-1)$$

در رابطه بالا، منظور از \vec{n} جهت مورد بررسی است که می‌تواند جهات مختلف مختصات کارتیزی باشد. نکته لازم به ذکر این است که در صورت استفاده از رابطه ۳-۱ برای محاسبه سرعت در هر لحظه، از موقعیت ذره در دو زمان متوالی استفاده می‌شود و سرعت بدست آمده نیز مربوط به میانگین زمانی آن دو می‌شود.

لازم به ذکر است که در حالت کلی، می‌توان تغییر مختصات را در این سیستم انجام نداد؛ اما به دو دلیل این تغییر مختصات انجام می‌گیرد:

- مورد اول، ذات سیستم است که می‌توان تا حدی از انجام تغییرات در راستای زاویه‌ای صرف نظر کرد.

Spatial Framework

Lagrangian

مورد دوم نیز روابط محاسبه ضریب نفوذ هستند که به تغییرات شعاعی ذره نیز نیاز دارند.

برای انتقال مختصات سیستم از کارترین به استوانه‌ای، کفایت تا از روابط زیر استفاده کنیم:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3-2)$$

$$\theta = \left(\tan^{-1} \frac{y}{x}\right) \frac{180}{\pi} \quad (3-3)$$

$$z = z \quad (3-4)$$

راه دیگری نیز برای محاسبه سرعت‌های استوانه‌ای وجود دارد که استفاده از سرعت‌های محاسبه شده در مختصات کارتزینی و تبدیل آن‌ها به سرعت‌های مختصات استوانه‌ای می‌باشد:

$$V_r = V_x \cos \theta + V_y \sin \theta \quad (3-5)$$

$$V_\theta = -V_x \sin \theta + V_y \cos \theta \quad (3-6)$$

$$V_z = V_z \quad (3-7)$$

A Literature Review on Statistical methods to model fuel particle motion was added

۳-۵ روش‌های آماری برای مدل‌سازی حرکت ذرات در بسترهای سیال

در این بخش به تئوری مرتبط با روش زنجیره‌های مارکوف برای مدل‌سازی حرکت ذرات در بسترهای سیال پرداخته می‌شود. ابتدا به صورت کلی به معرفی روش زنجیره‌های مارکوف و انواع آن می‌پردازیم. سپس نحوه بکار بردن آن برای حرکت ذرات در بسترهای سیال حبابی دوجزئی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. تمرکز مدل‌های آماری عموماً بر رفتار تک ذره و مسیر حرکت آن در اثر اثرات اتفاقی (همانند جابجایی در جهت بالا درون دنباله حباب‌ها، اثرات جدایش و سایر موارد) می‌باشد، در حالیکه مدل‌های غیرآماری بر تعداد زیادی از ذرات متمرکز می‌شوند. استفاده از مدل‌های مبتنی بر روش‌های آماری برای مدل‌سازی حرکت ذرات در بسترهای سیال، برای نخستین بار توسط دهلینگ و همکاران [۱۹] برای محاسبه میانگین زمان ماند یک واکنش نفوذی در یک راکتور بستر سیال مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش، دهلینگ و همکاران محدوده برقراری خاصیت مارکوفی سیستم و صحت آن را برای یک راکتور بستر سیال حاوی ذرات همگن بررسی کردند. در این پژوهش، مقادیر احتمالات تغییر فاز در سیستم به صورت یکسان برای تمامی سلول‌های درون بستر و کاملاً دستی تعیین شده بود و همچنین از ضریب λ برای معرفی احتمال برگشت ذره به ابتدای راکتور استفاده شده بود.

در پژوهش دیگری، دهلینگ و همکاران [۲۰] با انجام تغییراتی در مدل زنجیره‌های مارکوف خود، به ارائه مدلی برای بررسی اختلاط و جدایش در بسترهای سیال لخته‌ای کردند. در این پژوهش، آن‌ها تشکیل

و پیشروی لخته را نیز در نظر گرفتند و بر اساس آن، تمامی سلول‌های داخل لخته، عملن یک سلول محسوب می‌شدند. در این پژوهش نیز مقادیر احتمالات تغییر فاز و احتمالات مربوط به لخته به صورت دستی تغییر داده شدند تا تشابهی میان داده‌های تجربی و نتایج مدل حاصل شود. گاتچالک و همکاران [۲۱] در پژوهشی به بررسی مدل زنجیره‌های مارکوف چندفازی پرداختند. در این پژوهش برای نخستین بار، مفهوم فاز به عنوان مکانیسم حرکت و تعداد فازهای مختلف در مدل زنجیره‌های مارکوف مورد معرفی و بررسی قرار گرفت. در این پژوهش دو حالت بدون جریان چرخشی خلیجی و با در نظر گرفتن آن، به صورت دو و سه فاز مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند. لازم به ذکر است که این مدل به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده و مقادیر احتمالات آن نیز تماماً با استفاده از داده‌های تجربی معین شده‌اند. نوآوری‌های این پژوهش، مربوط به استفاده از تئوری‌های مربوط به بستر سیال و رفتار حباب و ذرات در آن برای بدست آوردن برخی از این احتمالات و استفاده از داده‌های تجربی برای احتمالات تغییر فاز می‌باشد که باعث می‌شود تا مدل ارائه شده در این پژوهش، به صورت نیمه-تجربی باشد. همچنین نوآوری دیگر این پژوهش، بررسی تاثیر عدم استفاده از فرضیه یکپارچگی می‌باشد که در آن، برای سلول‌های مختلف بستر در راستای طولی، مقادیر متفاوتی از احتمالات را در نظر گرفتیم.

۱-۵-۳ مقدمات روش زنجیره‌های مارکوف

روش زنجیره‌های مارکوف، یک روش آماری برای مدل سازی تصادفی^۱ سیستم‌هایی است که در آن‌ها وضعیت آتی سیستم تنها به وضعیت فعلی آن وابسته است و گذشته سیستم هیچ تاثیری بر آینده آن نمی‌گذارد [۱۹]. این روش بر اساس نحوه مدل سازی زمان، بیانات مختلفی را در پی خواهد داشت که با توجه به وجود گام‌های زمانی گسسته در سیستم، از مدل زنجیره‌های مارکوف با گام‌های زمانی گسسته استفاده می‌شود.

$$S_{i+1} = P(S_i)S_i \quad (۳-۸)$$

در این مدل، وضعیت فعلی، i_k به صورت برداری تعریف می‌شود که تعداد درایه‌های آن برابر با تعداد حالاتی است که سیستم می‌تواند در آن قرار بگیرد. برای تعیین وضعیت آینده آن، i_{k+1} نیز کافی است تا این بردار را در ماتریس انتقال سیستم، $P(S_i)$ ضرب کنیم. این ماتریس یک ماتریس مربعی است با تعداد سطری برابر با تعداد حالات سیستم که در صورت تعیین درست درایه‌ها، می‌تواند پیش‌بینی درستی از لحاظ آماری از آینده سیستم به ما بدهد. هر سطر از ماتریس انتقال بیانگر احتمالات انتقال به

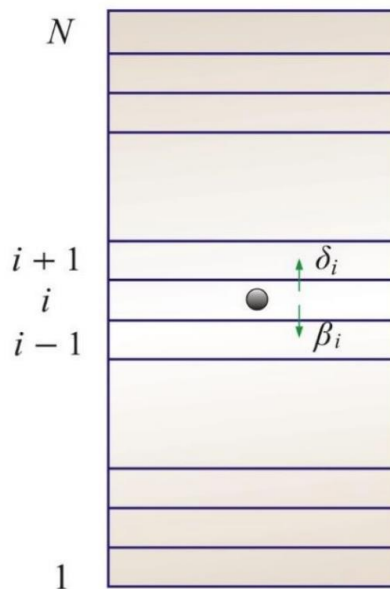
^۱Random Modeling

^۲Discrete-Time Markov Chains Model

حالت مورد نظر می‌باشد. در نتیجه برای پیش‌بینی وضعیت سیستم در گام زمانی n -ام، کافیت تا ماتریس انتقال را به توان n برسانیم و در وضعیت ابتدایی سیستم ضرب کنیم.

۲-۵-۳ روش زنجیره‌های مارکوف تک فازی برای حرکت ذرات در بسترهای سیال حبایی

در این بخش به بیان تئوری ارائه شده برای مدل‌سازی تک‌فاز به کمک روش زنجیره‌های مارکوف توسط دهلینگ و همکاران می‌پردازیم. [۲۱] در این روش ابتدا بستر سیال را در راستای طولی گسسته می‌کنیم. در ادامه برای حرکت ذره در داخل بستر احتمالات محدودی را در نظر می‌گیریم؛ برای این کار باید پارامترهای مدل را معرفی کرد و سپس آن‌ها را برحسب داده‌ها و یا مدل‌های پیشین تخمین زد. برای این کار شکل ۱-۳ را در نظر بگیرید.



شکل ۱-۳ بستر سیال گسسته شده که در آن احتمالات حرکت مختلف ذره با استفاده از پیکان نمایش داده شده‌اند

در شکل ۱-۳، بستر به تعداد N سلول گسسته شده است که سلول پایین را شماره ۱ نام‌گذاری کرده‌ایم. با در نظر گرفتن احتمالات δ_i به عنوان احتمال رفتن به سلول بالایی از سلول شماره i توسط ذره و β_i به عنوان احتمال رفتن به سلول پایینی از سلول شماره i توسط ذره، می‌توان معادلات این سیستم را به صورت زیر نوشت [۲۱].

$$p_{i,i} = \alpha_i = (1 - \beta_i - \delta_i) \quad (3-9)$$

$$p_{i,i-1} = \beta_i \quad (3-10)$$

$$p_{i,i+1} = \delta_i \quad (3-11)$$

در رابطه با شرایط مرزی این سیستم نیز می توان گفت:

$$p_{1,1} = (1 - \delta_1) \quad (3-12)$$

$$p_{1,2} = \delta_1 \quad (3-13)$$

$$p_{N,N-1} = 1 \quad (3-14)$$

در صورت تشکیل ماتریس انتقال \mathbf{p} ، مشاهده می شود که سایر اعضای آن، صفر می باشند. به طور خاص این ماتریس به صورت سه قطری خواهد بود و بجز در سطرهای اول و آخر، در باقی سطرها، فقط درایه های روی قطر اصلی و دوهم سایه آن، مقادیر غیر صفر دارند. در این ماتریس، احتمال انتقال از سلول i به سلول j به صورت $p_{i,j}$ نمایش داده می شود. [۲۱]

بردار احتمال $\mathbf{p}(n)$ که شامل اعضای $\mathbf{p}(n, \mathbf{i})$ می باشد، تعیین کننده موقعیت ذره در قدم n -ام می باشد. در صورت معلوم بودن ماتریس انتقال، می توان موقعیت ذره را به صورت بازگشتی با استفاده از رابطه زیر به موقعیت قبلی آن متصل کرد. [۲۱]

$$p(n, j) = \sum_{i=1}^N p(n-1, i) p_{ij} \quad (3-15)$$

یا به صورت فرم ماتریسی آن

$$\mathbf{p}(n) = \mathbf{p}(n-1) \mathbf{P} \quad (3-16)$$

برای بدست آوردن موقعیت هر قدمی، کفایت موقعیت ابتدایی ذره و همچنین تعداد قدم های مد نظر را داشته باشیم تا بتوانیم با استفاده از رابطه زیر، موقعیت ذره در آن قدم را بدست آوریم.

$$\mathbf{p}(n) = \mathbf{p}(0) \mathbf{P}^n \quad (3-17)$$

که در آن، $\mathbf{p}(0)$ بیانگر موقعیت ابتدایی ذره می باشد.

در این روش به صورت عام، احتمالات رفتن به سلول بالایی و پایینی برای هر سلول به صورت مجزا تعریف می شود.

۳-۵-۳ روش زنجیره های مارکوف یکپارچه^۱

این روش ساختاری مشابه با روش زنجیره های مارکوف معمولی دارد اما با فرضی ساده کننده؛ در این روش فرض بر آن می شود که سه ناحیه در بستر وجود دارد، به طور خاص ناحیه وسط بستر، ناحیه

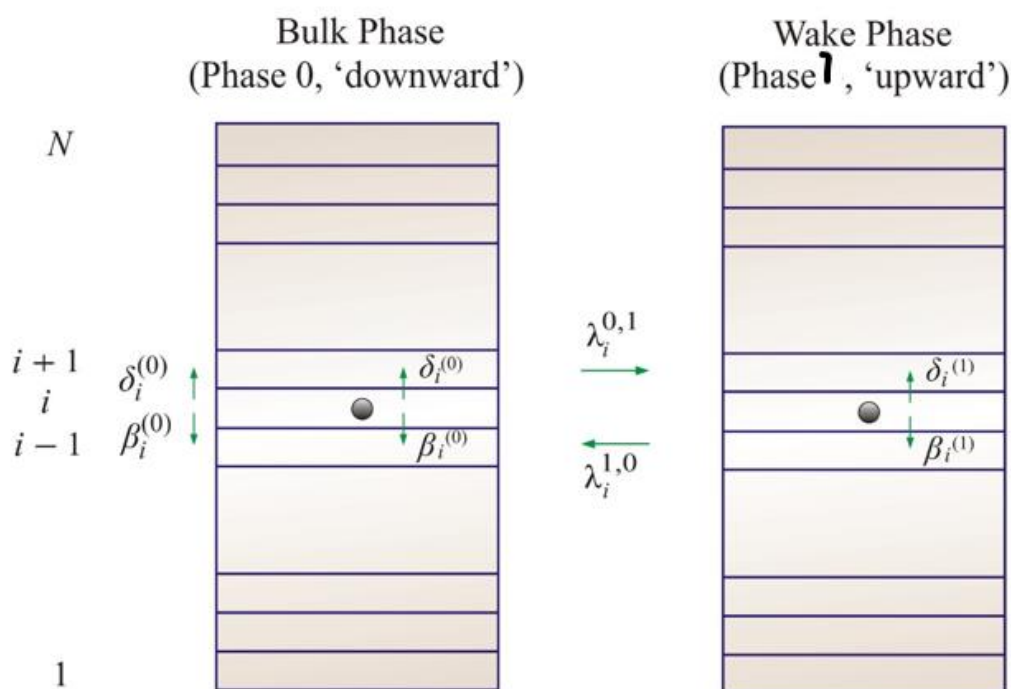
ورودی جریان گازی و ناحیه بالای بستر که شامل سطح آن نیز می شود. برای تمامی سلول های هر کدام از این نواحی، احتمالات بالا رفتن و پایین آمدن میزان ثابت و یکسانی را دارد و با استفاده از این فرض و تعداد محدودی از پارامترها می توان سیستم را مدل کرد.

۳-۵-۴ روش زنجیره های مارکوف دوفازی (بدون جریان خلیج)^۱

هدف در اینجا، اضافه کردن فاز دیگری برای بررسی حرکت ذره می باشد به طوریکه یک فاز بیانگر حرکت ذره به سمت بالا و دیگری بیانگر حرکت ذره به سمت پایین باشد. در نتیجه این مدل سازی، دو پارامتر موقعیت ذره و فاز آن، در موقعیت بعدی ذره دخیل خواهند بود. برای مدل سازی این سیستم، ابتدا بردار حالت آن را بیان می کنیم:

$$S = \{1, 2, \dots, N\} \times \{0, 1\} \quad (3-18)$$

در معادله ۳-۱۸ که بیانگر موقعیت های ممکن برای ذره است، تعداد موقعیت های ممکن دو برابر تعداد سلول های بستر است که به دلیل دوفازی در نظر گرفتن هر سلول می باشد. در این معادله فاز ۰، بیانگر موقعیت های متناظر با فاز حرکت توده (یا به سمت پایین) و همچنین فاز ۱، بیانگر موقعیت های متناظر با فاز صعودی حرکت (یا به سمت بالا) می باشد. شماتیک این روش مدل سازی در شکل ۲-۳ آمده است.



شکل ۳-۲ شماتیک روش زنجیره‌های مارکوف دوفازی برای جابجایی ذره در یک بستر سیال حبایی

در معادلاتی که در ادامه می‌آیند، اولین زیروند بیانگر موقعیت مکانی و دومین آن بیانگر فاز حرکت ذره می‌باشد. با تعریف $\lambda_i^{k,l}$ به عنوان احتمال تغییر فاز از فاز k به فاز l در سلول i و همچنین α_i به عنوان احتمال باقی ماندن در سلول و فاز خود، می‌توان به بیان معادلات مربوط به ماتریس انتقال سیستم پرداخت:

$$p_{(i,k)(i+1,k)} = \delta_i (1 - \lambda_i^{k,l}). \quad (3-19)$$

$$p_{(i,k)(i-1,k)} = \beta_i (1 - \lambda_i^{k,l}). \quad (3-20)$$

$$p_{(i,k)(i,k)} = \alpha_i (1 - \lambda_i^{k,l}) = (1 - \beta_i - \delta_i) (1 - \lambda_i^{k,l}). \quad (3-21)$$

$$p_{(i,k)(i,|k-1|)} = \lambda_i^{(k)} \quad (3-22)$$

البته شرط لازم برای داشتن خواص مارکوفی در این سیستم باید رعایت شود و آن این است که مجموع تمامی ضرایب احتمالات در هر سطر یک شود و یا به بیان ریاضی برای $1 \leq i \leq N, k \in \{0,1\}$:

$$\beta_i^{(k)} + \delta_i^{(k)} + \alpha_i^{(k)} + \lambda_i^{(k)} = 1 \quad (3-23)$$

در نتیجه با اضافه شدن یک فاز دیگر به سیستم، انتقالات ممکن توسط ذره شامل موارد زیر خواهد

بود:

۱. ماندن در همان سلول و عدم تغییر فاز

۲. رفتن به سلول بالایی

۳. رفتن به سلول پایینی

۴. ماندن در همان سلول و تغییر فاز

قابل ذکر است که با توجه به کوچک بودن بازه زمانی از تغییر همزمان موقعیت و فاز ذره می توان صرف نظر کرد. حال که معادلات مربوط به این روش مدل سازی بیان شد، می توان با در نظر گرفتن فرضیاتی، محاسبات را آسان تر کرد. فاز ۰، مربوط به حرکت رو پایین ذره در توده جریان می باشد که به صورت نفوذی مدل می شود. منظور از مدل نفوذی این است که انتقال ذرات با استفاده از مکانیسم جابجایی رخ نمی دهد و تماما در اثر نفوذ از میان ذرات ریز، سایر ذرات در شت و همچنین جریان هوا انجام می گیرد. فاز ۱ مربوط به حرکت رو به بالای ذره در دنباله حباب های گازی می باشد. می توان فرض کرد که تمامی حرکات رو به پایین توسط فاز ۰ و تمامی حرکات رو به بالا توسط فاز ۱ مدل می شوند [۲۱]. در نتیجه در برای تمامی سلول ها:

$$\beta_i^{(1)} = 0 \quad (3-24)$$

$$\delta_i^{(0)} = 0 \quad (3-25)$$

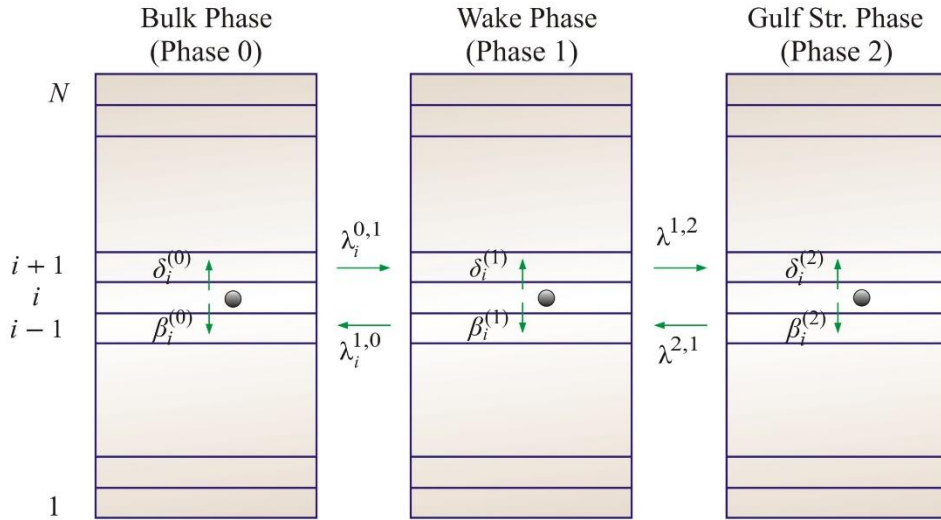
نکته دیگری که باید اینجا اضافه کرد، بزرگتر شدن ماتریس انتقال است که هم تعداد سطرها و هم تعداد ستون های آن، دو برابر روش معمولی است.

۵-۳-۵ روش زنجیره های مارکوف سه فاز (همراه با جریان خلیج)^۲

در این بخش تلاش می شود تا فاز دیگری نیز به سیستم اضافه شود و این فاز مسئول مدل سازی رفتار چرخش خلیجی سیستم است. [۲۱] چرخش خلیجی نوعی رفتار سیستم های بستر سیال است که به دلیل جریان غیریکسان حباب ها در سطح مقطع بستر ایجاد می شود. به دلیل اضافه شدن این جریان، یک جریان رو به بالا در یک سمت بستر (مرکز بستر) و یک جریان رو به پایین به بخش دیگری از بستر (کنار دیواره ها) اضافه می شود. در مقایسه با سیستم هایی که چرخش خلیجی در آن ها رخ نمی دهد، در این سیستم ها ذرات بیشتری در بستر درگیر چرخش می شوند. شماتیک این روش در شکل ۳-۳ آمده است.

^۱Gas Bubble Wakes

^۲۳-Phase Markov Chains Model (With Gulf Streaming)



شکل ۳-۳ شماتیک روش زنجیره‌های مارکوف سه فازی برای جابجایی ذره در یک بستر سیال حبابی

مدل‌سازی این سیستم نسبت به روش‌های قبلی پیچیدگی‌های بیشتری دارد؛ برای مثال، بردار حالت این سیستم سه برابر تعداد سلول‌های طولی بستر است و از طرفی بدلیل وجود سه فاز در سیستم، برای هر سلول، دو ضریب احتمال تغییر فاز خواهیم داشت.

$$S = \{1, 2, \dots, N\} \times \{0, 1, 2\} \quad (3-26)$$

در اینجا نیز متناسب با قسمت قبلی، زیروندهای ضرایب به ترتیب مربوط به موقعیت مکانی و فاز ذره در سیستم هستند. فازهای ذره می‌توانند مقادیر ۰، ۱ و ۲ را داشته باشند که به ترتیب مربوط به جریان به سمت پایین، جریان به سمت بالا و جریان چرخش خلیجی هستند. در فاز ۰، مربوط به جریان رو به پایین، با توجه به وجود این جریان در مسیری که حداقل فعالیت حباب‌ها می‌باشد، دارای کوچکترین میزان نفوذ است که آن را در این فاز صفر فرض می‌کنیم. در مورد فاز ۲، جریان چرخش خلیجی، با توجه به جریان چرخشی ذرات که منجر به ایجاد تغییر در مسیر حرکت حباب‌ها می‌شوند، ضریب نفوذ مقدار بزرگتری است [۲۱]. با این داده‌ها، معادلات محاسبه درایه‌های ماتریس انتقال به صورت زیر ارائه می‌شوند.

$$p_{(i,k)(i-1,k)} = \beta_i^{(k)} (1 - \lambda_i^{k,l} - \lambda_i^{k,m}). \quad (3-27)$$

$$p_{(i,k)(i+1,k)} = \delta_i^{(k)} (1 - \lambda_i^{k,l} - \lambda_i^{k,m}). \quad (3-28)$$

$$p_{(i,k)(i,l)} = \lambda_i^{k,l}. \quad (3-29)$$

$$p_{(i,k)(i,m)} = \lambda_i^{k,m}. \quad (3-30)$$

$$p_{(i.k)(i.k)} = \alpha_i^{(k)} (1 - \lambda_i^{k.l} - \lambda_i^{k.m}) = (1 - \beta_i^{(k)} - \delta_i^{(k)}) (1 - \lambda_i^{k.l} - \lambda_i^{k.m}) \quad (3-31)$$

همچنین برای رعایت شرط خاصیت مارکوفی سیستم، باید:

$$\beta_i^{(k)} + \delta_i^{(k)} + \alpha_i^{(k)} + \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_i^{(k)} = 1 \quad (3-32)$$

که معادله ۳-۳۲ باید برای تمامی سلول‌ها و فازها برقرار باشد.

۳-۶ ارتباط پارامترهای مدل با پدیده‌های فیزیکی

بر اساس پژوهش دهلینگ و همکاران [۱۹]، ما برای نمایش سرعت جریان ذرات در هر فاز از \tilde{v} با واحد متر بر ثانیه و همچنین برای نمایش ضریب نفوذ فیک در هر فاز از \tilde{D} با واحد متر مربع بر ثانیه استفاده می‌کنیم. به هنگام ارتباط پارامترهای فیزیکی سیستم مانند سرعت و ضریب نفوذ به پارامترهای بدون بعد در این روش، می‌توان با استفاده از بازه‌های مورد استفاده برای گسسته‌سازی فیزیکی و زمانی سیستم به صورت زیر استفاده کرد:

$$v \frac{\Delta}{\varepsilon} = \tilde{v} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (3-33)$$

$$D \frac{\Delta^2}{\varepsilon} = \tilde{D} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (3-34)$$

که در این روابط، v ، D ، Δ و ε ، به ترتیب سرعت و ضریب نفوذ بدون بعد، واحد طولی بستر و واحد زمانی مورد استفاده برای گسسته‌سازی هستند و \tilde{v} و \tilde{D} به ترتیب، معادل فیزیکی سرعت با واحد متر بر ثانیه و ضریب نفوذ با واحد متر مربع بر ثانیه هستند. با این حساب می‌توان میانگین جابجایی‌ها را با استفاده از رابطه ۳-۳۵. میانگین مربعات جابجایی‌ها را با استفاده از رابطه ۳-۳۶ محاسبه کرد [۲۱]:

$$\left(\Delta \times \beta_i^{(k)} - \Delta \times \delta_i^{(k)} \right) \frac{1}{\varepsilon} = \left(\beta_i^{(k)} - \delta_i^{(k)} \right) \frac{\Delta}{\varepsilon} = v_i \quad (3-35)$$

$$\left(\Delta^2 \times \beta_i^{(k)} + \Delta^2 \times \delta_i^{(k)} \right) \frac{1}{\varepsilon} = \left(\beta_i^{(k)} + \delta_i^{(k)} \right) \frac{\Delta^2}{\varepsilon} = 2D_i \quad (3-36)$$

از آنجاییکه میانگین مربعات جابجایی‌ها، دو برابر ضریب نفوذ ذرات است، می‌توان این دو مقدار را برابر یکدیگر قرار داد. با این احتساب تنها یک راه برای مدل‌سازی جریان پلاگ وجود دارد و آن هم انتخاب میزان ۱ برای ضرایب احتمال انتقال δ و یا β می‌باشد. در نتیجه خواهیم داشت:

$$v_i = \beta_i^{(k)} - \delta_i^{(k)} \quad (3-37)$$

$$2D_i = \beta_i^{(k)} + \delta_i^{(k)} \quad (3-38)$$

نکته دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد، بازه‌های گسسته‌سازی هستند، که در مورد ε میزان آن

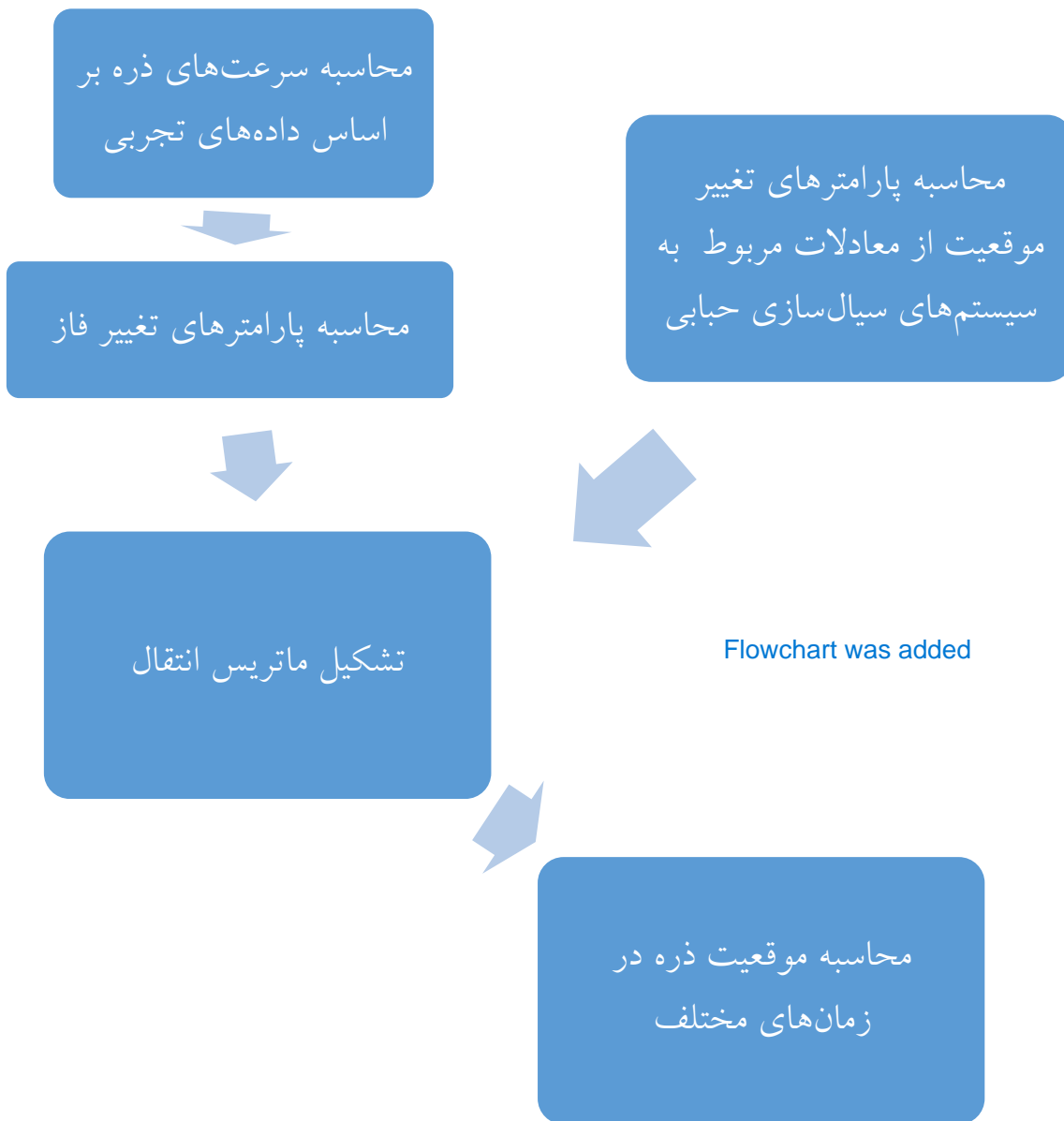
مشخص و برابر ۰,۰۱ ثانیه است؛ در مورد Δ نیز می‌توانیم مقادیر مختلفی را انتخاب کنیم اما بدلیل سادگی محاسبات، برای آن نیز از مقدار ۰,۰۱ متر استفاده می‌شود تا سرعت بدون بعد، مقادیر نسبتاً کوچکی را داشته باشد. در رابطه با میزان بازه‌های طولی سیستم، باید یک بررسی به صورت جدا صورت گیرد که مقادیر متفاوت آن چه تاثیری بر درستی پارامترهای سیستم می‌گذارند. لازم به ذکر است که در حالت فعلی (مقادیر انتخاب شده برای بازه‌های زمانی و مکانی)، مقادیر ضریب نفوذ بدون بعد، ۱۰۰ برابر ضرایب نفوذ فیزیکی خواهند بود.

در مدل‌سازی به این روش باید در نظر داشت که هر فاز، مشخصات مربوط به خود را بر طبق موارد زیر داراست:

- فاز حرکت به سمت پایین (توده). فرض را در این فاز بر نبود نفوذ می‌گذاریم تا از حرکت تماماً رو به پایین در این فاز اطمینان حاصل کنیم. در صورت وارد کردن این فاز، تمامی ضرایب $\delta_i^{(1)}$ مقدار صفر خواهند داشت.
- فاز حرکت به سمت بالا (در صعود (دریفت) حباب‌ها). به طور مشابه، فرض را بر این می‌گیریم که در این فاز نیز نفوذ نداریم تا از حرکت تماماً رو به بالا در این فاز اطمینان حاصل کنیم. در صورت وارد کردن این فرض، تمامی ضرایب $\beta_i^{(1)}$ مقادیر صفر خواهند داشت.
- فاز حرکت چرخشی خلیجی. نفوذ در این فاز به طور واضح دیده می‌شود و نمی‌توان از آن صرف‌نظر کرد زیرا بخش اعظم حباب‌ها در این فاز حرکت می‌کنند و رفتار این فاز را تحت تاثیر خود قرار می‌دهند. با توجه به روابط ۳-۳۷ و ۳-۳۸، می‌توانیم از روابط $\beta_i^{(2)} = D_i + \frac{1}{4}v_i$ و $\delta_i^{(2)} = D_i - \frac{1}{4}v_i$ برای محاسبه مقادیر ضرایب احتمال در ماتریس انتقال استفاده کرد.

۳-۷ روند مدل‌سازی

روند مدل‌سازی در هر سیستم بدین صورت است که ابتدا با استفاده از داده‌های سیستم، به تعیین مقادیر پارامترهای احتمال هر حرکت با توجه به نوع روش زنجیره مارکوف مورد استفاده می‌پردازیم. سپس ماتریس انتقال را برای سیستم تشکیل می‌دهیم. پس از تشکیل ماتریس انتقال دیگر می‌توانیم به بازسازی نتایج پردازیم. برای این کار کافیست تا شرایط ابتدایی سیستم واقعی را به مدل بدهیم تا مدل‌سازی برای همان بازه زمانی انجام گیرد.



شکل ۳-۴ فلوجارت روند مدل‌سازی

۳-۷-۱ تعیین مقادیر δ و β با استفاده از مدل‌سازی‌های موجود در مقالات برای حرکت ذره

برای محاسبه مقادیر این پارامترها، با توجه به نکات گفته شده، باید از میانگین سرعت بدون بعد ذرات در هر سلول استفاده کرد. با این مقدمه باید به محاسبه سرعت در راستای طولی بستر با استفاده از روابط صادق در سیستم‌های سیال‌سازی حبابی پردازیم.

برای این مهم، ابتدا باید سرعت صعود حباب، u_b ، در سیستم را محاسبه کنیم. برای این کار می‌توان

از رابطه ارائه شده توسط دیویدسون و هریسون [۲۲] استفاده کرد:

$$u_b = 0.71 \sqrt{gD_e} \quad (3-39)$$

برای محاسبه D_e نیز می‌توان از رابطه ارائه شده توسط دارتون [۲۳] استفاده کرد که برای توزیع‌کننده‌های شامل چند اریفیس صادق است:

$$D_e = 0.54(u - u_{mf})^{0.4} (z + 4\sqrt{A})^{0.8} g^{-0.2} \quad (3-40)$$

حال با در نظر گرفتن قسمتی از بستر به ضخامت dz ، و یک بازه زمانی به اندازه $dt = dz/u_b$ و فرضیات زیر، می‌توان تعداد میانگین حباب‌های حاضر در حجم دیفرانسیلی را بدست آورد. [۲۴]

- عملیات پایا
- تئوری دوفازی سیالات
- برابر بودن فضای خالی برای فازهای متراکم (امولسیون)، دنباله و دریافت با فضای خالی بستر در شرایط حداقل سیال‌سازی.
- در صورت برقراری این شرایط، می‌توان از رابطه زیر برای محاسبه تعداد حباب‌ها در حجم دیفرانسیلی مفروض استفاده کرد:

$$N_b = Ndt = \frac{Q_b dz}{V_b u_b} = \frac{(u - u_{mf}) Adz}{V_b u_b} \quad (3-41)$$

که در آن N_b برابرست با میانگین تعداد حباب‌هایی که در حجم دیفرانسیلی میان z تا $z+dz$ قرار دارند. N برابر ست با میانگین تعداد حباب‌هایی که از سطح مقطع بستر در ارتفاع z عبور می‌کنند. Q_b برابرست با نرخ جریان گاز به فرم حباب با واحد متر مکعب بر ثانیه. V_b برابرست با حجم حباب با واحد متر مکعب. u_b برابرست با سرعت حباب با واحد متر بر ثانیه. تعداد میانگین ذرات در ناحیه دنباله حباب‌های موجود در حجم دیفرانسیلی مفروض برابر است با:

$$N_{PW} = \frac{N_b f_w V_b (1 - \varepsilon_{mf})}{V_p} = \frac{f_w (1 - \varepsilon_{mf}) u - u_{mf}}{V_p u_b} Adz \quad (3-42)$$

که در آن، N_{PW} برابرست با تعداد ذرات در ناحیه دنباله حباب در حجم دیفرانسیلی. f_w برابرست با نسبت حجم ناحیه دنباله حباب به حجم حباب. V_p برابرست با حجم ذره با واحد متر مکعب. تعداد میانگین ذرات در ناحیه دریافت حباب‌های موجود در حجم دیفرانسیلی مفروض نیز برابرست با:

$$N_{PD} = \frac{N_b f_d V_b (1 - \varepsilon_{mf})}{V_p} = \frac{f_d (1 - \varepsilon_{mf}) u - u_{mf}}{V_p u_b} Adz \quad (3-43)$$

که در آن، N_{PD} برابرست با تعداد ذرات در ناحیه دریافت حباب در حجم دیفرانسیلی. f_d برابرست با نسبت حجم ناحیه دریافت به حجم حباب. از آنجاییکه حرکت رو به بالای ذرات عموماً در ناحیه دنباله و دریافت حباب‌ها رخ می‌دهد، می‌توان میانگین سرعت صعود ذرات را به صورت میانگین وزن‌دار

سرعت‌های ذره در ناحیه‌های دنباله و دریافت عنوان کرد:

$$u_{su} = \frac{N_{PW}u_{PW} + N_{PD}u_{PD}}{N_{PW} + N_{PD}} = \frac{f_w u_{PW} + f_d u_{pd}}{f_w + f_d} \quad (3-44)$$

که در آن منظور از u_{PW} ، u_{PD} و u_{su} به ترتیب، سرعت ذرات در ناحیه دنباله حباب، سرعت ذرات در ناحیه دریافت حباب و میانگین سرعت صعود ذرات. البته با توجه به این‌که برای ذرات درشت صعود ذرات در ناحیه دریافت حباب‌ها انجام می‌گیرد [۱۰]، می‌توان از سرعت صعود ذرات در ناحیه دنباله حباب‌ها صرف‌نظر کرد و میانگین سرعت صعود ذرات را با میانگین سرعت صعود ذرات در ناحیه دریافت حباب‌ها برابر در نظر گرفت.

برای محاسبه میانگین سرعت صعود ذرات در ناحیه دریافت حباب‌ها نیز می‌توان از نوشتن موازنه نیرو در ناحیه طولی بستر استفاده کرد [۱۰]. لازم به ذکر است که در نوشتن این معادله از نیروهای میان‌ذره‌ای بین ذرات ریز و درشت بستر صرف‌نظر شده است [۲۵].

$$\rho_o V_o \frac{dU_o}{dt} = (\rho_f - \rho_o) g V_o + \frac{1}{4} C_D A_o \rho_f (U_f - U_o)^2 \quad (3-45)$$

که در این معادله، C_D ، ρ_o ، V_o ، U_o و ρ_f به ترتیب بیانگر ضریب درگ، چگالی ذره، حجم ذره، سرعت ذره و دانسیته جریان گازی هستند. ضریب درگ می‌تواند بر حسب عدد رینولدز ذره و فضای خالی محلی بستر، به صورت زیر بیان شود:

$$C_D = \frac{24}{Re_o} \left(1 + \frac{Re_o^{1/2}}{6} \right) g(\varepsilon) \quad Re < 1000 \quad (3-46)$$

$$C_D = 0.44 g(\varepsilon) \quad Re \geq 1000 \quad (3-47)$$

که در این روابط، Re_o و $g(\varepsilon)$ به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۷] [۲۶]:

$$Re_o = \frac{\rho_f |U_f - U_o| d_o}{\mu_f} \quad (3-48)$$

$$g(\varepsilon) = \varepsilon^{-\beta} \quad (3-49)$$

$$\beta = 3.7 - 0.65 \exp \left[\frac{-(1.5 - \log Re_o)^2}{2} \right] \quad (3-50)$$

برای حل عددی این معادلات کفایت تا فرض کنیم که تخلخل بستر در ناحیه دریافت حباب‌ها، همان تخلخل حداقل سیال سازی است. برای شرط اولیه حل نیز، سرعت ذره برابر با نصف سرعت صعود حباب‌ها در زمان اولیه در نظر گرفته می‌شود [۱۰].

حال که سرعت ذره در زمان‌های مختلف مشخص شده است، می‌توان با استفاده از رابطه زیر،

میانگین آن را محاسبه کرد [۲۴]:

$$\bar{U}_o = \frac{1}{\tau_r} \int_0^{\tau_r} U_o dt \quad (3-51)$$

که در این رابطه، پارامتر τ_p که با عنوان زمان استراحت شناخته می‌شود، زمانی است که ذره جزئی از فاز امولسیون می‌شود و با سرعتی بسیار آهسته در شرایط حداقل سیال‌سازی حرکت می‌کند. از آنجاییکه شرط اولیه معادله موازنه انرژی نوشته شده برای محاسبه سرعت صعود ذره تابع موقعیت ذره در بستر است، و سرعت بدست آمده با موقعیت ذره در بستر تغییر می‌کند؛ سرعت ذره نیز در نقاط مختلف بستر متفاوت خواهد بود.

در فاز امولسیون، ذرات جامد در حال پایین آمدن هستند تا بالا رفتن باقی ذرات به دلیل صعود حباب‌ها را جبران کنند. در صورت نوشتن یک موازنه جرم بر روی ذرات بستر در یک سلول می‌توان سرعت پایین آمدن ذرات را نیز محاسبه کرد. طبق معادلات ارائه شده توسط لوندشپیل و کونی [۱۳]، سرعت پایین آمدن ذرات را می‌توان از رابطه ۳-۵۲ محاسبه کرد:

$$u_{s.down} = \frac{f_w \delta u_b}{(1 - \delta - f_w \delta)} \quad (3-52)$$

که در آن، f_w ، جزء حجمی دنباله حباب‌هاست که توسط ذرات جامد اشغال شده است و δ ، جزء فضای اشغال شده توسط حباب‌هاست که با عنوان چگالی حباب‌ها نیز از آن یاد می‌شود.

در تمامی مدل‌های متفاوت عنوان شده برای استفاده از روش زنجیره‌های مارکوف، پارامتر β ، که مربوط به انتقال به سلول پایینی است، با میانگین سرعت پایین آمدن ذره تخمین زده می‌شود و δ که مربوط به انتقال به سلول بالایی است با میانگین سرعت بالا رفتن ذرات تخمین زده می‌شود. البته باید در نظر گرفته شود که همانطور که قبلاً بحث شد و بر اساس مدل ارائه شده توسط گاتچالک و همکاران [۲۱]، در روش‌های زنجیره مارکوف با بیش از یک فاز، ضریب β و δ مرتبط با حرکت مربوطه در یک فاز خاص را برابر با میانگین سرعت محاسبه شده قرار دهیم و ضریب دیگر را نیز برابر صفر قرار می‌دهیم. نکته دیگر آن که در روش زنجیره‌های مارکوف یکپارچه، تنها سه ناحیه در بستر وجود دارد و برای آن باید از میانگین سرعت‌های یاد شده در طول هر ناحیه استفاده کرد.

Minor Edits on why

۳-۷-۲ تعیین تجربی مقادیر λ

با توجه به نبود رابطه‌ای برای محاسبه ضریب تغییر فاز در این مدل، ناچار به استفاده از داده‌های تجربی می‌شویم. با این کار، مدل زنجیره‌های مارکوف در حال گسترش، به یک مدل نیمه-تجربی تبدیل خواهد شد. ضریب λ مربوط به احتمال تغییر فاز در حرکت ذره است. با توجه به تعاریفات ارائه شده، بجز در مورد مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی (با احتساب جریان چرخش خلیجی)، منظور از فاز حرکت، جهت حرکت رو به بالا و یا پایین می‌باشد. پس کفایت تا الگوریتمی پیشنهاد شود که بتواند با در نظر گرفتن جهت حرکت ورودی به هر سلول، در صورت تغییر جهت، تعداد تغییر جهت‌های رخ داده شده

در آن سلول را بشمارد. از طرفی، تعداد وقوع سرعت‌های منفی و مثبت در هر سلول نیز از داده‌های آزمایشگاهی (RPT) محاسبه می‌شود. از تقسیم تعداد تغییر جهت به تعداد سرعت‌های متناظر، ضریب λ برای هر سلول بدست خواهد آمد.

برای محاسبه این پارامتر می‌توان به صورت دیگری نیز تعریف شود که در آن تعداد موقعیت‌هایی که در هر المان با سرعت مثبت ثبت شده را به تعداد کل مشاهدات ذره در آن سلول تقسیم کنیم. این تعریف مشکلاتی را با خود به همراه دارد، زیرا در صورت استفاده از آن، جمع دو پارامتر λ یک خواهند شد و دیگر سیستم ما خاصیت مارکوفی ندارد. برای محاسبه صحیح این پارامتر کفایت تا سرعت لحظه قبلی نیز لحاظ شود تا تنها در صورت تغییر جهت، آن مشاهده به خصوص را در جمع کردن تغییر فازها لحاظ کنیم نه به صرف مثبت بودن آن.

نکته دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد، تغییر فازهای مورد استفاده در مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (با احتساب جریان چرخشی خلیجی) است. در مورد این مدل باید دقت شود که جریان چرخشی خلیجی هم بخشی از حرکت رو به بالای جریان و هم بخشی از حرکت رو به پایین جریان را شامل می‌شود. این جریان به دلیل جریان حباب ناهم‌فرم در راستای سطح مقطع می‌باشد که در نتیجه آن و در مقایسه با انتقال ذرات در دنباله حباب‌ها، جریان بیشتری از ذرات از پایین بستر به بالای آن انتقال می‌کنند. بر اساس این تاثیر، سرعت‌های رو به پایین بستر نیز مقادیر بزرگتری خواهند داشت [۲۱].

۳-۷-۳ تشکیل ماتریس انتقال

برای تشکیل ماتریس انتقال در هر کدام از حالات روش زنجیره‌های مارکوف کفایت تا معادلات ارائه شده برای حالات خاص را لحاظ کنیم و سایر اعضای ماتریس را صفر قرار می‌دهیم. نکته‌ای که در اینجا حائز اهمیت است، این است که در روش زنجیره‌های مارکوف تک فازی یکپارچه، تعداد سطر و ستون ماتریس انتقال با تعداد سلول‌های بستر در راستای طولی برابر است؛ اما در روش زنجیره‌های مارکوف دوفازی، تعداد سطر و ستون‌ها دوبرابر این مقدار می‌باشد. در این حالت، می‌توان ماتریس انتقال را به ۴ ناحیه، هر کدام به اندازه ماتریس انتقال روش یکپارچه تقسیم بندی کرد. در این حالت، دو ناحیه راست-بالا و چپ-پایین، تماماً صفر هستند و در مورد دو ناحیه دیگر باید از روابط ارائه شده استفاده کرد. منظور این است که برای رعایت اصل مارکوفی سیستم، نمی‌توان برای هر کدام از فازهای حرکت، یک ماتریس انتقال جدا در نظر گرفت و باید آن‌ها را به نحوی به یکدیگر مرتبط ساخت، که با افزایش مقیاس این ماتریس، این مهم صورت می‌گیرد. در رابطه با روش زنجیره‌های مارکوف سه فازی نیز به تعداد سه برابر تعداد سلول‌ها در راستای طولی بستر، سطر و ستون خواهیم داشت.

جدول ۳-۴ خلاصه تعداد سلول-های بستر، فازهای سیستم و حالات ممکن در روش‌های مختلف

| تعداد سلول‌های با خواص مختلف | تعداد فازهای سیستم | تعداد سلول‌های بستر | مدل زنجیره‌های مارکوف |
|-------------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| تعداد حالات ممکن در مدل ۳۵ | ۳ | ۱ | مدل یکپارچه |
| $2 \times 35 = 70$ | ۳۵ | ۲ | مدل دوفازی |
| $3 \times 35 = 105$ | ۳۵ | ۳ | مدل سه فازی |

۳-۸ تفاوت روش‌های مختلف

با توجه به ذات مشابه روش‌های زنجیره مارکوف معرفی شده در این قسمت، به بررسی تفاوت‌های موجود در این روش‌ها می‌پردازیم تا بتوانیم تفاوت‌های آن‌ها و دلیل استفاده از هر کدام را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهیم.

۳-۸-۱ روش زنجیره‌های مارکوف یکپارچه

این روش، ساده‌ترین حالت مدل‌سازی شده می‌باشد و فرض‌های زیر در آن دخیل هستند. در این مدل، از تنها یک فاز استفاده شده و ضرایب λ هم مورد نیاز نمی‌باشند. در این صورت، تنها به دو پارامتر β و δ نیازمند خواهیم بود. نکته دیگر آن که در این روش از فرضیه یکپارچگی (لامپد) استفاده شده است و پارامترهای β و δ معرفی شده، برای هر سلول متفاوت نیست. در این مدل، بستر را به سه ناحیه اصلی تقسیم‌بندی می‌کنیم. ناحیه ورودی جریان سیال به بستر، ناحیه درونی بستر و همچنین ناحیه فضای خالی بالای بستر. برای هر کدام از این ناحیه‌ها، یک ضریب β و یک ضریب δ فرض می‌شود و مدل‌سازی انجام می‌شود. تمامی پارامترهای این مدل از روابط ارائه شده در مقالات استخراج شده‌اند. در نهایت با در نظر گرفتن، ۱۰ سلول پایینی به عنوان ناحیه ورودی، سلول‌های ۱۱ تا ۳۰ به عنوان ناحیه درونی بستر و همچنین سلول‌های بالاتر از ۳۰ به عنوان فضای بالای بستر، و میانگین‌گیری از پارامترهای بدست آمده در هر ناحیه، ماتریس انتقال را تشکیل می‌دهیم.

۳-۸-۲ روش زنجیره‌های مارکوف دو فازی

در این روش، از دو فاز متفاوت برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. یکی از این دو فاز، نماینده حرکت رو به پایین ذرات است و دیگری نماینده حرکت رو به بالای آن‌ها می‌باشد. به همین دلیل، در هر فازی، یکی از این دو پارامتر صفر خواهد بود. پارامتر دیگری نیز وارد مدل می‌شود تا تغییر فاز را بتوانیم مورد مدل‌سازی قرار دهیم. این ضریب بر اساس داده‌های تجربی محاسبه می‌شود و باعث می‌شود تا مدل ارائه شده، نیمه تجربی باشد. نکته دیگر نیز آنکه در این مدل تمامی سلول‌های بستر، خواص و پارامترهای مختص خود را دارند. برای بدست آوردن پارامترهای β و δ مطابق با گفته‌های پیشین، از میانگین سرعت‌های بدون بعد حاصل از روابط استفاده می‌شود. پارامتر λ با استفاده از داده‌های تجربی و الگوریتمی که به آن اشاره شد، محاسبه می‌گردد. با معلوم بودن همگی این پارامترها می‌توان به تشکیل ماتریس انتقال و تعیین وضعیت سیستم در زمان‌های متفاوت پرداخت.

۳-۸-۳ روش زنجیره‌های مارکوف سه فازی

در این روش، از سه فاز متفاوت برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. یکی از این سه فاز، نماینده حرکت رو به پایین ذرات است، دیگری نماینده حرکت رو به بالای آن‌ها و مورد آخر نماینده جریان چرخشی خلیجی می‌باشد. در این میان، تعداد پارامترهای تغییر فاز λ سه برابر خواهد شد و همچنین برای محاسبه پارامترها در فاز جریان چرخشی خلیجی، به ضریب نفوذ سیستم متوسل می‌شویم. در این مدل نیز هر سلول، خواص و پارامترهای مختص خود را دارد. در این روش با توجه به اینکه خود جریان چرخشی خلیجی، شامل یک حرکت کنترل شده به سمت بالا و همچنین یک حرکت کنترل شده به سمت پایین می‌باشد، تمییز میان این حرکت و سایر فازهای سیستم از اهمیت بالایی برخوردار است. در این حالت، تعیین پارامتر λ برای فازهای مختلف بسیار مبهم می‌باشد. با توجه به این‌که این جریان به دلیل حرکت صعودی حباب‌ها به صورت نامنظم ایجاد می‌شود، در مراحل مدل‌سازی این روش برای محاسبه میانگین سرعت‌های فاز این جریان، ابتدا یک حد آستانه‌ای برای سرعت‌های ذراتی که در دریافت حباب‌ها صعود می‌کنند، تعیین می‌کنیم و سپس مقدار کمی (۲۰٪) به آن حد اضافه کرده و به عنوان سرعت فاز چرخشی خلیجی در نظر می‌گیریم. از طرفی برای تعیین پارامترهای λ میان این فاز با سایر فازها نیز از تفاوت سرعت صعود حباب‌ها و همچنین سرعت ذرات استفاده شده و الگوریتم معرفی شده برای استفاده در روش زنجیره‌های مارکوف دوفازی، با تغییراتی برای در نظر گرفتن دو

محدوده سرعت در مسیر رو به بالا و همچنین دو محدوده سرعت در مسیر به سمت پایین، اصلاح شده و مورد استفاده قرار گرفت.

فصل ۴: نتایج و بحث

۴-۱ مقدمه

در این بخش از پایان‌نامه به ارائه نتایج و بحث پیرامون آن‌ها پرداخته می‌شود. در ابتدا به بررسی داده‌ها و موارد مورد استفاده در مدل‌سازی پرداخته می‌شود. پس از تحلیل نتایج حاصل از داده‌ها به صورت کلی، به محاسبات توزیع جابجایی و ضریب نفوذ پرداخته می‌شود. در ادامه درستی مدل‌های جابجایی محصور و نامحصور مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس به نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های به روش زنجیره‌های مارکوف پرداخته می‌شود.

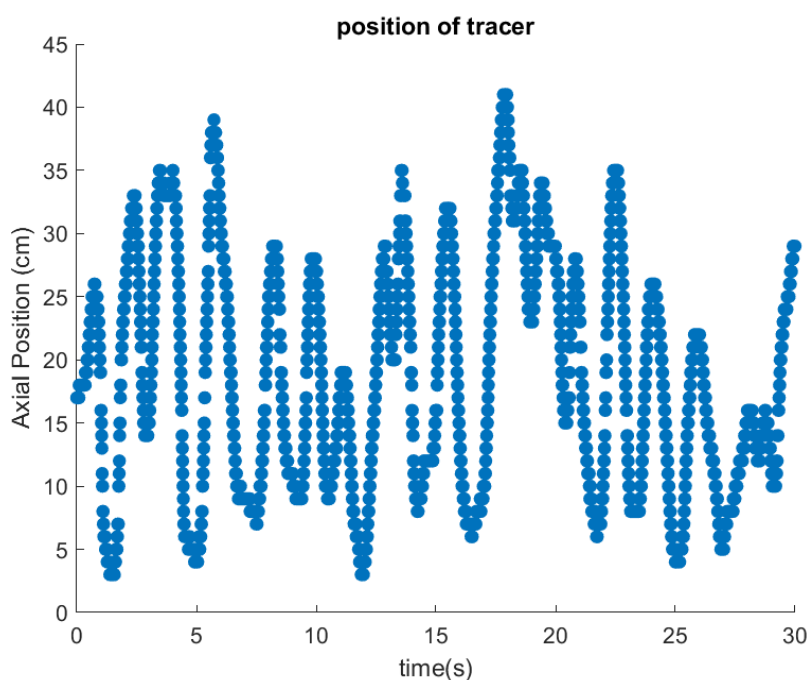
۴-۲ بحث در رابطه با داده‌ها و آماده‌سازی برای تحلیل آن‌ها

داده‌های مرتبط با آزمایشات که برای این مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند شامل ۱۲ مجموعه داده ردیابی ذرات به صورت رادیواکتیو بودند که هر کدام حاوی بیش از ۱,۵ میلیون ردیف داده موقعیت ذره، در فواصل ۰,۰۱ ثانیه از یکدیگر بودند. تفاوت‌های موجود در این داده‌ها مربوط به ذرات ریز تشکیل‌دهنده بستر (ماسه ریز، ماسه درشت و کاتالیست FCC)، نوع ذره زیست‌توده (استال کوچک، استال متوسط، استال بزرگ، پلی‌اتیلن با چگالی بالا و PTFE) و همچنین سرعت افزوده جریان گازی ورودی (دو مقدار ۰,۲۵ و ۰,۵ متر بر ثانیه برای هر تست) می‌باشند. منظور از سرعت افزوده ($U_e = U - U_{mf}$)، اختلاف سرعت جریان گاز با سرعت حداقل سیال‌سازی ذرات ریز بستر است. لیست داده‌هایی که برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند در جدول ۳-۳ آمده است.

۴-۳ تحلیل داده‌های سیستم مورد بررسی

برای بررسی داده‌ها ابتدا باید یک شناخت کلی از داده‌ها داشته باشیم. باید دقت داشته باشیم که موقعیت زمانی ردیاب با در نظر گرفتن دستگاه موقعیت‌کارتزینی ذخیره شده است و مبدا آن در وسط توزیع‌کننده گازی در پایین بستر می‌باشد. برای بررسی این داده‌ها، با توجه به هندسه سیستم، مختصات کارتزینی به مختصات استوانه‌ای تغییر داده شدند. شکل ۴-۱ نشانگر مسیر حرکت ذره در راستای طولی

بستر برای ذرات PTFE در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه و به مدت ۳۰ ثانیه می‌باشد.

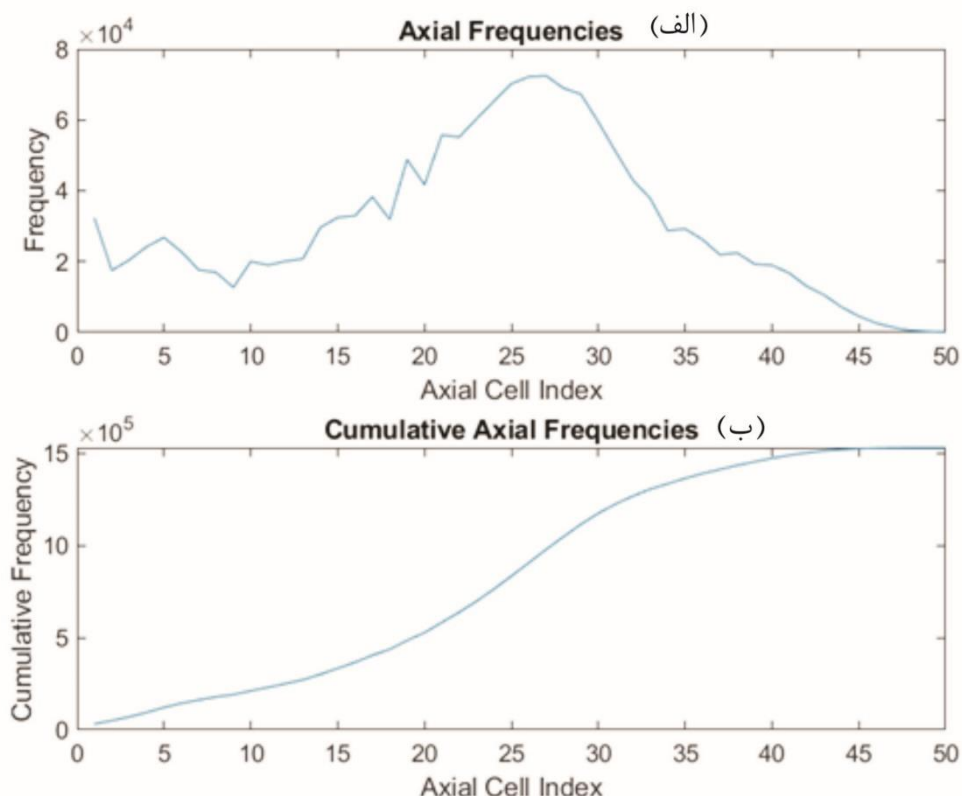


شکل ۴-۱ نمونه‌ای از مسیر حرکت ذره در راستای طولی به مدت ۳۰ ثانیه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه)

۴-۳-۱ توزیع طولی میانگین زمانی موقعیت ذرات در سیستم

در شکل ۴-۲، در ناحیه پایینی بستر که محل ورود جریان هوا از توزیع‌کننده است و جریان هوا با سرعت افزوده‌های عنوان شده به داخل بستر ورود می‌کنند و این سرعت از تمامی دیگر سرعت‌های ذرات و یا حباب‌ها در طول بستر بیشتر است و مشاهده می‌شود که کمترین حضور ذره در این ناحیه است. با اندکی بالاتر رفتن در طول بستر، وجود حرکت‌های چرخشی و مقابله آن با جریان هوای وارد شده از طریق توزیع‌کننده‌ها باعث می‌شود تا میزان فرکانس حضور ذره کمی افزایش پیدا کند. در بالای بستر، ترکیدن حباب‌ها و همچنین تغییر فاز ذره از حرکت رو به بالا به حرکت رو به پایین تغییر پیدا می‌کند و به همین دلیل میزان فرکانس حضور ذره در این ناحیه نسبتاً متعادل است (البته باید کوتاه‌تر بودن طول ثابت بستر و احتمال پایین‌تر رسیدن به آن ناحیه را نیز در نظر گرفت). در ناحیه میانی بستر سیال که البته نشانگر ارتفاع بستر در حالت سیال‌شدگی است، بیشترین میزان فرکانس حضور در نمودار مشاهده می‌شود.

1, 2, and 5 second trajectories were removed



شکل ۴-۲ الف) فرکانس طولی ذره در بستر. ب) فرکانس تجمیعی راستای طولی ذره در بستر (استال بزرگ در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه)

۴-۴ تحلیل توزیع جابجایی و ضریب نفوذ

کمی سازی اختلاط ذرات درون راکتورهای بستر سیال از اهمیت زیادی برخوردار است و همچنین چالش هایی را در طراحی راکتور ایجاد می کند. با وجود این که چرخش ذرات در طول بستر عموماً به واسطه حرکت حباب ها و در پی آنهاست، اختلاط ذرات در ابعاد خود ذره، بیشتر وابسته به برهمکنش های میان ذره ای و همچنین برخوردهای ذره-دیواره است. در این بخش، روشی که عموماً برای محاسبه میانگین مربعات جابجایی طولی و همچنین ضریب نفوذ استفاده می شود معرفی می شوند و سپس نتایج حاصل از آن را مورد بررسی قرار می دهیم.

۴-۴-۱ الگوریتم محاسبه میانگین مربعات جابجایی طولی و ضریب نفوذ

ضریب نفوذ طولی یک پارامتر حیاتی برای تعیین مشخصات رفتار اختلاطی ذره و مکانیسم حرکت آن در راستای طولی است که طریقه محاسبه آن وابسته به محاسبه میانگین مربعات جابجایی طولی

می باشد. متد مورد استفاده در اینجا در ابتدا توسط لاراچی و همکاران [۱۷] برای محاسبه ضریب نفوذ در بسترهای سیال یکار گرفته شد. در این روش و برای هر مجموعه داده‌های ردیابی ذره، ابتدا یک سلول درون بستر به عنوان نقطه ابتدا (r_i, z_i) انتخاب می شود و الگوریتم زیر بر روی آن اجرا می شود. برای هر سلول انتخابی، ۲۵۰۰ بار از دفعاتی که ذره از آن سلول عبور کرده را مورد مطالعه قرار می دهیم؛ به این صورت که در هر دفعه، ذره مورد نظر برای ۵ ثانیه مورد مطالعه قرار می گیرد و موقعیت مکانی نهایی سلول آن به عنوان نقطه انتها (r_o, z_o) ذخیره می شود. پس از این که این پروسه برای هر سلول به میزان کافی از لحاظ آماری (۲۵۰۰ بار) تکرار شد، می توان از الگوریتم زیر (روابط ۱-۴ تا ۴-۴) استفاده کرد.

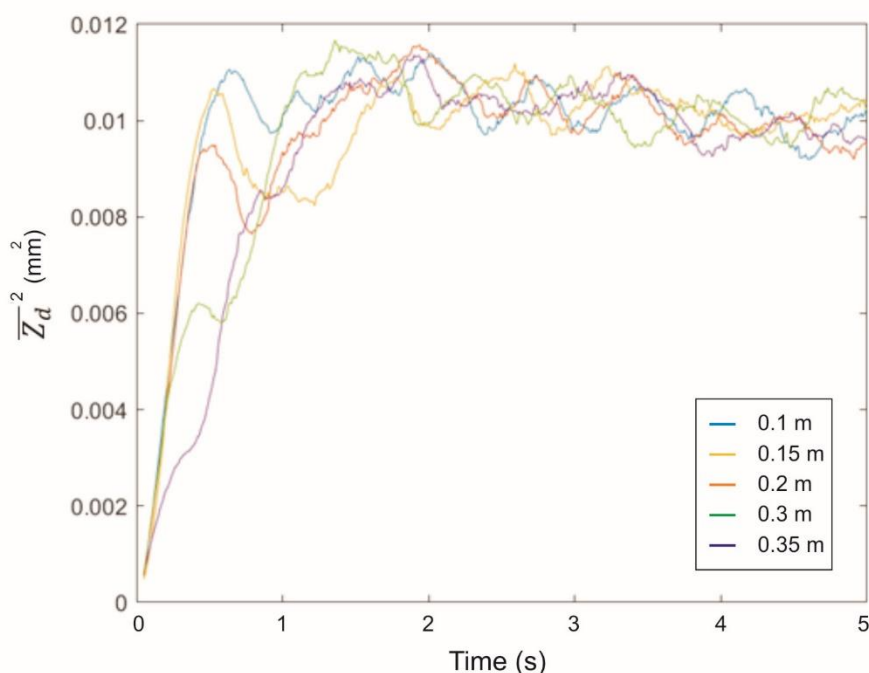
$$Z_{d,j} = Z_o(t) - Z_i \quad (۴-۱)$$

$$\bar{Z}_d = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Z_{d,j} \quad (۴-۲)$$

$$\bar{Z}_d^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (Z_{d,j} - \bar{Z}_d)^2 \quad (۴-۳)$$

$$D_z = \frac{1}{\tau} \frac{d}{dt} (\bar{Z}_d^2) \quad (۴-۴)$$

در این الگوریتم، رسیدن میانگین مربعات جابجایی طولی به یک میزان ثابت در اثر زمان و نوسان حول آن، نشان دهنده رسیدن به اختلاط کامل در داخل بستر است. برای محاسبه ضریب نفوذ از داده‌های میانگین مربعات جابجایی طولی کافیت نصف مشتق ناحیه ابتدایی رشد میانگین مربعات جابجایی طولی را بدست بیاوریم. محاسبه میانگین مربعات جابجایی برای ۵ مقطع از بستر (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۳۵ سانتی متر از کف بستر) انجام شده و نتیجه آن در شکل ۴-۳ آمده است.



شکل ۴-۳ میانگین مربعات جابجایی طولی برای ۵ نقطه مختلف بستر (استال بزرگ در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه)

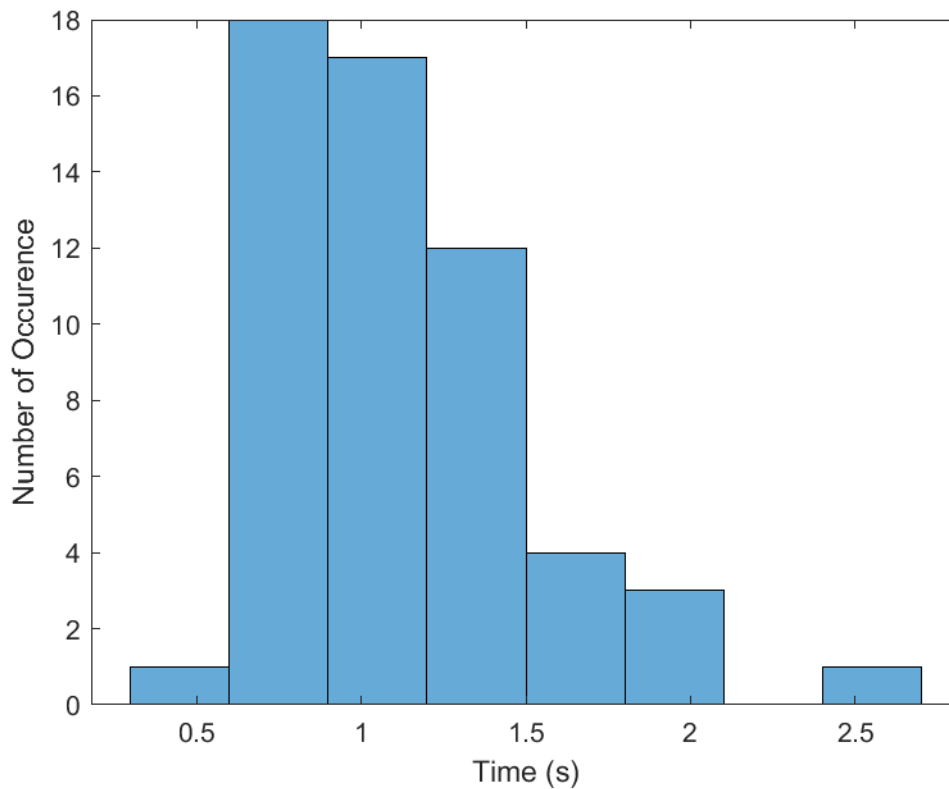
۴-۵ بررسی درستی مدل‌های نفوذی و جابجایی

در این بخش ابتدا جابجایی‌های مقید و نامقید موجود در داده‌های تجربی را می‌یابیم و سپس درستی مدل نفوذ و جابجایی را برای جابجایی‌های مقید مورد بررسی قرار می‌دهیم. در نهایت به بررسی کیفی رژیم جریان با استفاده از این نتایج می‌پردازیم. در قسمت‌های بعد، از جابجایی‌های مقید و نامقید برای بررسی و مقایسه میان نتایج مدل و داده‌های تجربی استفاده می‌شود.

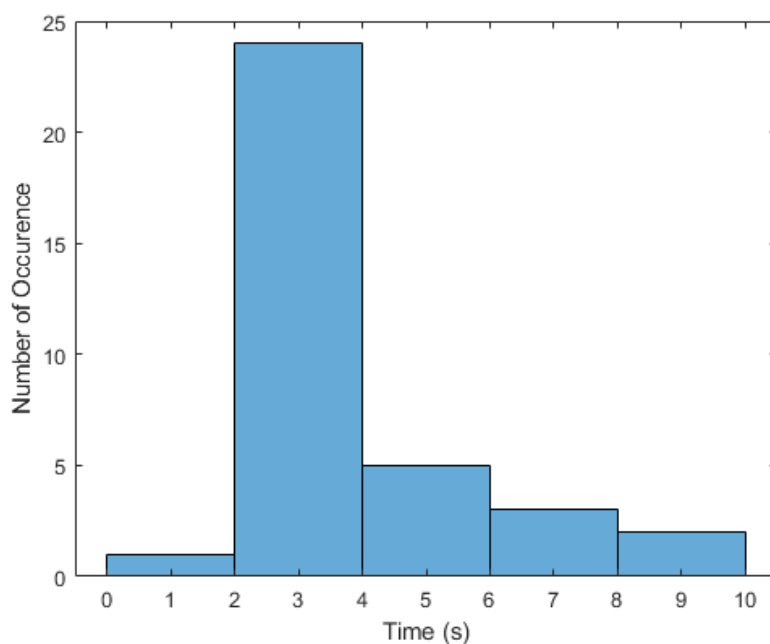
۴-۵-۱ بررسی جابجایی‌های مقید و نامقید

در این قسمت به نتایج حاصل از شناسایی جابجایی‌های مقید و نامقید پرداخته می‌شود. به عنوان ابتدایی‌ترین قسمت این بخش، باید با استفاده از الگوریتم عنوان شده به دنبال جابجایی‌هایی بود که شرایط ذکر شده برای این نوع جابجایی‌ها را داشته باشند. این مهم بر روی داده‌های مربوط به ذرات استال بزرگ در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه امتحان شد. با توجه به داده‌های این آزمایش، ۵۶۵ و ۶۳۵ حرکت جابجایی مقید به ترتیب به سمت بالا و پایین در کل دوره آزمایش

شناسایی شد. این به این معناست که به عنوان مثال، به تعداد ۵۶۵ حرکت که از مرز پایین بستر شروع شده‌اند با حداقل تعویض مسیر به مرز بالای بستر رسیده‌اند. به علاوه، در همین مدت به ترتیب ۹۱۱ و ۷۳۸ حرکت جابجایی نامقید نیز به سمت بالا و پایین رخ داده بود. برای هر کدام از این مسیرها، مسافت طی شده و زمان سپری شده محاسبه و در اشکال ۴-۴ و ۴-۵ آمده‌اند.



شکل ۴-۴ هیستوگرام زمان جابجایی های مقید به سمت بالا (ذره استال بزرگ در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه)

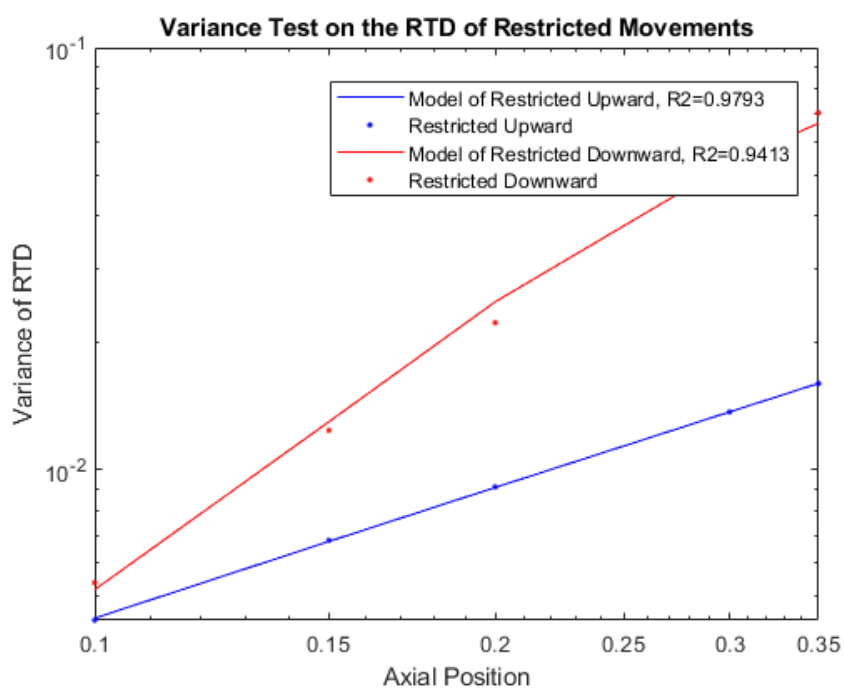


شکل ۴-۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا (ذره استال بزرگ در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه)

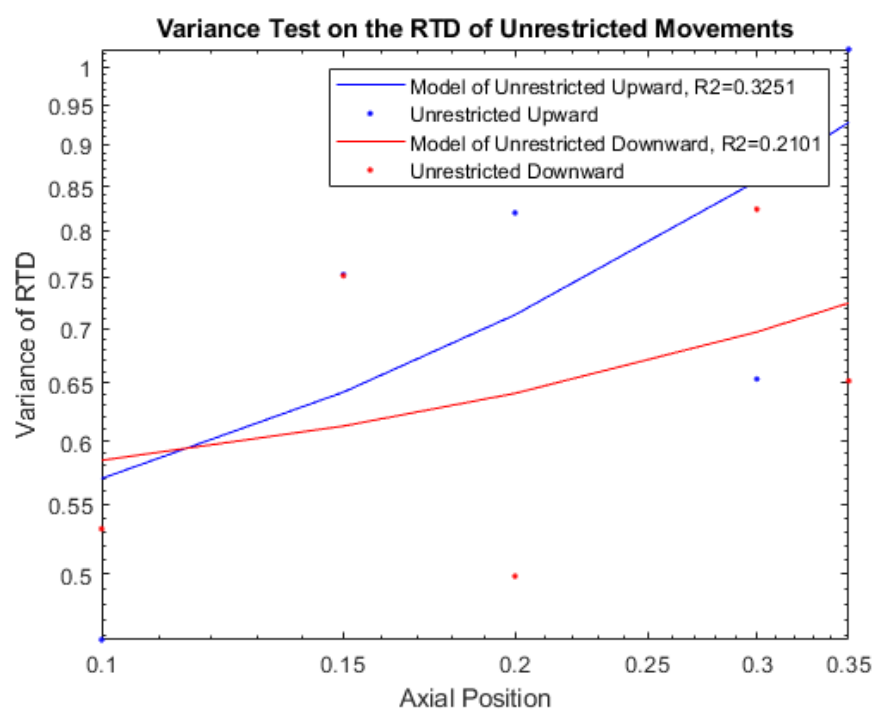
۴-۵-۲ واریانس توزیع زمان ماند

در ابتدا جابجایی‌های مقید و نامقید موجود در داده‌های تجربی مربوط به آزمایش ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه معین شدند و سپس با استفاده از روابط مندرج در قسمت ۲-۵ و ۲-۶، واریانس زمان ماند انحصاری مربوط به حرکت مقید رو به پایین و حرکت مقید رو به بالا محاسبه شدند. از طرفی سایر موارد روابط مربوطه نیز محاسبه شدند تا بتوان نمودار تمام لگاریتمی واریانس زمان ماند بر اساس موقعیت در بستر را رسم کرد.

با توجه به مباحث مطرح شده در قسمت ۲-۶ و نمودار بدست آمده و این که شیب مربوط به حرکت به سمت بالا و پایین به ترتیب، ۱,۰۲۷۲ و ۱,۹۷۵۱ بدست آمد، می‌توان نتیجه گرفت که ذره در مسیر حرکت خود به سمت بالا در جابجایی‌های مقید، با مکانیسم نفوذ و در مسیر حرکت خود به سمت پایین در این جابجایی‌ها، از مکانیسم جابجایی پیروی می‌کند. اما در رابطه با جابجایی‌های نامقید، با توجه به مقادیر شیب ۰,۳۷۹۳ برای حرکت نامقید به سمت بالا و همچنین ۰,۱۴۶۶ برای حرکت نامقید به سمت پایین، مکانیسم حرکت ذرات در این جابجایی‌ها از مکانیسم‌های نفوذ و جابجایی به طور خالص پیروی نمی‌کند و می‌تواند ترکیبی از این دو باشد. نمودار تست واریانس برای جابجایی‌های مقید و نامقید به ترتیب در اشکال ۴-۶ و ۴-۷ آمده‌اند.



شکل ۴-۶ نمودار تست واریانس برای بدست آوردن مکانیسم حرکت در جابجایی‌های محصور (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه)



شکل ۴-۷ نمودار تست واریانس برای بدست آوردن مکانیسم حرکت در جابجایی‌های نامحصور (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه)

۴-۶ بررسی نتایج روش زنجیره‌های مارکوف یکپارچه

مدل‌سازی به روش زنجیره‌های مارکوف یکپارچه بر طبق جزئیات گفته شده انجام شده است و نتایج آن در جداول ۳-۴ تا ۸-۴ و نمودارهای زیر آمده‌اند.

لازم به ذکر است که مطابق با روند مدل‌سازی بیان شده در بخش ۳-۷، ابتدا پارامترهای مدل زنجیره مارکوف برای سلول‌های مختلف سیستم محاسبه شدند. سپس با توجه به یکپارچگی سیستم، در سه ناحیه مشخص شده، از این پارامترها میانگین گرفته شد و در تشکیل ماتریس انتقال از میانگین آن‌ها استفاده شد. پس از تشکیل ماتریس انتقال برای این سیستم، با در نظر گرفتن شرط مرزی مشابه با داده‌های تجربی، به تخمین ۴ ساعت آتی رفتار ذره درشت پرداخته شد. سپس همین ۴ ساعت از داده‌های تجربی نیز انتخاب شده و به بررسی جابجایی‌های مقید و نامقید در هر یک پرداخته شد. در هر مورد، با در نظر گرفتن شرط انحراف ۲ سانتی‌متری (برای تمییز جابجایی‌های مقید و نامقید)، مسیرهای جابجایی مورد مطالعه قرار گرفتند. در این مطالعه، دو حد بالا و پایین ۳۵ و ۵ سانتی‌متری از ابتدای بستر انتخاب شدند و در هر موردی که ذره وارد این ناحیه شده، رفتار آن از ابتدای شروع آن مسیر مورد بررسی قرار گرفته است. در صورتی که ذره بدون رد کردن حد انحراف به سمت دیگر بستر رسید، آن جابجایی، یک جابجایی مقید نام‌گذاری شده و موقعیت مکانی و زمان نقاط ابتدایی و انتهایی آن ذخیره می‌شود. در صورتی که ذره مورد نظر از حد انحراف عبور کند اما همچنان به سمت دیگر بستر برسد، آن جابجایی، یک جابجایی نامقید نام‌گذاری شده و موقعیت مکانی و زمانی نقاط ابتدایی و انتهایی آن نیز ذخیره می‌شود. در انتها اختلاف موقعیت مکانی میان نقاط ابتدایی و انتهایی در هر مسیر، معادل مسافت آن جابجایی و اختلاف زمانی میان نقاط ابتدایی و انتهایی در هر مسیر، معادل زمان آن جابجایی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این که در هر حالتی، تعداد جابجایی‌های داده‌های تجربی و نتایج مدل با یکدیگر متفاوت است، هیستوگرام‌ها و میانگین و واریانس این داده‌ها آورده شده تا بتوان راحت‌تر به بررسی آن‌ها پرداخت.

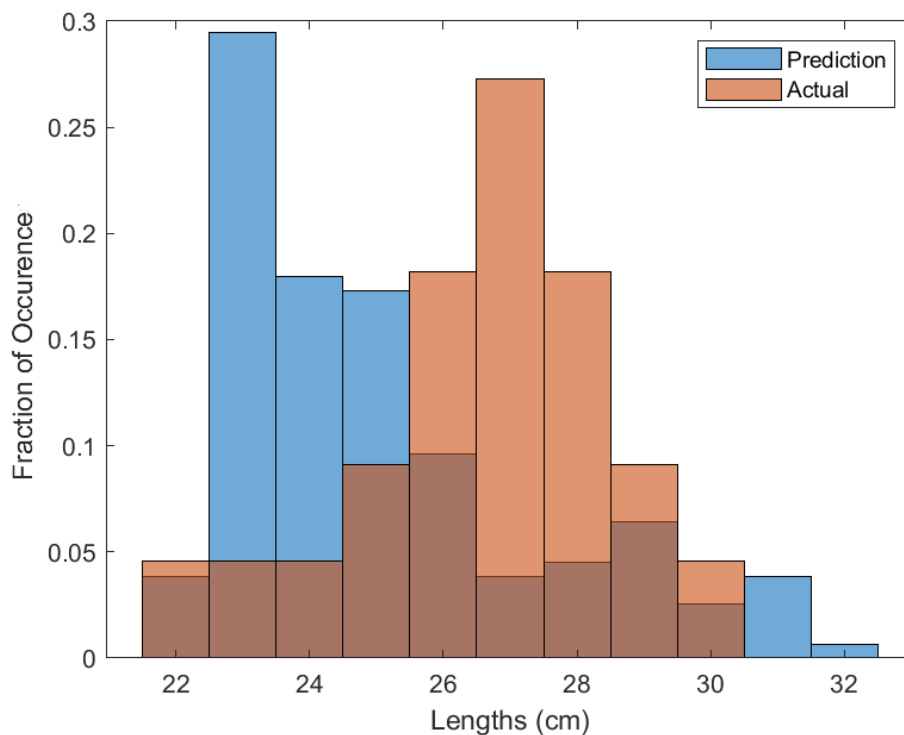
اولین بررسی مربوط به زمان جابجایی‌های مقید (صرف نظر از به سمت پایین و یا بالا) است. اولین نکته‌ای که از داده‌های تجربی مشخص می‌شود، این است که در صورت سیال‌سازی، نوع ذره درشت در بستر کمترین تاثیر را بر میانگین زمان جابجایی‌های مقید گذاشته است. نکته دیگر آن که همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش سرعت افزوده سیال‌سازی، میانگین زمان جابجایی‌ها نیز کاهش می‌یابد. نکته قابل بیان دیگر آن است که در صورت سیال‌سازی، در جابجایی‌های مقیدی که بستر آن‌ها ماسه درشت است، سیال‌سازی بهتری را شاهد هستیم زیرا ذره درشت بستر، سرعت بالاتر و میانگین زمان کمتری را در هر جابجایی سپری کرده است. همچنین در رابطه با تفاوت میان داده‌های تجربی و مدل، می‌توان به

این مهم اشاره کرد که در همه موارد، میانگین زمان جابجایی‌های مقید و به سمت پایین بدست آمده از مدل، مقدار بالاتری (کمتر از ۲ برابر) از داده‌های تجربی است. این موضوع در مورد جابجایی‌های نامقید نیز صادق است.

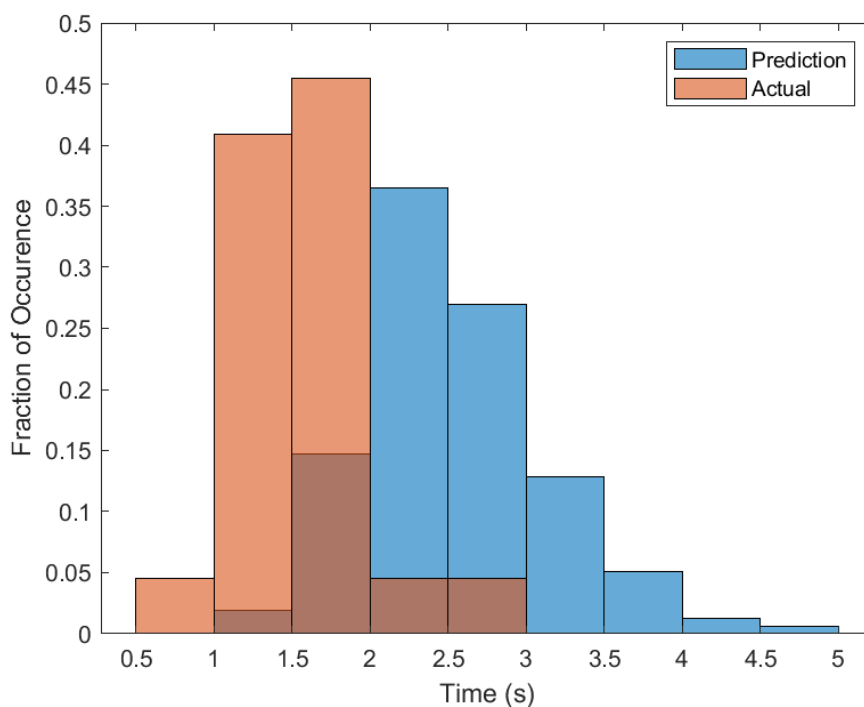
با دقت در نمودارهای هیستوگرام برای بررسی تفاوت در مدل‌های مبتنی بر زنجیره‌های مارکوف یکپارچه می‌توان به نکات زیر رسید:

- این روش مدل‌سازی، توانایی مدل کردن مسافت طی شده در جابجایی‌ها را ندارد و تقریباً در تمامی موارد، مستقل از مقید و یا نامقید بودن جابجایی، توزیع متفاوتی را نسبت به داده‌های تجربی ارائه می‌دهد.

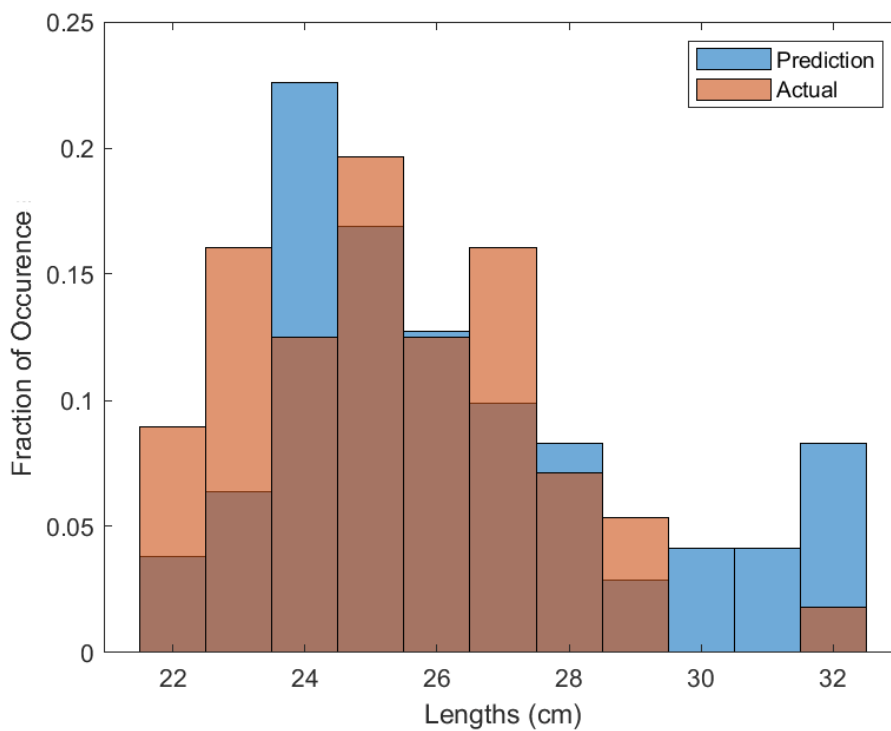
میانگین زمان جابجایی‌های طی شده بدست آمده از مدل، مقادیر بالاتری نسبت به داده‌های تجربی متناظر هستند.



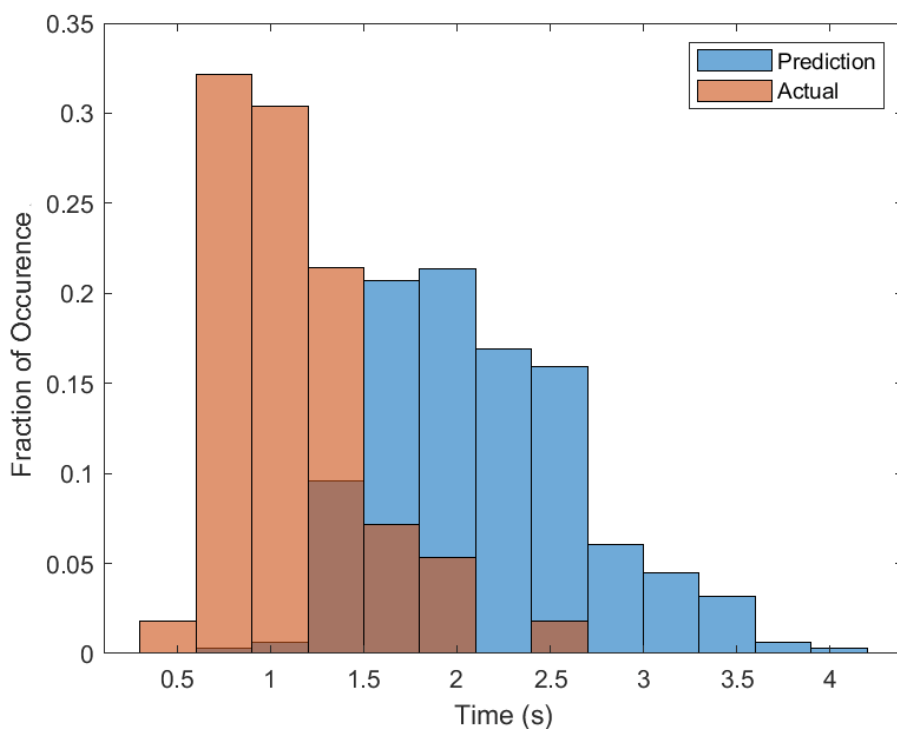
شکل ۴-۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



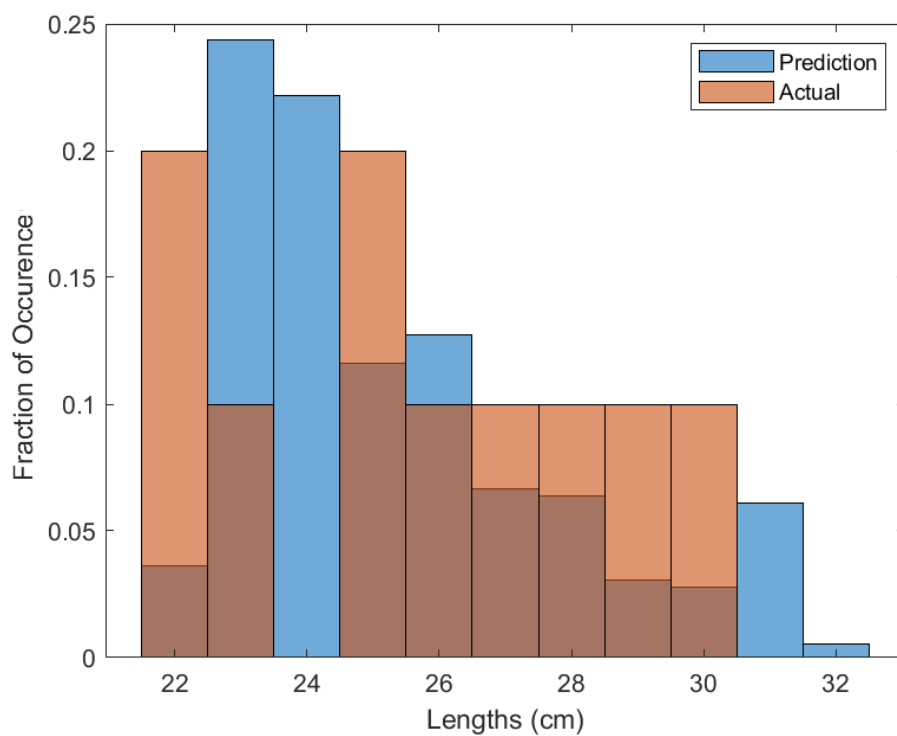
شکل ۴-۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



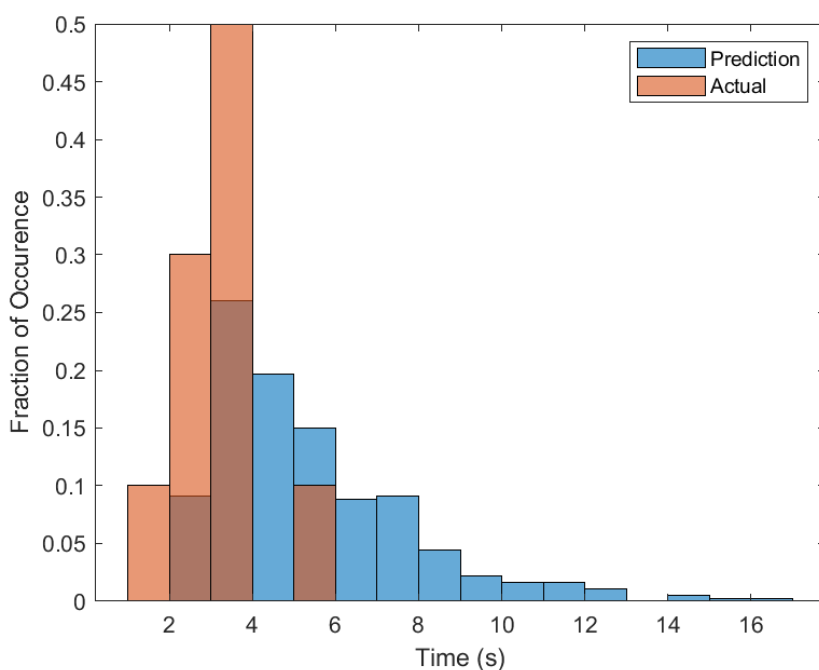
شکل ۴-۱۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



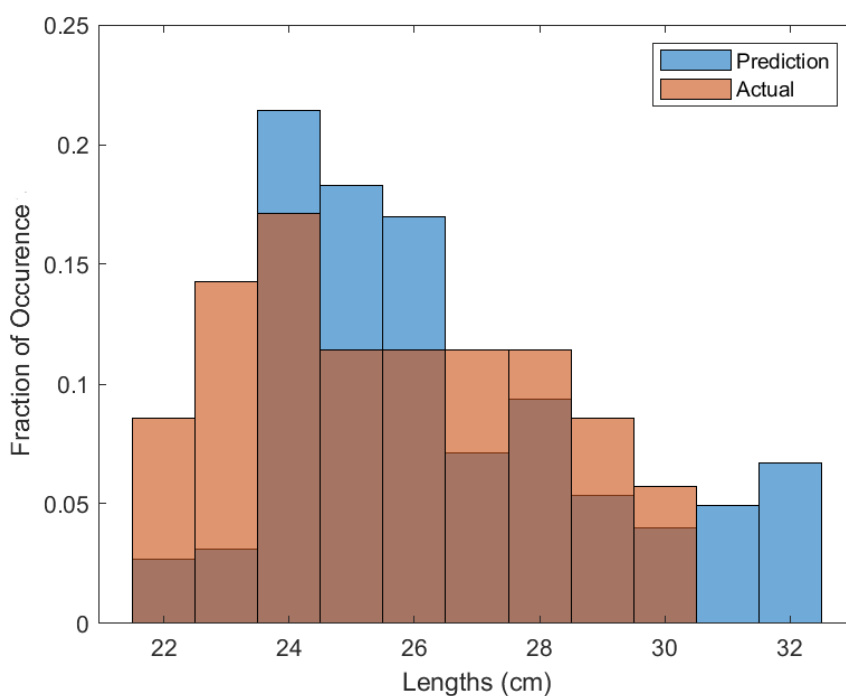
شکل ۴-۱۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



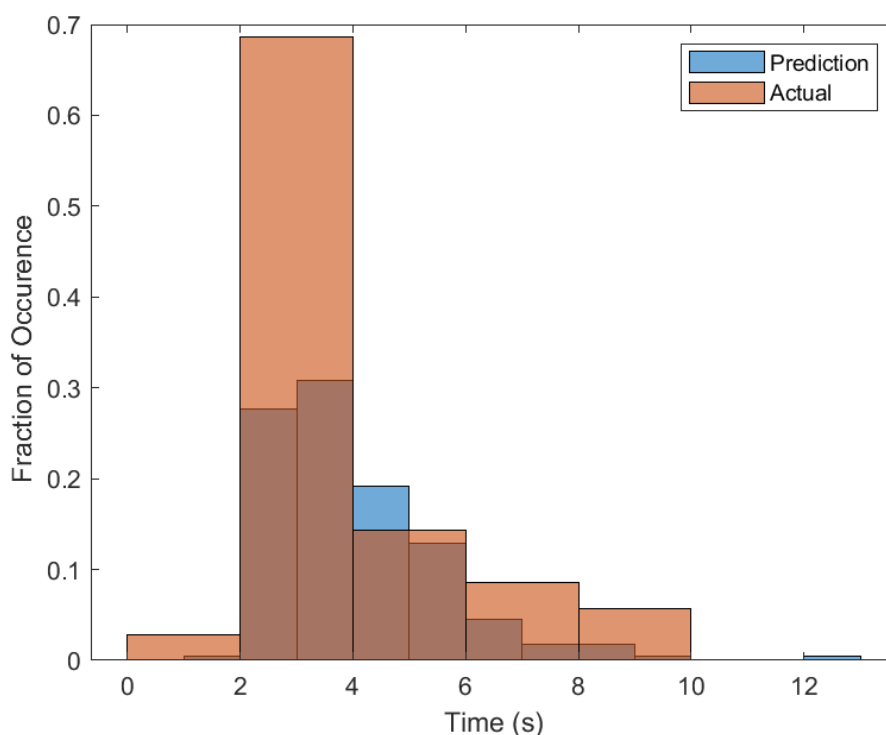
شکل ۴-۱۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



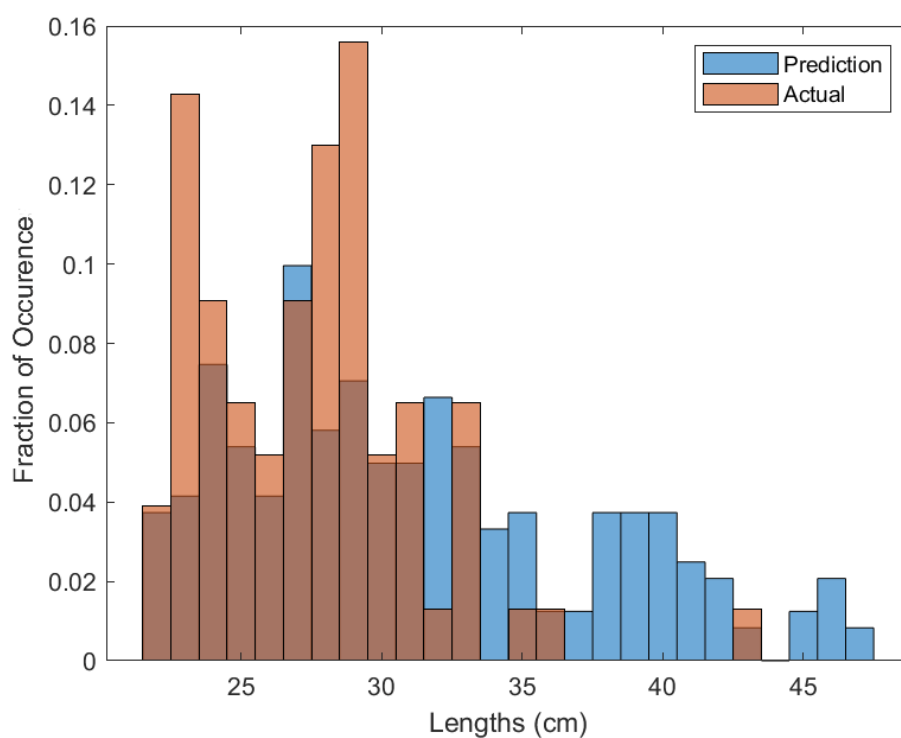
شکل ۴-۱۳ هیستوگرام زمان جابجایی های نامقید به سمت پایین برای داده های تجربی و مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



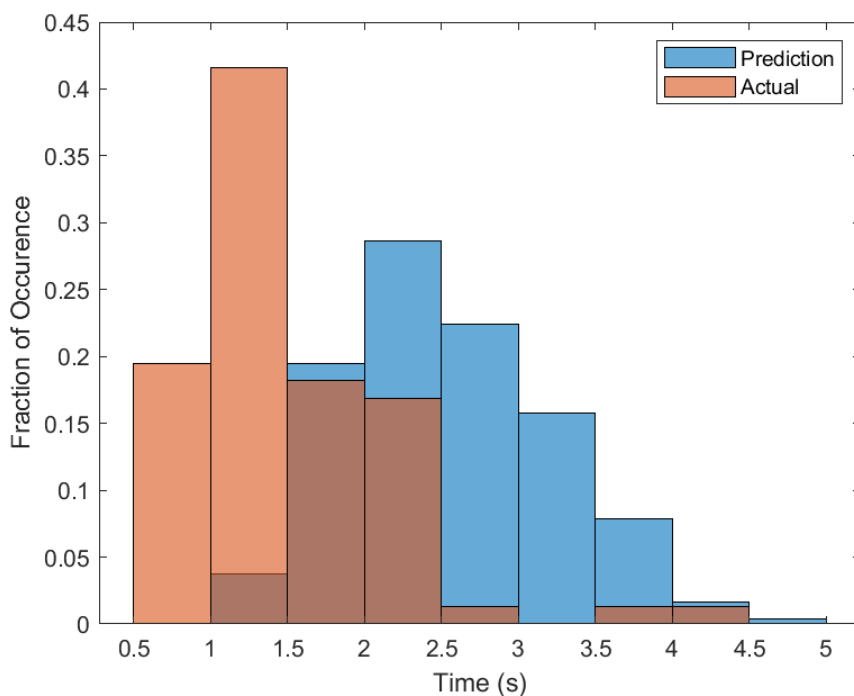
شکل ۴-۱۴ هیستوگرام مسافت جابجایی های نامقید به سمت بالا برای داده های تجربی و مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



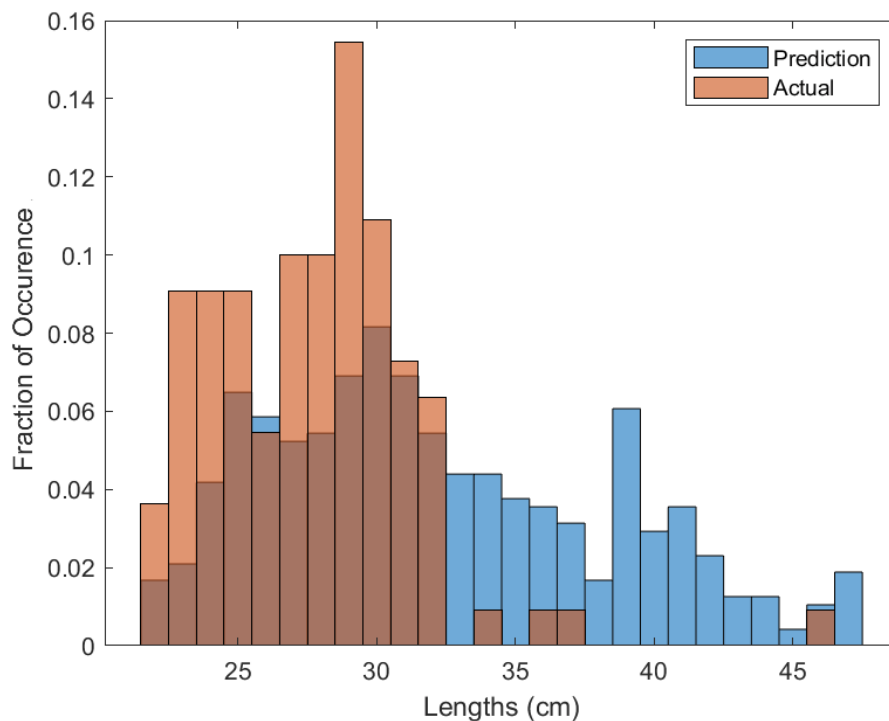
شکل ۴-۱۵ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



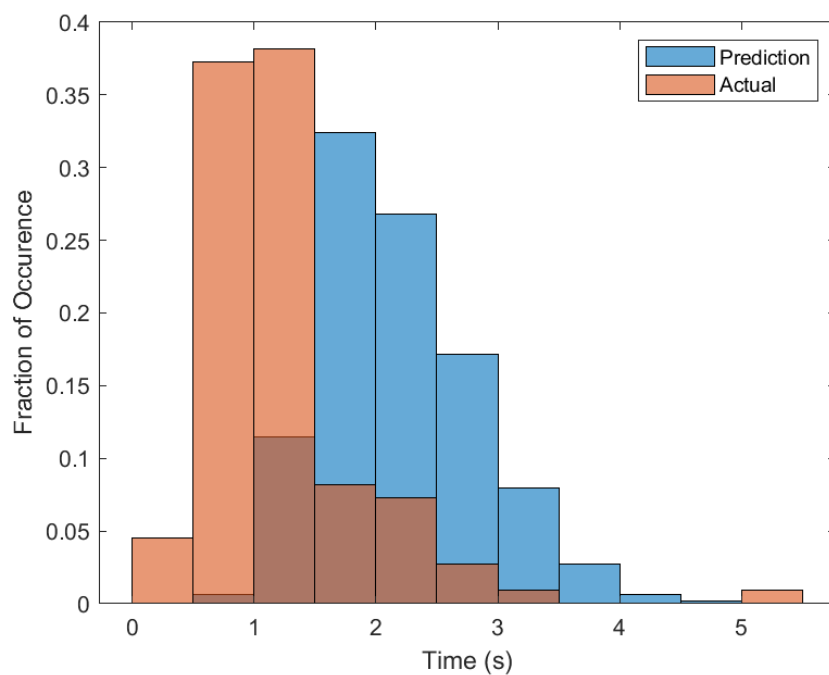
شکل ۴-۱۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



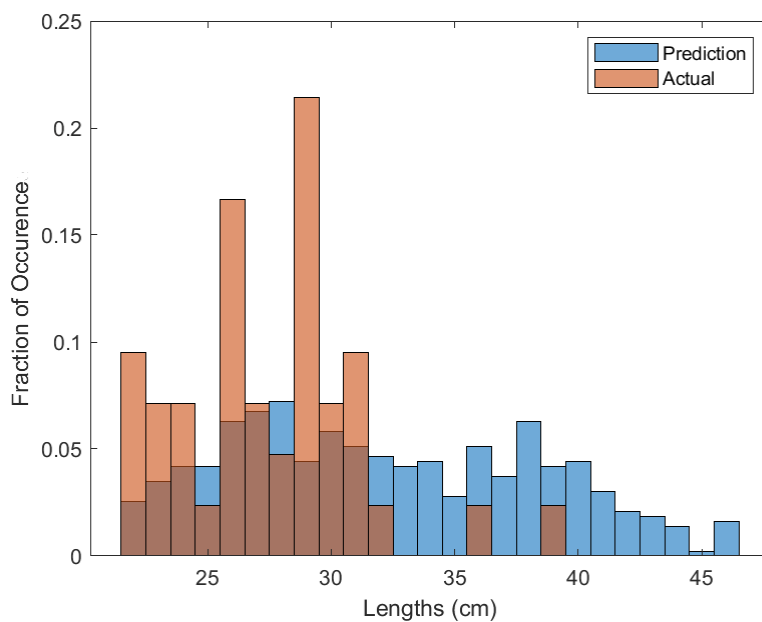
شکل ۴-۱۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



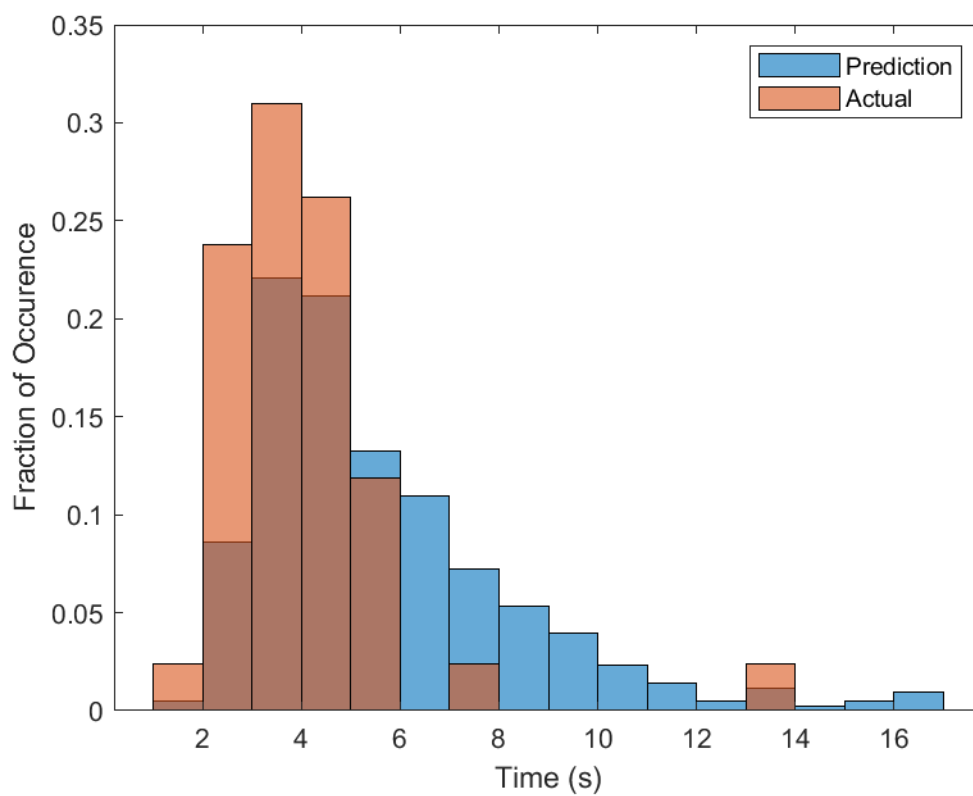
شکل ۴-۱۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



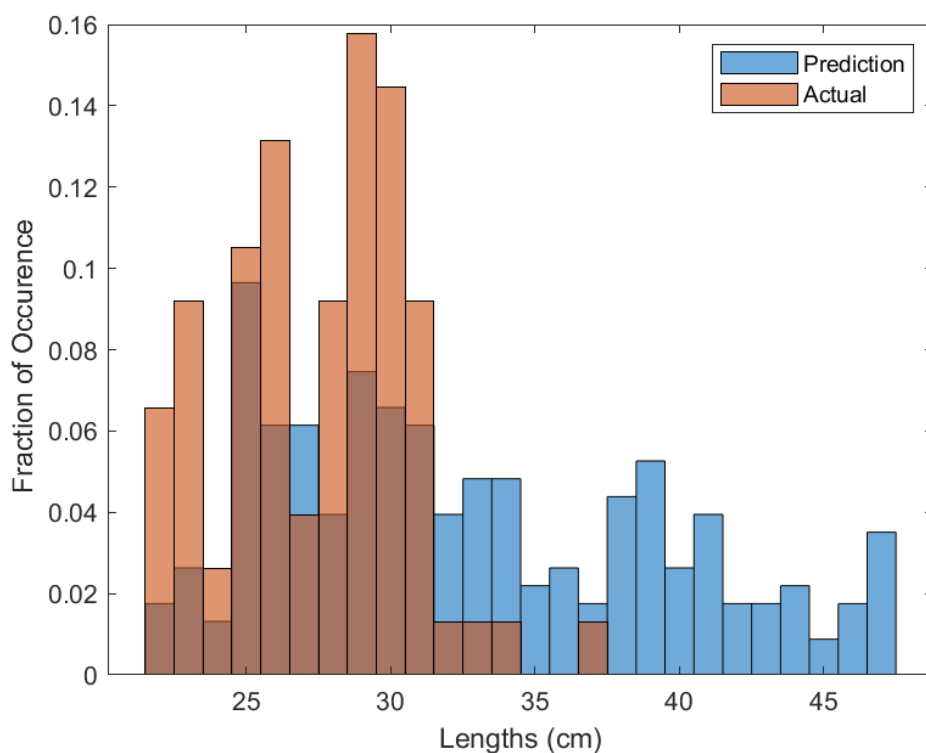
شکل ۴-۱۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



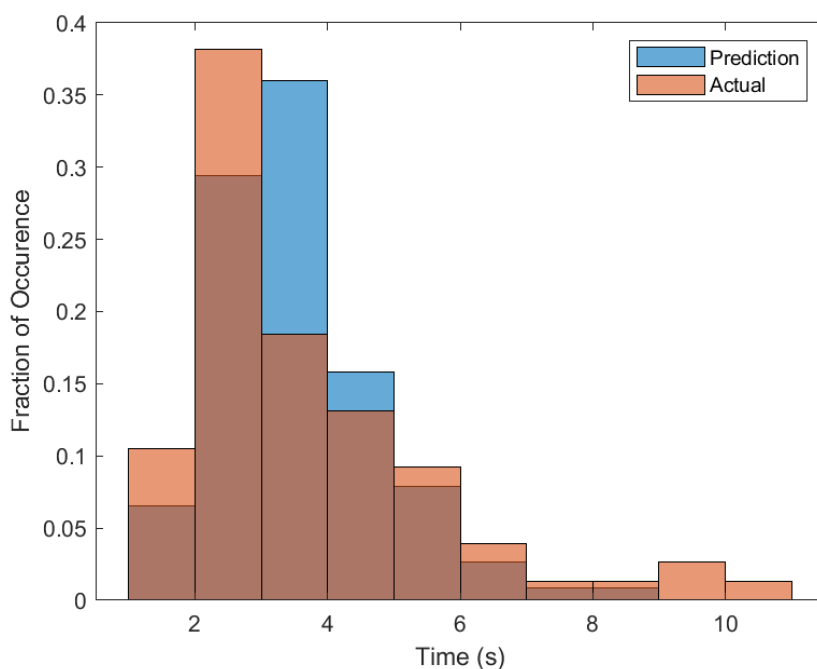
شکل ۴-۲۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



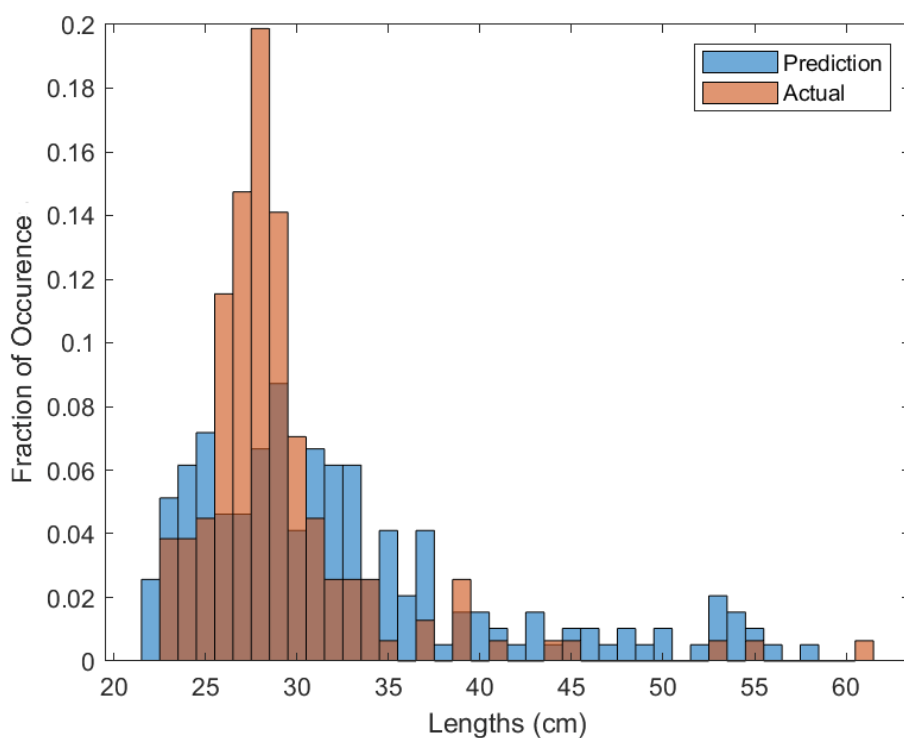
شکل ۴-۲۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



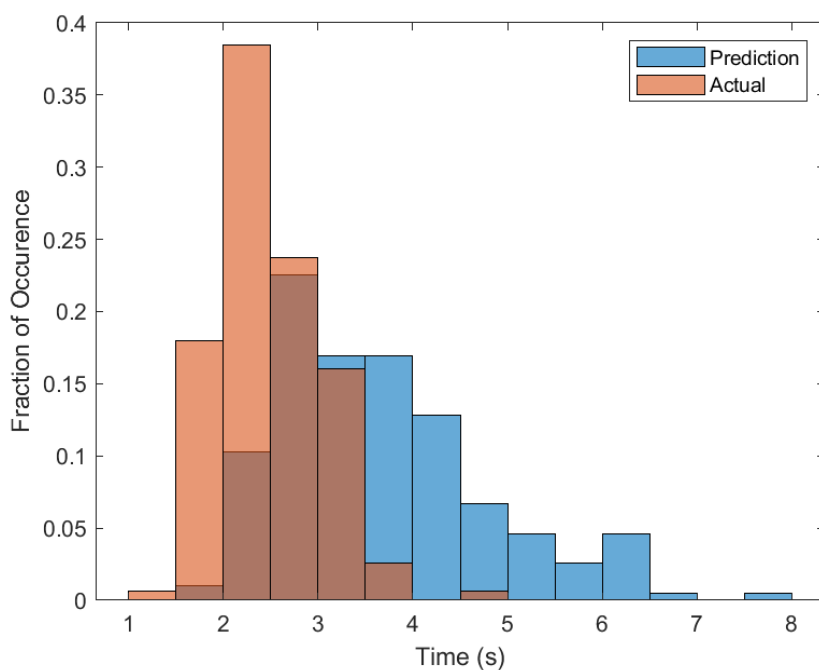
شکل ۴-۲۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



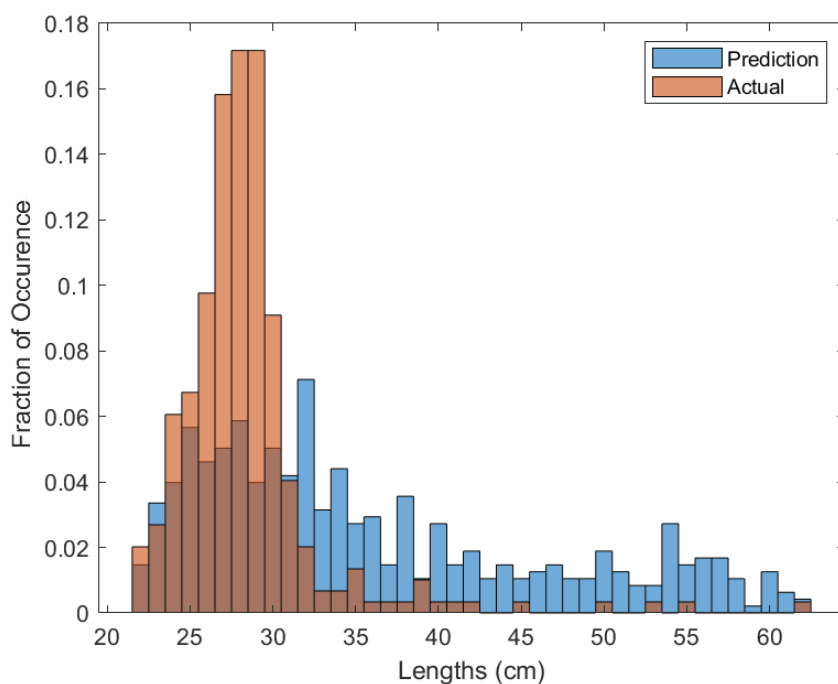
شکل ۴-۲۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



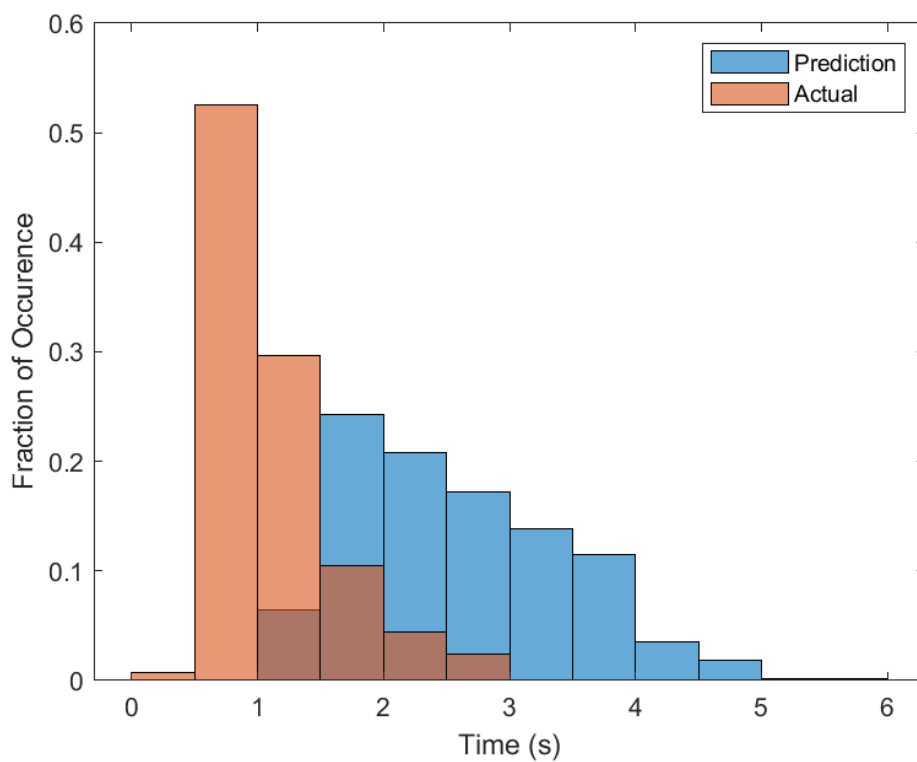
شکل ۴-۲۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



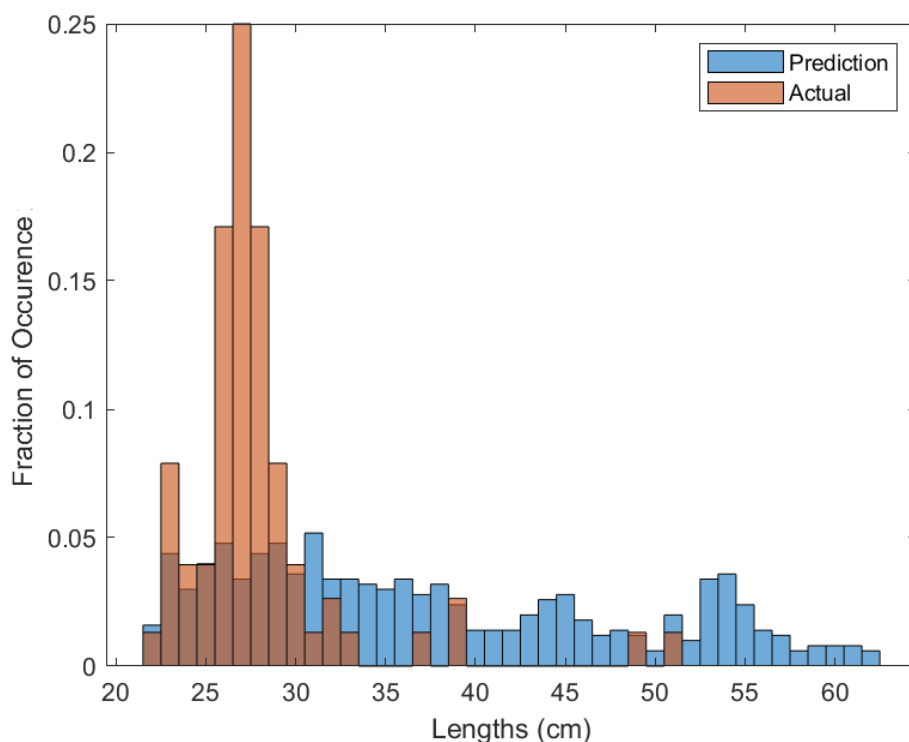
شکل ۴-۲۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



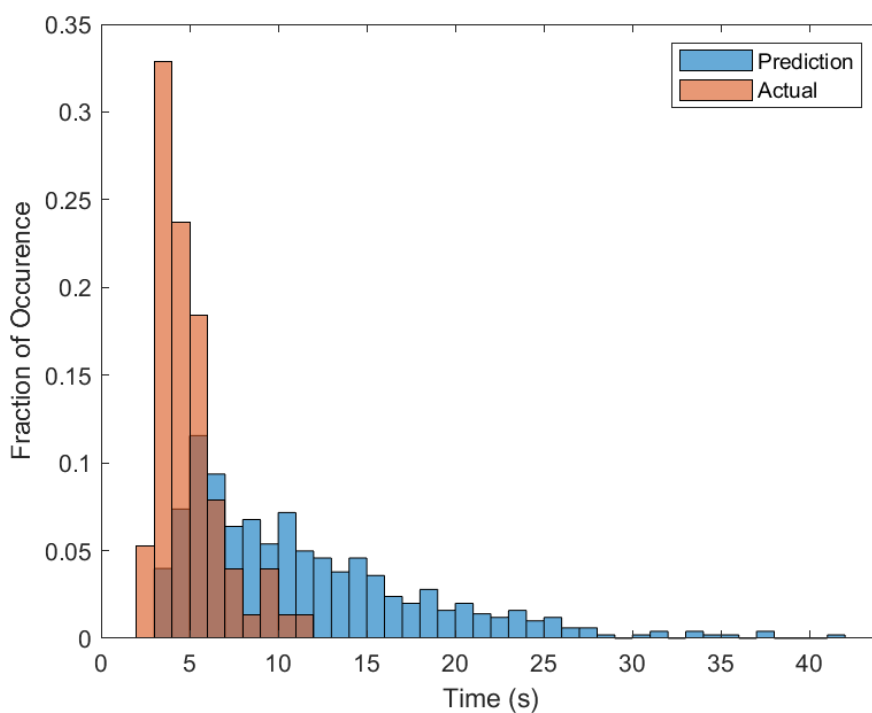
شکل ۴-۲۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



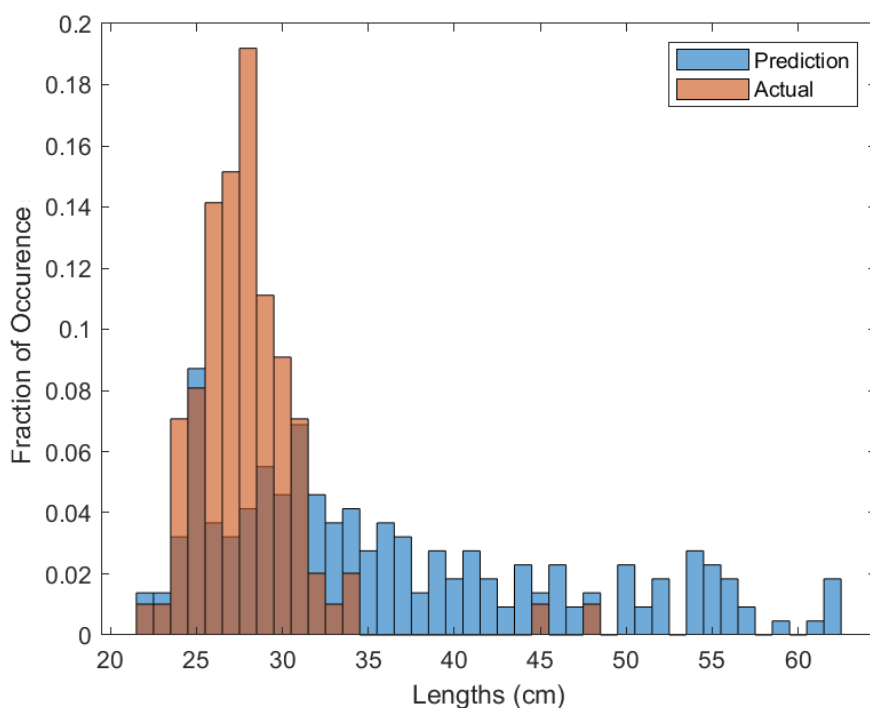
شکل ۴-۲۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



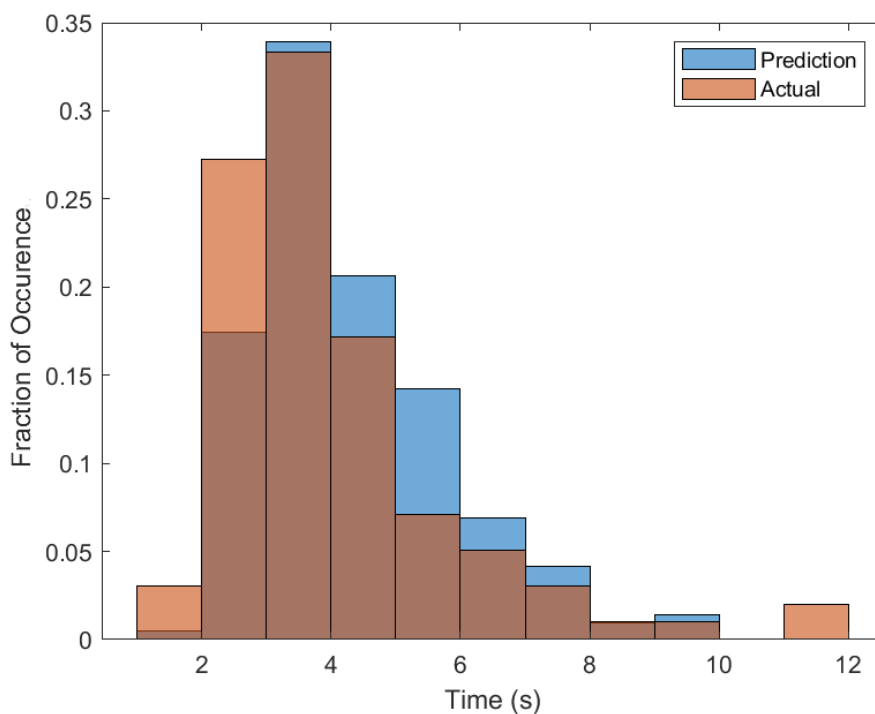
شکل ۴-۲۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



شکل ۴-۲۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



شکل ۴-۳۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



شکل ۴-۳۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)

۴-۷ بررسی نتایج روش زنجیره‌های مارکوف دوفازی

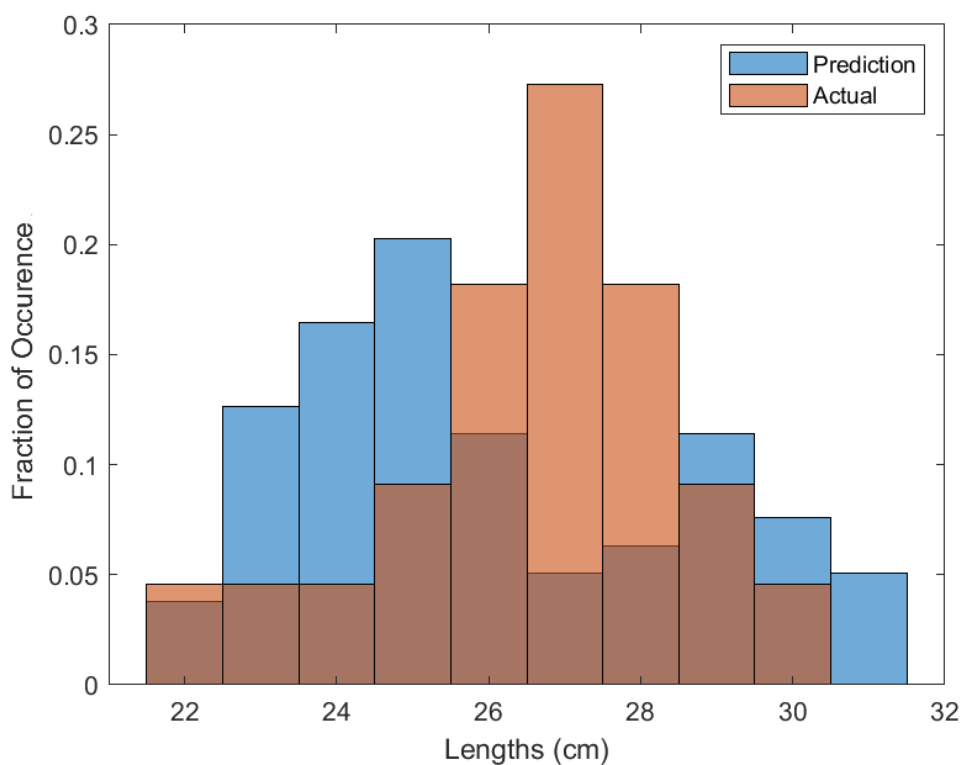
مدل‌سازی به روش زنجیره‌های مارکوف دوفازی بر طبق جزئیات گفته شده انجام شده است و نتایج آن در جداول ۴-۹ تا ۴-۱۳ و نمودارهای زیر آمده‌اند.

لازم به ذکر است که روند مدل‌سازی، مطابق متد بیان شده در بخش ۳-۷ می‌باشد. اولین بررسی مربوط به زمان جابجایی‌های مقید (صرف نظر از به سمت پایین و یا بالا) است. اولین نکته‌ای که از داده‌های تجربی مشخص می‌شود، این است که در صورت سیال‌سازی، نوع ذره درشت در بستر کمترین تاثیر را بر میانگین زمان جابجایی‌های مقید گذاشته است. نکته دیگر آن که همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش سرعت افزوده سیال‌سازی، میانگین زمان جابجایی‌ها نیز کاهش می‌یابد. نکته قابل بیان دیگر آن است که در صورت سیال‌سازی، در جابجایی‌های مقیدی که بستر آن‌ها ماسه درشت است، سیال‌سازی بهتری را شاهد هستیم زیرا ذره درشت بستر، سرعت بالاتر و میانگین زمان کمتری را در هر جابجایی سپری کرده است. همچنین در رابطه با تفاوت میان داده‌های تجربی و مدل، می‌توان به این مهم اشاره کرد که در همه موارد، میانگین زمان جابجایی‌های مقید و به سمت پایین بدست آمده از مدل، مقدار بالاتری (کمتر از ۲ برابر) از داده‌های تجربی است. این موضوع در مورد جابجایی‌های نامقید نیز صادق است.

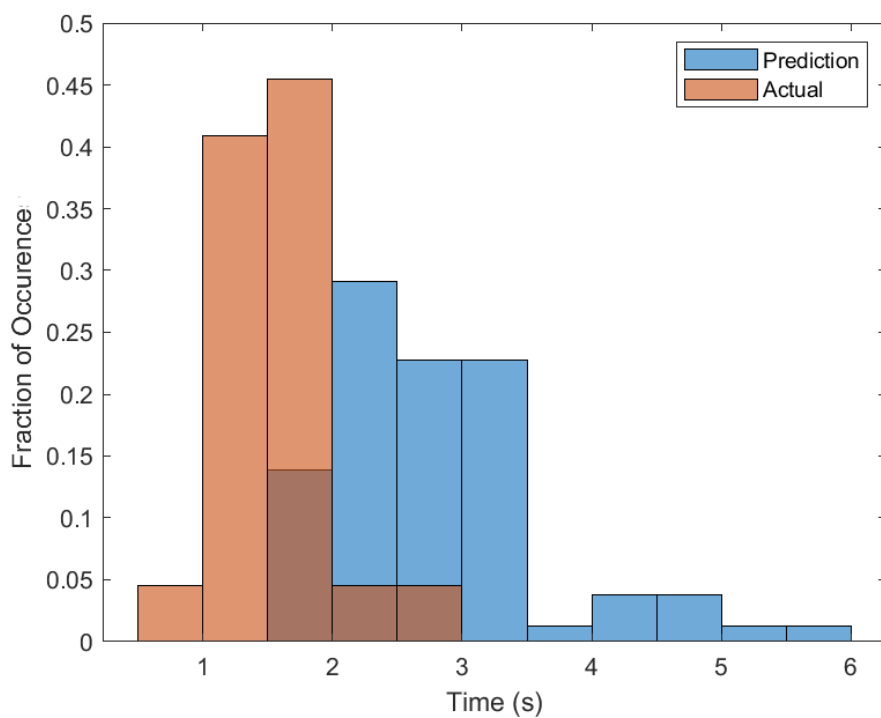
با دقت در نمودارهای هیستوگرام برای بررسی تفاوت در مدل‌های مبتنی بر زنجیره‌های مارکوف دوفازی می‌تواند به نکات زیر رسید:

- این روش مدل‌سازی، توانایی مدل کردن مسافت طی شده در جابجایی‌ها را تا حد بالایی دارد و تقریباً در تمامی موارد، مستقل از مقید و یا نامقید بودن جابجایی، توزیع یکسانی را نسبت به داده‌های تجربی ارائه می‌دهد.

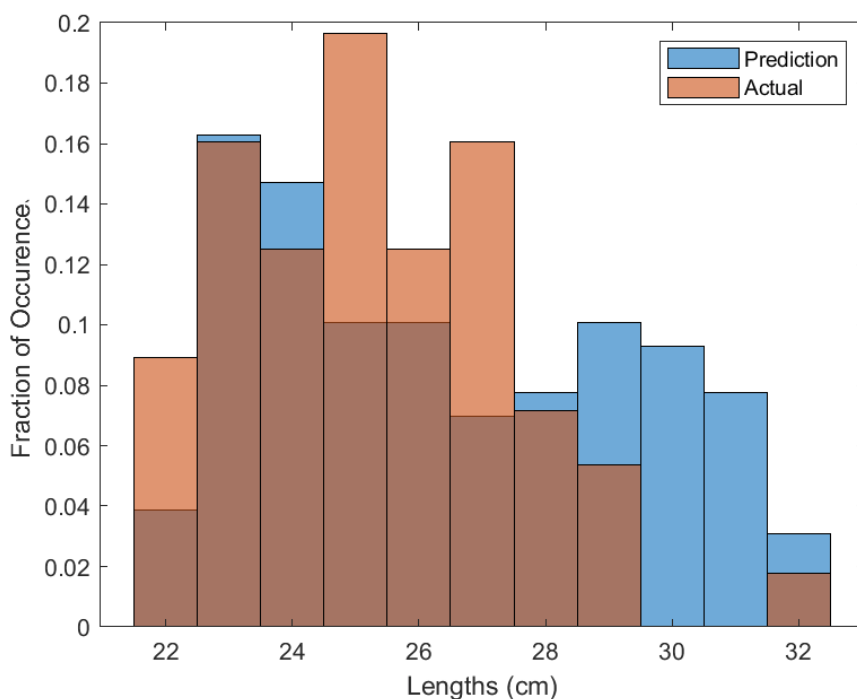
میانگین زمان جابجایی‌های طی شده بدست آمده از مدل، مقادیر بالاتری نسبت به داده‌های تجربی متناظر هستند.



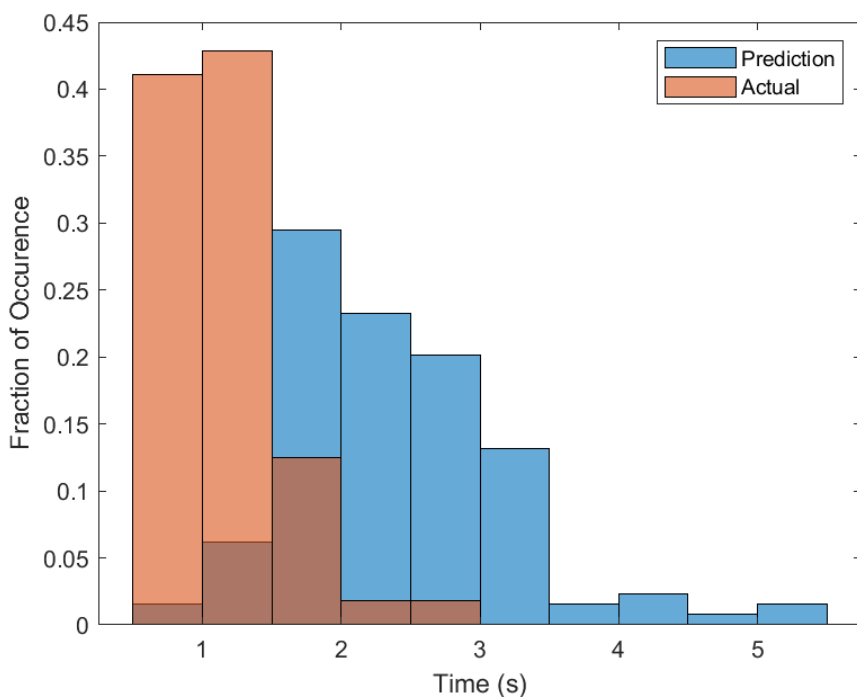
شکل ۴-۳۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



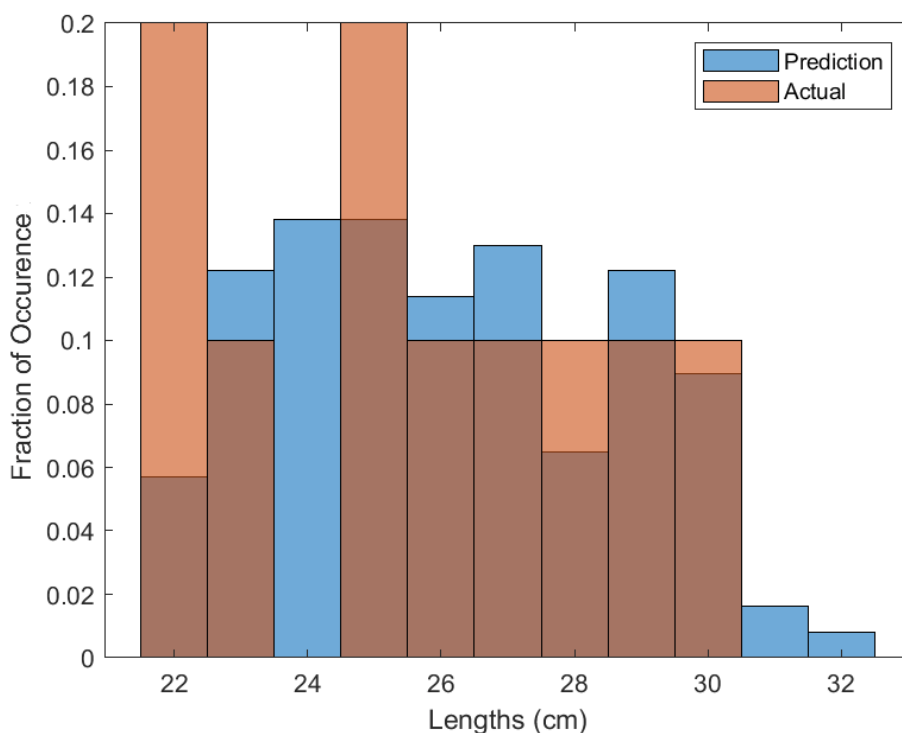
شکل ۴-۳۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



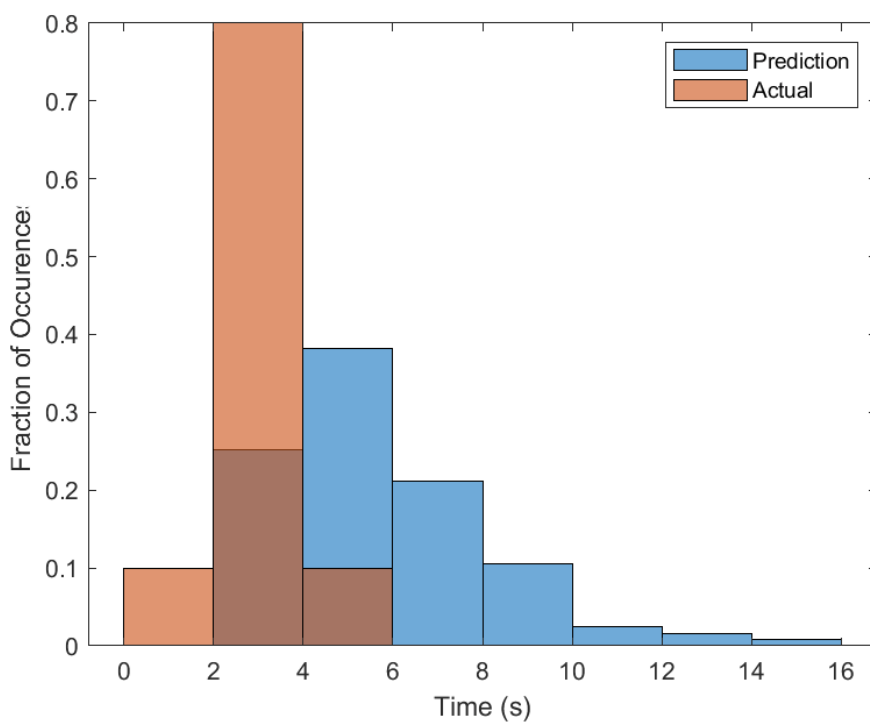
شکل ۴-۳۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



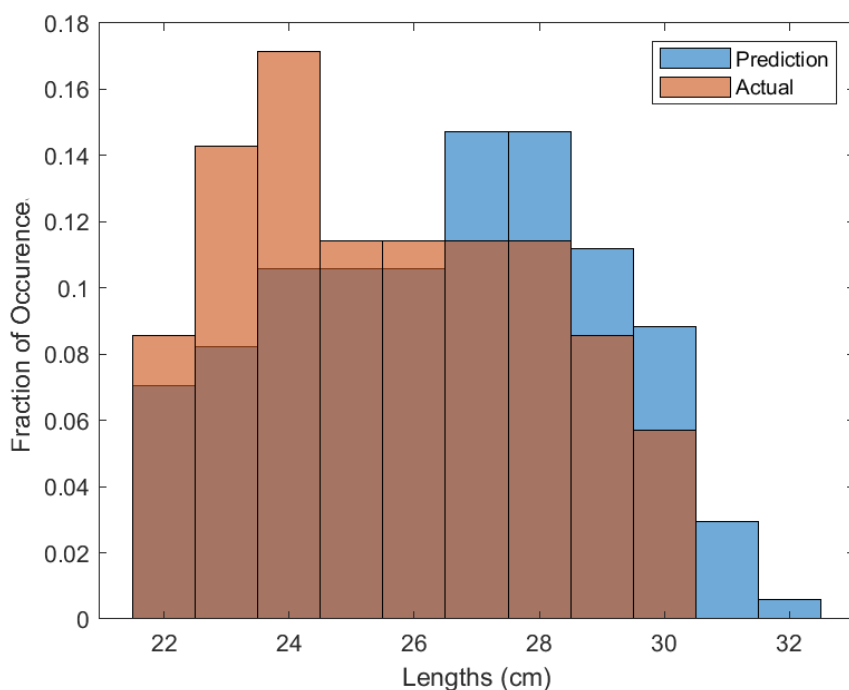
شکل ۴-۳۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



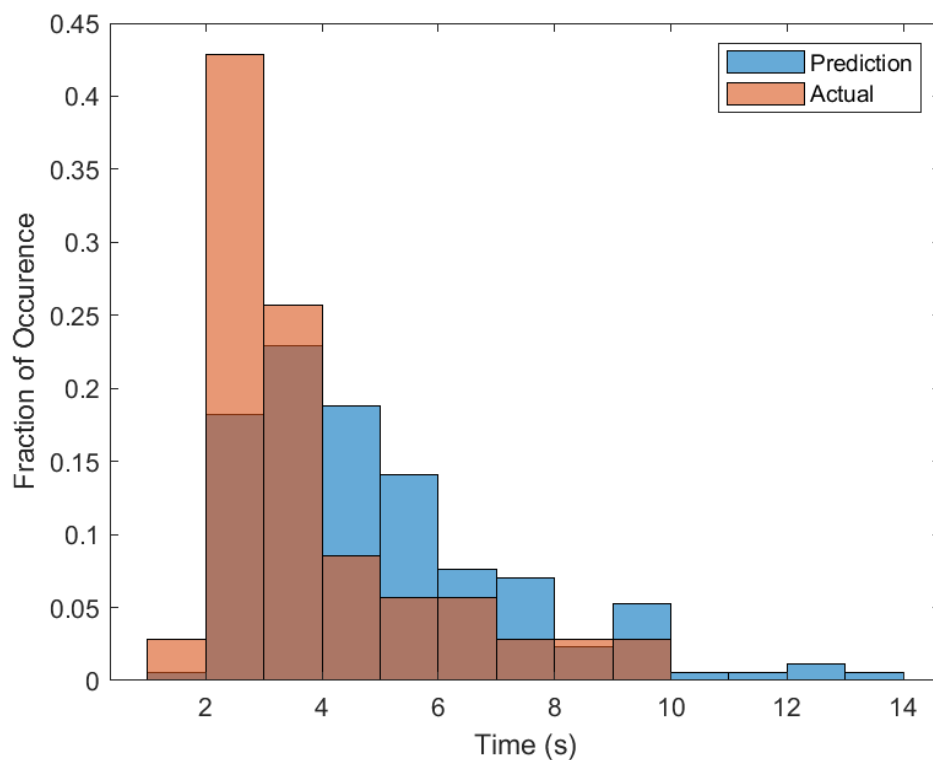
شکل ۴-۳۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



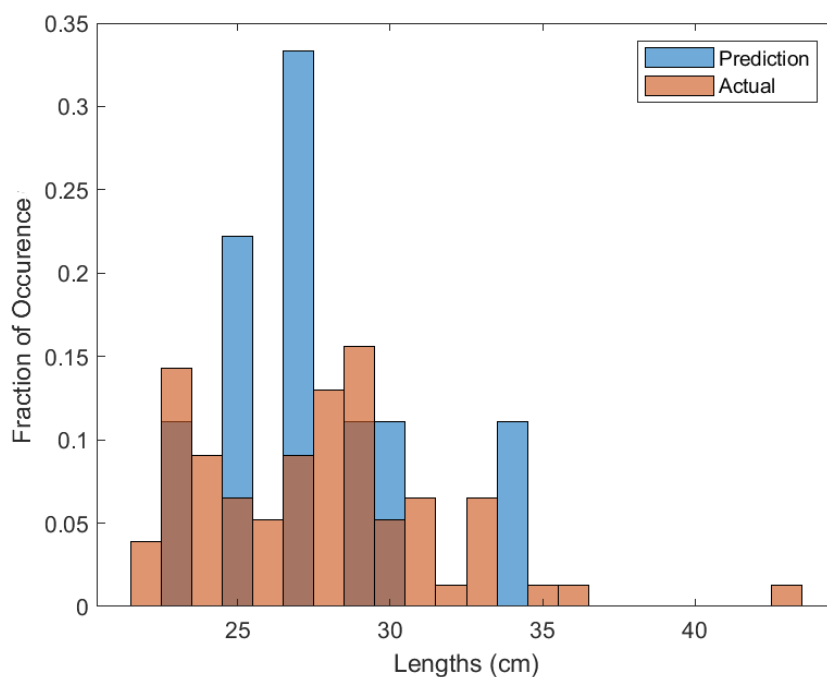
شکل ۴-۳۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



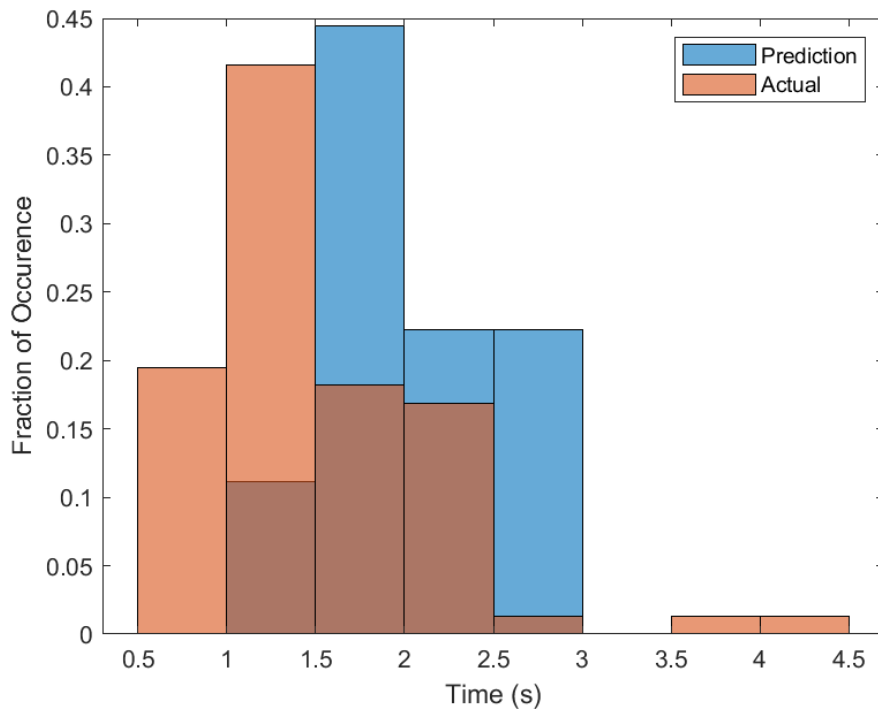
شکل ۴-۳۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



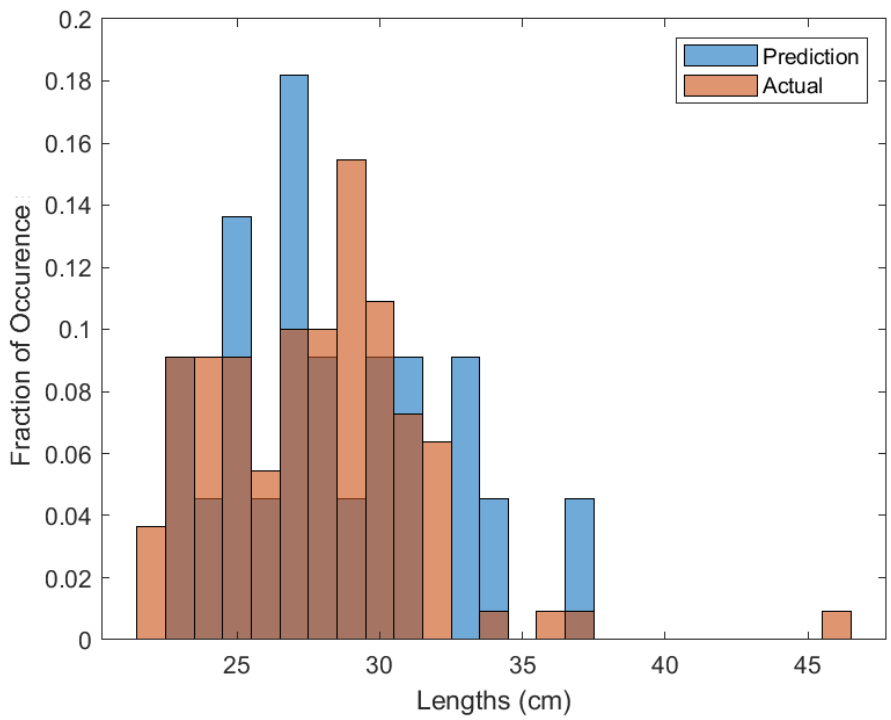
شکل ۴-۳۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



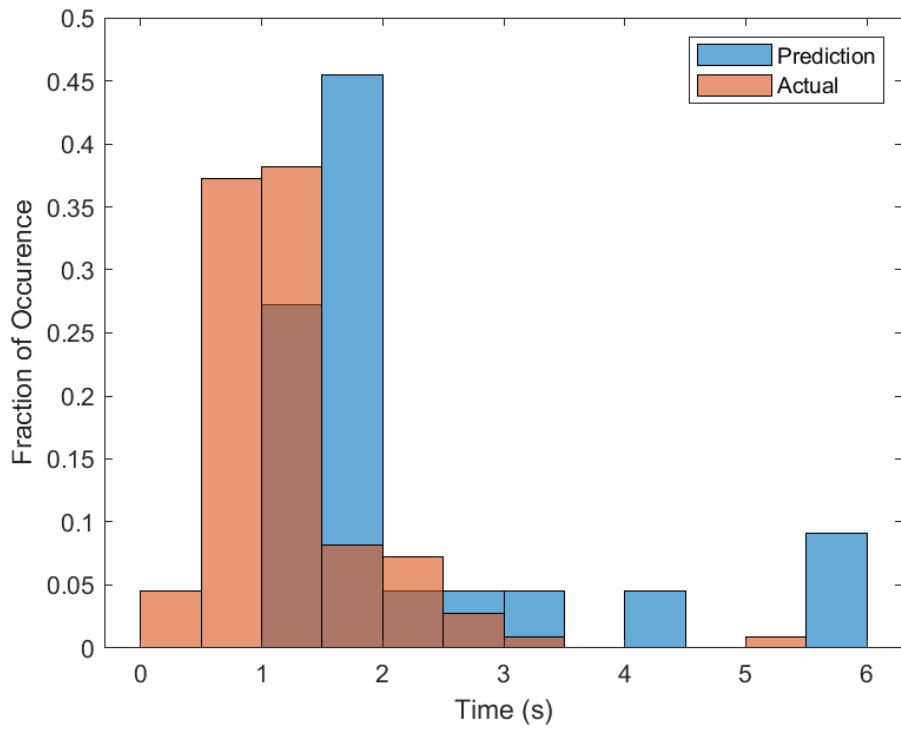
شکل ۴-۴۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



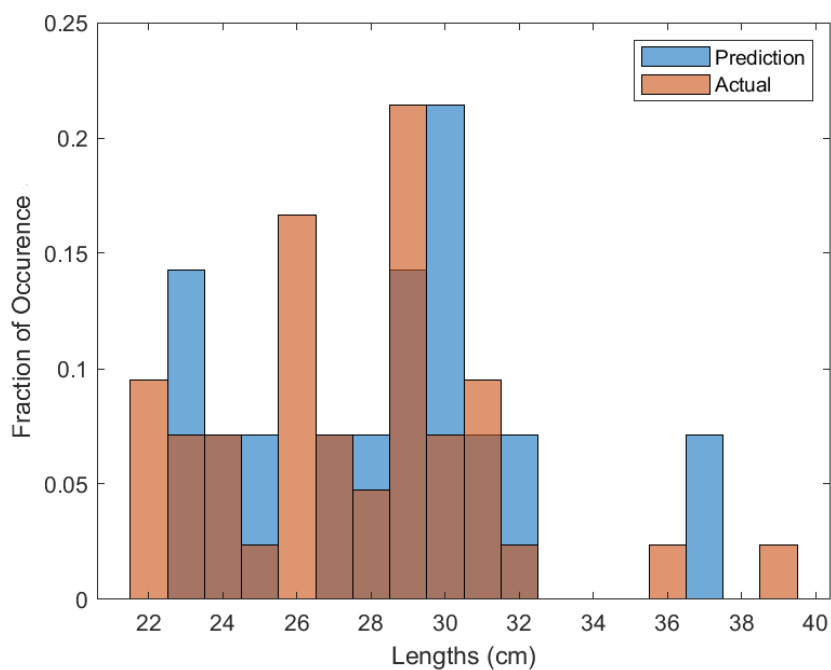
شکل ۴-۴۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



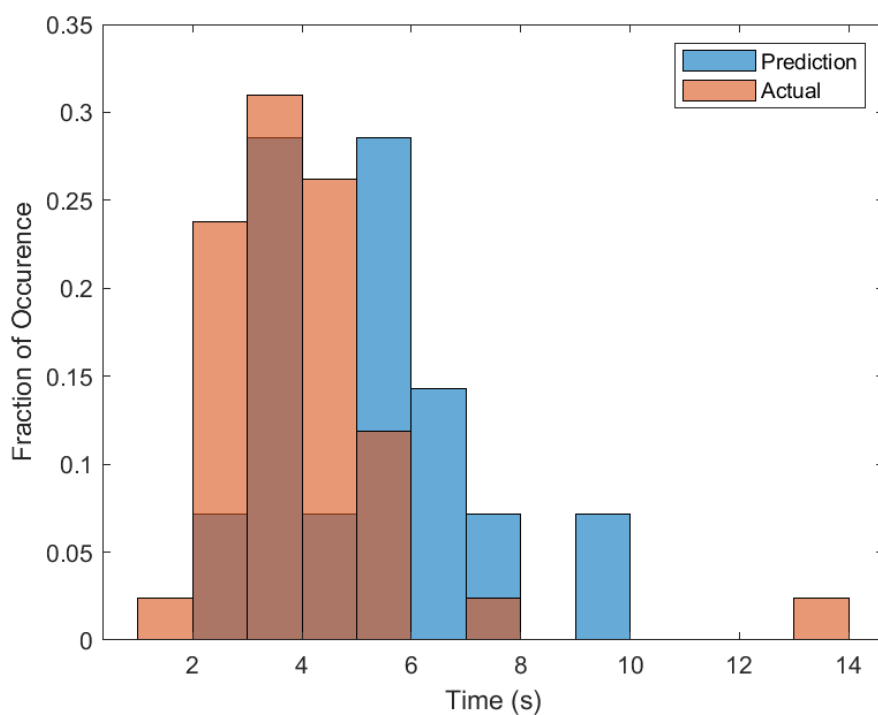
شکل ۴-۲۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



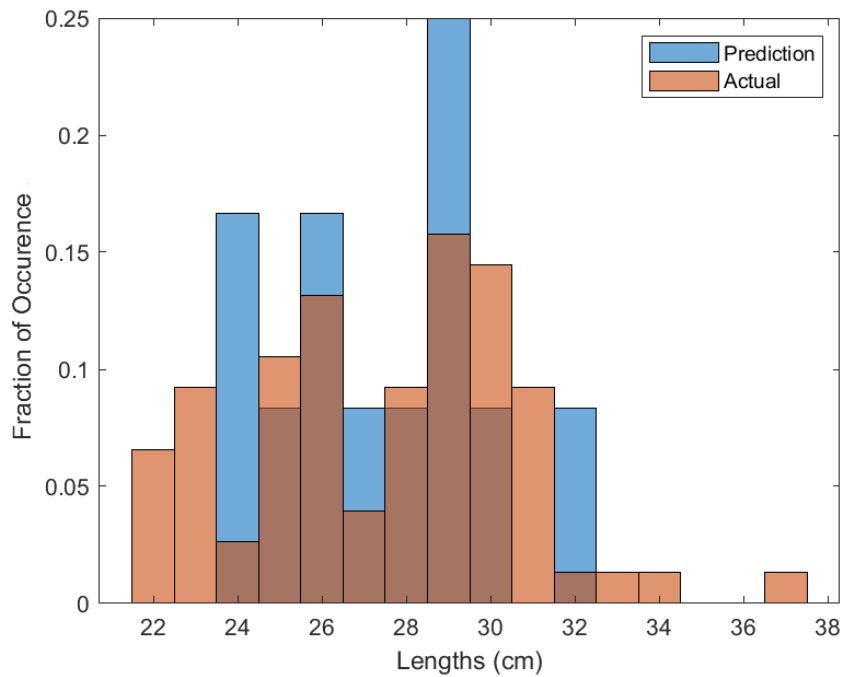
شکل ۴-۲۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



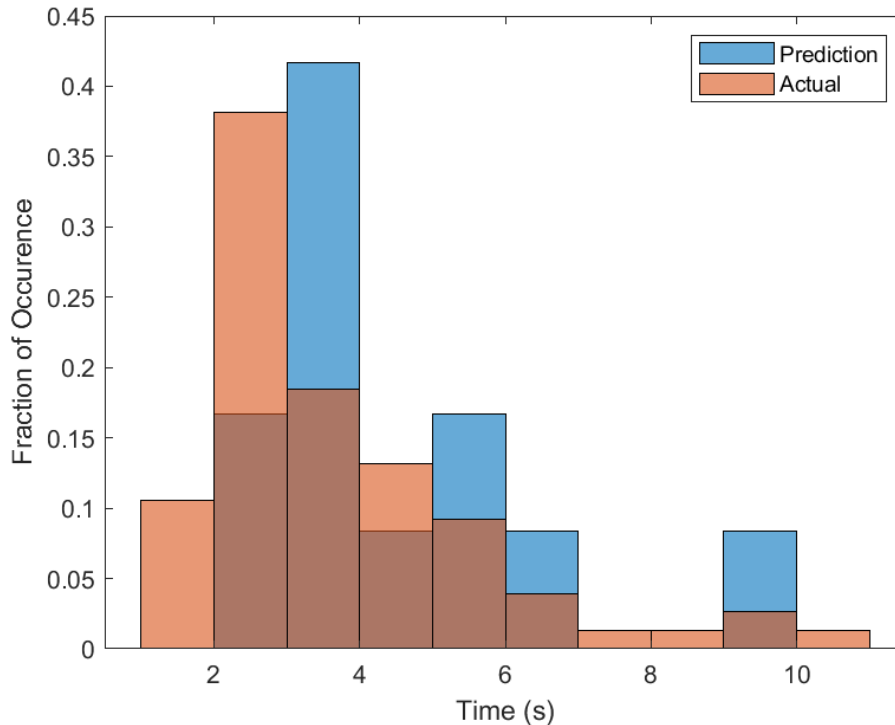
شکل ۴-۴۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



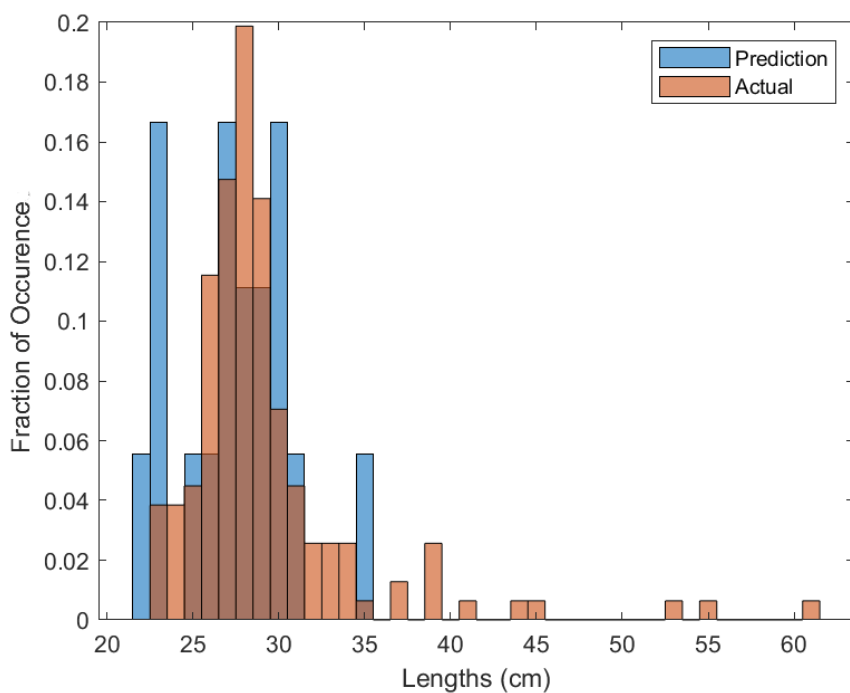
شکل ۴-۴۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



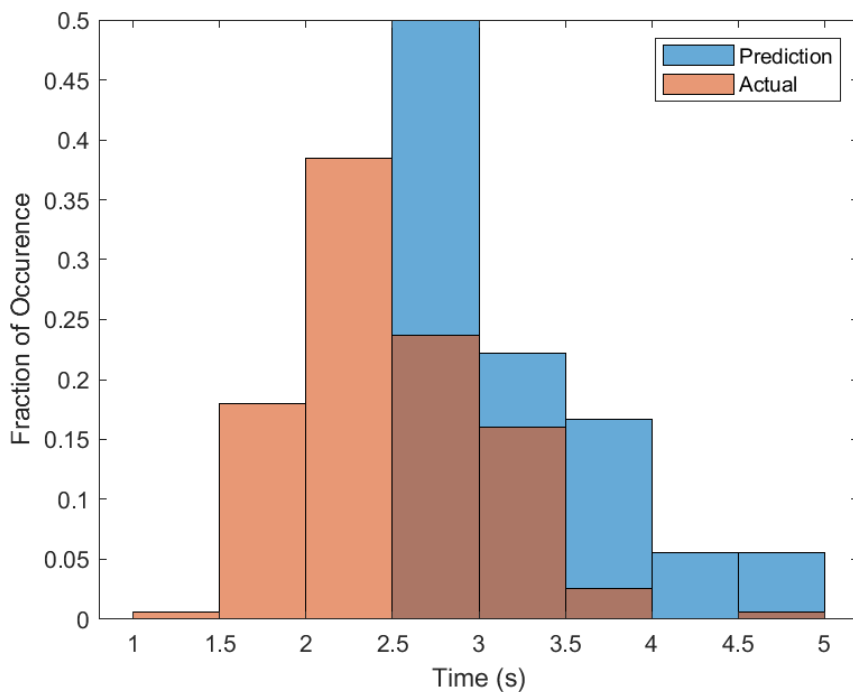
شکل ۴-۴۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



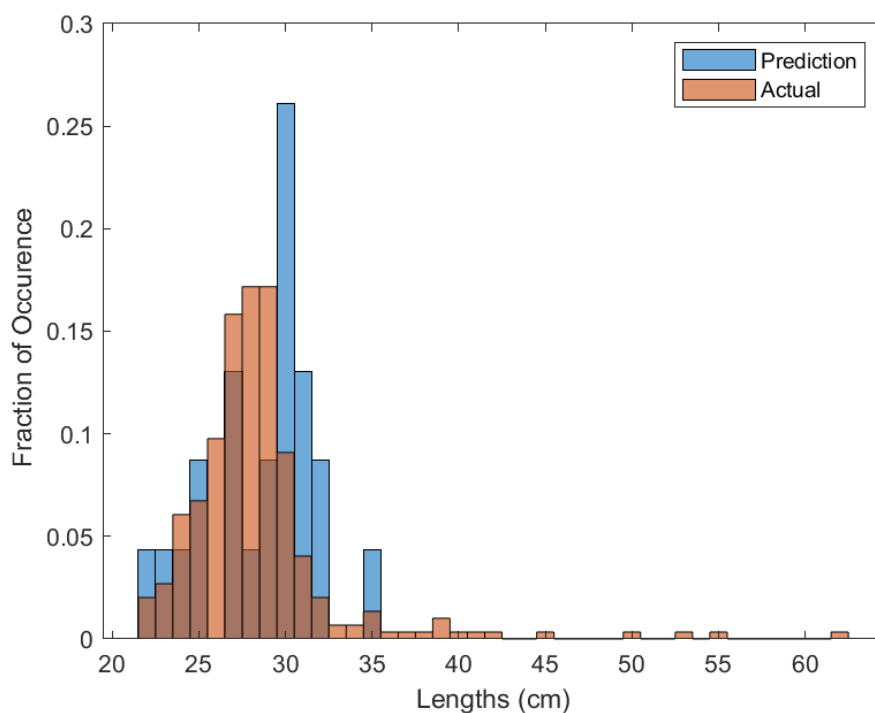
شکل ۴-۴۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



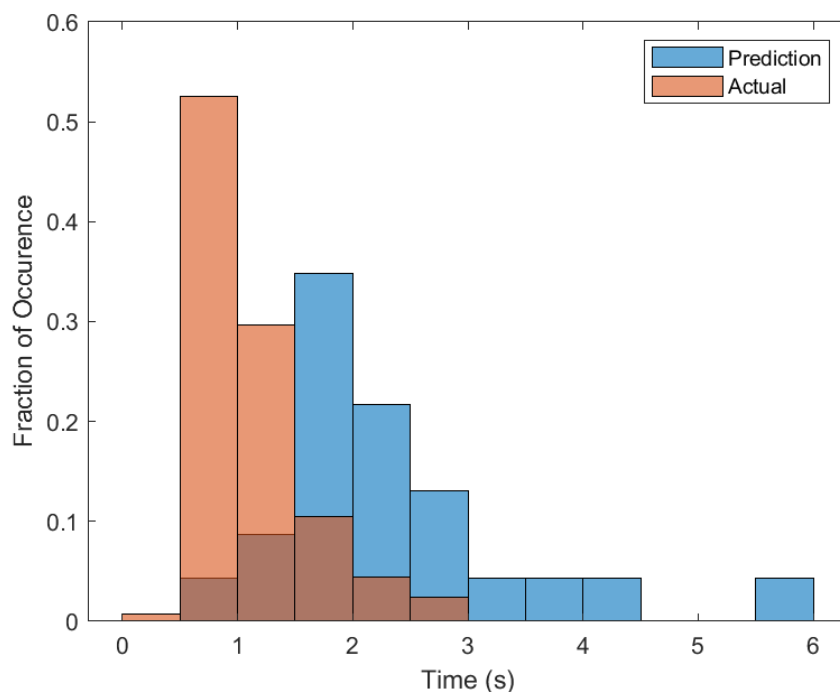
شکل ۴-۴۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



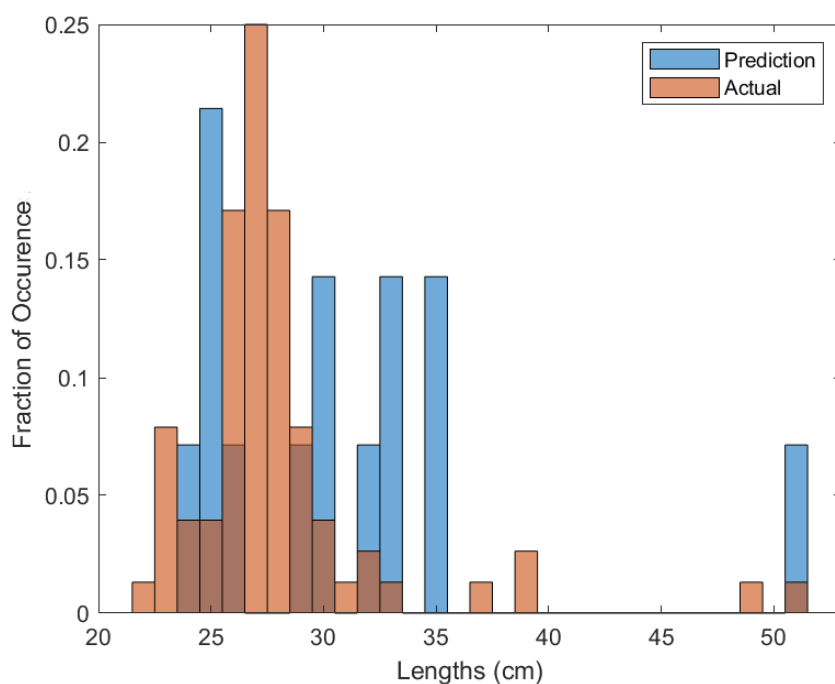
شکل ۴-۴۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



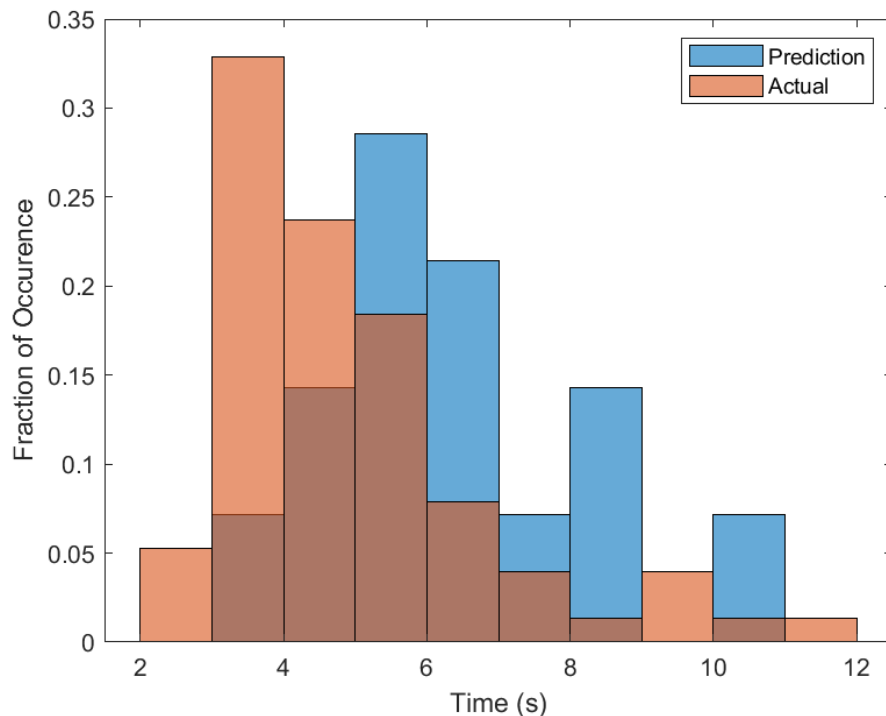
شکل ۴-۵۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



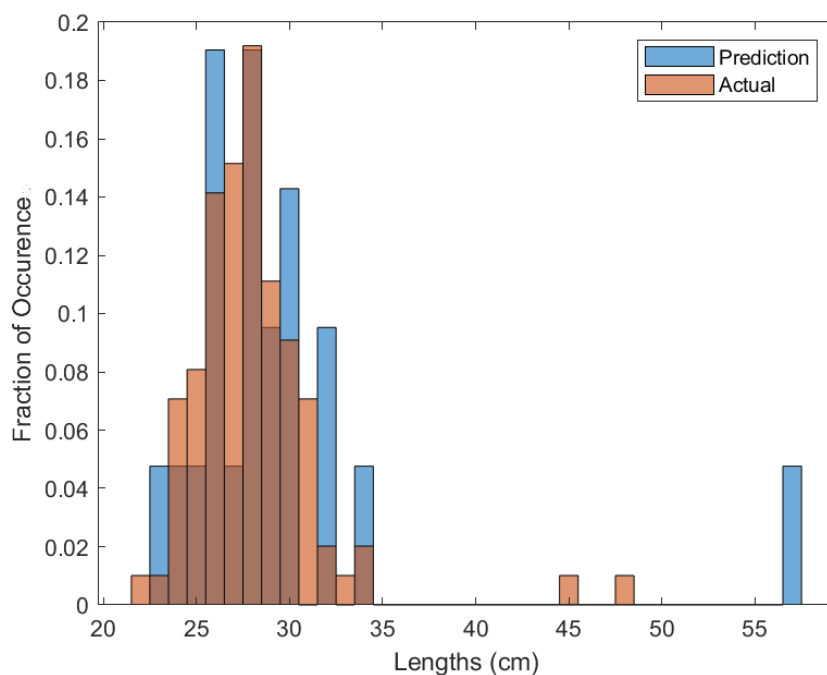
شکل ۴-۵۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



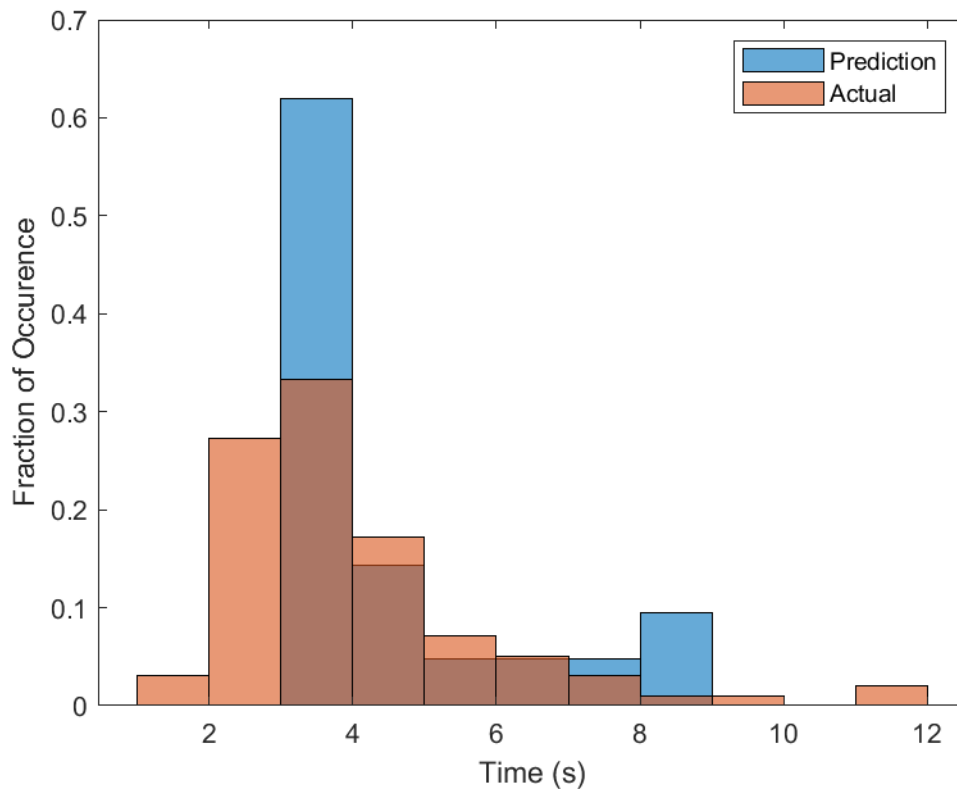
شکل ۴-۵۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



شکل ۴-۵۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



شکل ۴-۵۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



شکل ۴-۵۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)

۴-۸ بررسی نتایج روش زنجیره‌های مارکوف سه فازی

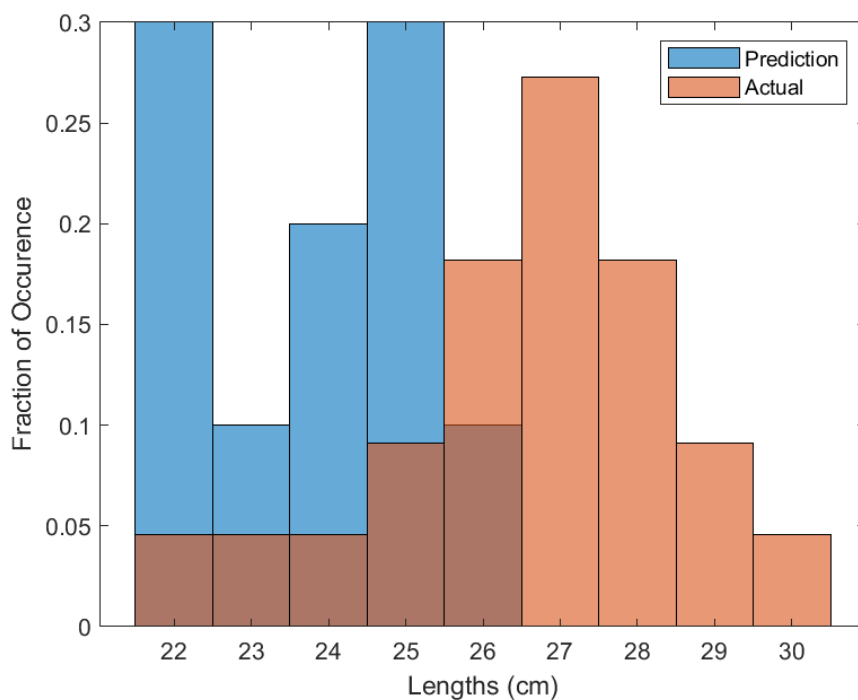
مدل‌سازی به روش زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی بر طبق جزئیات گفته شده انجام شده است و نتایج آن در جداول ۴-۱۴ تا ۴-۱۸ و نمودارهای زیر آمده‌اند.

لازم به ذکر است که مدل‌سازی نتایج عنوان شده در این بخش، مطابق با روند مدل‌سازی بیان شده در بخش ۳-۷ می‌باشد. مشابه با دیگر مدل‌های بررسی شده، از داده‌های تجربی مشخص می‌شود که نوع ذره در شت در بستر کمترین تاثیر را بر میانگین زمان جابجایی‌های مقید گذاشته است. همچنین با افزایش سرعت افزوده سیال‌سازی، میانگین زمان جابجایی‌ها نیز کاهش می‌یابد. در صورت سیال‌سازی، در جابجایی‌های مقیدی که بستر آن‌ها ماسه در شت است، سیال‌سازی بهتری را شاهد هستیم زیرا ذره در شت بستر، سرعت بالاتر و میانگین زمان کمتری را در هر جابجایی سپری کرده است. همچنین در رابطه با تفاوت میان داده‌های تجربی و مدل، می‌توان به این مهم اشاره کرد که در همه موارد، میانگین زمان جابجایی‌های مقید و به سمت پایین بدست آمده از مدل، مقدار بالاتری (کمتر از ۲ برابر) از داده‌های تجربی است. این موضوع در مورد جابجایی‌های نامقید نیز صادق است.

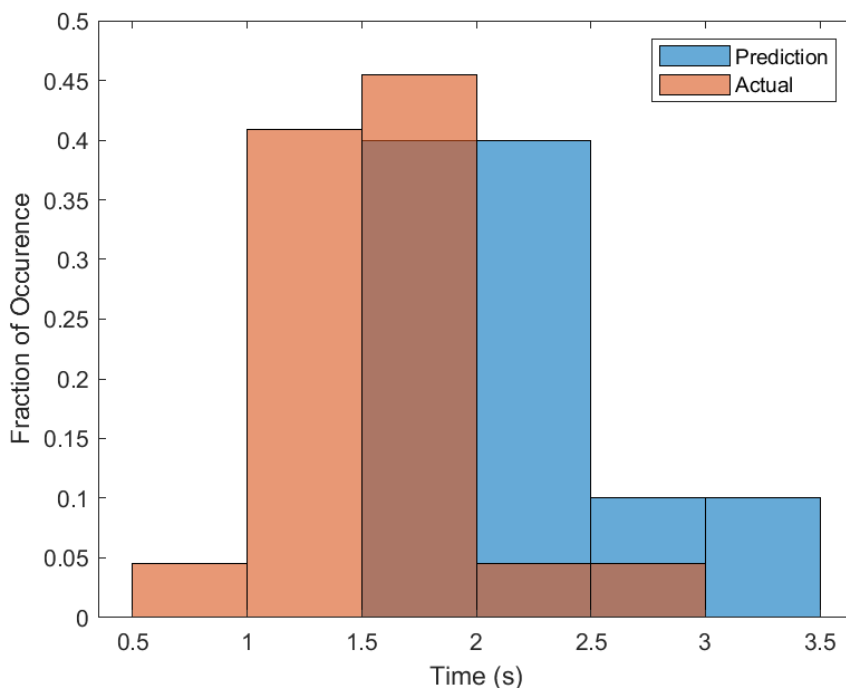
با دقت در نمودارهای هیستوگرام برای بررسی تفاوت در مدل‌های مبتنی بر زنجیره‌های مارکوف دو فازی می‌تواند به نکات زیر رسید:

- این روش مدل‌سازی، توانایی مدل کردن مسافت طی شده در جابجایی‌ها را تا حد بالایی دارد و تقریباً در تمامی موارد، مستقل از مقید و یا نامقید بودن جابجایی، توزیع نسبتاً یکسانی را نسبت به داده‌های تجربی ارائه می‌دهد. البته در برخی از جابجایی‌های مقید، بازه یا الگوی توزیع ارائه شده کاملاً یکسان نیستند.

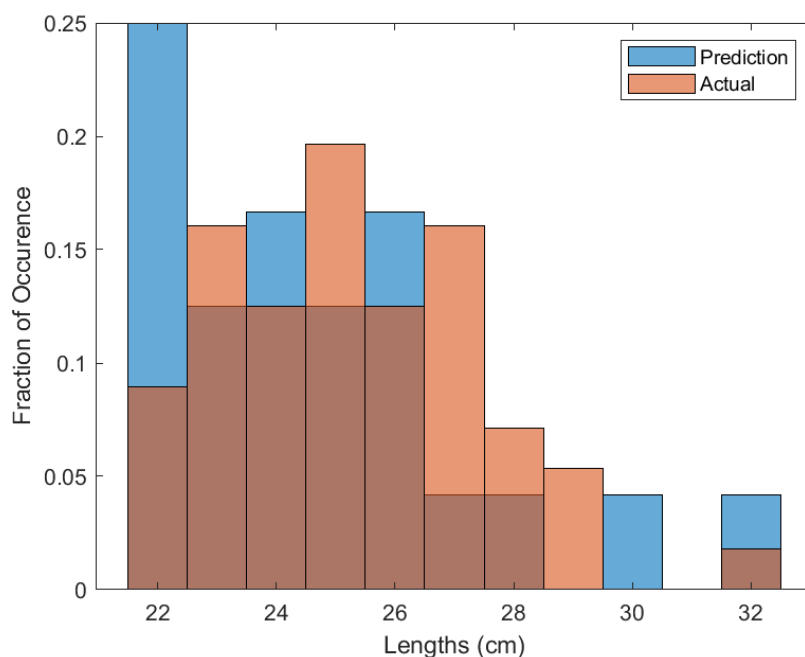
میانگین زمان جابجایی‌های طی شده بدست آمده از مدل، مقادیر بالاتری نسبت به داده‌های تجربی متناظر هستند.



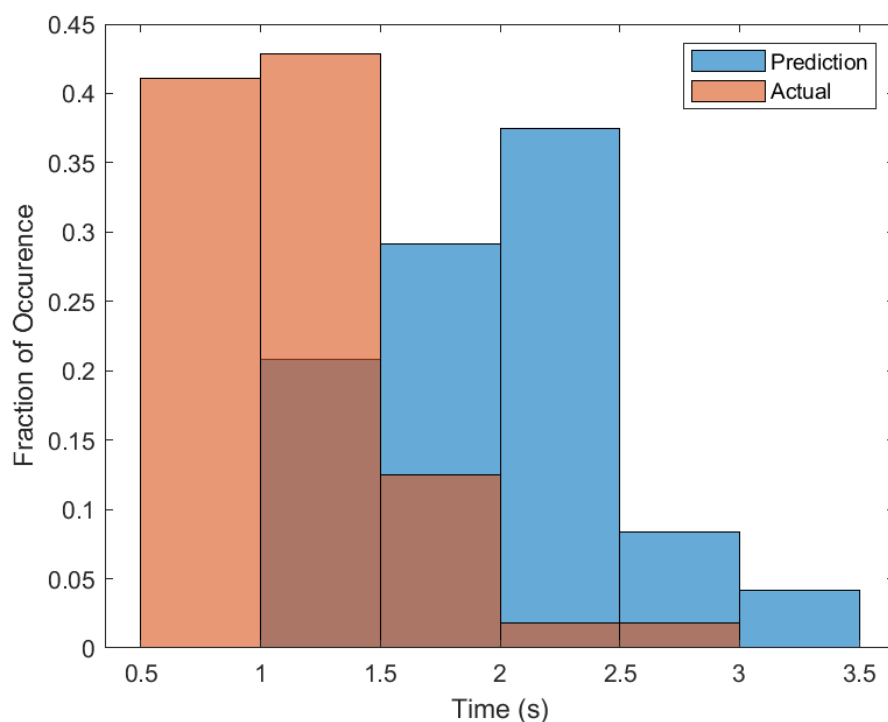
شکل ۴-۵۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



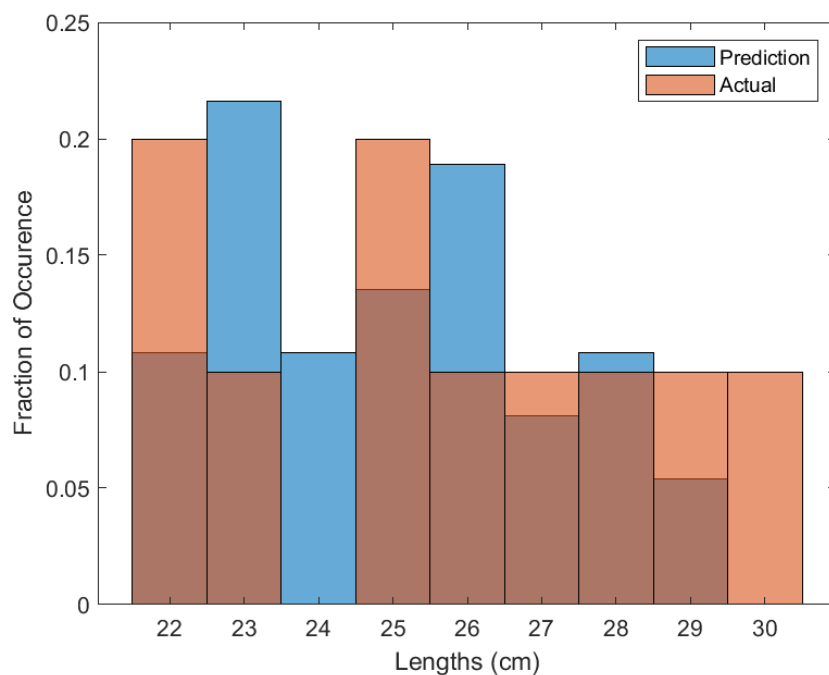
شکل ۴-۵۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



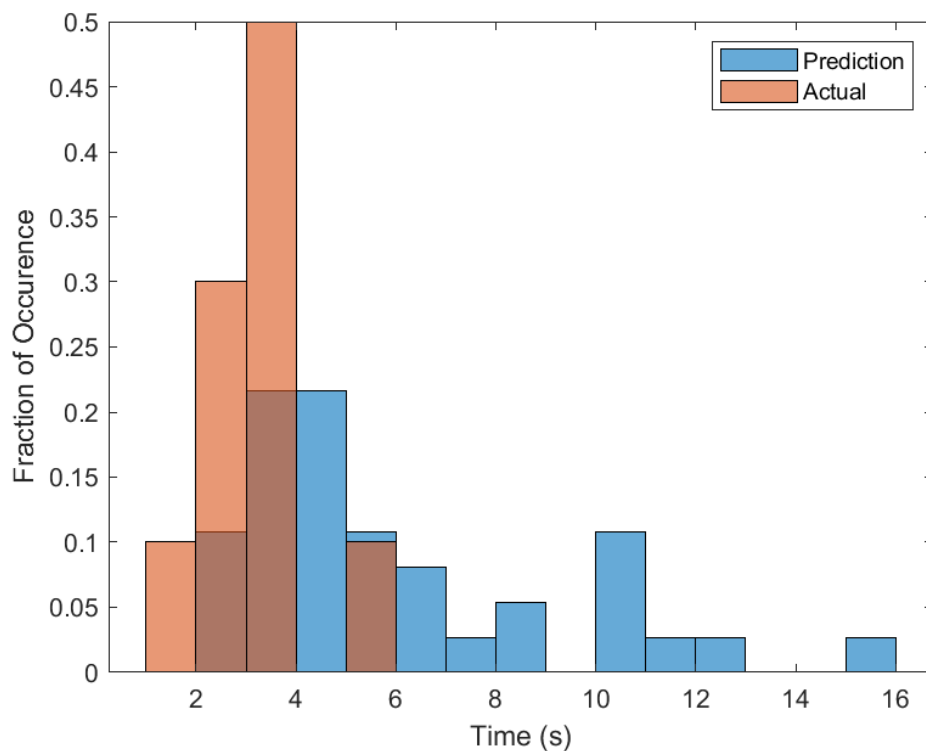
شکل ۴-۵۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



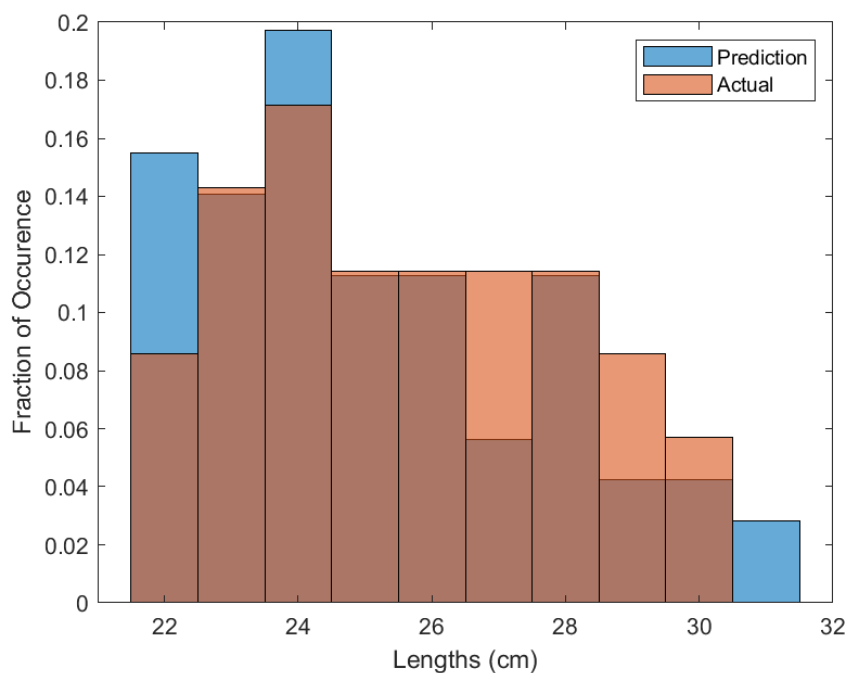
شکل ۴-۵۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



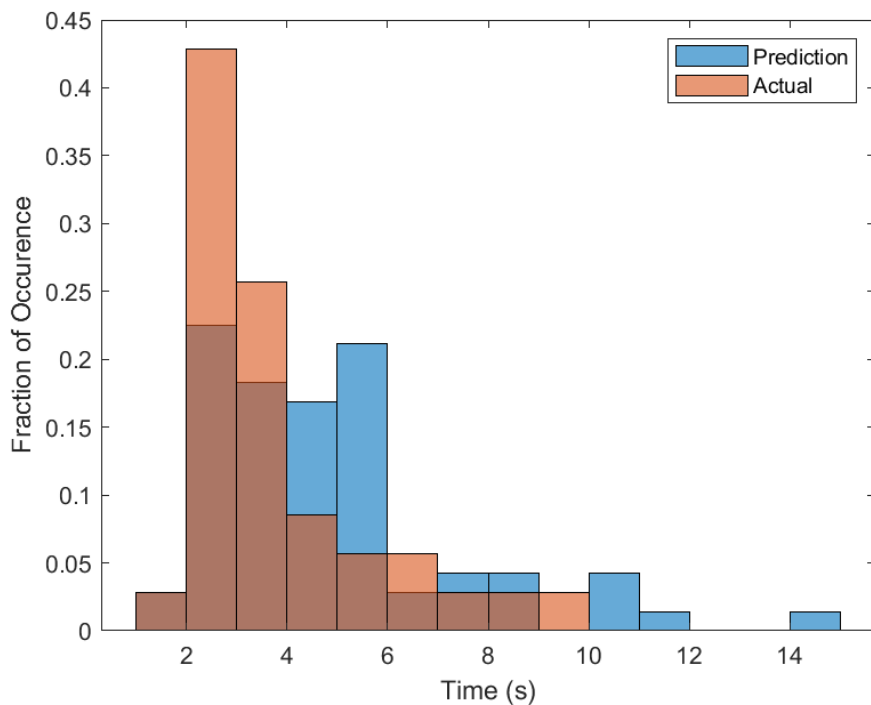
شکل ۴-۶۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر مایه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



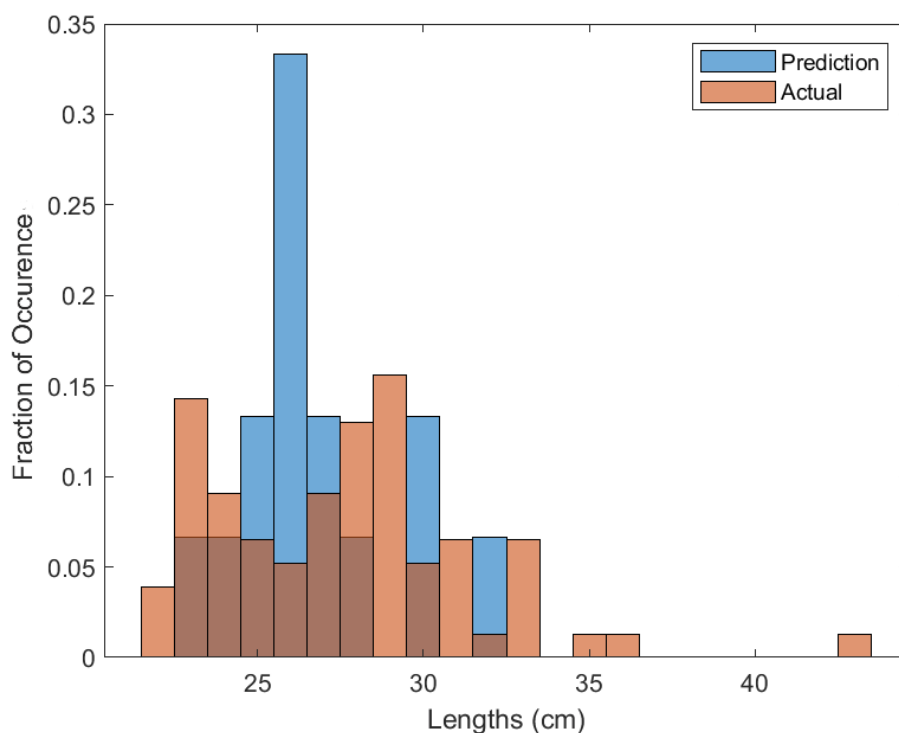
شکل ۴-۶۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



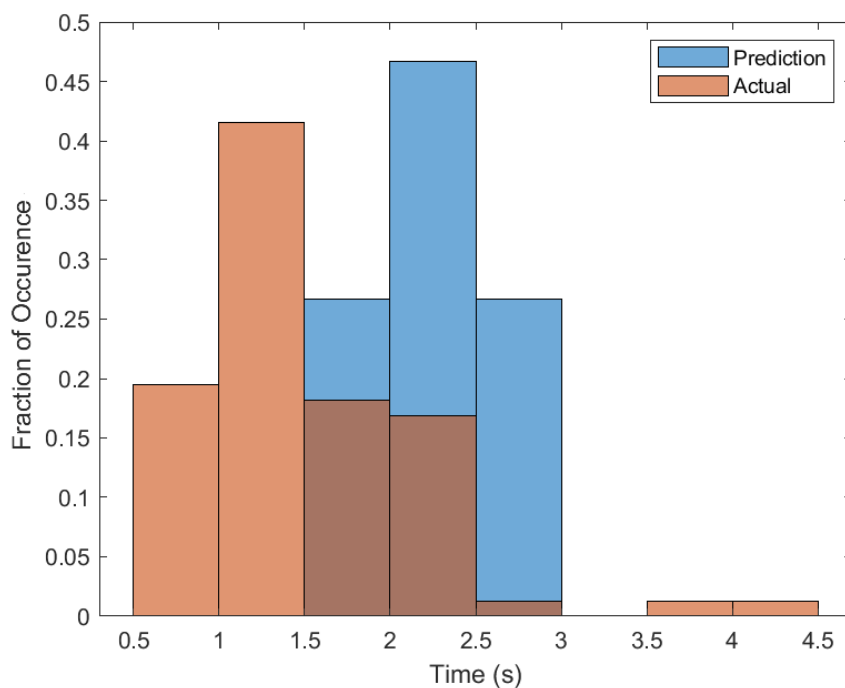
شکل ۴-۶۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



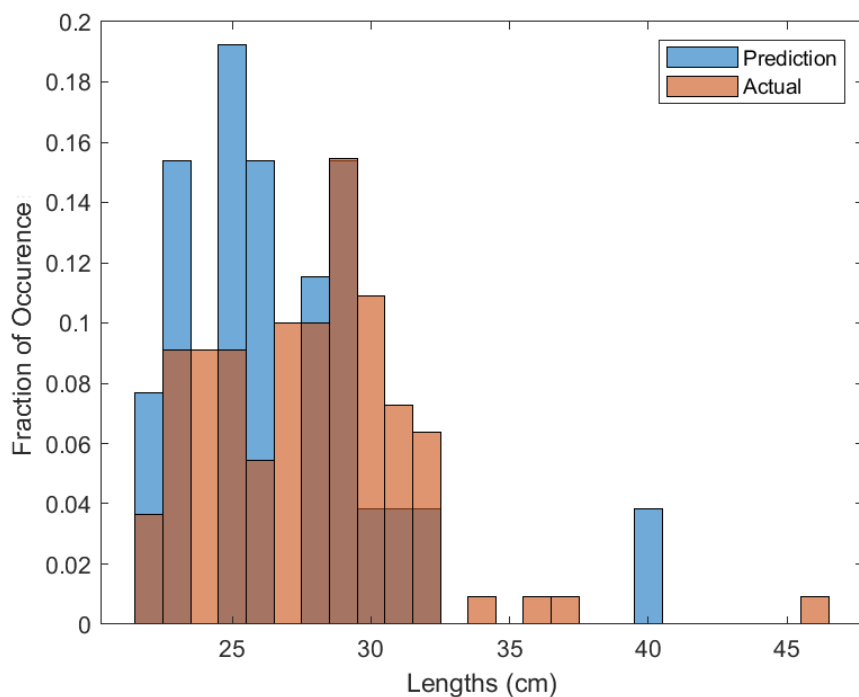
شکل ۴-۶۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



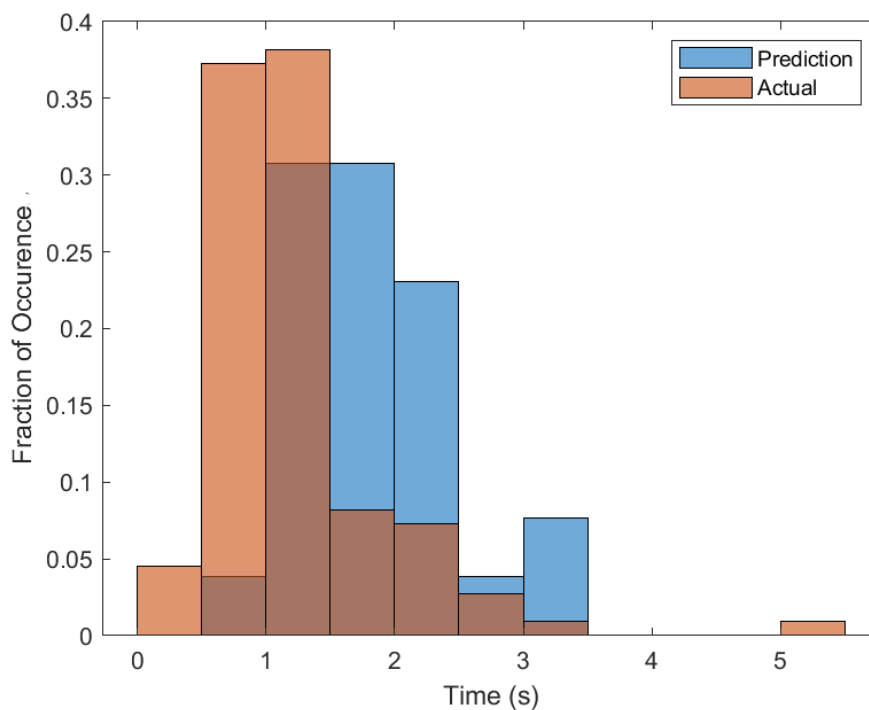
شکل ۴-۶۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



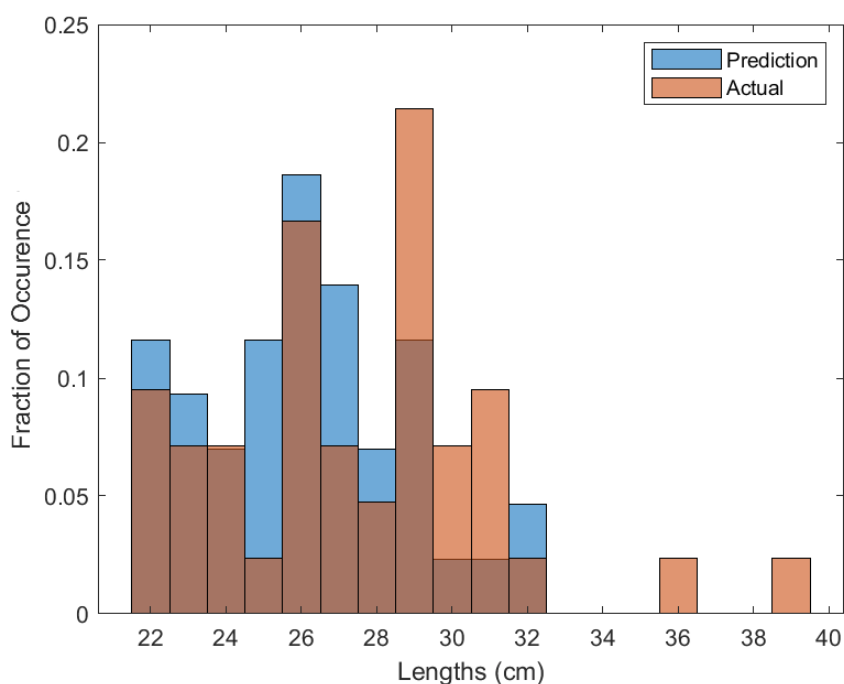
شکل ۴-۶۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



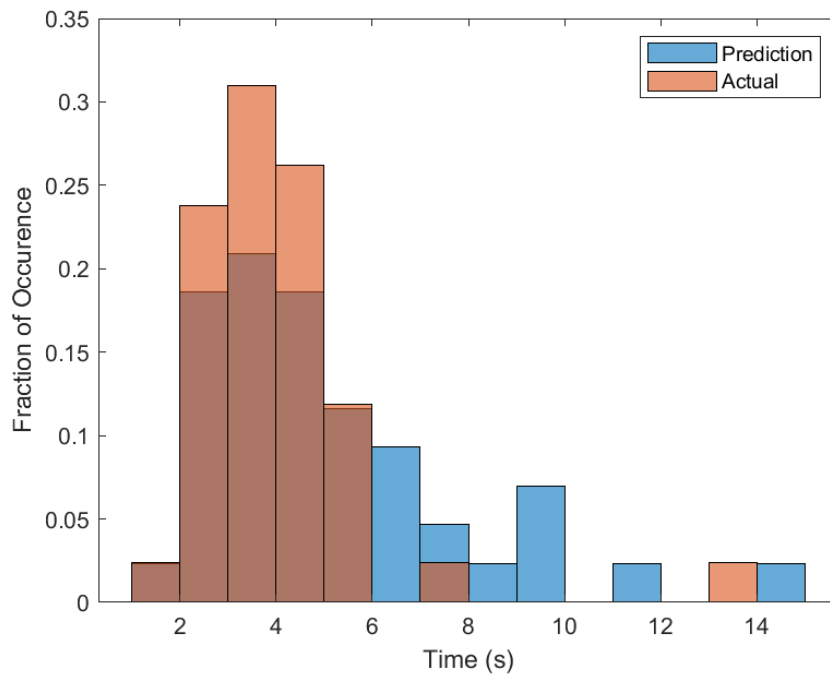
شکل ۴-۶۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



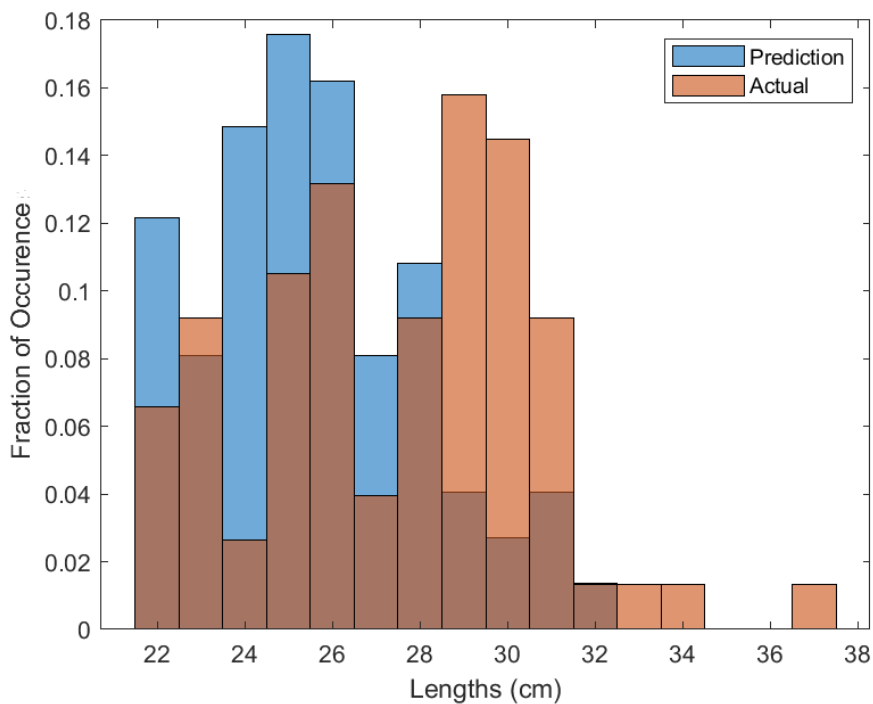
شکل ۴-۶۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



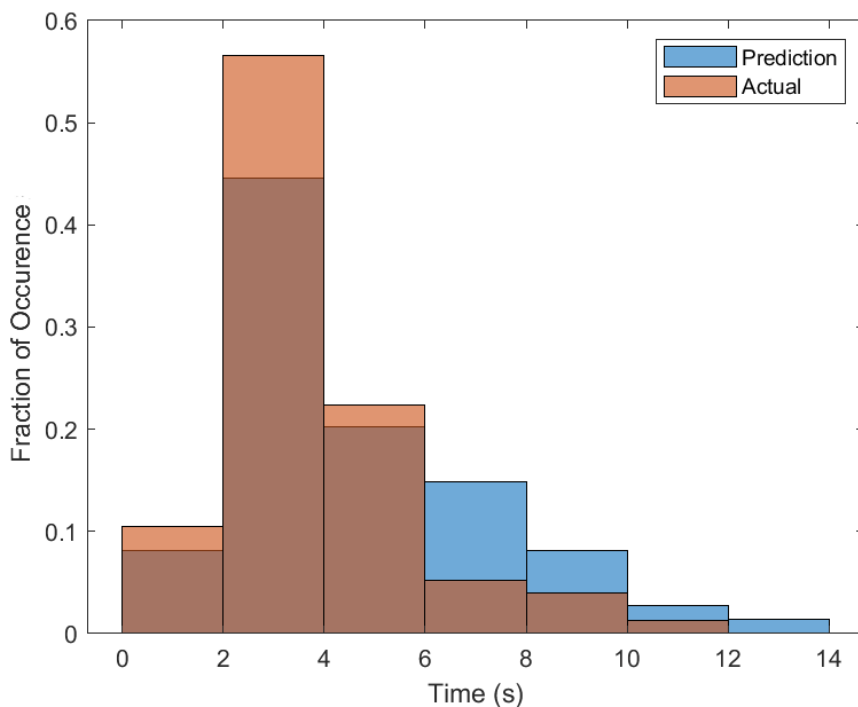
شکل ۴-۶۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



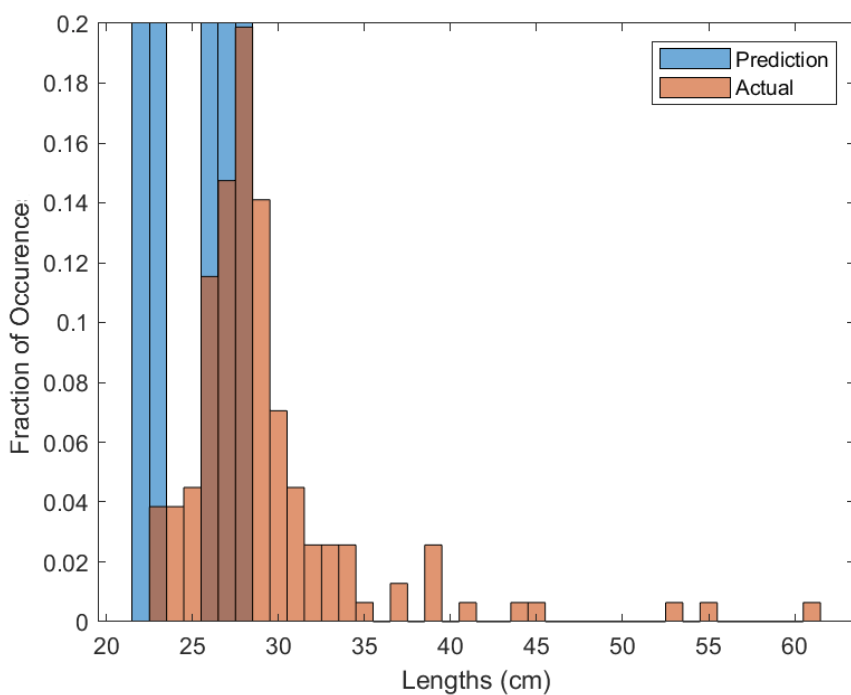
شکل ۴-۶۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



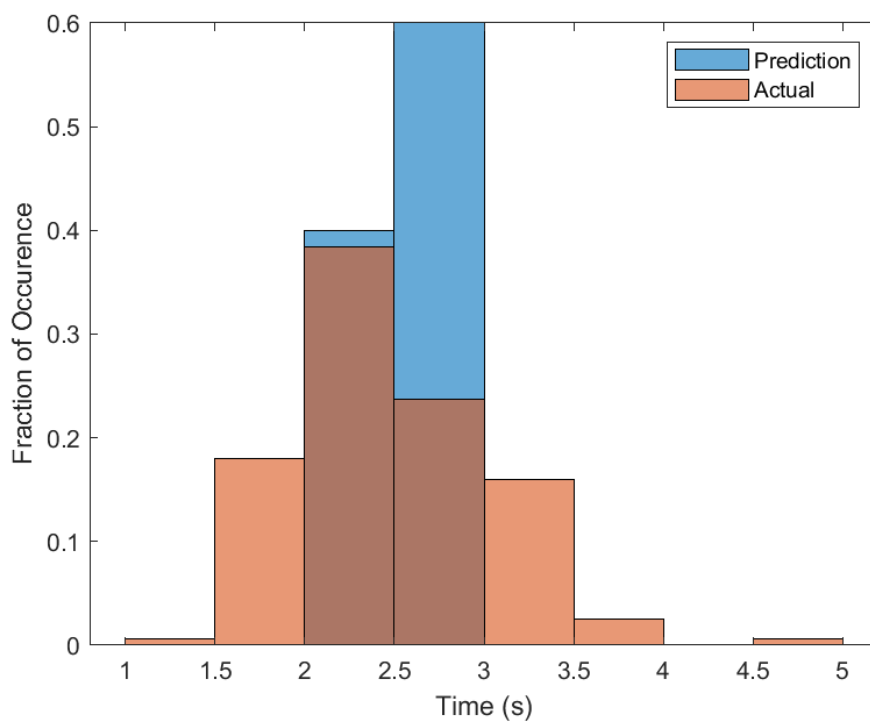
شکل ۴-۷۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



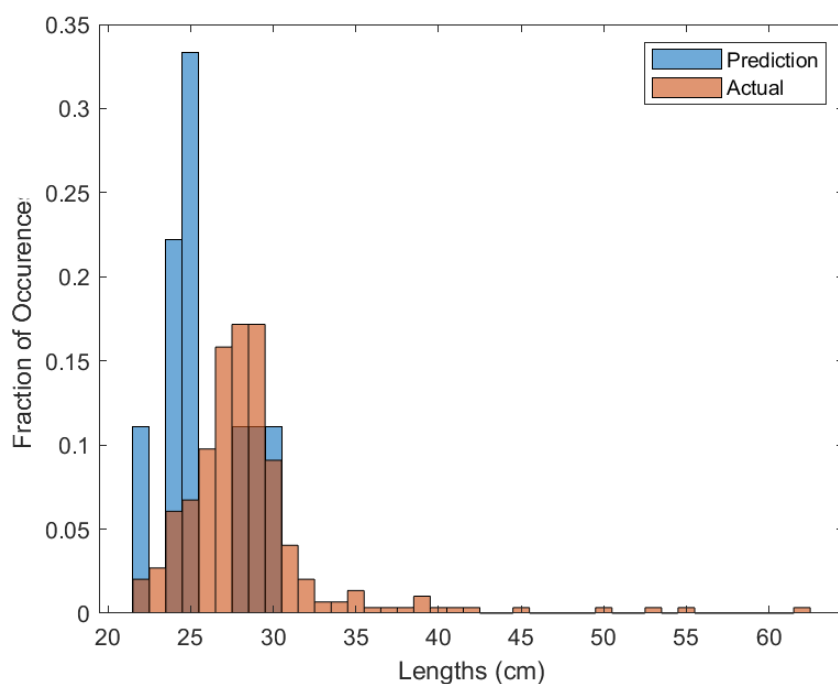
شکل ۴-۷۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



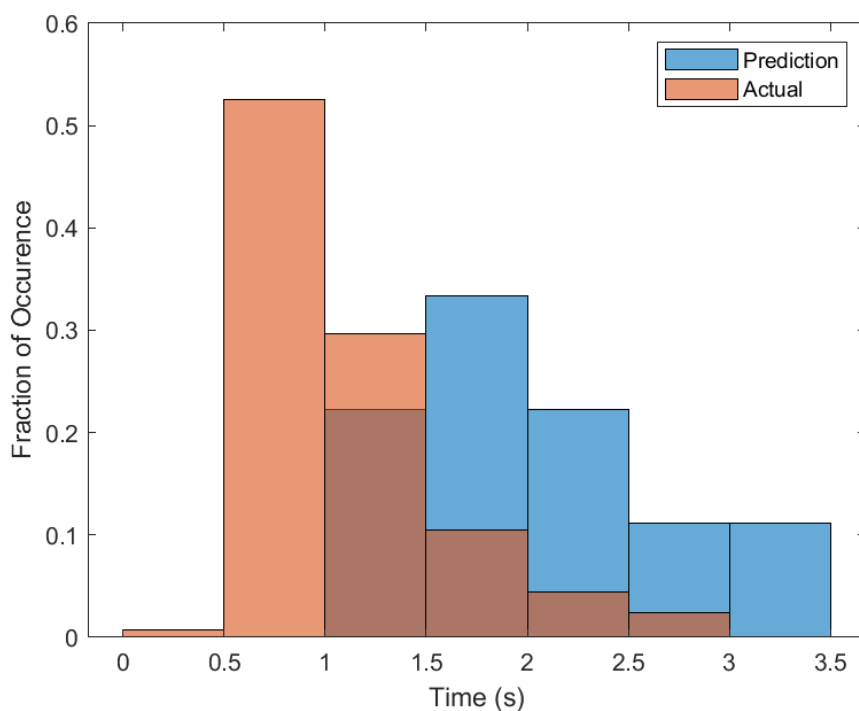
شکل ۴-۷۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



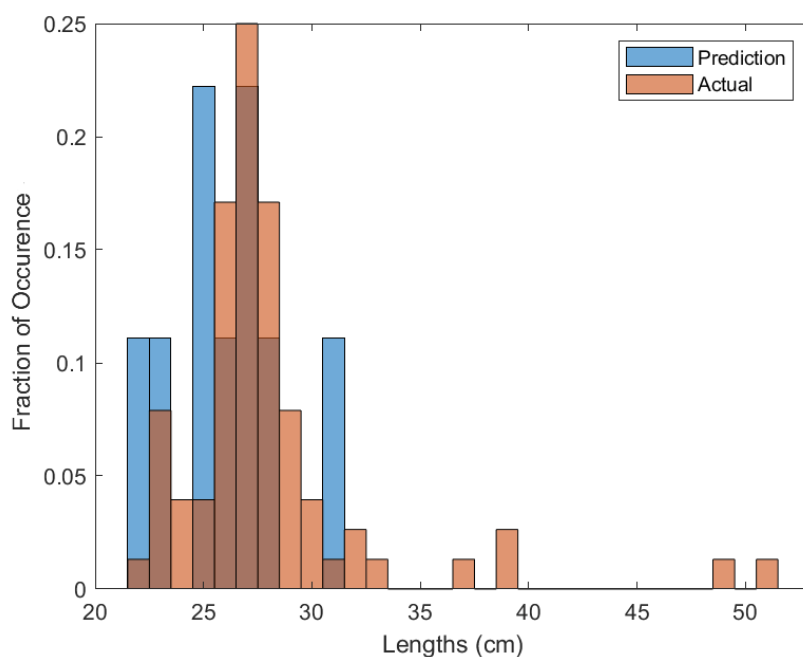
شکل ۴-۷۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



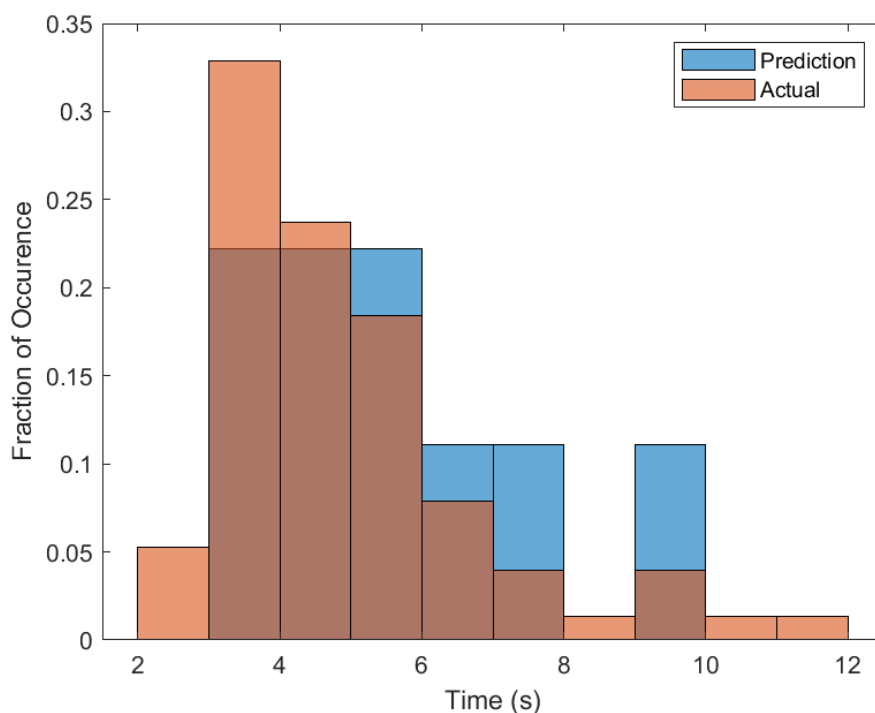
شکل ۴-۷۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



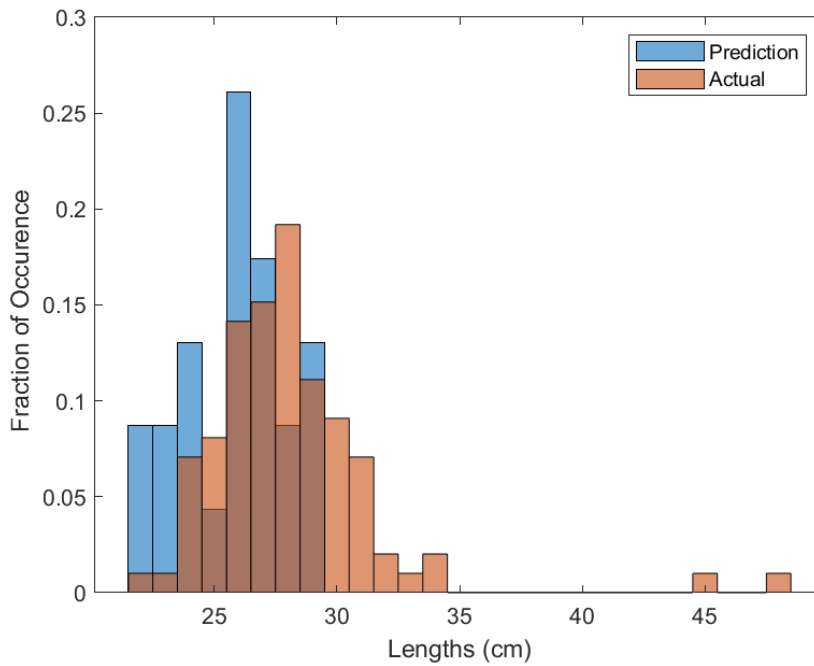
شکل ۴-۷۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



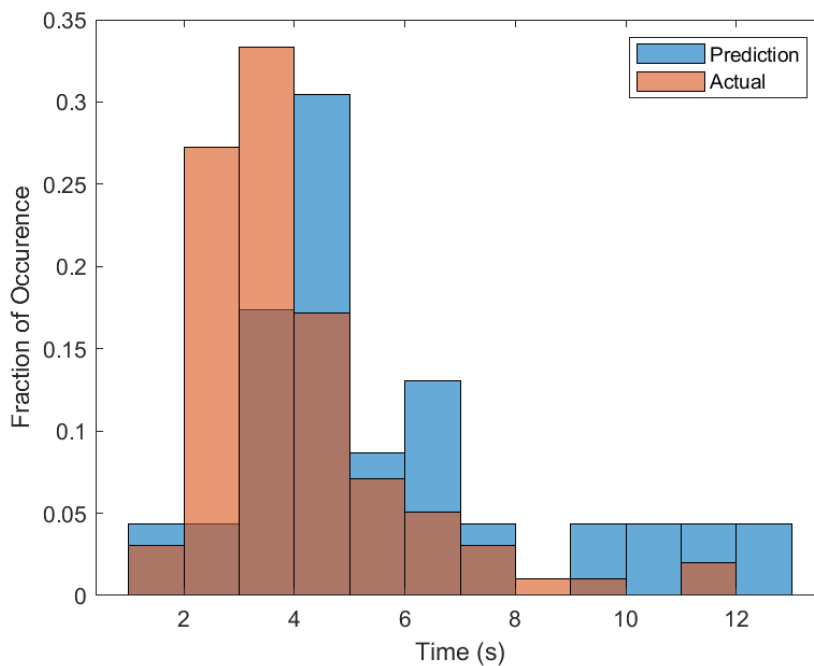
شکل ۴-۷۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



شکل ۴-۷۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



شکل ۴-۷۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



شکل ۴-۷۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)

۹-۴ اعتبارسنجی مدل‌ها

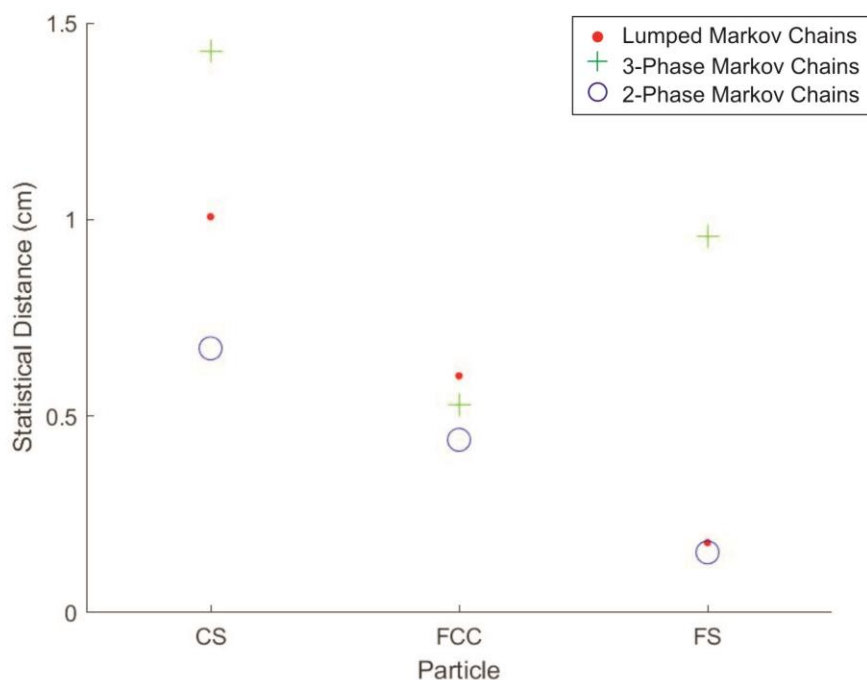
با توجه به ذات آماری روش‌های زنجیره‌های مارکوف مورد استفاده برای مدل‌سازی، از پارامتر فاصله آماری برای مقایسه و بررسی مدل‌سازی‌ها استفاده شده است. در تئوری احتمال، فاصله آماری^۱ به اختلاف میان دو توزیع آماری اطلاق می‌شود و بر طبق آن، دو توزیع X و Y بر روی یک دامنه محدود D ، اختلاف آماری $(\Delta(X, Y))$ به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۸]:

$$\Delta(X, Y) = \frac{1}{2} \sum_{a \in D} |Pr[X = a] - Pr[Y = a]| \quad (۴-۵)$$

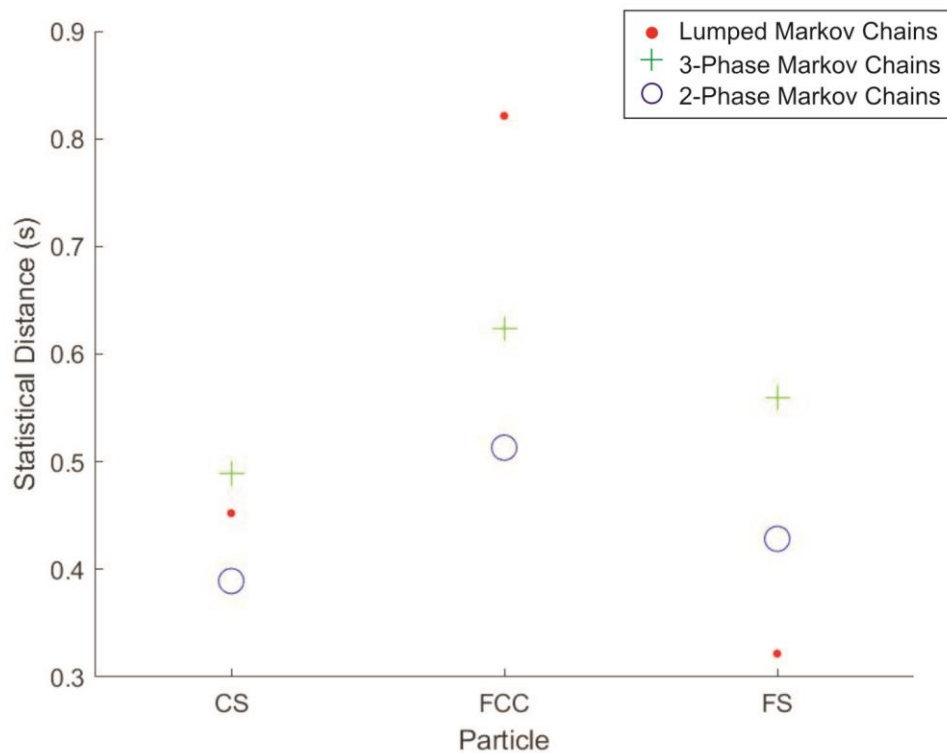
۹-۴-۱ مقایسه نتایج

در رابطه با بررسی و مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های مختلف، می‌توان توزیع مسافت‌ها و همچنین زمان جابجایی‌های مقید و نامقید هر یک را با یکدیگر مقایسه کرد. لازم به ذکر است که با بررسی و تامل در توزیع‌های رسم شده برای مدل و داده‌های تجربی، مقدار ۰,۷۵ به عنوان حد مرزی برای مشخص کردن محدوده تعیین صحیح توزیع انتخاب می‌شود و حالاتی که فاصله آماری شان بیشتر از این مقدار باشد را مدل‌های نامناسبی می‌نامیم. برای مقایسه نتایج میان توزیع مسافت و زمان جابجایی‌های مقید و نامقید میان هر کدام از مدل‌های ارائه شده و داده‌های تجربی، از فاصله آماری میان آن‌ها استفاده شده است و نمودارهای مربوط به مقایسه نتایج آن برای ذره استال کوچک در بسترهای مختلف و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه در نمودارهای ۴-۸۰ تا ۴-۸۷ آمده است.

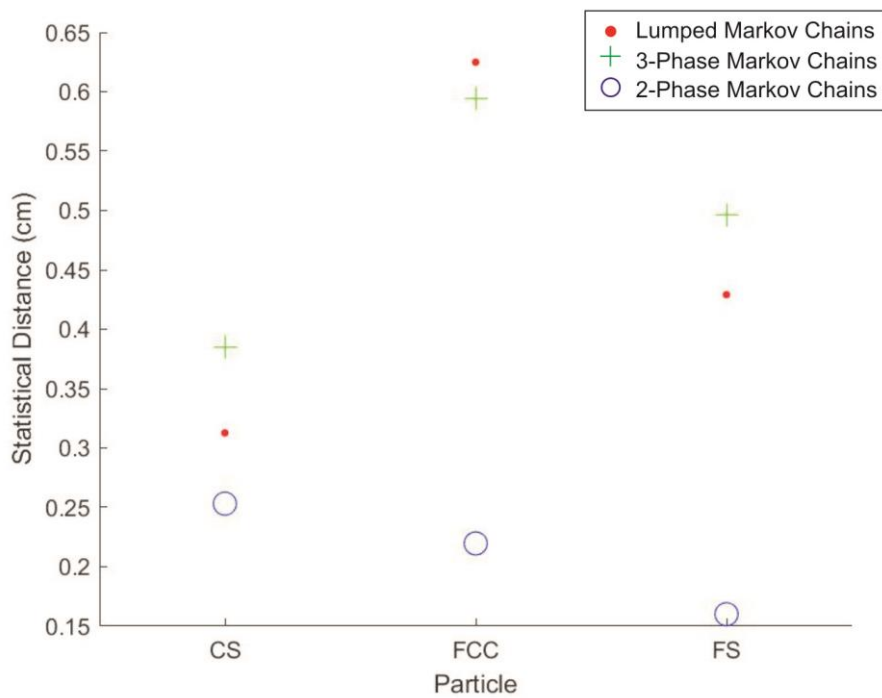
^۱Statistical Distance



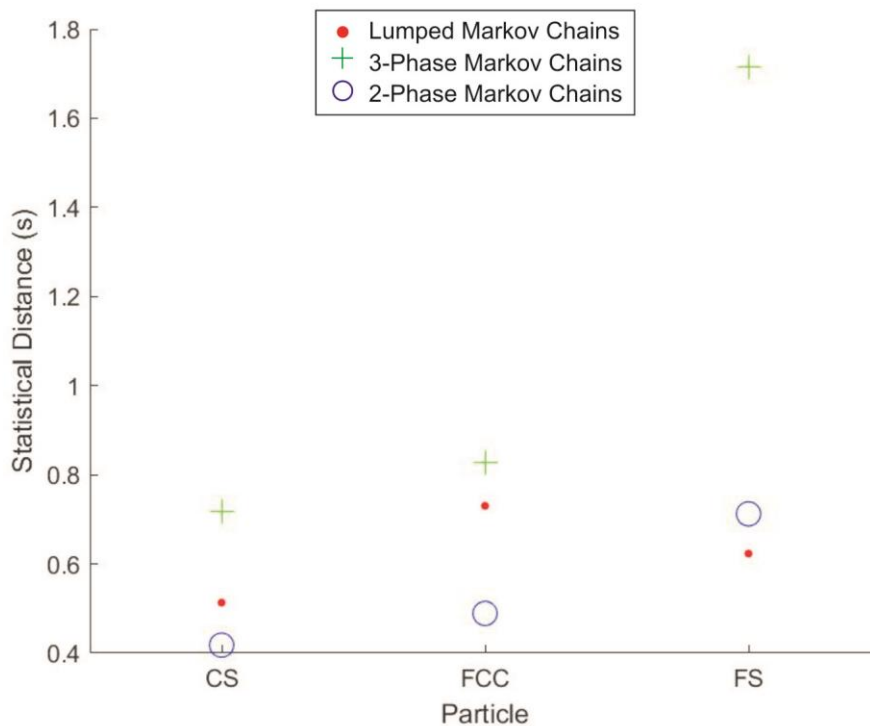
شکل ۴-۸۰ مقایسه فاصله آماری برای توزیع مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



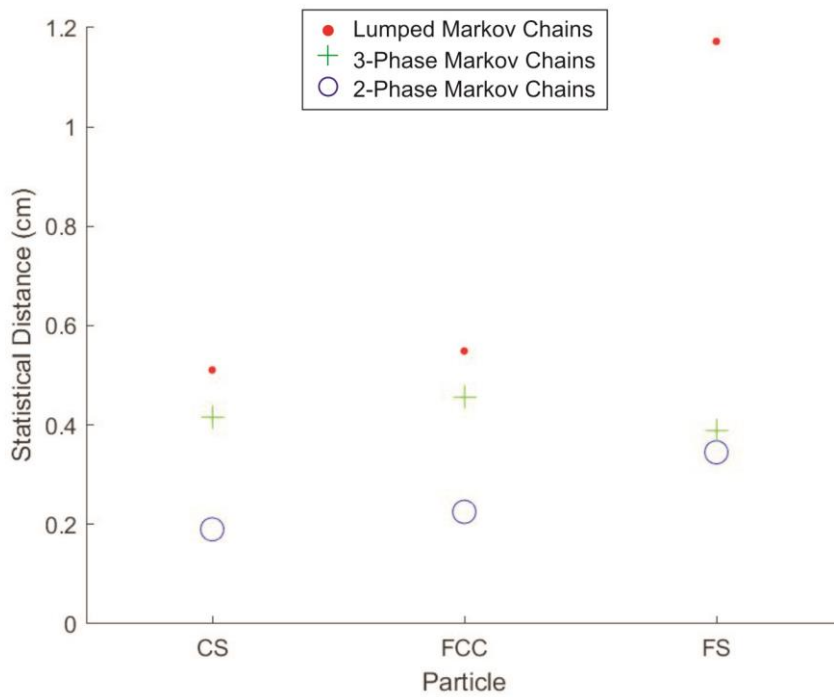
شکل ۴-۸۱ مقایسه فاصله آماری برای توزیع زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



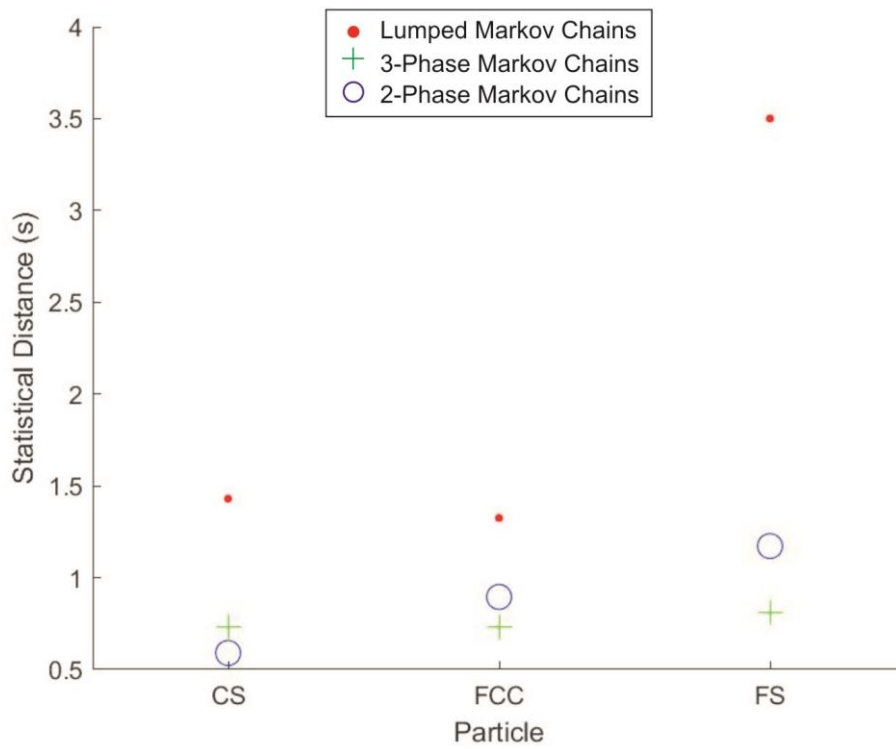
شکل ۴-۸۲ مقایسه فاصله آماری برای توزیع مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



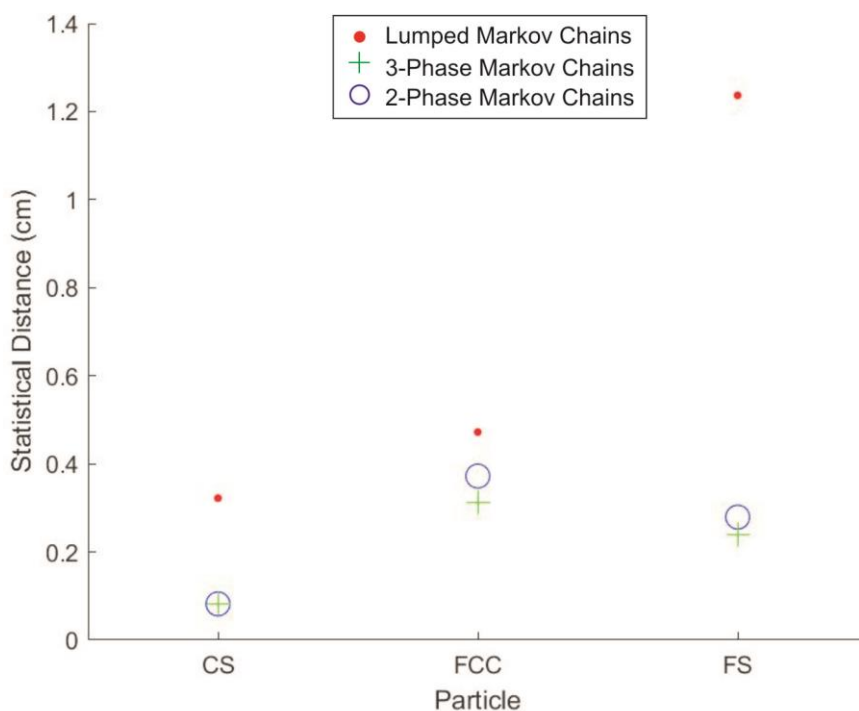
شکل ۴-۸۳ مقایسه فاصله آماری برای توزیع زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



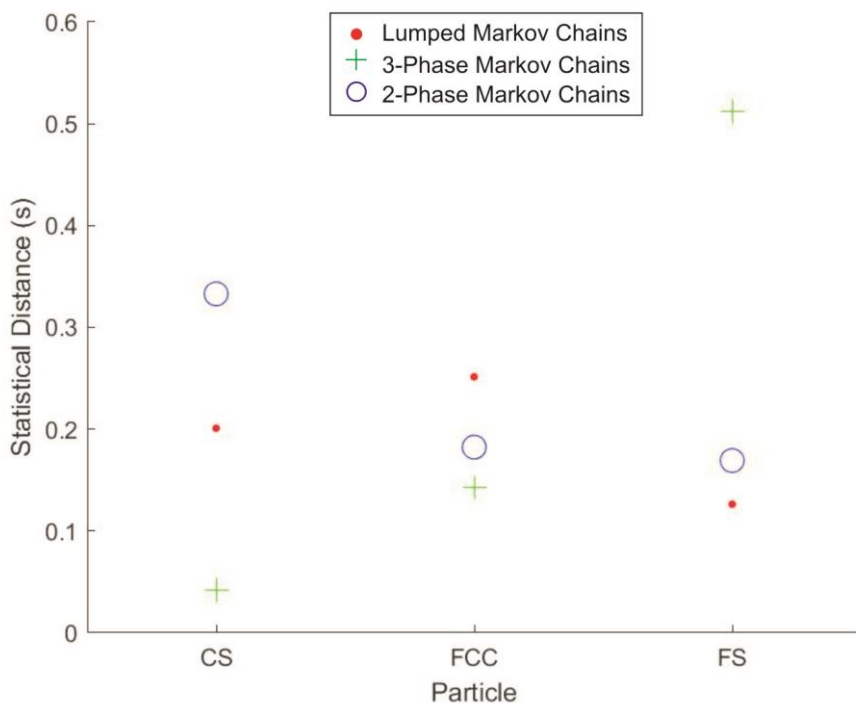
شکل ۴-۸۴ مقایسه فاصله آماری برای توزیع مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



شکل ۴-۸۵ مقایسه فاصله آماری برای توزیع زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



شکل ۴-۸۶ مقایسه فاصله آماری برای توزیع مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



شکل ۴-۸۷ مقایسه فاصله آماری برای توزیع زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)

در رابطه با نمودارهای ۴-۸۰ و ۴-۸۱ که بیانگر فاصله آماری میان هر مدل با داده‌های تجربی برای توزیع مسافت جابجایی‌های مقید می‌باشد، قابل مشاهده است که در تمامی حالات، مدل دو فازی بیشترین دقت را دارد که منجر به کوچکترین فاصله آماری شده است. در رابطه با دو مدل دیگر، کمترین دقت در بسترهای ماسه‌ای، مربوط به مدل سه فازی و کمترین دقت در بستر کاتالیست FCC، مربوط به مدل یکپارچه است. در رابطه با مقادیر محاسبه شده برای هر کدام از فواصل آماری، می‌توان پایین‌تر بودن مقدار مربوط به مدل سه فازی را به تعیین مرز میان جابجایی‌های مقید و نامقید در این پژوهش نسبت داد و ممکن است که با تمیز دادن این جابجایی‌ها در مدل سه فازی، به مقادیر بالاتری از دقت نیز دست یافت. در این میان، با توجه به حد مرزی مشخص شده، تنها سه حالت مدل سه فازی در بسترهای ماسه‌ای برای جابجایی‌های مقید به سمت پایین و همچنین مدل یکپارچه برای جابجایی‌های مقید در بستر ماسه درشت از تفاوت زیادی با داده‌های تجربی برخوردار می‌باشند.

در رابطه با نمودارهای ۴-۸۲ و ۴-۸۳ که بیانگر فاصله آماری میان هر مدل با داده‌های تجربی برای توزیع زمان جابجایی‌های مقید می‌باشند، قابل مشاهده است که بجز برای حالات در بسترهای ماسه ریز که مدل یکپارچه کمترین فاصله آماری را با داده‌های تجربی دارد، در باقی حالات، مدل دو فازی کمترین فاصله را با داده‌های تجربی داراست. از طرفی بجز برای حالت بستر کاتالیست FCC برای جابجایی‌های مقید به سمت پایین، که مدل یکپارچه کمترین دقت را دارد، در باقی حالات، مدل سه فازی از کمترین دقت برخوردار است. البته با توجه به حد مرزی تعیین شده، مدل یکپارچه برای جابجایی‌های مقید به سمت پایین در بستر کاتالیست FCC، مدل سه فازی برای جابجایی‌های مقید به سمت بالا در بسترهای ماسه ریز و کاتالیست FCC از تفاوت زیادی با داده‌های تجربی برخوردارند.

در رابطه با نمودارهای ۴-۸۴ و ۴-۸۵ که بیانگر فاصله آماری میان هر مدل با داده‌های تجربی برای توزیع مسافت جابجایی‌های نامقید می‌باشند، قابل مشاهده است که در جابجایی‌های به سمت پایین، مدل دو فازی و مدل سه فازی، هر دو از دقت بالایی و فاصله کمی با توزیع داده‌های تجربی برخوردارند. همچنین تنها مدل یکپارچه برای بستر ماسه ریز نامناسب می‌باشد. اما در رابطه با مسافت جابجایی‌های به سمت بالا، هر دو مدل دو فازی و سه فازی از دقت‌های بسیار بالایی در تخمین داده‌های تجربی برخوردارند و به طور مشابه، مدل یکپارچه برای بستر ماسه ریز نامناسب می‌باشد.

در رابطه با نمودارهای ۴-۸۶ و ۴-۸۷ که بیانگر فاصله آماری میان هر مدل با داده‌های تجربی برای توزیع زمان جابجایی‌های نامقید می‌باشند، قابل مشاهده است که در جابجایی‌های به سمت پایین، بجز حالت مدل دو فازی برای بستر ماسه درشت، باقی مدل‌ها از دقت خوبی برخوردار نیستند. اما در رابطه با جابجایی‌های به سمت بالا، همه مدل‌ها از دقت خوبی در تخمین نتایج برخوردارند اما مدل سه فازی در دو حالت بستر ماسه درشت و همچنین کاتالیست FCC از بیشترین دقت برخوردار است.

به طور کلی همانطور که مشاهده می شود، با توجه به نمودارهای ۴-۸۰ تا ۴-۸۷، مدل های سه فازی و یکپارچه برای تخمین مسافت و زمان جابجایی های مقید از دقت نسبتا یکسانی برخوردارند و در این موارد مدل دو فازی از دقت بسیار بالاتری برخوردار است. دلیل این مهم مربوط به دخیل شدن پارامتر تغییر فاز نسبت به مدل یکپارچه و همچنین تعریف مشخص و مناسب مرز میان فازها نسبت به مدل سه فازی می باشد. البته در رابطه با تخمین مسافت و زمان جابجایی های نامقید، مدل یکپارچه دقت بسیار پایینی دارد و مدل های دو فازی و سه فازی از خطای بسیار کمتری برخوردارند. این نتیجه مربوط به ذات پیچیدگی های مرتبط با جابجایی های نامقید و همچنین تعریف گسترده آنها می شود که مدل یکپارچه از تخمین آنها باز می ماند.

NEW SECTION

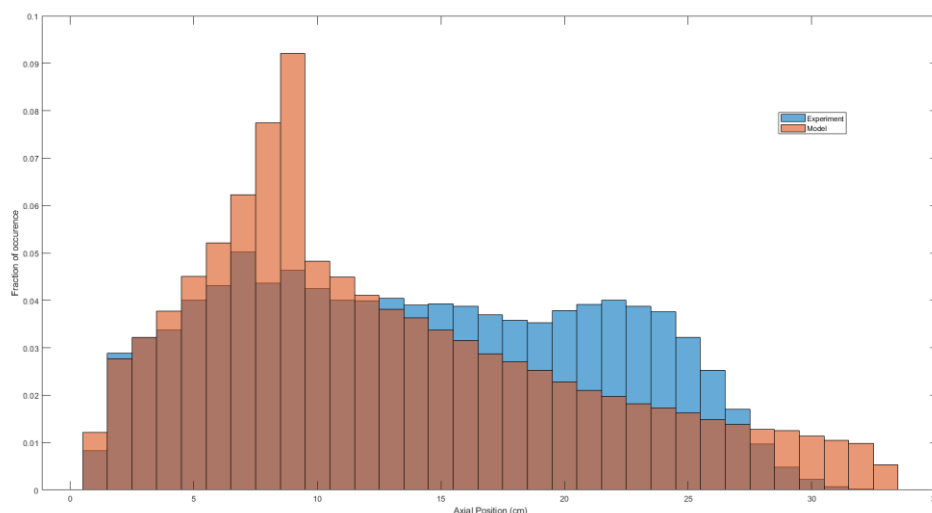
۱۰-۴ بررسی توزیع طولی حضور ذرات در بستر

برای بررسی عملکرد مدل های مختلف گسترش داده شده در پیش بینی توزیع طولی حضور ذرات در قسمت های مختلف بستر، نمودار توزیع فرکانس آن در مقایسه با منحنی مربوط به توزیع داده های آزمایشی رسم شده و مورد مطالعه قرار گرفت. شکل های ۴-۸۸ تا ۴-۹۶، مربوط به ذره استال کوچک و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه می باشد در بسترهای متفاوت و مدل های مختلف بررسی شده می باشند. همانطور که از نمودارهای بر می آید، در مدل سازی های مربوط به بستر ما سه درشت، مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه، یک قله ناشی از اجتماع ذرات در ۱۰ سانتی متر پایینی بستر پیش بینی می کند که در داده های مربوط به آزمایشات مشابه آن دیده نمی شود. در ضمن پس از این قله و در تناقض با داده های آزمایشات، فرکانس حضور ذره رو به کاهش است و پیش بینی می شود که ذره، به سلول های بالاتری از بستر برسد. مدل زنجیره های مارکوف دو فازی نیز وجود یک قله بخاطر تجمع ذرات را پیش بینی می کند اما در نقطه پایین تری نسبت به مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه و همچنین در صورت حرکت در راستای طولی بستر، تطابق بیشتری را با داده های آزمایشی مشاهده می کنیم. مدل زنجیره های مارکوف سه فازی نیز قله ابتدایی را پیش بینی می کند اما در اندازه بسیار کوچکتری نسبت به دو مدل دیگر و همچنین در صورت حرکت در راستای طولی بستر، تطابق بسیار بالایی را میان داده های مدل و آزمایشات مشاهده می کنیم.

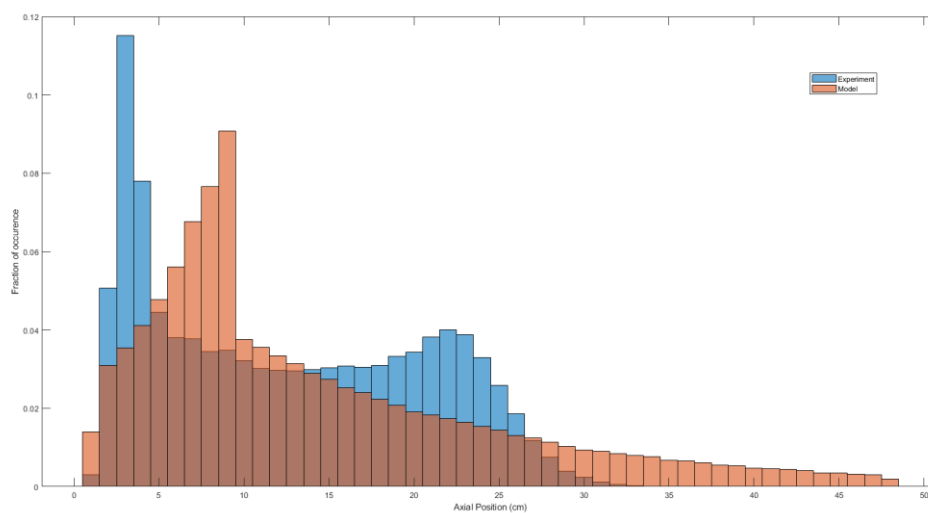
در مدل سازی های مربوط به بستر کاتالیست FCC، در داده های آزمایشی دو قله مشاهده می شود که قله ای که در نقطه پایین تری از بستر رخ می دهد، به دلیل وجود جت های ورودی جریان گاز است. قله

بالتر که ارتفاع پایین تری نیز دارد، نشان دهنده ارتفاع موثر بستر سیال می باشد. مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه، توانایی تشخیص قله دوم را ندارد و قله اول را نیز با اختلاف ۵ سانتی متری پیش بینی می کند و علاوه بر این موارد، الگوی فرکانس حضور ذره در راستای طولی را نیز نمی تواند به درستی پیش بینی کند. مدل زنجیره های مارکوف دوفازی، محل قله اول را به درستی اما غلظت آن را بیشتر از میزان واقعی پیش بینی می کند. همچنین از شناسایی قله دوم باز می ماند. این مدل می تواند الگوی فرکانس ذره را به درستی پیش بینی کند اما میزان آن را خیر. اما مدل زنجیره های مارکوف سه فازی، هر دو قله را به درستی پیش بینی می کند و الگوی فرکانس حضور طولی ارائه شده توسط این مدل نیز تطابق بسیار بالایی با داده های آزمایشی دارد.

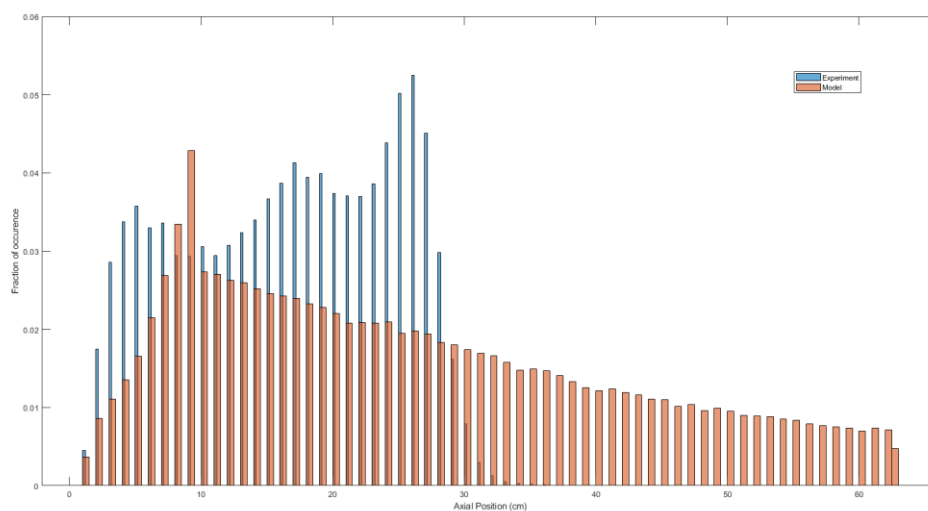
در مدل سازی های مربوط به بستر ماسه ریز، در داده های آزمایشی، یک قله در بالای بستر مشاهده می شود و توزیع آن از توزیع های دیگر بسترها متفاوت است. مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه همچنان از خطای بسیار بالایی برخوردار است. مدل زنجیره های مارکوف دوفازی، می تواند الگو و توزیع فرکانس را به درستی پیش بینی کند اما قله مورد نظر را در ابتدای بستر پیش بینی می کند و نه در بالای بستر. مدل زنجیره های مارکوف سه فازی در این حالت دقت کمتری نسبت به مدل زنجیره های مارکوف دوفازی دارد.



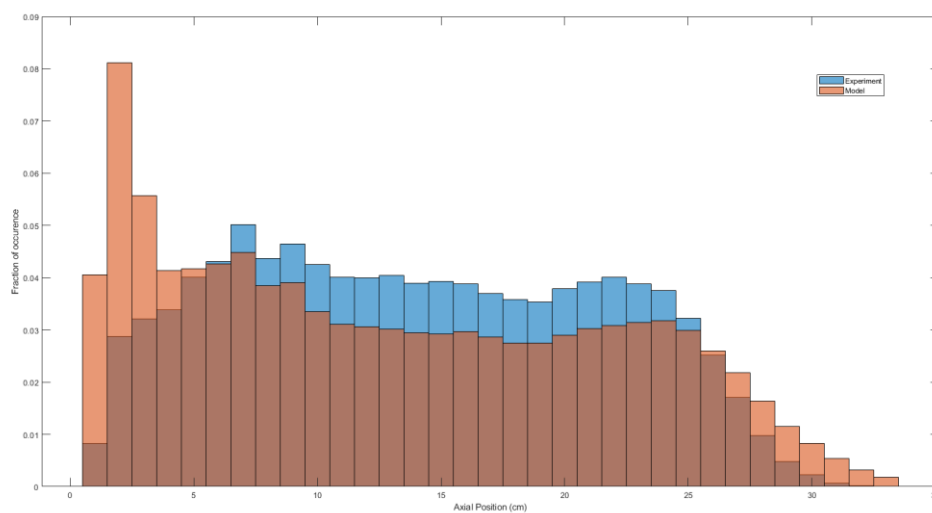
شکل ۴-۸۸ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه درشت و مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه)



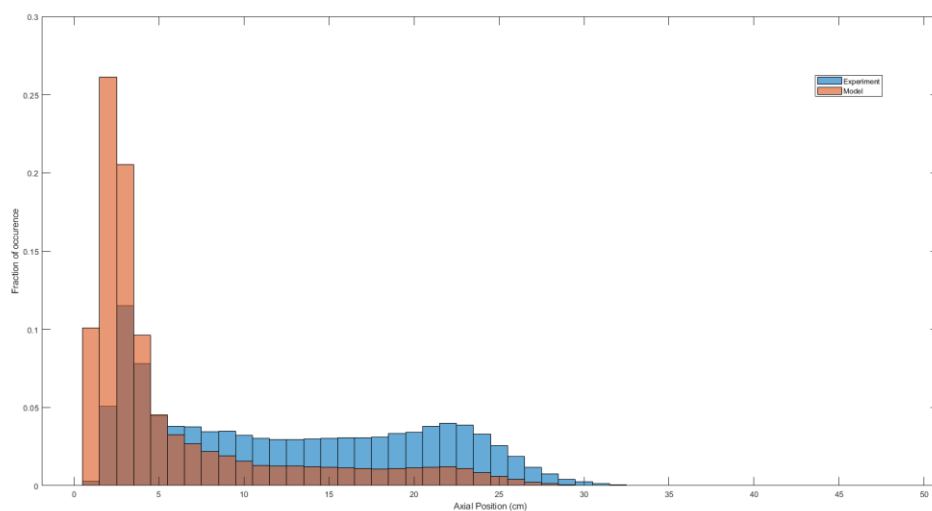
شکل ۴-۸۹ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر کاتالیست FCC و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه)



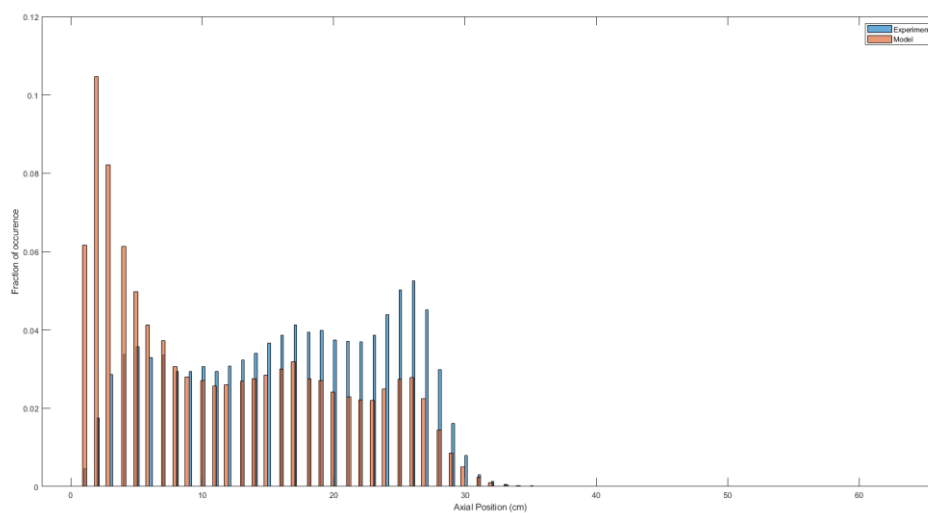
شکل ۴-۹۰ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه ریز و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه)



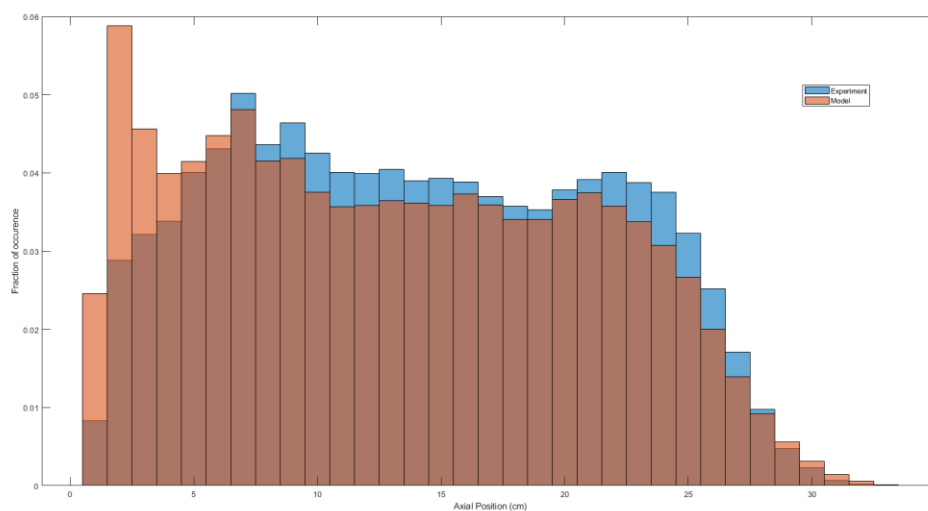
شکل ۴-۹۱ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه درشت و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی)



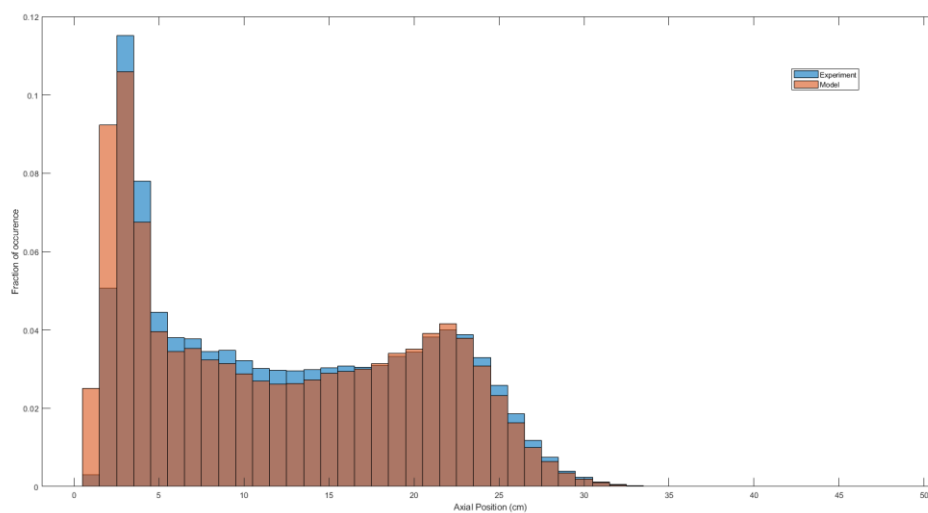
شکل ۴-۹۲ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر کاتالیست FCC و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی)



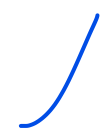
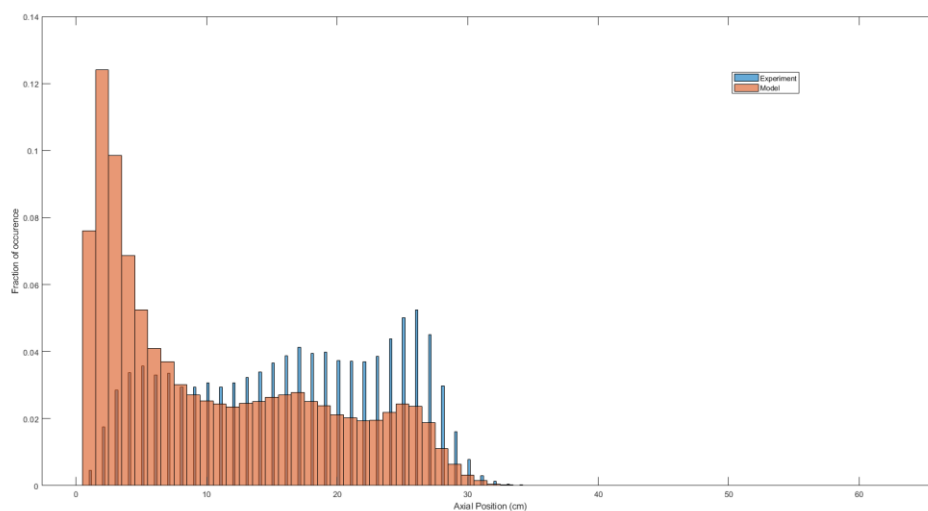
شکل ۴-۹۳ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه ریز و مدل زنجیره‌های مارکوف دو فازی)



شکل ۴-۹۴ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه درشت و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی)



شکل ۴-۹۵ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر کاتالیست FCC و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی)



شکل ۴-۹۶ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه ریز و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی)

۱۱-۴ نتیجه گیری

بسترهای سیال گاز-جامد به دلیل کاربرد زیادی که در صنعت دارند، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند و تلاش‌های تئوری و تجربی زیادی برای پیش‌بینی رفتار آن‌ها صورت گرفته است. بسترهای سیال دوجزئی به طور خاص، رفتارهایی منحصر بفرد را از خود نشان می‌دهند که نیازمند بررسی‌های بیشتری برای انجام مدل‌سازی است.

به عنوان هدف اصلی این پروژه، در این پژوهش سعی کردیم تا با استفاده از ابزارهای آماری، محاسباتی و پردازش کامپیوتری، رفتار حرکت ذرات درشت را در بسترهای سیال حبابی مدل و مطالعه نماییم. برای این منظور به استفاده از روش‌های آماری زنجیره‌های مارکوف و همچنین ارتباط دادن آن با روابط موجود برای بسترهای سیال حبابی، به مدل‌سازی رفتار این ذرات در بسترها و مقایسه آن‌ها پرداخته‌ایم.

مدل‌سازی‌های این پژوهش با استفاده از نسخه ۲۰۱۸b نرم‌افزار **MATLAB** در بخش تحلیل داده‌ها، محاسبه پارامترها، مدل‌سازی و مقایسه نتایج صورت گرفته است. هدف از انجام مدل‌سازی‌های انجام شده، بررسی توانایی پیش‌بینی رفتار حرکت ذرات درشت در بسترهای سیال حبابی و دوجزئی بوده است. برای اعتبار سنجی نتایج، از مقایسه توزیع زمان ماند حرکت‌های جابجایی استفاده شده است. همچنین سه مدل مختلف از روش‌های زنجیره‌های مارکوف مورد استفاده و با استفاده از فاصله آماری میان توزیع‌های داده‌های نتایج، مورد مقایسه با یکدیگر قرار گرفتند.

به طور کلی، مدل‌های سه‌فازی و یکپارچه برای تخمین مسافت و زمان جابجایی‌های مقید از دقت نسبتاً یکسانی برخوردارند و در این موارد، مدل دو‌فازی از دقت بسیار بالاتری برخوردار است. دلیل این مهم مربوط به دخیل شدن پارامتر تغییر فاز نسبت به مدل یکپارچه و همچنین تعریف مشخص و مناسب مرز میان فازها نسبت به مدل سه‌فازی می‌باشد. البته در رابطه با تخمین مسافت و زمان جابجایی‌های نامقید، مدل یکپارچه دقت بسیار پایینی دارد و مدل‌های دو‌فازی و سه‌فازی از خطای بسیار کمتری برخوردارند. این نتیجه مربوط به ذات پیچیدگی‌های مرتبط با جابجایی‌های نامقید و همچنین تعریف گسترده آن‌ها می‌شود که مدل یکپارچه از تخمین آن‌ها باز می‌ماند.

۱۲-۴ محدودیت‌ها

پژوهش حاضر شامل محدودیت‌هایی از جمله عدم توانایی برای بررسی نیروهای برهمکنش میان ذرات درشت به دلیل ذات ردیابی‌های RPT و همچنین عدم وجود رابطه‌ای برای مجاسبه پارامتر انتقال

فاز و همچنین نبود مرز مشخص برای تعریف فاز جریان خلیجی در محاسبات می‌باشد.

۴-۱۳ پیشنهادها و موضوعات آتی

محا سبه و مقایسه فاصله آماری برای ذرات درشت مختلف و مطالعه تاثیر فاکتورهای مختلف بر میزان دقت مدل زنجیره‌های مارکوف در پیش‌بینی توزیع ذرات درشت در بستر سیال مت‌شکل از ذرات ریز می‌تواند مهم‌ترین موضوع احتمالی برای گسترش این کار باشد. تعریف مشخصه‌های رفتار جریان چرخشی خلیجی می‌تواند در تعیین پارامترهای روش زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی تاثیر بسزایی بگذارد. در دیگر مواردی که می‌توانند در ادامه مورد بحث و بررسی قرار بگیرند می‌توان به بررسی مفهوم جریان چرخشی خلیجی و شرایط وجودی آن پرداخت. همچنین از دیگر مواردی که می‌توان به آن‌ها پرداخت، می‌توان به روش‌های مونت کارلو برای مدل‌سازی حرکت ذرات درشت در بستر و همچنین استفاده از روش‌های مدل‌سازی سری زمانی چه به صورت آماری و چه با استفاده از هوش مصنوعی برای مدل‌سازی رفتار ذرات درشت در بسترهای سیال پرداخت.

- [١] International Energy Agency, “World Energy Investment ٢٠٢٣,” IEA, .٢٠٢٣
- [٢] B. Wahlund, J. Yan and M. Westermark, “Comparisons of CO₂-Reducing Alternatives for Heat and Power Generation: CO₂-Capture and Fuel Shift to Biomass,” *Proceedings of the ٥th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies* .٢٠٠٠ ,
- [٣] A. Bhattacharya, A. Datta, “Effects of supplementary biomass firing on the performanve of combined cycle power generation: A Comparison between NGCC and IGCC plants,” *Biomass and Bioenergy*, , شماره ٥٤, جلد ٢٣٩-٢٤٩, .٢٠١٣
- [٤] E. Kurkela, M. Nieminen, and P. Simell, “Development and Commercialisation of Biomass and waste gasification technologies from reliable and robust co-firing plants towards synthesis gas production and advanced power cycles,” *2nd world conference and technology exhibition on biomass for Energy, Industry and Climate Protection* .٢٠٠٤ ,
- [٥] Ehnberg J., Y. Liu and M. Grahn, *Systems Perspectives on Renewable Power*, Chalmers University of Technology, .٢٠١٤
- [٦] A. Gomez-Barea, and B. Leckner, “Modeling of Biomass gasification in Fluidized bed,” *Progress in Energy and Combustion Science*, , شماره ٤, جلد ٣٦, pp. ٤٤٤-٥٠٩, .٢٠١٠
- [٧] J. Koornneef, M. Junginger, A. Faaij, “Development of Fluidized Bed Combustion - An Overview of Trends, Performance and Cost,” *Progress in Energy and Combustion Science*, , شماره ٤, جلد ٣٦, pp. ٤٤٤-٥٠٩, .٢٠٠٧
- [٨] John R. Grace, Xiaotao Bi, and Naoko Ellis, *Essentials of Fluidization Technology*, Wiley-VCH, .٢٠٢١
- [٩] D. Geldart, “Types of Gas Fluidization,” *Powder Technology*, , شماره ٥, جلد ٧, pp. ٢٨٥-٢٩٢, .١٩٧٣
- [١٠] Farzam Fotovat, Jamal Chaouki, “Characterization of the upward motion of an object immersed in a bubbling fluidized bed of fine particles,” *Chemical Engineering Journal*, , جلد ٢٨٠, pp. ٢٦-٣٥, .٢٠١٥

- [١١] B. Formisani, R. Girimonte, and V. Vivacqua, "Fluidization of mixtures of two solids differing in density or size," *AIChE Journal*, ,٩ شماره ٥٧, جلد pp. ٢٣٢٥-٢٣٣٣, .٢٠١١
- [١٢] C. Crowe, *Multiphase Flow Handbook*, Florida: Taylor & Francis, .٢٠١٠
- [١٣] A. Kohler, E. Cano-Pleite, A. Soria-Verdugo, D. Pallares, F. Johnsson, "Modeling the motion of fuel particles in a fluidized bed," *Fuel*, .٢٠٢١, ٣٠٥ جلد
- [١٤] D. Kunii, O. Levenspiel, *Fluidization Technology*, Butterworth-Heinemann, .١٩٩١
- [١٥] Navid Mostoufi, Jamal Chaouki, "On The Axial Movement of Solids in Gas-Solid Fluidized Beds," *Trans IChemE*, .٢٠٠٠, ٧٨ جلد
- [١٦] O. Levenspiel, T. J. Fitzgerald, "A Warning on the misuse of the Dispersion Model," *Chemical Engineering Science*, ,٣٨ جلد pp. ٤٨٩-٤٩١, .١٩٨٣
- [١٧] F. Larachi, J. Chaouki, G. Kennedy, "٣-D mapping of solids flow fields in multiphase reactors with RPT," *AIChE*, ,٢ شماره ٤١, جلد pp. ٤٣٩-٤٤٣, .١٩٩٥
- [١٨] R. K. Upadhyay & S. Roy, "Investigation of hydrodynamics of binary fluidized beds via radioactive particle tracking and dual-densimetry," *Canadian Journal of Chemical Engineering*, ,٤ شماره ٨٨, جلد pp. ٦٠١-٦١٠, .٢٠١٠
- [١٩] H. G. Dehling, A. C. Hoffmann, and H. W. Stuu, "Stochastic Models for Transport in a Fluidized Bed," *Journal of Applied Mathematics*, ,١ شماره ٦٠, جلد pp. ٣٣٧-٣٥٨, .١٩٩٩
- [٢٠] Herold G. Dehling, Chutima Dechsiri, Timo Gottschalk, Philip C. Wright, Alex C. Hoffmann, "A Stochastic model for mixing and segregation in slugging fluidized beds," *Powder Technology*, ,١٧١ جلد pp. ١١٨-١٢٥, .٢٠٠٧
- [٢١] Timo Gottschalk, Herold G. Dehling, and Alex Hoffmann, "Multiphase Stochastic Model for Fluidized Beds," *Physical Review E*, .٢٠٠٨, ٧٧ جلد
- [٢٢] J. F. Davidson, D. Harrison, *Fluidised Particles*, Cambridge University Press, .١٩٦٣
- [٢٣] R. C. Darton, R. D. LaNAUZE, J. F. Davidson, and D. Harrison, "Bubble Growth due to Coalescence in Fluidised Beds," *Trans IChemE*, ,٥٥ جلد pp. ٢٧٤-٢٨٠, .١٩٧٧
- [٢٤] M. Stein, Y. L. Ding, J. P. K. Seville, D. J. Parker, "Solids Motion in Bubbling Gas Fluidised Beds," *Chemical Engineering Science*, ,٥٥ جلد pp. ٥٢٩١-٥٣٠٠, .٢٠٠٠

- [٢٥] C.Crowe, M. Sommerfield, and Y. Tsuji, *Multiphase Flows with Droplets and Particles*, CRC Press, .١٩٩٨
- [٢٦] R. D. Felice, “The Voidage Function for Fluid-Particle Interaction Systems,” *International Journal of Multiphase Flow*, جلد ٥٠, pp. ١٥٣-١٥٩, .١٩٩٤
- [٢٧] J. Leboireiro, G.G. Joseph, C. M. Hrenya, D. M. Snider, S. S. Banerjee, J. E. Galvin, “The Influence of Binary Drag Laws on Simulations of Species Segregation in Gas Fluidized Beds,” *Powder Technology*, جلد ١٨٤, pp. ٢٧٥-٢٩٠, .٢٠٠٨
- [٢٨] O. Goldreich, *Foundations of Cryptography: Basic Tools*, Cambridge University Press, .٢٠٠١
- [٢٩] I.N.S. Winaya, T. Shimizu, and D. Yamada, “A New Method to evaluate horizontal solid dispersion in a bubbling fluidized bed,” *Powder Technology*, جلد ١٧٨, شماره ٣, pp. ١٧٣-١٧٨, .٢٠٠٧

ضمیمه

جدول ۴-۱ تعداد جابجایی های محصور در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال سازی (متر بر ثانیه) | تعداد مسیرهای محصور به سمت پایین در داده های آزمایش | تعداد مسیرهای محصور به سمت پایین در نتیجه مدل سازی | تعداد مسیرهای محصور به سمت بالا در نتیجه مدل سازی | تعداد تعداد مسیرهای محصور به سمت بالا در نتیجه مدل سازی |
|------|-------------|-----------|---|---|--|---|--|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۲۳ | ۱۵۷ | ۵۷ | ۳۱۵ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱۳۰ | ۱۵۵ | ۲۱۰ | ۳۴۳ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۱۸۱۲ | ۵۸۵ | ۱۹۴۷ | ۸۹۱ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲۱۷۰ | ۷۲۲ | ۲۲۳۹ | ۱۱۷۱ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲۳۶۰ | ۷۳۰ | ۲۳۹۸ | ۱۱۷۰ |
| ۶ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۵ | ۱۹۶۰ | ۷۰۸ | ۱۹۹۷ | ۱۰۵۵ |
| ۷ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۵ | ۱۸۲۲ | ۵۰۱ | ۱۷۶۶ | ۷۰۳ |
| ۸ | HDPE | FCC | ۰,۲۵ | ۱۸۶ | ۳۶۰ | ۲۸۰ | ۸۳۰ |
| ۹ | استال کوچک | FCC | ۰,۲۵ | ۷۸ | ۲۴۲ | ۱۱۱ | ۴۷۹ |
| ۱۰ | استال متوسط | FCC | ۰,۵ | ۳۱۹ | ۴۲۰ | ۴۰۸ | ۷۳۱ |
| ۱۱ | استال کوچک | FCC | ۰,۵ | ۸۶۴ | ۴۷۰ | ۱۰۲۶ | ۸۶۸ |
| ۱۲ | استال کوچک | ماسه ریز | ۰,۲۵ | ۱۵۷ | ۱۹۶ | ۲۹۸ | ۴۷۸ |

جدول ۴-۲ تعداد جابجایی های نامحصور در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال سازی (متر بر ثانیه) | تعداد مسیرهای | تعداد مسیرهای | تعداد مسیرهای | تعداد مسیرهای |
|------|----------|----------|---|------------------|------------------|------------------|------------------|
|------|----------|----------|---|------------------|------------------|------------------|------------------|

| نامحضور به سمت پایین در داده‌های مدل‌سازی | نامحضور به سمت بالا در داده‌های آزمایش | نامحضور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی | نامحضور به سمت پایین در داده‌های آزمایش | | | | |
|---|--|--|---|------|-----------|-------------|----|
| ۲۲۵ | ۳۶ | ۳۶۲ | ۱۱ | ۰,۲۵ | ماسه درشت | استال کوچک | ۱ |
| ۴۵۱ | ۳۵۹ | ۵۸۵ | ۲۸۰ | ۰,۲۵ | ماسه درشت | استال بزرگ | ۲ |
| ۳۲۶ | ۷۰۳ | ۳۹۳ | ۸۰۴ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال متوسط | ۳ |
| ۳۶۸ | ۶۲۱ | ۴۹۰ | ۷۳۷ | ۰,۵ | ماسه درشت | PTFE | ۴ |
| ۳۸۶ | ۶۹۰ | ۴۵۷ | ۷۴۲ | ۰,۵ | ماسه درشت | HDPE | ۵ |
| ۳۲۱ | ۷۱۶ | ۴۵۱ | ۷۱۵ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال کوچک | ۶ |
| ۲۸۶ | ۵۹۹ | ۲۱۷ | ۶۹۱ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال بزرگ | ۷ |
| ۲۸۶ | ۲۰۱ | ۷۰۴ | ۱۳۹ | ۰,۲۵ | FCC | HDPE | ۸ |
| ۲۲۹ | ۷۷ | ۴۳۱ | ۴۳ | ۰,۲۵ | FCC | استال کوچک | ۹ |
| ۱۹۷ | ۱۰۱ | ۴۶۱ | ۹۰ | ۰,۵ | FCC | استال متوسط | ۱۰ |
| ۲۹۳ | ۳۹۵ | ۵۶۰ | ۳۵۳ | ۰,۵ | FCC | استال کوچک | ۱۱ |
| ۲۱۹ | ۱۰۰ | ۵۰۳ | ۷۷ | ۰,۲۵ | ماسه ریز | استال کوچک | ۱۲ |

جدول ۳-۴ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت پایین در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه

| واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت پایین در نتیجه مدل- سازی (ثانیه مربع) | واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت پایین در داده‌های آزمایش (ثانیه مربع) | میانگین زمان جابجایی- های محصور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های محصور به سمت پایین در داده‌های آزمایش (ثانیه) | سرعت افزوده سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | ذره بستر | ذره درشت | ردیف |
|---|--|--|---|---|-----------|------------|------|
| ۰,۳۴۶۲ | ۰,۱۹۰۲ | ۲,۵۰۹۷ | ۱,۴۸۶۸ | ۰,۲۵ | ماسه درشت | استال کوچک | ۱ |

| | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|------|-----------|-------------|----|
| ۰,۲۷۳۹ | ۰,۵۳۳۵ | ۲,۳۸۳۱ | ۱,۴۴۰۹ | ۰,۲۵ | ماسه درشت | استال بزرگ | ۲ |
| ۰,۲۳۰۵ | ۰,۱۱۴۴ | ۱,۸۰۳۰ | ۰,۹۸۸۲ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال متوسط | ۳ |
| ۰,۱۵۶۶ | ۰,۱۸۱۲ | ۱,۶۲۲۶ | ۰,۹۲۳۰ | ۰,۵ | ماسه درشت | PTFE | ۴ |
| ۰,۱۵۳۰ | ۰,۱۴۷۸ | ۱,۶۲۳۲ | ۰,۹۶۸۹ | ۰,۵ | ماسه درشت | HDPE | ۵ |
| ۰,۲۴۶۴ | ۰,۰۹۴۹ | ۱,۷۸۷۹ | ۰,۹۶۲۴ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال کوچک | ۶ |
| ۰,۱۸۳۶ | ۰,۱۶۶۳ | ۱,۶۸۶۵ | ۰,۹۲۲۵ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال بزرگ | ۷ |
| ۰,۳۶۲۸ | ۰,۵۷۲۴ | ۲,۴۹۹۳ | ۱,۶۳۹۱ | ۰,۲۵ | FCC | HDPE | ۸ |
| ۰,۴۶۵۰ | ۰,۳۹۶۴ | ۲,۵۴۴۶ | ۱,۵۰۱۶ | ۰,۲۵ | FCC | استال کوچک | ۹ |
| ۰,۳۲۸۲ | ۰,۱۸۹۹ | ۲,۲۰۱۰ | ۱,۳۶۹۰ | ۰,۵ | FCC | استال متوسط | ۱۰ |
| ۰,۳۵۴۵ | ۰,۲۴۴۷ | ۲,۱۹۰۹ | ۱,۳۰۵۵ | ۰,۵ | FCC | استال کوچک | ۱۱ |
| ۱,۲۳۷۲ | ۰,۲۹۵۲ | ۳,۶۵۷۵ | ۲,۴۸۸۳ | ۰,۲۵ | ماسه ریز | استال کوچک | ۱۲ |

جدول ۴-۴ میانگین و واریانس زمان جابجایی های محصور به سمت پایین در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف یکپارچه

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال سازی (متر بر ثانیه) | میانگین زمان جابجایی های محصور به سمت بالا در داده های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی های محصور به سمت بالا در نتیجه مدل سازی (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی های محصور به سمت بالا در نتیجه مدل سازی (ثانیه مربع) |
|------|-------------|-----------|--------------------------------------|---|--|---|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱,۱۳۸۰ | ۲,۱۳۵۴ | ۰,۳۰۲۵ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱,۵۳۷۶ | ۲,۲۴۳۳ | ۰,۲۸۵۷ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۷۷۴ | ۱,۸۰۷۱ | ۰,۲۷۱۸ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۶۹۹ | ۱,۶۶۱۳ | ۰,۱۷۱۵ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۰۵۹ | ۱,۶۷۱۸ | ۰,۱۶۶۱ |

| | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|------|-----------|-------------|----|
| ۰,۲۶۹۵ | ۰,۰۹۷۵ | ۱,۷۷۹۱ | ۰,۹۵۰۳ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال کوچک | ۶ |
| ۰,۱۹۰۲ | ۰,۱۰۶۲ | ۱,۷۲۸۸ | ۰,۹۴۳۰ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال بزرگ | ۷ |
| ۰,۳۳۴۶ | ۱,۹۶۴۳ | ۲,۰۲۳۴ | ۱,۴۳۷۶ | ۰,۲۵ | FCC | HDPE | ۸ |
| ۰,۴۲۶۱ | ۰,۴۹۰۶ | ۲,۱۷۰۰ | ۱,۲۰۷۵ | ۰,۲۵ | FCC | استال کوچک | ۹ |
| ۰,۳۹۹۵ | ۰,۳۲۷۳ | ۲,۰۹۲۵ | ۱,۴۲۱۲ | ۰,۵ | FCC | استال متوسط | ۱۰ |
| ۰,۳۸۲۴ | ۰,۱۹۷۳ | ۲,۰۶۰۰ | ۱,۱۴۸۳ | ۰,۵ | FCC | استال کوچک | ۱۱ |
| ۰,۷۲۰۲ | ۰,۲۲۰۸ | ۲,۵۸۴۵ | ۱,۱۰۶۱ | ۰,۲۵ | ماسه ریز | استال کوچک | ۱۲ |

جدول ۴-۵ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در داده‌های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی (ثانی) | واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در داده‌های آزمایش (مربع) | واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی (مربع) |
|------|-------------|-----------|--------------------------------------|--|--|---|--|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۳,۲۴۸۰ | ۵,۳۴۶۲ | ۰,۸۵۲۱ | ۵,۸۲۰۱ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۶,۱۳۶۵ | ۷,۶۵۱۸ | ۲۰,۷۲۴۹ | ۲۵,۶۶۱۸ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۳۷۶۲ | ۳,۶۴۷۰ | ۰,۸۹۲۹ | ۲,۵۰۲۷ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۱۰۱۹ | ۳,۴۱۲۸ | ۰,۶۶۳۳ | ۲,۵۶۶۴ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۲۱۶۵ | ۳,۳۲۶۸ | ۰,۶۷۸۶ | ۱,۹۵۴۸ |
| ۶ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۴۲۴۱ | ۳,۷۳۴۳ | ۰,۹۱۶۹ | ۲,۶۵۵۵ |
| ۷ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۱۴۲۶ | ۳,۱۱۳۱ | ۰,۷۳۶۳ | ۱,۲۵۷۰ |
| ۸ | HDPE | FCC | ۰,۲۵ | ۴,۰۵۳۲ | ۶,۰۶۹۴ | ۳,۹۶۶۳ | ۱۱,۰۸۴۱ |
| ۹ | استال کوچک | FCC | ۰,۲۵ | ۳,۹۶۷۹ | ۵,۶۲۹۷ | ۳,۴۷۰۵ | ۷,۲۸۹۱ |
| ۱۰ | استال متوسط | FCC | ۰,۵ | ۲,۶۸۶۵ | ۴,۵۰۲۶ | ۰,۵۷۸۶ | ۴,۰۷۱۹ |

| | | | | | | | |
|---------|--------|---------|--------|------|----------|------------|----|
| ۵,۸۶۵۳ | ۰,۸۳۱۲ | ۵,۰۰۳۷ | ۲,۷۵۶۹ | ۰,۵ | FCC | استال کوچک | ۱۱ |
| ۴۴,۰۰۹۳ | ۳,۵۳۶۴ | ۱۱,۴۵۳۹ | ۵,۰۰۲۶ | ۰,۲۵ | ماسه ریز | استال کوچک | ۱۲ |

جدول ۴-۶ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی (مربع) | واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی (مربع) |
|------|-------------|-----------|--------------------------------------|---|--|---|---|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۳,۸۲۲۰ | ۴,۰۱۴۷ | ۲,۳۸۷۲ | ۳,۵۹۴۷ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۵,۸۹۸۷ | ۴,۱۱۰۶ | ۲,۶۲۱۶ | ۱۹,۳۳۹۸ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۴۵۴۸ | ۲,۶۸۸۳ | ۰,۵۱۰۳ | ۱,۱۳۰۰ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۱۴۱۰ | ۲,۵۶۸۸ | ۰,۵۲۸۰ | ۰,۵۴۳۳ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۱۷۰۴ | ۲,۵۴۵۹ | ۰,۵۱۲۳ | ۰,۶۹۳۱ |
| ۶ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۵۵۱۴ | ۲,۶۶۴۹ | ۰,۵۵۴۹ | ۱,۰۹۷۹ |
| ۷ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۱۸۹۰ | ۲,۶۴۸۲ | ۰,۵۳۳۰ | ۰,۶۷۴۵ |
| ۸ | HDPE | FCC | ۰,۲۵ | ۳,۸۱۳۳ | ۳,۲۰۴۰ | ۱,۰۱۰۷ | ۵,۱۰۰۶ |
| ۹ | استال کوچک | FCC | ۰,۲۵ | ۳,۶۷۲۶ | ۳,۵۳۲۰ | ۱,۵۶۳۳ | ۳,۶۰۶۴ |
| ۱۰ | استال متوسط | FCC | ۰,۵ | ۲,۸۱۱۹ | ۲,۹۶۵۷ | ۰,۷۶۹۹ | ۰,۹۱۳۸ |
| ۱۱ | استال کوچک | FCC | ۰,۵ | ۲,۷۱۱۴ | ۳,۰۳۷۵ | ۰,۷۳۳۸ | ۱,۲۶۹۹ |
| ۱۲ | استال کوچک | ماسه ریز | ۰,۲۵ | ۴,۰۰۹۳ | ۴,۳۰۹۰ | ۲,۲۲۸۶ | ۳,۲۶۱۸ |

جدول ۴-۷ تعداد مسیرهای محصور در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | تعداد مسیرهای محصور به سمت پایین در داده‌های آزمایش | تعداد مسیرهای محصور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی | تعداد مسیرهای محصور به سمت بالا در داده- های آزمایش | تعداد مسیرهای محصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی |
|------|-------------|-----------|---|---|--|--|---|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۲۳ | ۸۰ | ۵۷ | ۱۳۰ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱۳۰ | ۹۴ | ۲۱۰ | ۱۶۶ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۱۸۸۲ | ۷۷۳ | ۱۹۴۷ | ۱۱۲۳ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲۱۷۰ | ۸۵۰ | ۲۲۳۹ | ۱۲۶۲ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲۳۶۰ | ۸۱۵ | ۲۳۹۸ | ۱۱۸۵ |
| ۶ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۵ | ۱۹۶۰ | ۸۵۳ | ۱۹۹۷ | ۱۲۱۷ |
| ۷ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۵ | ۱۸۲۲ | ۷۲۳ | ۱۷۶۶ | ۹۷۴ |
| ۸ | HDPE | FCC | ۰,۲۵ | ۱۸۶ | ۲۲۰ | ۲۸۰ | ۳۶۷ |
| ۹ | استال کوچک | FCC | ۰,۲۵ | ۷۸ | ۱۰ | ۱۱۱ | ۲۳ |
| ۱۰ | استال متوسط | FCC | ۰,۵ | ۳۱۹ | ۳۱۰ | ۴۰۸ | ۵۱۴ |
| ۱۱ | استال کوچک | FCC | ۰,۵ | ۸۶۴ | ۵۶۶ | ۱۰۲۶ | ۸۵۶ |
| ۱۲ | استال کوچک | ماسه ریز | ۰,۲۵ | ۱۵۷ | ۱۹ | ۲۹۸ | ۲۴ |

جدول ۴-۸ تعداد مسیرهای نامحصور در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | تعداد مسیرهای نامحصور به سمت پایین در داده‌های آزمایش | تعداد مسیرهای نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی | تعداد مسیرهای نامحصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش | تعداد مسیرهای نامحصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی |
|------|------------|-----------|---|---|--|--|---|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱۱ | ۱۲۴ | ۳۶ | ۱۷۱ |

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|------|-----------|-------------|----|
| ۴۱۰ | ۳۵۹ | ۳۰۹ | ۲۸۰ | ۰,۲۵ | ماسه درشت | استال بزرگ | ۲ |
| ۵۷۷ | ۷۰۳ | ۴۵۴ | ۸۰۴ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال متوسط | ۳ |
| ۵۲۵ | ۶۲۱ | ۴۳۹ | ۷۳۷ | ۰,۵ | ماسه درشت | PTFE | ۴ |
| ۵۷۷ | ۶۹۰ | ۴۳۱ | ۷۴۲ | ۰,۵ | ماسه درشت | HDPE | ۵ |
| ۵۹۶ | ۷۱۶ | ۵۲۳ | ۷۱۵ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال کوچک | ۶ |
| ۵۲۶ | ۵۹۹ | ۲۸۲ | ۶۹۱ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال بزرگ | ۷ |
| ۲۹۵ | ۲۰۱ | ۲۵۶ | ۱۳۹ | ۰,۲۵ | FCC | HDPE | ۸ |
| ۱۳ | ۷۷ | ۱۵ | ۴۳ | ۰,۲۵ | FCC | استال کوچک | ۹ |
| ۱۶۴ | ۱۰۱ | ۲۴۵ | ۹۰ | ۰,۵ | FCC | استال متوسط | ۱۰ |
| ۳۵۶ | ۳۹۵ | ۴۰۹ | ۳۵۳ | ۰,۵ | FCC | استال کوچک | ۱۱ |
| ۲۲ | ۱۰۰ | ۱۵ | ۷۷ | ۰,۲۵ | ماسه ریز | استال کوچک | ۱۲ |

جدول ۴-۹ میانگین و واریانس زمان جابجایی های محصور به سمت پایین در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف دوفازی

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال سازی (متر بر ثانیه) | میانگین زمان جابجایی های محصور به سمت پایین در داده های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی های محصور به سمت پایین در نتیجه مدل سازی (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی های محصور به سمت پایین در نتیجه مدل سازی (ثانیه مربع) | واریانس زمان جابجایی های محصور به سمت پایین در نتیجه مدل سازی (ثانیه مربع) |
|------|-------------|-----------|--------------------------------------|--|---|--|--|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱,۴۸۶۸ | ۲,۸۰۳۰ | ۰,۶۹۱۲ | ۰,۱۹۰۲ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱,۴۴۰۹ | ۲,۳۸۳۲ | ۰,۵۱۲۵ | ۰,۵۳۳۵ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۸۸۲ | ۱,۵۷۹۸ | ۰,۱۷۰۸ | ۰,۱۱۴۴ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۲۳۰ | ۱,۵۱۸۴ | ۰,۲۰۰۷ | ۰,۱۸۱۲ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۶۸۹ | ۱,۵۵۰۳ | ۰,۱۶۶۶ | ۰,۱۴۷۸ |

| | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|------|-----------|-------------|----|
| ۰,۱۶۰۲ | ۰,۰۹۴۹ | ۱,۵۴۵۲ | ۰,۹۶۲۴ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال کوچک | ۶ |
| ۰,۱۷۸۰ | ۰,۱۶۶۳ | ۱,۵۶۹۷ | ۰,۹۲۲۵ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال بزرگ | ۷ |
| ۱,۴۰۹۱ | ۰,۵۷۲۴ | ۲,۵۴۸۷ | ۱,۶۳۹۱ | ۰,۲۵ | FCC | HDPE | ۸ |
| ۰,۲۰۶۹ | ۰,۳۹۶۴ | ۲,۰۴۷۸ | ۱,۵۰۱۶ | ۰,۲۵ | FCC | استال کوچک | ۹ |
| ۰,۳۹۰۸ | ۰,۱۸۹۹ | ۲,۱۳۳۹ | ۱,۳۶۹۰ | ۰,۵ | FCC | استال متوسط | ۱۰ |
| ۰,۳۰۳۸ | ۰,۲۴۴۷ | ۱,۹۳۴۱ | ۱,۳۰۵۵ | ۰,۵ | FCC | استال کوچک | ۱۱ |
| ۰,۳۶۱۰ | ۰,۲۹۵۲ | ۳,۱۸۴۴ | ۲,۴۸۸۳ | ۰,۲۵ | ماسه ریز | استال کوچک | ۱۲ |

جدول ۴-۱۰ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های محصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی (ثانیه مربع) | واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی (ثانیه مربع) |
|------|-------------|-----------|--------------------------------------|---|--|---|---|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱,۱۳۸۰ | ۲,۳۸۲۹ | ۰,۶۳۱۹ | ۰,۱۴۸۵ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱,۵۳۷۶ | ۲,۴۰۴۰ | ۰,۶۰۱۰ | ۸,۳۳۹۲ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۷۷۴ | ۱,۵۵۹۸ | ۰,۱۹۴۶ | ۰,۱۰۴۸ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۶۹۹ | ۱,۴۸۴۸ | ۰,۱۹۴۱ | ۰,۱۴۲۸ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۰۵۹ | ۱,۵۲۶۴ | ۰,۱۷۵۵ | ۰,۰۹۳۴ |
| ۶ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۵۰۳ | ۱,۵۰۹۴ | ۰,۱۸۷۸ | ۰,۰۹۷۵ |
| ۷ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۴۳۰ | ۱,۵۳۹۷ | ۰,۱۸۶۹ | ۰,۱۰۶۲ |
| ۸ | HDPE | FCC | ۰,۲۵ | ۱,۴۳۷۶ | ۲,۰۴۳۴ | ۱,۵۱۲۹ | ۱,۹۶۴۳ |
| ۹ | استال کوچک | FCC | ۰,۲۵ | ۱,۲۰۷۵ | ۲,۲۸۵۰ | ۱,۷۲۹۶ | ۰,۴۹۰۶ |

| | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|------|----------|-------------|----|
| ۰,۴۴۲۰ | ۰,۳۲۷۳ | ۲,۰۲۴۸ | ۱,۴۲۱۲ | ۰,۵ | FCC | استال متوسط | ۱۰ |
| ۰,۲۵۲۰ | ۰,۱۹۷۳ | ۱,۷۷۴۸ | ۱,۱۴۸۳ | ۰,۵ | FCC | استال کوچک | ۱۱ |
| ۱,۱۴۶۴ | ۰,۲۲۰۸ | ۲,۳۷۹۱ | ۱,۱۰۶۱ | ۰,۲۵ | ماسه ریز | استال کوچک | ۱۲ |

جدول ۴- ۱۱ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در داده‌های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی (ثانیه) |
|------|-------------|-----------|--------------------------------------|--|---|---|---|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۳,۲۴۸۰ | ۵,۶۹۳۵ | ۰,۸۲۵۱ | ۵,۰۶۰۱ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۶,۱۳۶۵ | ۸,۵۲۱۷ | ۲۰,۷۲۴۹ | ۳۵,۲۶۱۴ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۳۷۶۲ | ۳,۲۲۲۳ | ۰,۸۹۲۹ | ۲,۰۲۱۸ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۱۰۱۹ | ۳,۰۵۱۶ | ۰,۶۶۳۳ | ۱,۸۲۴۴ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۲۱۶۵ | ۳,۰۸۱۰ | ۰,۶۷۸۶ | ۱,۷۵۱۶ |
| ۶ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۴۲۴۱ | ۳,۱۹۱۷ | ۰,۹۱۶۹ | ۱,۸۶۰۹ |
| ۷ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۱۴۲۶ | ۲,۸۳۳۵ | ۰,۷۳۶۳ | ۱,۲۲۷۵ |
| ۸ | HDPE | FCC | ۰,۲۵ | ۴,۰۵۳۲ | ۵,۶۱۶۰ | ۳,۹۶۶۳ | ۷,۹۷۱۶ |
| ۹ | استال کوچک | FCC | ۰,۲۵ | ۳,۹۶۷۹ | ۵,۲۱۶۴ | ۳,۴۷۰۵ | ۳,۱۲۶۵ |
| ۱۰ | استال متوسط | FCC | ۰,۵ | ۲,۶۸۶۵ | ۴,۰۸۴۶ | ۰,۵۷۸۶ | ۲,۷۴۷۰ |
| ۱۱ | استال کوچک | FCC | ۰,۵ | ۲,۷۵۶۹ | ۴,۱۲۳۴ | ۰,۸۳۱۲ | ۳,۶۸۱۵ |
| ۱۲ | استال کوچک | ماسه ریز | ۰,۲۵ | ۵,۰۰۲۶ | ۶,۳۵۴۳ | ۳,۵۳۶۴ | ۲,۸۵۲۹ |

جدول ۴- ۱۲ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در داده‌های آزمایشی (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در داده‌های آزمایشی (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی (ثانیه) |
|------|-------------|-----------|--------------------------------------|--|--|--|--|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۳,۸۲۲۰ | ۴,۹۷۲۶ | ۳,۵۹۴۷ | ۵,۰۴۶۹ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۵,۸۹۸۷ | ۶,۱۹۹۳ | ۱۹,۳۳۹۸ | ۱۱,۱۶۷۲ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۴۵۴۸ | ۲,۷۰۷۲ | ۱,۱۳۰۰ | ۰,۸۲۷۱ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۱۴۱۰ | ۲,۵۳۲۵ | ۰,۵۴۳۳ | ۰,۷۸۰۳ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۱۷۰۴ | ۲,۶۵۶۳ | ۰,۶۹۳۱ | ۰,۷۷۷۳ |
| ۶ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۵۵۱۴ | ۲,۷۴۳۵ | ۱,۰۹۷۹ | ۰,۹۲۶۷ |
| ۷ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۱۸۹۰ | ۲,۶۰۸۵ | ۰,۶۷۴۵ | ۰,۷۶۵۰ |
| ۸ | HDPE | FCC | ۰,۲۵ | ۳,۸۱۳۳ | ۴,۱۵۷۷ | ۵,۱۰۰۶ | ۴,۳۹۸۱ |
| ۹ | استال کوچک | FCC | ۰,۲۵ | ۳,۶۷۲۶ | ۴,۳۳۸۳ | ۳,۶۰۶۴ | ۳,۱۱۶۵ |
| ۱۰ | استال متوسط | FCC | ۰,۵ | ۲,۸۱۱۹ | ۳,۲۵۶۷ | ۰,۹۱۳۸ | ۱,۲۹۸۱ |
| ۱۱ | استال کوچک | FCC | ۰,۵ | ۲,۷۱۱۴ | ۳,۱۶۹۷ | ۱,۲۶۹۹ | ۱,۲۱۷۳ |
| ۱۲ | استال کوچک | ماسه ریز | ۰,۲۵ | ۴,۰۰۹۳ | ۴,۵۰۰۵ | ۳,۲۶۱۸ | ۲,۹۳۳۶ |

جدول ۴- ۱۳ تعداد مسیرهای محصور در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | تعداد مسیرهای محصور به سمت پایین در داده‌های آزمایشی | تعداد مسیرهای محصور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی | تعداد مسیرهای محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایشی | تعداد مسیرهای محصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی |
|------|----------|----------|--------------------------------------|--|--|---|---|
| | | | | | | | |

| | | | | | | | |
|-----|------|-----|------|------|-----------|-------------|----|
| ۲۵ | ۵۷ | ۱۱ | ۲۳ | ۰,۲۵ | ماسه درشت | استال کوچک | ۱ |
| ۲۸ | ۲۱۰ | ۹ | ۱۳۰ | ۰,۲۵ | ماسه درشت | استال بزرگ | ۲ |
| ۴۴۷ | ۱۹۴۷ | ۲۶۴ | ۱۸۸۲ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال متوسط | ۳ |
| ۵۳۹ | ۲۲۳۹ | ۳۳۷ | ۲۱۷۰ | ۰,۵ | ماسه درشت | PTFE | ۴ |
| ۴۹۳ | ۲۳۹۸ | ۳۰۷ | ۲۳۶۰ | ۰,۵ | ماسه درشت | HDPE | ۵ |
| ۶۳۹ | ۱۹۹۷ | ۳۳۲ | ۱۹۶۰ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال کوچک | ۶ |
| ۳۴۴ | ۱۷۶۶ | ۱۸۱ | ۱۸۲۲ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال بزرگ | ۷ |
| ۷۷ | ۲۸۰ | ۵۰ | ۱۸۶ | ۰,۲۵ | FCC | HDPE | ۸ |
| ۲۷ | ۱۱۱ | ۱۶ | ۷۸ | ۰,۲۵ | FCC | استال کوچک | ۹ |
| ۱۱۹ | ۴۰۸ | ۷۶ | ۳۱۹ | ۰,۵ | FCC | استال متوسط | ۱۰ |
| ۲۶۰ | ۱۰۲۶ | ۱۶۲ | ۸۶۴ | ۰,۵ | FCC | استال کوچک | ۱۱ |
| ۱۰ | ۲۹۸ | ۶ | ۱۵۷ | ۰,۲۵ | ماسه ریز | استال کوچک | ۱۲ |

جدول ۴-۱۴ تعداد مسیرهای نامحصور در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی

| تعداد مسیرهای نامحصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی | تعداد مسیرهای نامحصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش | تعداد مسیرهای نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی | تعداد مسیرهای نامحصور به سمت پایین در داده‌های آزمایش | سرعت افزوده سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | ذره بستر | ذره درشت | ردیف |
|---|--|--|---|--------------------------------------|-----------|-------------|------|
| ۷۲ | ۳۶ | ۳۸ | ۱۱ | ۰,۲۵ | ماسه درشت | استال کوچک | ۱ |
| ۳۰۸ | ۳۵۹ | ۱۸۰ | ۲۸۰ | ۰,۲۵ | ماسه درشت | استال بزرگ | ۲ |
| ۸۰۳ | ۷۰۳ | ۳۹۵ | ۸۰۴ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال متوسط | ۳ |
| ۷۹۳ | ۶۲۱ | ۴۳۷ | ۷۳۷ | ۰,۵ | ماسه درشت | PTFE | ۴ |
| ۸۱۵ | ۶۹۰ | ۳۹۰ | ۷۴۲ | ۰,۵ | ماسه درشت | HDPE | ۵ |
| ۸۱۶ | ۷۱۶ | ۴۴۶ | ۷۱۵ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال کوچک | ۶ |

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|------|-----------|-------------|----|
| ۵۹۸ | ۵۹۹ | ۲۱۹ | ۶۹۱ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال بزرگ | ۷ |
| ۲۶۱ | ۲۰۱ | ۱۴۰ | ۱۳۹ | ۰,۲۵ | FCC | HDPE | ۸ |
| ۷۵ | ۷۷ | ۴۴ | ۴۳ | ۰,۲۵ | FCC | استال کوچک | ۹ |
| ۱۴۶ | ۱۰۱ | ۱۱۶ | ۹۰ | ۰,۵ | FCC | استال متوسط | ۱۰ |
| ۴۱۳ | ۳۹۵ | ۲۷۳ | ۳۵۳ | ۰,۵ | FCC | استال کوچک | ۱۱ |
| ۲۴ | ۱۰۰ | ۱۰ | ۷۷ | ۰,۲۵ | ماسه ریز | استال کوچک | ۱۲ |

جدول ۴-۱۵ میانگین و واریانس زمان جابجایی های محصور به سمت پایین در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف سه فازی

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال سازی (متر بر ثانیه) | میانگین زمان جابجایی های محصور به سمت پایین در داده های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی های محصور به سمت پایین در نتیجه مدل سازی (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی های محصور به سمت پایین در نتیجه مدل سازی (ثانیه مربع) |
|------|-------------|-----------|--------------------------------------|--|---|--|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱,۴۸۶۸ | ۲,۲۰۴۰ | ۰,۲۴۶۶ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱,۴۴۰۹ | ۲,۶۰۲۵ | ۰,۳۵۴۳ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۸۸۲ | ۱,۳۸۷۸ | ۰,۱۱۴۹ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۲۳۰ | ۱,۲۹۳۲ | ۰,۱۱۷۵ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۶۸۹ | ۱,۳۸۴۰ | ۰,۱۲۲۴ |
| ۶ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۶۲۴ | ۱,۳۳۴۷ | ۰,۱۰۷۱ |
| ۷ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۲۲۵ | ۱,۳۵۲۱ | ۰,۱۶۲۱ |
| ۸ | HDPE | FCC | ۰,۲۵ | ۱,۶۳۹۱ | ۲,۰۶۵۵ | ۰,۸۸۱۳ |
| ۹ | استال کوچک | FCC | ۰,۲۵ | ۱,۵۰۱۶ | ۲,۲۳۲۰ | ۰,۱۵۴۱ |
| ۱۰ | استال متوسط | FCC | ۰,۵ | ۱,۳۶۹۰ | ۱,۹۱۷۹ | ۰,۴۳۶۱ |

| | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|------|----------|------------|----|
| ۰,۱۶۷۷ | ۰,۲۴۴۷ | ۱,۶۷۲۷ | ۱,۳۰۵۵ | ۰,۵ | FCC | استال کوچک | ۱۱ |
| ۰,۱۰۴۷ | ۰,۲۹۵۲ | ۲,۶۰۶۰ | ۲,۴۸۸۳ | ۰,۲۵ | ماسه ریز | استال کوچک | ۱۲ |

جدول ۴-۱۶ میانگین و واریانس زمان جابجایی های محصور به سمت بالا در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف سه فازی

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال سازی (متر بر ثانیه) | میانگین زمان جابجایی های محصور به سمت بالا در داده های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی های محصور به سمت بالا در نتیجه مدل سازی (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی های محصور به سمت بالا در نتیجه مدل سازی (ثانیه مربع) | واریانس زمان جابجایی های محصور به سمت بالا در نتیجه مدل سازی (ثانیه مربع) |
|------|-------------|-----------|--------------------------------------|---|--|---|---|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱,۱۳۸۰ | ۱,۹۷۰۳ | ۰,۲۱۲۲ | ۰,۱۴۸۵ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱,۵۳۷۶ | ۲,۲۳۵۲ | ۰,۳۲۹۰ | ۸,۳۳۹۲ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۷۷۴ | ۱,۳۸۲۲ | ۰,۱۱۵۵ | ۰,۱۰۴۸ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۶۹۹ | ۱,۲۹۳۴ | ۰,۱۱۳۲ | ۰,۱۴۲۸ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۰۵۹ | ۱,۳۳۹۴ | ۰,۱۰۳۰ | ۰,۰۹۳۴ |
| ۶ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۵۰۳ | ۱,۳۳۹۲ | ۰,۱۵۴۹ | ۰,۰۹۷۵ |
| ۷ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۴۳۰ | ۱,۳۷۳۱ | ۰,۱۱۸۶ | ۰,۱۰۶۲ |
| ۸ | HDPE | FCC | ۰,۲۵ | ۱,۴۳۷۶ | ۱,۶۶۰۷ | ۰,۸۱۳۱ | ۱,۹۶۴۳ |
| ۹ | استال کوچک | FCC | ۰,۲۵ | ۱,۲۰۷۵ | ۱,۷۸۶۲ | ۰,۳۴۷۳ | ۰,۴۹۰۶ |
| ۱۰ | استال متوسط | FCC | ۰,۵ | ۱,۴۲۱۲ | ۱,۶۶۹۲ | ۰,۳۲۷۳ | ۰,۳۲۷۳ |
| ۱۱ | استال کوچک | FCC | ۰,۵ | ۱,۱۴۸۳ | ۱,۵۴۰۳ | ۰,۱۷۶۴ | ۰,۱۹۷۳ |
| ۱۲ | استال کوچک | ماسه ریز | ۰,۲۵ | ۱,۱۰۶۱ | ۲,۰۶۲۲ | ۰,۲۸۱۶ | ۰,۲۲۰۸ |

جدول ۴-۱۷ میانگین و واریانس زمان جابجایی های نامحصور به سمت پایین در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف سه فازی

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال سازی (متر بر ثانیه) | میانگین زمان جابجایی های نامحصور به سمت پایین در داده های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی های نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل سازی (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی های نامحصور به سمت پایین در داده های آزمایش (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی های نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل سازی (ثانیه) |
|------|-------------|-----------|--------------------------------------|--|---|--|---|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۳,۲۴۸۰ | ۵,۹۹۲۲ | ۰,۸۲۵۱ | ۱۰,۲۳۵۲ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۶,۱۳۶۵ | ۱۳,۴۰۰۳ | ۲۰,۷۲۴۹ | ۱۱۰,۱۱۴۷ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۳۷۶۲ | ۳,۰۱۳۸ | ۰,۸۹۲۹ | ۱,۸۹۳۹ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۱۰۱۹ | ۲,۸۸۰۰ | ۰,۶۶۳۳ | ۲,۰۵۶۳ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۲۱۶۵ | ۲,۹۳۱۷ | ۰,۶۷۸۶ | ۱,۹۲۰۳ |
| ۶ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۴۲۴۱ | ۳,۰۱۰۰ | ۰,۹۱۶۹ | ۱,۹۴۵۰ |
| ۷ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۱۴۲۶ | ۲,۷۷۴۱ | ۰,۷۳۶۳ | ۱,۴۸۰۰ |
| ۸ | HDPE | FCC | ۰,۲۵ | ۴,۰۵۳۲ | ۵,۳۸۲۹ | ۳,۹۶۶۳ | ۹,۷۹۶۸ |
| ۹ | استال کوچک | FCC | ۰,۲۵ | ۳,۹۶۷۹ | ۵,۱۲۸۴ | ۳,۴۷۰۵ | ۶,۸۹۰۱ |
| ۱۰ | استال متوسط | FCC | ۰,۵ | ۲,۶۸۶۵ | ۳,۷۲۵۴ | ۰,۵۷۸۶ | ۲,۴۷۸۶ |
| ۱۱ | استال کوچک | FCC | ۰,۵ | ۲,۷۵۶۹ | ۳,۸۳۴۵ | ۰,۸۳۱۲ | ۳,۵۴۸۸ |
| ۱۲ | استال کوچک | ماسه ریز | ۰,۲۵ | ۵,۰۰۲۶ | ۵,۷۲۰۰ | ۳,۵۳۶۴ | ۳,۳۷۰۷ |

جدول ۴-۱۸ میانگین و واریانس زمان جابجایی های نامحصور به سمت بالا در داده های آزمایشی و مدل زنجیره های مارکوف سه فازی

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال سازی (متر بر ثانیه) | میانگین زمان جابجایی های نامحصور به سمت بالا در داده های | میانگین زمان جابجایی های نامحصور به سمت بالا در نتیجه | واریانس زمان جابجایی های نامحصور به سمت بالا در | واریانس زمان جابجایی های نامحصور به سمت بالا در |
|------|----------|----------|--------------------------------------|--|---|---|---|
|------|----------|----------|--------------------------------------|--|---|---|---|

| نتیجه مدل- سازی (ثانیه) | داده‌های آزمایش (ثانیه) | مدل‌سازی (ث) انیه | آزمایش (ثانیه) | | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------|------|-----------|-------------|----|
| ۵,۸۴۵۸ | ۳,۵۹۴۷ | ۴,۴۸۳۱ | ۳,۸۲۲۰ | ۰,۲۵ | ماسه درشت | استال کوچک | ۱ |
| ۳۶,۶۵۹۳ | ۱۹,۳۳۹۸ | ۹,۹۹۶۵ | ۵,۸۹۸۷ | ۰,۲۵ | ماسه درشت | استال بزرگ | ۲ |
| ۲,۱۸۱۲ | ۱,۱۳۰۰ | ۳,۰۳۲۸ | ۲,۴۵۴۸ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال متوسط | ۳ |
| ۱,۵۵۴۱ | ۰,۵۴۳۳ | ۲,۶۸۷۸ | ۲,۱۴۱۰ | ۰,۵ | ماسه درشت | PTFE | ۴ |
| ۱,۶۸۸۲ | ۰,۶۹۳۱ | ۲,۸۱۸۰ | ۲,۱۷۰۴ | ۰,۵ | ماسه درشت | HDPE | ۵ |
| ۱,۹۹۵۹ | ۱,۰۹۷۹ | ۲,۹۵۷۲ | ۲,۵۵۱۴ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال کوچک | ۶ |
| ۱,۵۰۴۲ | ۰,۶۷۴۵ | ۲,۸۰۷۷ | ۲,۱۸۹۰ | ۰,۵ | ماسه درشت | استال بزرگ | ۷ |
| ۱۲,۶۷۸۲ | ۵,۱۰۰۶ | ۵,۱۶۳۰ | ۳,۸۱۳۳ | ۰,۲۵ | FCC | HDPE | ۸ |
| ۶,۴۰۴۴ | ۳,۶۰۶۴ | ۴,۶۸۷۴ | ۳,۶۷۲۶ | ۰,۲۵ | FCC | استال کوچک | ۹ |
| ۱,۵۰۰۸ | ۰,۹۱۳۸ | ۳,۰۷۷۰ | ۲,۸۱۱۹ | ۰,۵ | FCC | استال متوسط | ۱۰ |
| ۱,۶۰۴۴ | ۱,۲۶۹۹ | ۳,۲۰۲۷ | ۲,۷۱۱۴ | ۰,۵ | FCC | استال کوچک | ۱۱ |
| ۷,۷۵۳۹ | ۳,۲۶۱۸ | ۵,۷۴۷۸ | ۴,۰۰۹۳ | ۰,۲۵ | ماسه ریز | استال کوچک | ۱۲ |

Abstract

Fluidized beds have established themselves as crucial components within the chemical industry, offering unparalleled advantages in terms of solid mixing and heat transfer efficiency. In scenarios necessitating the fluidization of two dissimilar solids, particularly those characterized by significant variations in physical properties, the behavior of larger solid particles becomes a paramount concern. Such systems find widespread application in processes associated with biomass and petrochemical industries. Despite their ubiquity and significance, research pertaining to binary fluidization has received comparatively less attention compared to the well-studied realm of mono-component fluidization.

This investigation centers on the comprehensive analysis of large solid particle behavior within binary fluidized systems, with a particular focus on modeling this intricate phenomenon. Owing to the inherent complexity of large solid particle dynamics, a singular prevailing model remains elusive. To address this gap, statistical methodologies, notably Markov chain models, have been employed to capture the intricacies of these systems.

The developed Markov chain models encompass several critical parameters governing particle movement in distinct directions, computed using established equations and algorithms tailored to particle velocity within bubbling fluidized beds. Additionally, empirical techniques, leveraging data from Residence Time Distribution (RTD) experiments, were employed to establish parameters governing phase transitions, a previously unexplored facet of modeling.

This study introduces and evaluates three distinct versions of Markov chain models to elucidate the movement patterns of large solid particles. The results obtained were subjected to rigorous analysis, comparing them against the backdrop of the concepts of restricted and unrestricted movement and their associated RTD profiles. This Comparison was done using the statistical distance concept, as a measure of comparing two different distributions.

The findings of this research reveal that while the lumped Markov chain model effectively computes the mean RTDs for each case, it fails to capture the distribution patterns. In contrast, the two-phase and three-phase Markov chain models exhibit enhanced precision, enabling the calculation of both mean and distribution patterns for length and time of RTDs for restricted and unrestricted areas.

Keywords: Gas-Solid Fluidization, Markov Chains, Bubbling Fluidized Beds, Residence Time Distribution, Restricted and Unrestricted Movements



**Sharif University of Technology
(Chemical & Petroleum Engineering Department)**

**Hydrodynamic Analysis of Fuel Motion in a Binary Bubbling Fluidized
Bed using Markov Chains Method**

**By:
Amirhossein Alivandlai**

**Supervisor:
Dr. Farzam Fotovat**

September 2023