

بسم الله الرحمن الرحيم



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 علیوند لای

استاد راهنما

دکتر فرزام فتوت

شهریور ۱۴۰۲

برگه تصویب نامه

تصویب نامه

به نام خدا

دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی شیمی و نفت

پایان نامه کارشناسی ارشد

این پایان نامه به عنوان تحقیق 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:

| | | |
|-------|-------|-------|
| | | |
| | | |
| | | |

تاریخ:.....



اظهارنامه

(اصل متن و محتوای پایان‌نامه کارشناسی ارشد)

عنوان پایان‌نامه:

نام استاد راهنمای همکار: _____ نام استاد راهنمای: _____

اظهار می‌دارم: _____

۱- متن و نتایج علمی ارائه شده در این پایان‌نامه اصیل بوده و منحصرًّا توسط این‌جانب و زیرنظر استادان (راهنما، همکار و مشاور) نامبرده شده در بالا تهیه شده است.

۲- متن پایان‌نامه به این صورت در هیچ جای دیگر منتشر نشده است.

۳- متن و نتایج مندرج در این پایان‌نامه، حاصل تحقیقات این‌جانب به عنوان دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف است.

۴- کلیه مطالعی که از منابع دیگر در این پایان‌نامه مورد استفاده قرار گرفته، با ذکر مرجع مشخص شده است.

نام دانشجو: _____

تاریخ

امضا

نتایج تحقیقات مندرج در این پایان‌نامه و دستاوردهای مادی و معنوی ناشی از آن (شامل فرمول‌ها، توابع کتابخانه‌ای، نرم‌افزارها، سخت‌افزارها و مواردی که قابلیت تبت 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 تبت 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 مأخذ بلامنع است.

نام استادان راهنمای: _____

تاریخ

تاریخ

امضا

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 عزیزی که با صبری مثال‌زدنی از پشتیبانی و حمایت معنوی اینجانب در طی این مدت، دست نکشیدند.

چکیده

Minor Edits, Innovations were stated

بسترهاي سيال با توجه به قابلیت‌های منحصر‌بفرد خود در اختلاط ذرات جامد و همچنین کیفیت انتقال حرارت صورت گرفته، در صنعت مورد استفاده گستردۀ قرار گرفته‌اند. در برخی موارد که سيال‌سازی 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 گستردۀ‌ای در صنایع فرآوری زیست‌توده‌ها و یا فرآیندهای پتروشیمیایی استفاده می‌شوند. با وجود اهمیت این سیستم‌ها و کاربری گستردۀ‌شان، در مقایسه با سیستم‌های سيال‌سازی تکذره‌ای رایج کمتر مورد مطالعه و پژوهش قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های حاصل از رדיابی 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 سيال، محاسبه می‌شود. از طرفی میزان احتمال تغییر فاز ذره بین فازهای حباب و متراکم (مولسیون)، 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 سيال، از فرم‌های مختلف روش زنجیره‌های مارکوف از قبیل یکپارچه، دو فازی و سه فازی برای مدل‌سازی حرکت و پراکندگی ذره درشت (شیء) در بستر سيال 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 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 دو فازی و سه فازی هر دو از دقت بالایی برخوردارند اما نمی‌توان از مدل یکپارچه استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: سيال‌سازی گاز-جامد، زنجیره‌های مارکوف، بسترهاي سيال حبابی، توزیع زمان ماند، جابجایی‌های محصور و نامحصور

فهرست مطالب

| | |
|----|--|
| ۵ | چکیده |
| ۶ | فهرست جداول |
| ۷ | فهرست تصویرها |
| ۱ | فصل ۱: مقدمه |
| ۱ | ۱-۱ اهمیت موضوع و بیان مسئله |
| ۲ | ۱-۲ اهداف پژوهشی |
| ۳ | ۱-۳ ساختار پایان نامه |
| ۴ | فصل ۲: مبانی نظری و مروری بر پژوهش های پیشین |
| ۴ | ۲-۱ سیال سازی و بستر های سیال |
| ۸ | ۲-۲ دسته بندی گلدارت ذرات در سیال سازی گازی |
| ۱۰ | ۲-۳ بهبود سیال سازی ذرات گروه D به کمک ذرات گروه A و B |
| ۱۱ | ۲-۴ جریان چند فازی در بستر های سیال |
| ۱۱ | ۲-۴-۱ سرعت های مشخصه |
| ۱۱ | ۲-۴-۲ توزیع حبابها |
| ۱۲ | ۲-۴-۳ مکانیسم حرکت ذرات در بستر |
| ۱۳ | ۲-۵ مدل سازی جابجایی ذرات در طول بستر |
| ۱۳ | ۲-۵-۱ توزیع زمان ماند و محاسبه آن |
| ۱۴ | ۲-۵-۲ مدل نفوذ و جابجایی برای ذرات در بستر سیال |
| ۱۶ | ۲-۶ جابجایی های مقید و نامقید |
| ۲۰ | فصل ۳: مدل سازی و روش ها |
| ۲۰ | ۳-۱ مقدمه |
| ۲۰ | ۳-۲ سیستم مورد بررسی |

| | |
|---------|--|
| ۲۲..... | ۳-۳ گسته‌سازی هندسه |
| ۲۳..... | ۳-۴ معادلات ابتدایی بررسی هیدرودینامیکی سیستم |
| ۲۴..... | ۳-۵ روش‌های آماری برای مدل‌سازی حرکت ذرات در بسترهاي سیال |
| ۲۵..... | ۳-۵-۱ مقدمات روش زنجیرهای مارکوف |
| ۲۶..... | ۳-۵-۲ روش زنجیرهای مارکوف تک فازی برای حرکت ذرات در بسترهاي سیال حبابی |
| ۲۷..... | ۳-۵-۳ روش زنجیرهای مارکوف یکپارچه |
| ۲۸..... | ۳-۵-۴ روش زنجیرهای مارکوف دوفازی (بدون جریان خلیج) |
| ۳۰..... | ۳-۵-۵ روش زنجیرهای مارکوف سه‌فازی (همراه با جریان خلیج) |
| ۳۲..... | ۳-۶ ارتباط پارامترهای مدل با پدیده‌های فیزیکی |
| ۳۳..... | ۳-۷ روند مدل‌سازی |
| ۳۴..... | ۳-۷-۱ تعیین مقادیر β و δ با استفاده از مدل‌سازی‌های موجود در مقالات برای حرکت ذره |
| ۳۷..... | ۳-۷-۲ تعیین تجربی مقادیر λ |
| ۳۸..... | ۳-۷-۳ تشکیل ماتریس انتقال |
| ۳۹..... | ۳-۸ تفاوت روش‌های مختلف |
| ۳۹..... | ۳-۸-۱ روش زنجیرهای مارکوف یکپارچه |
| ۴۰..... | ۳-۸-۲ روش زنجیرهای مارکوف دو فازی |
| ۴۰..... | ۳-۸-۳ روش زنجیرهای مارکوف سه فازی |
| ۴۲..... | فصل ۴: نتایج و بحث |
| ۴۲..... | ۴-۱ مقدمه |
| ۴۲..... | ۴-۲ بحث در رابطه با داده‌ها و آماده‌سازی برای تحلیل آنها |
| ۴۲..... | ۴-۳ تحلیل داده‌های سیستم مورد بررسی |
| ۴۳..... | ۴-۳-۱ توزیع طولی میانگین زمانی موقعیت ذرات در سیستم |
| ۴۴..... | ۴-۴ تحلیل توزیع جابجایی و ضریب نفوذ |
| ۴۴..... | ۴-۴-۱ الگوریتم محاسبه میانگین مریعات جابجایی طولی و ضریب نفوذ |
| ۴۶..... | ۴-۵ بررسی درستی مدل‌های نفوذی و جابجایی |
| ۴۶..... | ۴-۵-۱ بررسی جابجایی‌های مقید و نامقید |
| ۴۸..... | ۴-۵-۲ واریانس توزیع زمان ماند |
| ۵۰..... | ۴-۶ بررسی نتایج روش زنجیرهای مارکوف یکپارچه |

| | |
|----------|---|
| 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 ۲-۱ 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 ۳-۱ خواص ذرات درشت مورد استفاده در آزمایش‌ها [۱۰]..... | ۲۱ |
| جدول ۳-۲ 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 سلول-های 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 جابجایی‌های محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی..... | ۱۱۵ |
| جدول ۴-۱۱ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی..... | ۱۱۶ |
| جدول ۴-۱۲ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی..... | ۱۱۷ |
| جدول ۴-۱۳ تعداد مسیرهای محصور در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی .. | ۱۱۷ |
| جدول ۴-۱۴ تعداد مسیرهای نامحصور در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی .. | ۱۱۸ |
| جدول ۴-۱۵ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت پایین در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی..... | ۱۱۹ |
| جدول ۴-۱۶ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی..... | ۱۲۰ |
| جدول ۴-۱۷ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی..... | ۱۲۱ |
| جدول ۴-۱۸ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی..... | ۱۲۱ |

فهرست تصویرها

| | |
|---|----|
| شکل ۱ - ۱ - سرمایه‌گذاری‌های ۵ سال اخیر در بخش انرژی [۱] | ۱ |
| شکل ۲ - ۱ رژیم‌های سیالیت مختلف در سیستم‌های بستر سیال گاز-جامد [۸] | ۵ |
| شکل 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 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 پرتتاب ذرات واقع در بالای سطح بستر [۱۳] | ۱۳ |
| شکل ۲ - ۴ نمونه‌ای از جابجایی‌های مقید الف) در مسیر حرکت به بالا. ب) در مسیر حرکت به پایین | ۱۷ |
| شکل ۲ - ۵ نمونه‌ای از جابجایی‌های نامقید الف) در مسیر حرکت به بالا. ب) در مسیر حرکت به پایین | ۱۸ |
| شکل ۳ - ۱ بستر سیال گستته شده که در آن احتمالات حرکات مختلف ذره با استفاده از پیکان نمایش داده شده‌اند | ۲۶ |
| شکل ۳ - ۲ شماتیک روش زنجیره‌های مارکوف دوفازی برای جابجایی ذره در یک بستر سیال حبابی | ۲۹ |
| شکل ۳ - ۳ شماتیک روش زنجیره‌های مارکوف سه فازی برای جابجایی ذره در یک بستر سیال حبابی | ۳۱ |
| شکل ۳ - ۴ فلوچارت روند مدل‌سازی | ۳۴ |
| 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) | ۴۳ |
| شکل ۴ - 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 افروده 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 افروده 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

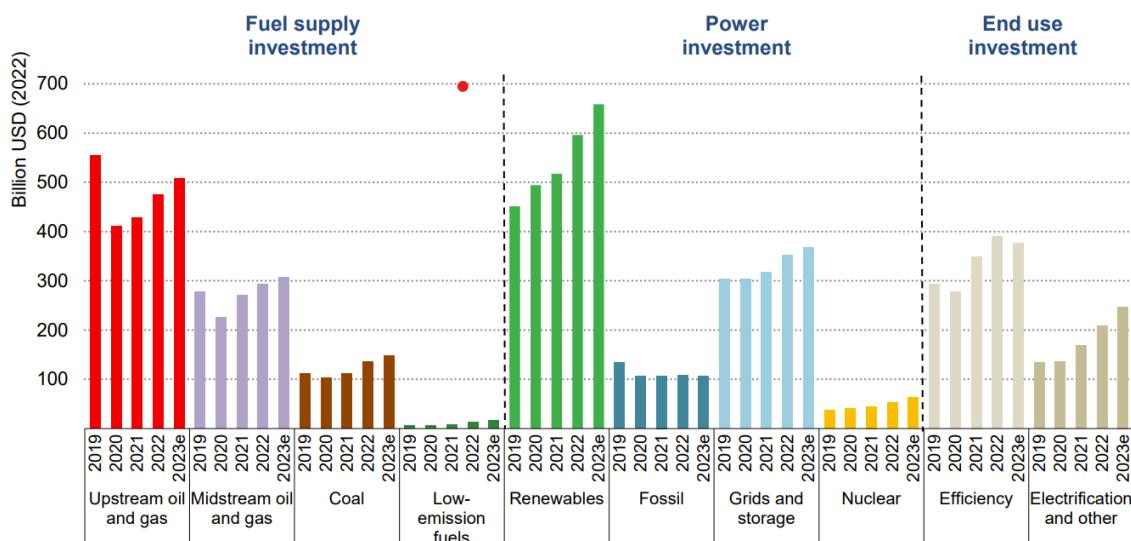
- شکل ۴- ۷۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه).....
۸۹
- شکل ۴- ۷۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره 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 نصب شده 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 راه حل منحصر‌فرد 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 تعیین 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 سایتی 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 بستر سیال^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.^[۶] و تابه حالت 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 موجود است که این خلا به طور خاص در طراحی راکتور و بررسی عملکرد پلنت به هنگام کاربردهای متفاوت از اهمیت خاصی برخورداد خواهد بود.^[۴]

راکتورهای بستر سیال 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 آنها 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 تابع صرفه جویی در هزینه و زمان شود و حتی ما را در مسیر بهینه سازی سیستم قرار دهد.

۱-۲ 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 بستری‌سالی 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 شیع هم یاد می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرند و به هنگام استفاده می‌تواند گستره وسیعی از تاثیرات را بر رفتار ذرات درشت درون بستر بگذاردند. علی‌رغم اهمیت این سیستم‌ها، هیدرودینامیک آن‌ها در مقایسه با بسترها 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 بسترها 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.

۱-۳ ساختار پایان‌نامه

در پژوهش حاضر، در فصل اول مقدمه‌ای مختصر در مورد کلیات پژوهش انجام شده آورده شده است. در فصل دوم، به معرفی بسترها سیال، به طور خاص بسترها 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 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 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.

¹Bubbling Fluidized Beds

²Multi-component Fluidized Beds

³Restricted and Unrestricted Movements

فصل ۲: مبانی نظری و مروری بر پژوهش‌های پیشین

۱-۲ سیال‌سازی^۱ و بسترهای سیال

سیال‌سازی هنگامی اتفاق می‌افتد که ذرات جامد موجود در یک بسته با حجم محدود تو سط یک 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 سمت پایین به درون لوله‌ای فرستاده می‌شود. این تنها حالت یک بسته سیال نیست و یک بسته 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 تو سط جریان گاز یا مایع به حرکت در می‌آیند. هنگامی که یک سیال از بسته 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 بسته سیال با وزن ذرات در آن بخش خاص برابر می‌شود. این حالت خاص از بسته به عنوان "بسته سیال ابتدایی" یا "بسته در حداقل سیال شدن"^۴ نامیده می‌شود. سرعت رخ دادن این اتفاق به عنوان "سرعت حداقل سیالیت"^۵ 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 بسته منحصر به فرد به نام بسته سیال حبابی ایجاد می‌کند. اگر سرعت سیال را باز هم زیادتر بکنیم، حباب‌های گاز همزمان با

^۱Fluidization

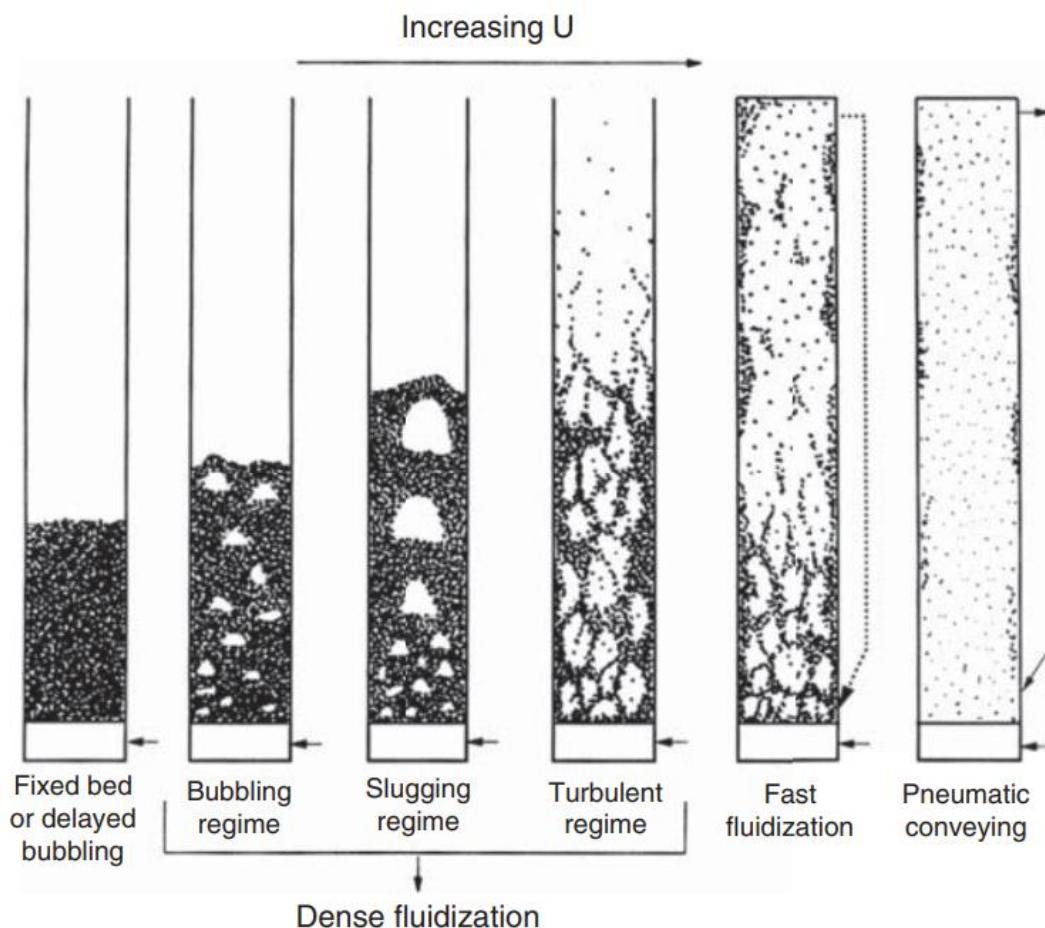
^۲Perforated Plate

^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 بسترهای 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 عنوان شده 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 بسترهای 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^۱)
 - بالا بودن ضرایب انتقال حرارت میان بستر و سطح (معمولایک 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 معاویت این بسترهای 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 آنجام می‌گیرد و باعث می‌شود تا این جریان از جریان پلاگ ایده‌آل فاصله بگیرد و عدد پکلت از مرتبه بزرگی ۱۰-۵ داشته باشد)
 - نفوذ قابل توجه ذرات جامد (جابجایی ذرات و خوش‌های 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 دارد)
 - محدودیت در سیال‌سازی موفق ذرات (ذراتی با اندازه‌های نافرم، به عنوان مثال سوزنی یا به

¹'Hot-spots

'Back-mixing

شکل دیسک، یا ذرات با قطر میانگین کوچکتر از $30\text{ }\mu\text{m}$ را به سختی می‌توان به حالت سیال درآورد یا اصلاً نمی‌توان)

- همراه بری^۱(ذرات، به خصوص در اندازه‌های ریز، همراه با جریان گازی به بالا بردہ می‌شوند و ممکن است بستر را ترک کنند. برای حداقل سازی همراه بری 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 ۲-۱ 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 ۲-۱ 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 | سترن اتیلن | بخارزنی و بخاردهی |
| کلسانیه‌سازی ^۶ | سترن 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 متنال به الفین | جذب گازهای خطرناک |
| تخمیر گاز-جامد | هیدروژن‌زدایی 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 | گستردۀ، برای مثال ۲۰۰-۰ 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

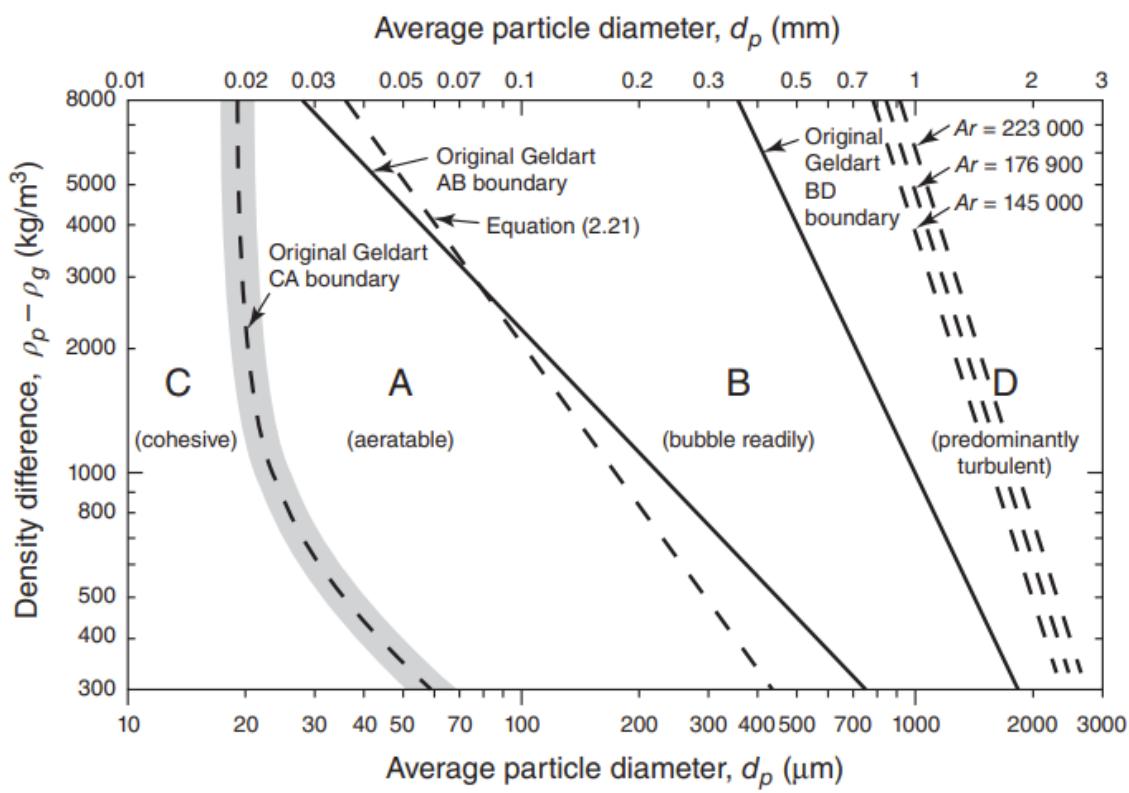
اندازه و چگالی ذرات تاثیر زیادی بر نحوه سیال‌شدن و رفتار سیال‌شدنگی ذرات دارند. به عنوان مثال ذرات کوچک با چگالی پایین‌تر، در مقایسه با ذرات درشت‌تر با چگالی بالاتر، مقاومت کمتری برای سیال‌شدن دارند. این تفاوت عموماً به دلیل تاثیر نیروهای میان‌ذره‌ای می‌باشد. گلدارت [۹] در یک پژوهش بسیار مفید و پرکاربرد، به تمیز 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 چسبنده‌گی 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 هواده). 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 ۵۰۰-۶۰۰ 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 در شدت‌تری 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 همچنینی احتمال زیادی وجود دارد که اندازه بزرگ این ذرات باعث تشکیل بلوكه‌هایی 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 دوچرخی، به معنای سیال‌سازی دو نوع ذره جامد با خواص مختلف، یک مسیر مفید برای بهبود خواص سیال‌شدنی ذراتی که به سختی سیال می‌شوند، مانند ذرات گروه D، ارائه می‌دهند. با اضافه کردن ذراتی از گروه‌های A و یا 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 یا B باعث ایجاد ناحیه‌های سیال‌شدنی محلی در طول بستر می‌شوند. این مهم باعث جلوگیری تهنشینی ذرات گروه D در بستر می‌شود.

۲-۴ جریان چندفازی در بسترهای سیال

ذرات زیست‌توده 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.

۱-۴-۲ سرعت‌های مشخصه

بر خلاف ذرات در بسترهای تک‌جزئی، که سیال‌سازی در تمامی بستر با سرعت به‌خصوصی که با عنوان سرعت حداقل 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 (U_i)، و سرعتی که در آن تمامی ذرات بستر سیال شده‌اند، با نام سرعت نهایی سیال‌سازی^۱ (U_{ff}) نام‌گذاری می‌شوند.^[۱]

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.

۲-۴-۳ 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^۲ (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

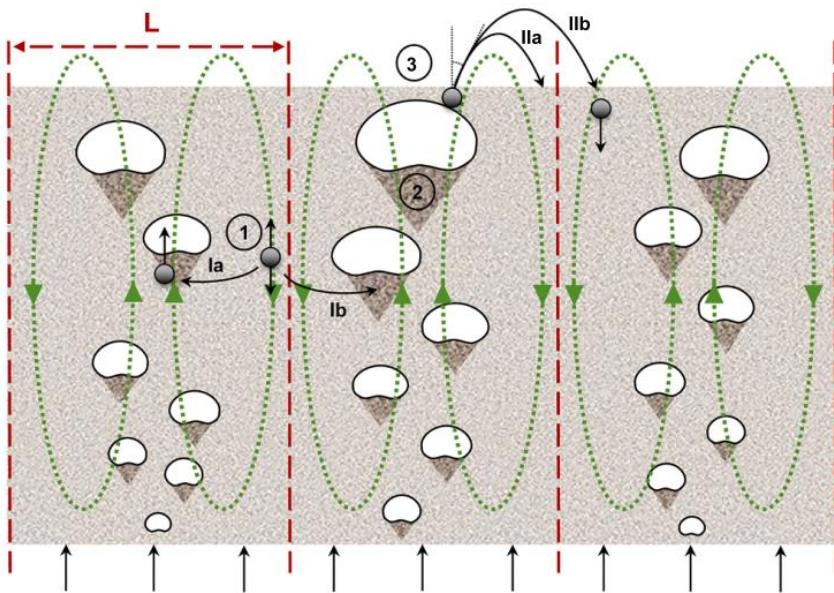
^۲Full Fluidization Velocity

^۳Minimum Bubbling Velocity

ماسه و ذرات زیست‌توده، سرعت حداقل حباب‌زایی و سرعت حداقل سیال‌سازی، یک میزان هستند. در این بسترهای 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]

۲-۴-۳ مکانیسم حرکت ذرات در بستر

در رابطه با مکانیسم حرکت طولی ذرات جامد در بستر، ابتدا بستر را به چند ناحیه تقسیم می‌کنیم، شکل ۳-۲. 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 ۲-۳ 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]

۵-۲ 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.

۱-۵-۲ توزیع زمان ماند^۱ 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 متدهای محاسبه آن می‌پردازیم. ابتدا باید فرضیات لازم را با توجه به سیستم مورد نظر بیان می‌کنیم. [۱۴]

- فرچن توزیع نرمال. در این قسمت فرض می‌کنیم که توزیع میانگین زمان ماند ذرات در اینجا از حالت توزیع نرمال (گاوی^۲) پیروی می‌کند، 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 می‌شود، از ممان اول نمودار میانگین زمان ماند بدست می‌آید.
- محاسبه واریانس. واریانس میانگین زمان ماند که به صورت σ_t^2 نمایش داده می‌شود، از محاسبه ممان مرکزی دوم میانگین زمان ماند محاسبه می‌شود.
- خواص توزیع نرمال (گاووسی). در این توزیع، ممان مرکزی دوم به صورت مربع مجموع اختلافات هر داده از میانگین زمان ماند تعریف می‌شود. 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 می‌توان 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 ساده‌سازی بیشتر معادله بالا، می‌توانیم 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:

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

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

۲-۵ 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 می‌کند تا پالسی از ذرات وارد بستر می‌شوند، این پالس درون بستر منتشر می‌شود و بررسی نحوه انتشار آن، می‌تواند در مدل‌سازی 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 و u 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:

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

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

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

برای نفوذ مولکولی در راستای طولی، معادله دیفرانسیلی غالب بر سیستم، قانون فیک^۱ است، در نتیجه:

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

به طور مشابهی، می‌توان ضریب نفوذ داخل سیال را نیز به صورت زیر تعریف کرد:

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

لازم به ذکر است که دو پارامتر D و D' با یکدیگر متفاوت می‌باشند. در صورت بی‌بعدسازی این معادله با استفاده از روابط $z = \frac{ut+x}{L}$ و $\theta = \frac{t}{\bar{t}} = \frac{tu}{L}$ می‌توان 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، می‌توان جواب این معادله را برابر یک توزیع نرمال برازش کرد که پاسخ آن را به فرم زیر بدست خواهیم آورد:

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

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

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

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

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 صرفنظر 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

¹Fick's Rule

²Diffusion Coefficient

³Dispersion Coefficient

واریانس میانگین زمان ماند به صورت بدون بعد می‌باشد.

۶-۲ جابجایی‌های مقید و نامقید^۱

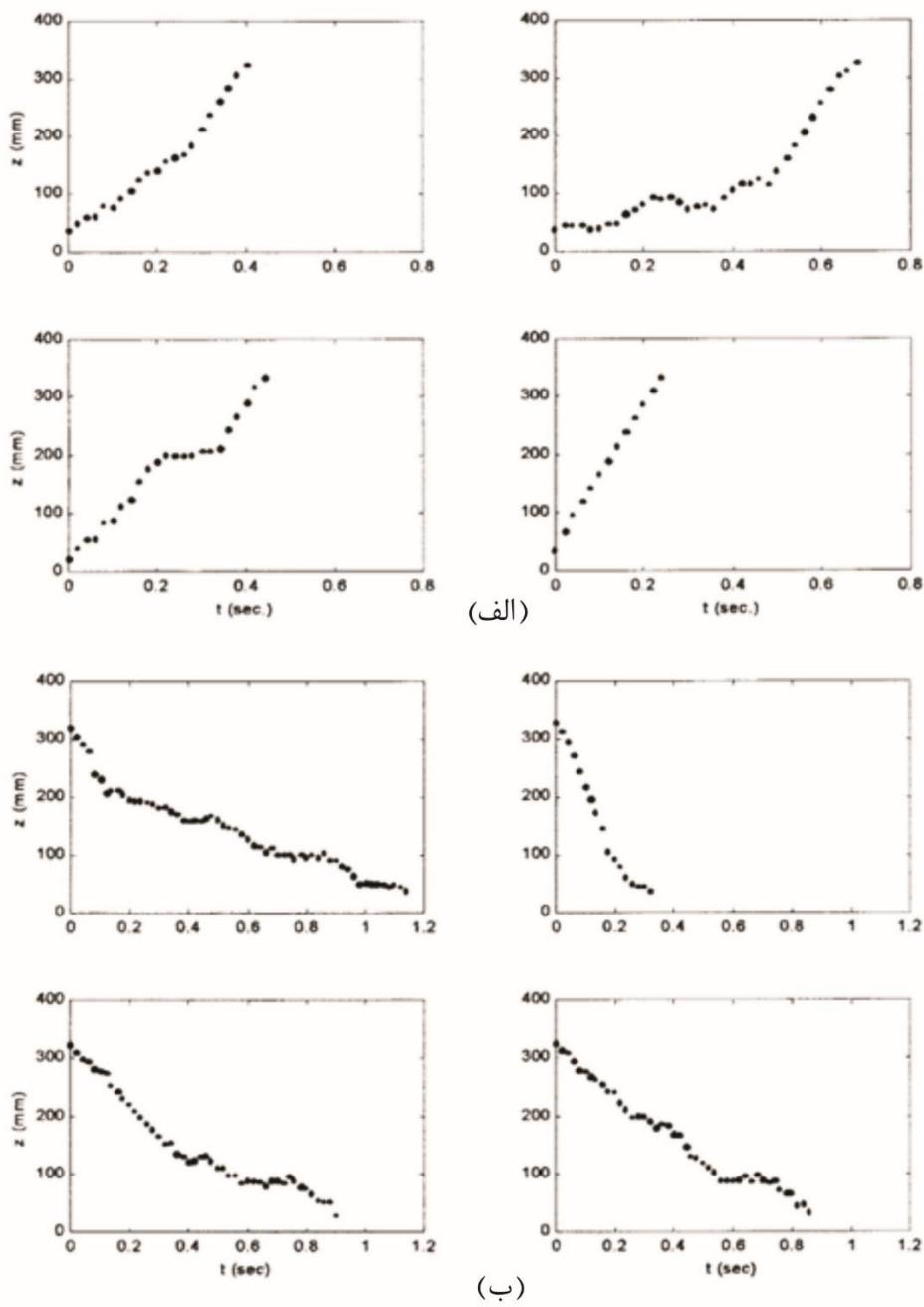
یکی از مهم‌ترین اقدام‌ها در بررسی حرکت ذرات در بسترهای سیال، آنالیز جابجایی‌های طولی ذرات است. برای انجام این آنالیز می‌توان ذرات جامدی را به عنوان ردیاب به داخل بستر تزریق کرد و مسیر حرکت آن‌ها را زیر نظر گرفت. در بررسی این حرکت‌ها، بررسی میانگین زمان ماند نیز از اهمیت بالایی برخوردار است.

در این قسمت از پایان‌نامه مفهومی را معرفی کرده و بکار می‌گیریم که در سال ۲۰۰۰ میلادی و توسط مستوفی و چائوکی معرفی شد.^[۱۵] مفهوم جابجایی طولی مقید به جابجایی‌هایی 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) می‌رسند. برای شناسایی این جابجایی‌ها می‌توان از متذکر استفاده کرد.

۱. مسیر ذره ردیابی شده دنبال می‌شود تا به یک سمت بستر برسد.
۲. موقعیت ابتدایی ذره ذخیره می‌شود و ذره را دنبال می‌کنیم تا به سمت دیگر بستر برسد.
۳. در صورتی که انحرافاتی در مسیر جابجایی طولی وجود داشته باشد، آن‌ها را یادداشت می‌کنیم تا اگر از یک حد بحرانی بیشتر شد، کل آن جابجایی رد می‌شود و رفتار محصوری را از خود نشان نمی‌دهد. (جابجایی نامقید محسوب می‌شود)

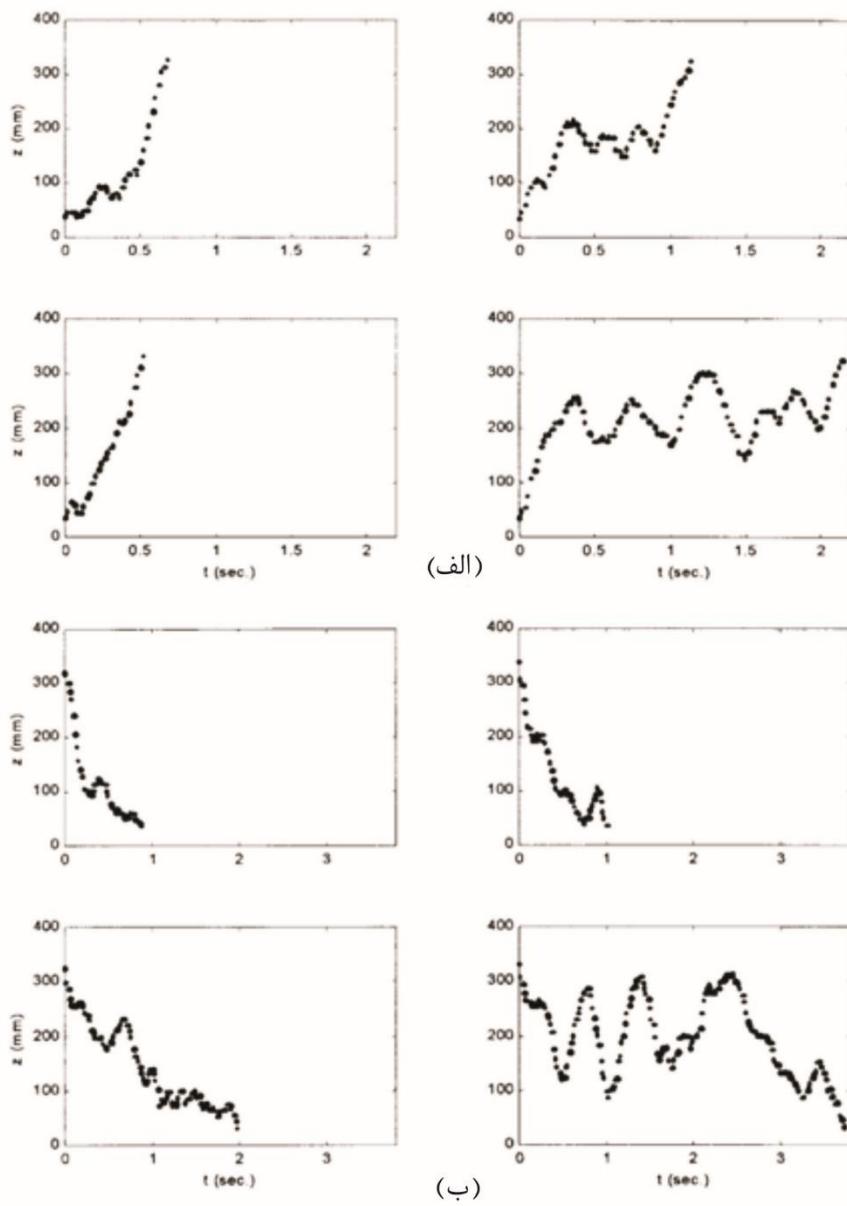
لازم به ذکر است که حد بحرانی لحاظ شده برای انحرافات در جابجایی طولی، میزان ۲۰ میلی‌متر می‌باشد و اگر حرکت ذره در خلاف مسیر طولی از این مقدار بیشتر شد، آن مسیر دیگر نشانگر یک جابجایی محصور نیست. اشکال ۴-۲ و ۲-۵ به عنوان نمونه‌هایی از مسیر حرکت مقید و نامقید ذرات آورده شده‌اند.

^۱Restricted and Unrestricted Movement



شکل ۲-۴ نمونه‌ای از جابجایی‌های محدود (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 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:

$$\sigma_t^2 = \left(\frac{4D_{SZ}}{V_s^2} \right) L \quad (2-15)$$

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

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

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، شبیب نمودار برای مدل نفوذی مقدار ۱ و برای مدل جابجایی، مقدار ۲ خواهد بود.

فصل ۳: مدل‌سازی و روش‌ها

۱- مقدمه

در این فصل از پایان‌نامه، پس از معرفی آزمایشات مورد بررسی، به نحوه پردازش داده‌های این آزمایشات و گسترش سازی هندسه بستر و همچنین به بررسی روش‌های آماری مورد استفاده برای مدل‌سازی حرکت ذرات در بسترها سیال می‌پردازیم. خانواده‌های مختلفی از روش زنجیره‌های مارکوف^۱ برای مدل‌سازی حرکت ذرات در بسترها سیال، مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین نحوه تعیین پارامترهای این روش‌ها با استفاده از روابط حاکم بر بسترها 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 بندۀ قرار گرفتند.

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 ۱۶۲ 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 ۱-۳ و جدول ۲-۳ آمده است.

جدول ۱-۳ 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 ^۱ | 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 ۲-۳ 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) | تخلفل (در ثابت) | سرعت حداقل سیال- سازی (متر بر ثانیه) | تقسیم‌بندی گلدارت |
|------|-----------|----------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|
| 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 | FCC | ۳۰-۳۰۰ | ۸۰ | ۱۶۹۰ | ۹۲۸ | ۰,۴۵ | ۰,۰۰۴ | A |

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

Literature review on RPT was added

^۱High Density Polyethylene

^۲Polytetraflouoroethylene

^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 بسته 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 کارتزینی و به فاصله زمانی ۰,۰ 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 بسته | 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 گسته‌سازی هندسه

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

بعدی است. گستته سازی یک چارچوب فضایی برای مشخصه سازی رفتار ذرات و دینامیک میان آن و سیال را فراهم می کند. از آنجایی که داده های RPT به صورت مختصات کارتزینی در سه بعد ذخیره می شوند و بستر مورد مطالعه، ساختاری استوانه ای دارد، پس از محاسبه سرعت لحظه ای ذرات، داده ها را به مختصات استوانه ای تغییر می دهیم و سپس اقدام به گستته سازی بستر می نماییم. تغییر مختصات از کارتزین به استوانه ای بدلیل وجود نظم در راستای زاویه ای، حجم محاسبات را کمتر و همچنین تحلیل آنها را راحت تر می سازد.

برای گستته سازی بستر، در راستای طولی، بستر را به سلول هایی با ضخامت ۱ سانتی متر تقسیم می کنیم. در راستای شعاعی نیز با توجه به شعاع کم بستر (نسبت به طول آن)، بستر را به سلول هایی با ضخامت ۵،۰ سانتی متر تقسیم می کنیم. اما در راستای زاویه ای، با توجه به عدم تاثیر پدیده های مدنظر از تغییرات در این راستا، بستر را به دو ناحیه که هر کدام ۱۸۰ درجه را پوشش می دهند تقسیم بنده می کنیم.

۴-۳ معادلات ابتدایی بررسی هیدرودینامیکی سیستم

با توجه به نحوه ذخیره داده ها توسط RPT به سراغ مدل لاگرانژی برای تحلیل حرکت ذرات می رویم. در این نوع مدل تحلیل حرکت ذرات، مختصات ثابت تصور می شوند و موقعیت زمانی ذره مورد ردیابی توسط داده ها بررسی می شوند. بدین منظور با توجه به در دست داشتن موقعیت ذره در هر لحظه، می توان 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 Δt جهت مورد بررسی است که می تواند جهات مختلف مختصات کارتزینی 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 می شود و سرعت بدست آمده نیز مربوط به میانگین زمانی آن دو می شود.

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

- مورد اول، ذات سیستم است که می توان تا حدی از انجام تغییرات در راستای زاویه ای صرف نظر کرد.

¹Spatial Framework

²Lagrangian

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

برای انتقال مختصات سیستم از کارتزین به استوانه‌ای، کافیست تا از روابط زیر استفاده کنیم:

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

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

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

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 بسترها سیال

در این بخش به تئوری مرتبط با روش زنجیره‌های مارکوف برای مدل‌سازی حرکت ذرات در بسترها 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 بسترها سیال حبابی دو جزئی 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 بسترها 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 بسترها سیال لخته‌ای کردند. در این پژوهش، آن‌ها تشکیل

و پیش روی لخته را نیز در نظر گرفتند و بر اساس آن، تمامی سلول های داخل لخته، عملن یک سلول محسوب می شدند. در این پژوهش نیز مقادیر احتمالات تغییر فاز و احتمالات مربوط به لخته به صورت دستی تغییر داده شده بودند تا تشابهی میان داده های تجربی و نتایج مدل حاصل شود. گاتچالک و همکاران [۲۱] در پژوهشی به بررسی مدل زنجیره های مارکوف چند فازی پرداختند. در این پژوهش برای نخستین بار، مفهوم فاز به عنوان مکانیسم حرکت و تعداد فازهای مختلف در مدل زنجیره های 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 فازی 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 تماما با استفاده از داده های تجربی معین شده اند. نوآوری های این پژوهش، مربوط به استفاده از تئوری های مربوط به بستر سیال و رفتار حباب و ذرات در آن برای بدست آوردن برخی از این احتمالات و استفاده از داده های تجربی برای احتمالات تغییر فاز می باشد که باعث می شود تا مدل ارائه شده در این پژوهش، به صورت نیمه - تجربی باشد. همچنین نوآوری دیگر این پژوهش، بررسی تاثیر عدم استفاده از فرضیه یکپارچگی می باشد که در آن، برای سلول های مختلف بستر در راستای طولی، مقادیر متفاوتی از احتمالات را در نظر گرفتیم.

۱-۵-۳ مقدمات روش زنجیره های مارکوف

روش زنجیره های مارکوف، یک روش آماری برای مدل سازی تصادفی^۱ سیستم هایی است که در آن ها وضعیت آتی سیستم تنها به وضعیت فعلی آن وابسته است و گذشته سیستم هیچ تاثیری بر آینده آن نمی گذارد [۱۹]. این روش بر اساس نحوه مدل سازی زمان، بیانات مختلفی را در پی خواهد داشت که با توجه به وجود گام های زمانی گستره در سیستم، از مدل زنجیره های مارکوف با گام های زمانی گستره استفاده می شود.

$$S_{i+1} = P(S_i)S_i \quad (3-8)$$

در این مدل، وضعیت فعلی، S_i به صورت برداری تعریف می شود که تعداد درایه های آن برابر با تعداد حالاتی است که سیستم می تواند در آن قرار بگیرد. برای تعیین وضعیت آینده آن، S_{i+1} نیز کافی است تا این بردار را در ماتریس انتقال سیستم، $P(S_i)$ ضرب کنیم. این ماتریس یک ماتریس مرتبی است با تعداد سطوحی برابر با تعداد حالات سیستم که در صورت تعیین درست درایه ها، می تواند پیش بینی درستی از لحظه آماری از آینده سیستم به ما بدهد. هر سطر از ماتریس انتقال بیانگر احتمالات انتقال به

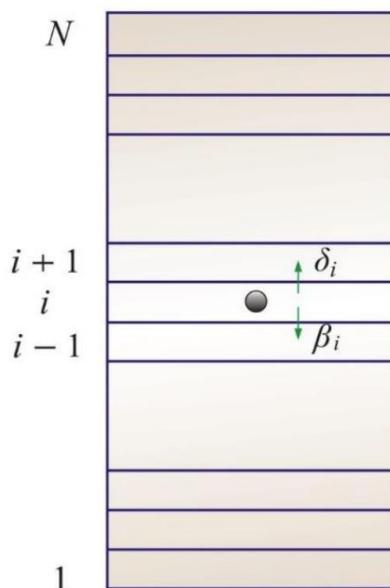
¹Random Modeling

²Discrete-Time Markov Chains Model

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

۳-۵-۲ روش زنجیره‌های مارکوف تک فازی برای حرکت ذرات در بسترها سیال جابجایی

در این بخش به بیان تئوری ارائه شده برای مدل‌سازی تک‌فاز به کمک روش زنجیره‌های مارکوف تو سط دهلینگ و همکاران می‌پردازیم.^[۲۱] در این روش ابتدا بستر سیال را در راستای طولی گسترش 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 بمحاسبه داده‌ها و یا مدل‌های پیشین تخمین زد. برای این کار شکل ۱-۳ را در نظر بگیرید.



شکل ۱-۳ ۱ بستر سیال گسترش داده که در آن احتمالات حرکات مختلف ذره با استفاده از پیکان نمایش داده شده‌اند

در شکل ۱-۳، بستر به تعداد N سلول گسترش داده 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 می‌توان گفت:

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

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

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

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

بردار احتمال $\mathbf{p}(n)$ که شامل اعضای $\mathbf{p}(n,i)$ می‌باشد، تعیین کننده موقعیت ذره در قدم n -ام می‌باشد. در صورت معلوم بودن ماتریس انتقال، می‌توان 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، کافیست موقعیت ابتدایی ذره و همچنین تعداد قدمهای 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، $(\cdot)^n$ بیانگر موقعیت ابتدایی ذره می‌باشد.

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

۳-۵-۳ روش زنجیره‌های مارکوف یکپارچه^۱

این روش ساختاری مشابه با روش زنجیره‌های مارکوف معمولی دارد اما با فرضی ساده‌کننده؛ در این روش فرض بر آن می‌شود که سه ناحیه در بسترهای وجود دارد، به طور خاص ناحیه و سط بسترهای ناحیه

¹Lumped Markov Chains Model

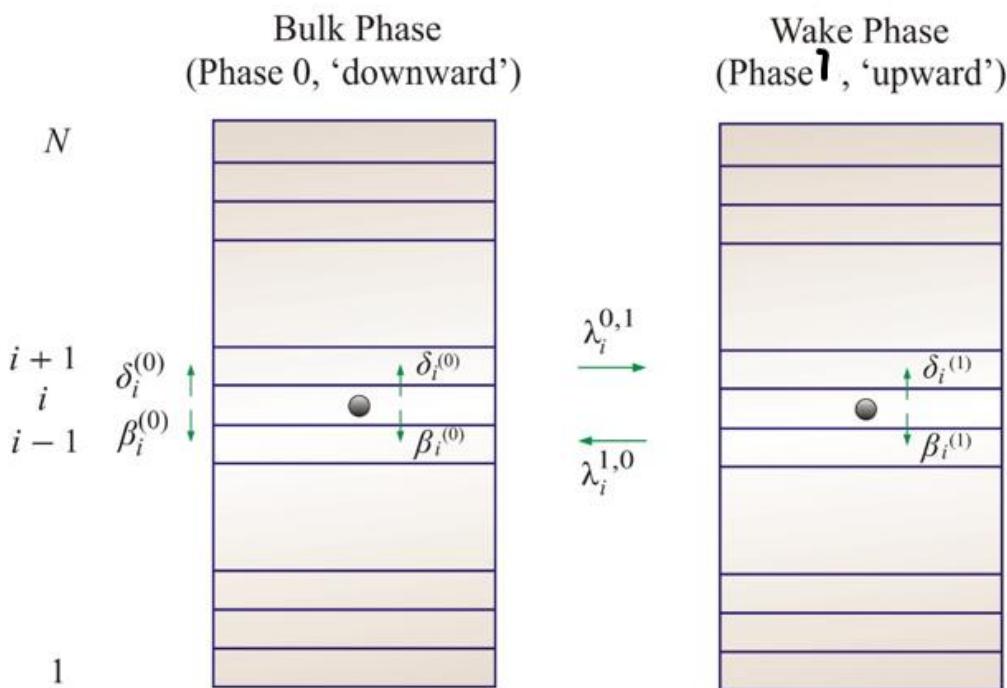
ورودی جریان گازی و ناحیه بالای بستر که شامل سطح آن نیز می‌شود. برای تمامی سلول‌های هر کدام از این نواحی، احتمالات بالا رفتن و پایین آمدن میزان ثابت و یکسانی را دارد و با استفاده از این فرض و تعداد محدودی از پارامترها می‌توان سیستم را مدل کرد.

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

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

$$S = \{0.1 \dots N\} \times \{0.1\} \quad (3-18)$$

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



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

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 باقیماندن 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 $k \in \{0,1\}$. $1 \leq i \leq N$

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

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 می‌توان صرف نظر کرد. حال که معادلات مربوط به این روش مدل‌سازی بیان شد، می‌توان با در نظر گرفتن فرضیاتی، محاسبات را آسان‌تر کرد. فاز 0 ، مربوط به حرکت رو پایین ذره در توده جریان می‌باشد که به صورت نفوذی مدل می‌شود. منظور از مدل نفوذی این است که انتقال ذرات با استفاده از مکانیسم جابجایی رخ نمی‌دهد و تماماً در اثر نفوذ از میان ذرات ریز، سایر ذرات در شت و همچنین جریان هوا انجام می‌گیرد. فاز 1 مربوط به حرکت رو به بالای ذره در دنباله حباب‌های گازی^۱ می‌باشد. می‌توان فرض کرد که تمامی حرکات رو به پایین توسط فاز 0 و تمامی حرکات رو به بالا توسط فاز 1 مدل می‌شوند [۲۱]. در نتیجه در برای تمامی سلول‌ها:

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

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

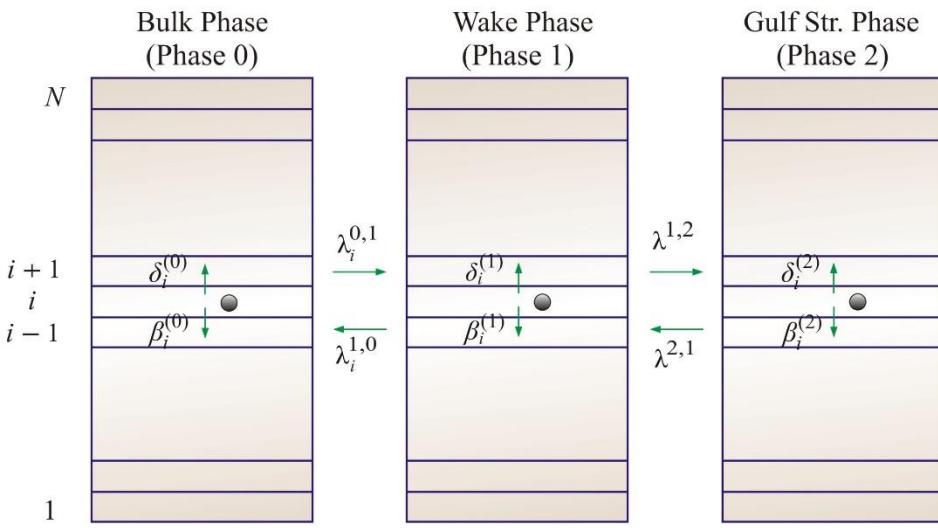
نکته دیگری که باید اینجا اضافه کرد، بزرگتر شدن ماتریس انتقال است که هم تعداد سطراها و هم تعداد ستون‌های آن، دو برابر روش معمولی است.

۳-۵-۳ روش زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی (همراه با جریان خلیج)^۲

در این بخش تلاش می‌شود تا فاز دیگری نیز به سیستم اضافه شود و این فاز مسئول مدل‌سازی رفتار چرخش خلیجی سیستم است. [۲۱] چرخش خلیجی نوعی رفتار سیستم‌های بستر سیال است که به دلیل جریان غیریکسان حباب‌ها در سطح مقطع بستر ایجاد می‌شود. 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 دیواره‌ها) اضافه می‌شود. در مقایسه با سیستم‌هایی که چرخش خلیجی در آن‌ها رخ نمی‌دهد، در این سیستم‌ها ذرات بیشتری در بستر درگیر چرخش می‌شوند. شماتیک این روش در شکل ۳-۳ آمده است.

¹Gas Bubble Wakes

²Three-Phase Markov Chains Model (With Gulf Streaming)



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

مدل سازی 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 جريان به سمت پایین، جريان به سمت بالا و جريان چرخش خلیجی هستند. در فاز ۰، مربوط به جريان رو به پایین، با توجه به وجود اين جريان در مسیری که حداقل فعالیت حباب‌ها می‌باشد، دارای کوچکترین میزان نفوذ است که آن را در اين فاز صفر فرض می‌کنیم. در مورد فاز ۲، جريان چرخش خلیجی، با توجه به جريان 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:

$$\beta_i^{(k)} + \delta_i^{(k)} + \alpha_i^{(k)} + \sum_{k=1}^2 \lambda_i^{(k)} = 1 \quad (3-32)$$

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

۶-۳ 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 گسترش سازی فیزیکی و زمانی سیستم به صورت زیر استفاده کرد:

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

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

که در این روابط، v ، D ، Δ و ε و، به ترتیب سرعت و ضریب نفوذ بدون بعد، واحد طولی بستره واحد زمانی مورد استفاده برای گسترش سازی 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]:

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

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

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 گسسته سازی هستند، که در مورد ε میزان آن

^۱Plug Flow

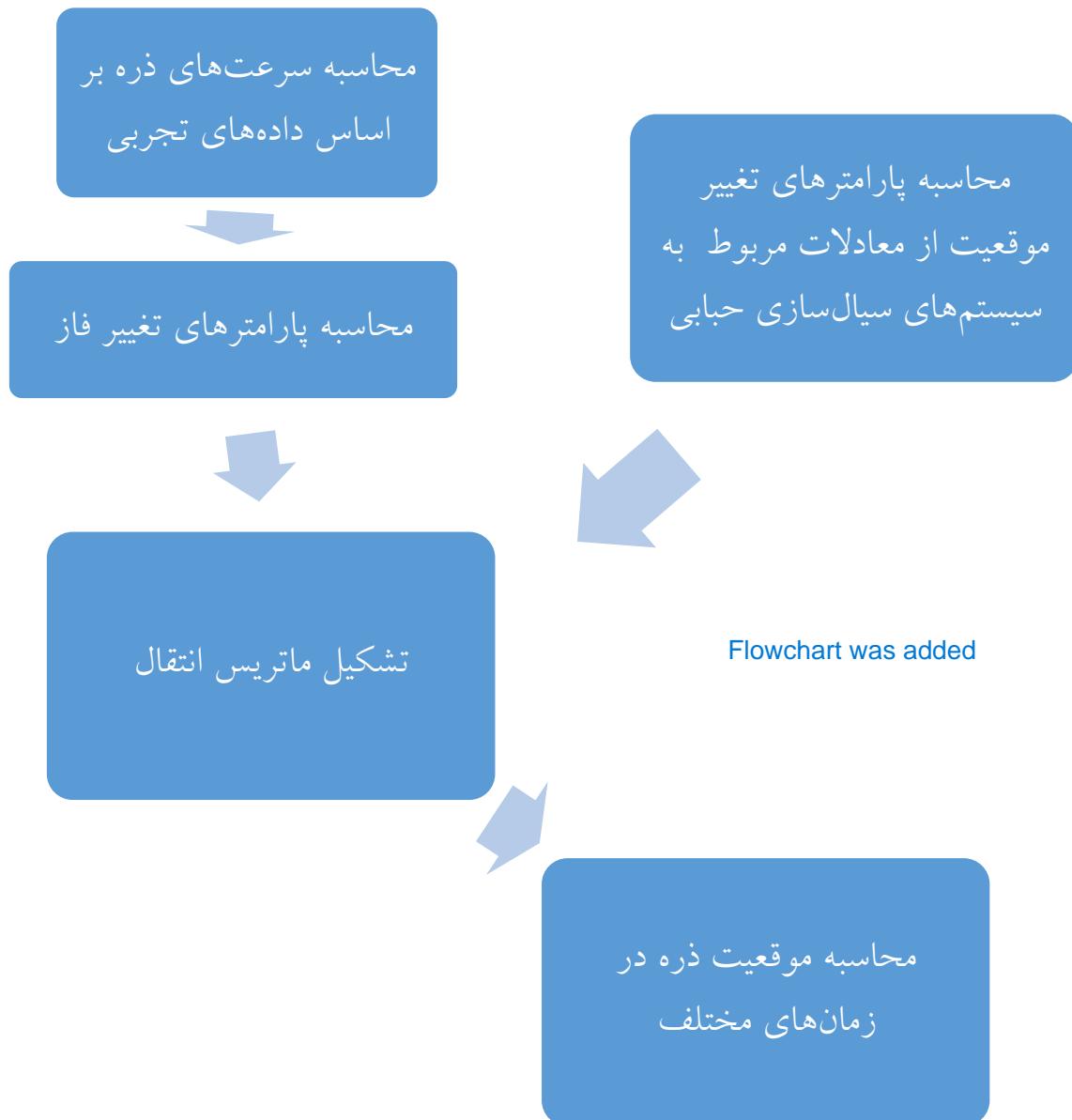
مشخص و برابر 100×10 ثانیه است؛ در مورد Δ نیز می‌توانیم مقادیر مختلفی را انتخاب کنیم اما بدلیل سادگی محاسبات، برای آن نیز از مقدار 100×10 متر استفاده می‌شود تا سرعت بدون بعد، مقادیر نسبتاً کوچکی را داشته باشد. در رابطه با میزان بازه‌های طولی سیستم، باید یک بررسی به صورت جدا صورت گیرد که مقادیر متفاوت 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، 100×10 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 $\delta_i^{(0)}$ مقدار صفر خواهند داشت.
- فاز حرکت به سمت بالا (در صعود (دربافت) 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 $\delta_i^{(1)}$ مقادیر صفر خواهند داشت.
- فاز حرکت چرخشی خلیجی. نفوذ در این فاز به طور واضح دیده می‌شود و نمی‌توان از آن صرف نظر 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 $D_i = \frac{1}{\beta_i^{(1)}} + \frac{1}{\beta_i^{(2)}}$ و $\delta_i^{(2)} = D_i - \frac{1}{\beta_i^{(1)}}$ 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 فلوچارت روند مدل‌سازی

۱-۷-۳ تعیین مقادیر β و δ 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 بپردازیم.

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 توزیع کننده‌های 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 دریفت 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:

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

که در آن N_b برابرست با میانگین تعداد حباب‌هایی که در حجم دیفرانسیلی میان \mathbf{z} تا $\mathbf{z}+dz$ قرار دارند. \mathbf{N} برابرست با میانگین تعداد حباب‌هایی که از سطح مقطع بسته در ارتفاع \mathbf{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:

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

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 دریفت حباب‌های موجود در حجم دیفرانسیلی مفروض نیز برابرست با:

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

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

سرعت‌های ذره در ناحیه‌های دنباله و دریفت 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 دریفت حباب و میانگین سرعت صعود ذرات. البته با توجه به این‌که برای ذرات درشت صعود ذرات در ناحیه دریفت 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 دریفت حباب‌ها برابر در نظر گرفت.

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

$$\rho_0 V_o \frac{dU_o}{dt} = (\rho_f - \rho_o) g V_o + \frac{1}{2} C_D A_o \rho_f (U_f - U_o)^2 \quad (3-45)$$

که در این معادله، C_D ، V_o ، ρ_0 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:

$$C_D = \frac{24}{Re_o} \left(1 + \frac{Re_o^{7/3}}{6} \right) g(\varepsilon) \quad Re < 1000 \quad (3-46)$$

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

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

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

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

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

برای حل عددی این معادلات کافیست تا فرض کنیم که تخلخل بستر در ناحیه دریفت حباب‌ها، همان تخلخل حداقل سیال‌سازی 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]:

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

که در این رابطه، پارامتر τ 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 موازنۀ انرژی نوشه 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 موازنۀ جرم بر روی ذرات بستر در یک سلول می‌توان سرعت پایین آمدن ذرات را نیز محا سبه کرد. طبق معادلات ارائه شده تو سط لوزشپیل 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 تو سط 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 قبل 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 این‌کار، 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 تعریفات 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 کافیست تا الگوریتمی پیشنهاد شود که بتواند با در نظر گرفتن جهت حرکت ورودی به هر سلول، در صورت تغییر جهت، تعداد تغییرجهت‌های 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 خواهد شد و دیگر سیستم ما خاصیت مارکوفی ندارد. برای محاسبه صحیح این پارامتر کافیست 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 دقیق 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 می‌کند. 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 کافیست 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 دوباره 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 سه‌فازی نیز به تعداد سه برابر تعداد سلول‌ها در راستای طولی بستر، سطر و ستون خواهیم داشت.

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

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

۱-۸-۳ 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.

۲-۸-۳ 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.

۲-۸-۴ 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 متول 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 کترل شده به سمت بالا و همچنین یک حرکت کترل شده به سمت پایین می‌باشد، تمیز 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 دریفت حباب‌ها صعود می‌کنند، تعیین می‌کنیم و سپس مقدار کمی (20%) 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

۱-۴ 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.

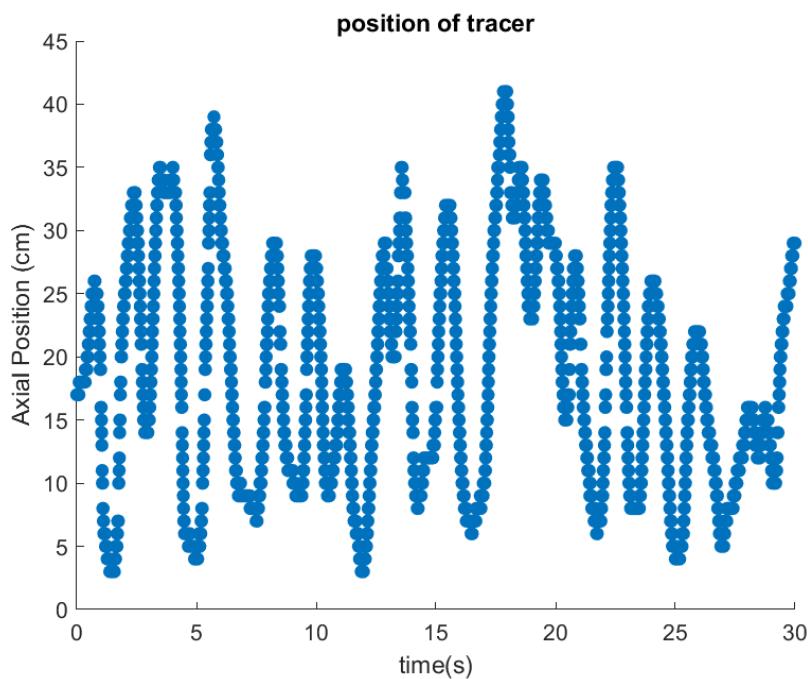
۲-۴ بحث در رابطه با داده‌ها و آماده‌سازی برای تحلیل آن‌ها

داده‌های مرتبط با آزمایشات که برای این مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند شامل ۱۲ مجموعه داده رديابي ذرات به صورت راديواكتيو بودند که هر کدام حاوی بيش از ۱,۵ ميليون رديف داده موقعیت ذره، در فواصل ۰,۰۱ ثانية از يكديگر بودند. تفاوت‌های موجود در اين داده‌ها مربوط به ذرات ريز تشکيل دهنده بستر (ماسه ريز، ماسه درشت و کاتالیست FCC)، نوع ذره زیست‌توده (استال کوچک، استال متوسط، استال بزرگ، پلي‌اتيلن با چگالي بالا و PTFE) و همچنین سرعت افزوده جريان گازی ورودی (دو مقدار ۰,۲۵ و ۰,۵ متر بر ثانية برای هر تست) می‌باشند. منظور از سرعت افزوده ($U_e = U - U_{mf}$)، اختلاف سرعت جريان گاز با سرعت حداقل سial‌سازی ذرات ريز بستر است. ليست داده‌هایی که برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند در جدول ۳-۳ آمده است.

۳-۴ تحلیل داده‌های سیستم مورد بررسی

برای بررسی داده‌ها ابتدا باید یک شناخت کلی از داده‌ها داشته باشیم. باید دقت داشته باشیم که موقعیت زمانی ردياب با در نظر گرفتن دستگاه موقعیت کارتزینی ذخیره شده است و مبدأ 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.

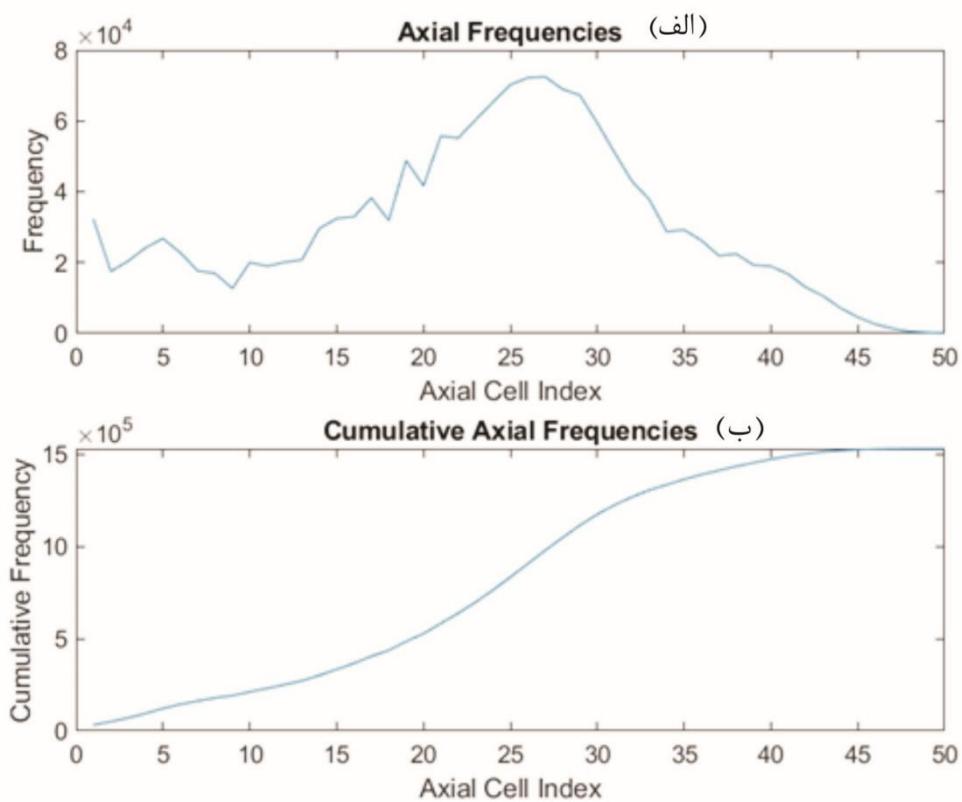


شکل ۴-۱ نمونه‌ای از مسیر حرکت ذره در راستای طولی به مدت ۳۰ ثانیه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۵ متر بر ثانیه)

۱-۳-۴ 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 هوا 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 پایین تر رسیدن به آن ناحیه را نیز در نظر گرفت). در ناحیه میانی بستر سیال که البته نشانگر ارتفاع بستر در حالت سیال شدگی 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 تجمعی راستای طولی ذره در بستر (استال بزرگ در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۵,۰ متر بر ثانیه)

۴-۴ تحلیل توزیع جابجایی و ضریب نفوذ

کمی‌سازی اختلاط ذرات درون راکتورهای بستر سیال از اهمیت زیادی برخوردار است و همچنین چالش‌هایی را در طراحی راکتور ایجاد می‌کند. با وجود این‌که چرخش ذرات در طول بستر عموماً به واسطه حرکت حباب‌ها و در پی آن‌هاست، اختلاط ذرات در ابعاد خود ذره، بیشتر وابسته به برهمکنش‌های میان‌ذره‌ای و همچنین برخوردهای ذره-دیواره است. در این بخش، روشی که عموماً برای محاسبه میانگین مربعات جابجایی طولی و همچنین ضریب نفوذ استفاده می‌شود معرفی می‌شوند و سپس نتایج حاصل از آن را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱-۴-۴ 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. متدهای استفاده در اینجا در ابتدا تو سط 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 می‌شود و الگوریتم زیر بر روی آن اجرا می‌شود. برای هر سلول انتخابی، ۲۵۰۰ بار از دفعاتی که ذره از آن سلول عبور کرده را مورد مطالعه قرار می‌دهیم؛ به این صورت که در هر دفعه، ذره مورد نظر برای ۵ ثانیه مورد مطالعه قرار می‌گیرد و موقعیت مکانی نهایی سلول آن به عنوان نقطه انتهای (r_0, z_0) ذخیره می‌شود. پس از این که این پرسه برای هر سلول به میزان کافی از لحاظ آماری (۲۵۰۰ بار) تکرار شد، می‌توان از الگوریتم زیر (روابط ۴-۱ تا ۴-۴) استفاده کرد.

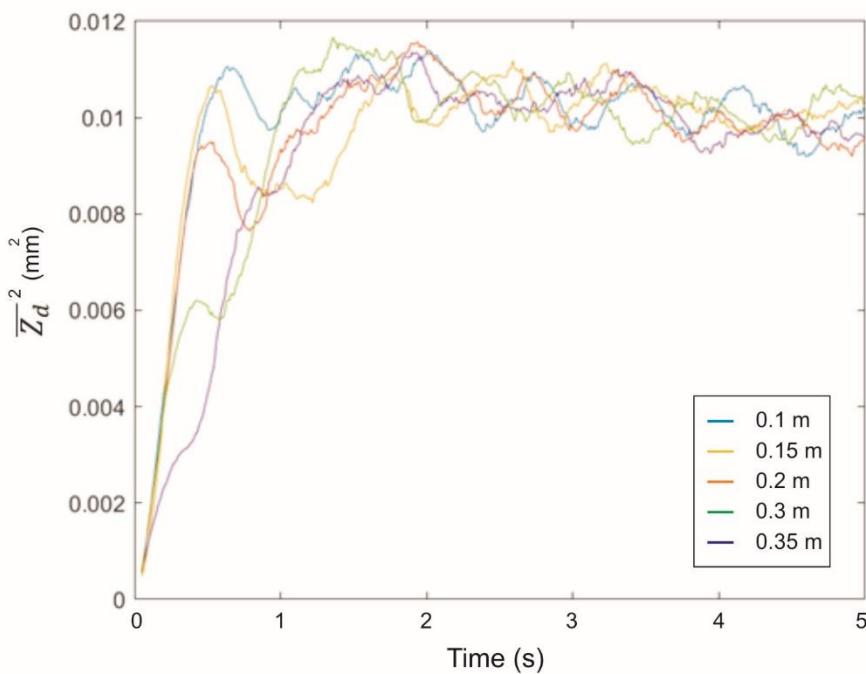
$$Z_{d,j} = Z_o(t) - Z_i \quad (4-1)$$

$$\overline{Z_d} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Z_{d,j} \quad (4-2)$$

$$\overline{Z_d}^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (Z_{d,j} - \overline{Z_d})^2 \quad (4-3)$$

$$D_z = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (\overline{Z_d}^2) \quad (4-4)$$

در این الگوریتم، رسیدن میانگین مربعات جابجایی طولی به یک میزان ثابت در اثر زمان و نوسان حول آن، نشان‌دهنده رسیدن به اختلاط کامل در داخل بستر است. برای محاسبه ضریب نفوذ از داده‌های میانگین مربعات جابجایی طولی کافیست 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 سانتی‌متر از کف بستر) انجام شده و نتیجه آن در شکل ۳-۴ 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)

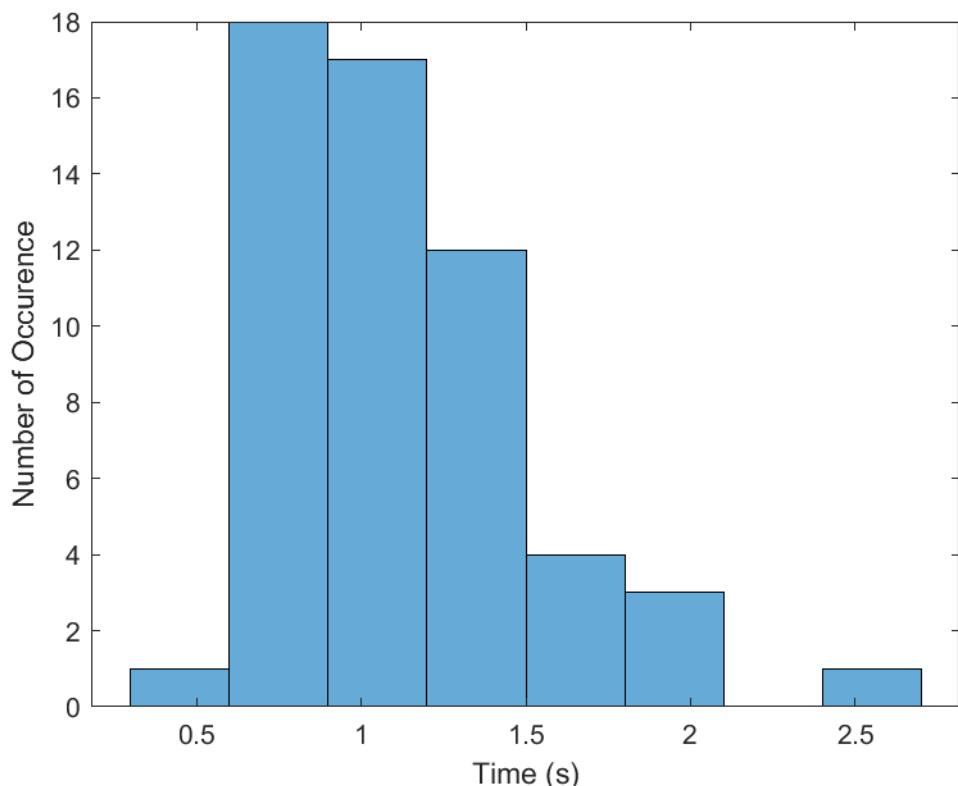
۴-۵ بررسی درستی مدل‌های نفوذی و جابجایی

در این بخش ابتدا جابجایی‌های مقید و نا مقید 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.

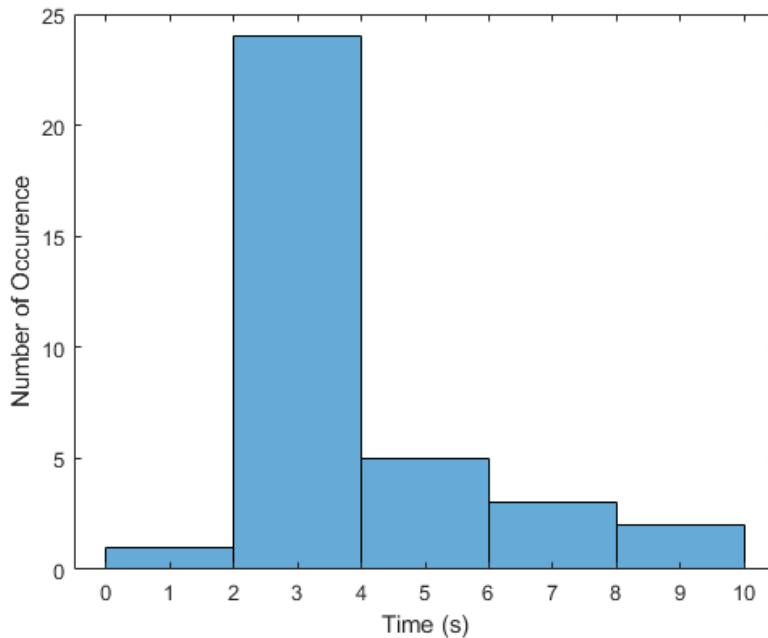
۱-۵-۴ بررسی جابجایی‌های مقید و نامقید

در این قسمت به نتایج حاصل از شناسایی جابجایی‌های مقید و نامقید پرداخته می‌شود. به عنوان ابتدایی ترین 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

شناصایی 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 ۵-۴ آمده‌اند.



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

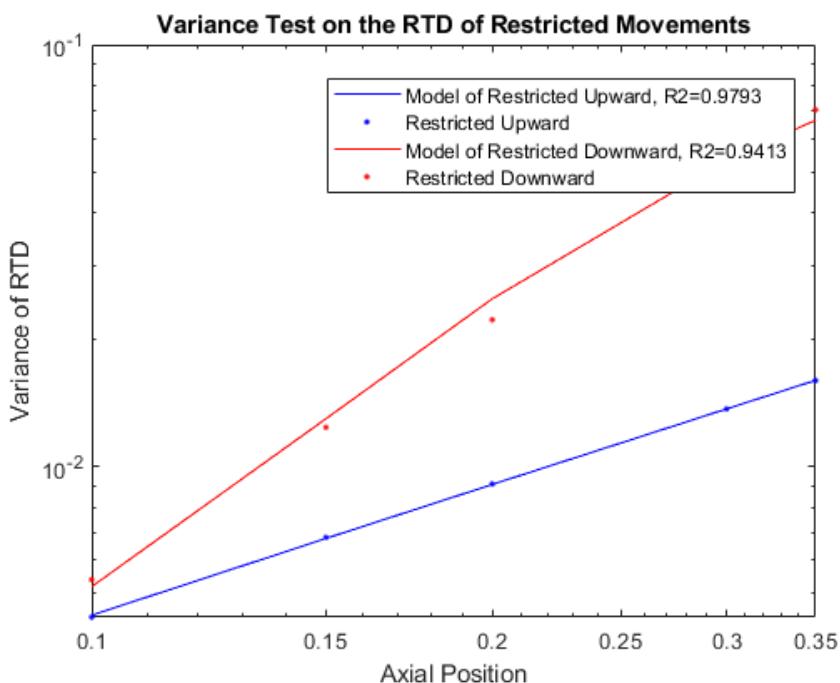


شکل ۴-۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا (ذره استال بزرگ در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده $0,5$ متر بر ثانیه)

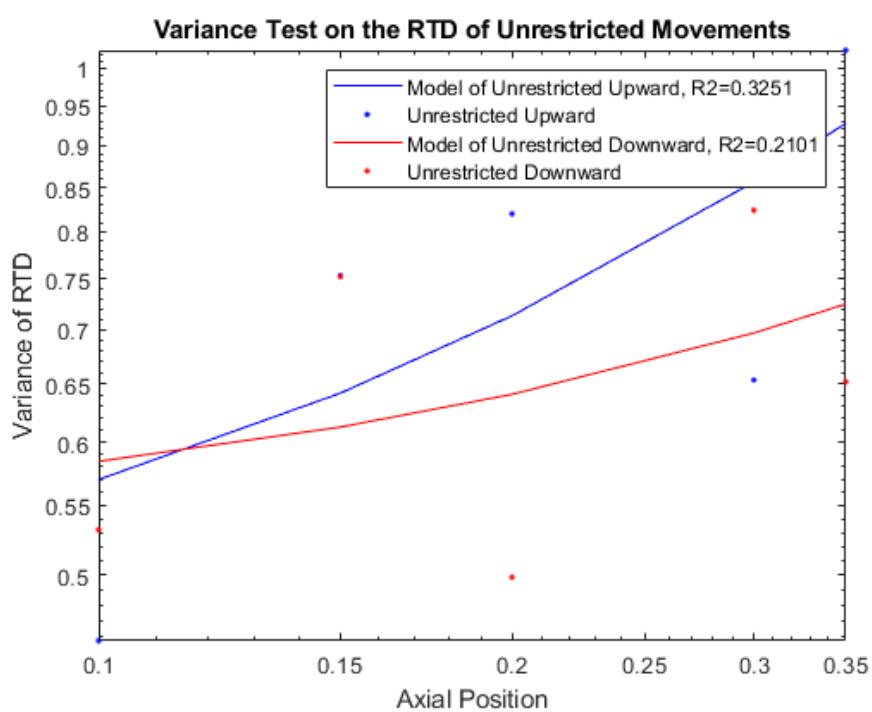
۴-۵-۲ واریانس توزیع زمان ماند

در ابتدا جابجایی‌های مقید و نامقید موجود در داده‌های تجربی مربوط به آزمایش ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده $0,5$ متر بر ثانیه معین شدند و سپس با استفاده از روابط مندرج در قسمت ۴-۲ و ۵-۲، 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 ۶-۲ و نمودار بدست آمده و این که شبیه مربوط به حرکت به سمت بالا و پایین به ترتیب، $1,9751$ و $1,0272$ 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 شبیه $0,3793$ ، برای حرکت نامقید به سمت بالا و همچنین $0,1466$ ، 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 ۷-۴ 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)

۶-۴ 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 ۴-۳ تا ۴-۸ 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 م شخص 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 تمیز جابجایی‌های مقید و نامقید)، مسیرهای جابجایی مورد مطالعه قرار گرفتند. در این مطالعه، دو حد بالا و پایین ۳۵ و ۵ سانتی‌متری از ابتدای بسته 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 زمان 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 این‌که 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.

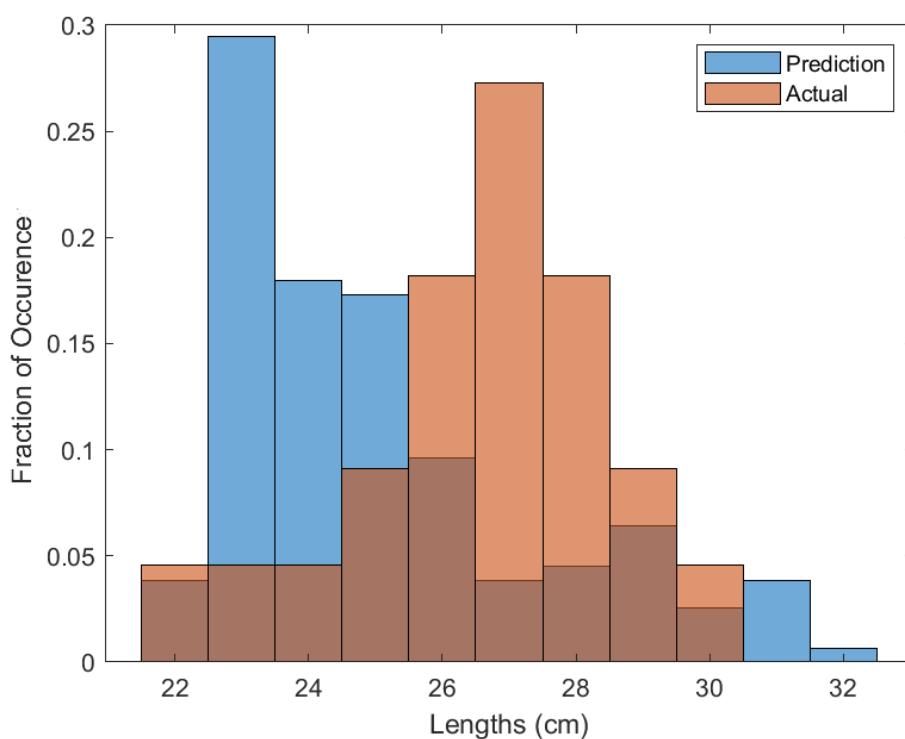
اولین بررسی مربوط به زمان جابجایی‌های مقید (صرف نظر از به سمت پایین و یا بالا) است. اولین نکته‌ای که از داده‌های تجربی مشخص می‌شود، این است که در صورت سیال‌سازی، نوع ذره درشت در بستر کمترین تاثیر را بر میانگین زمان جابجایی‌های مقید گذاشته است. نکته دیگر آن که همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش سرعت افروده 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.

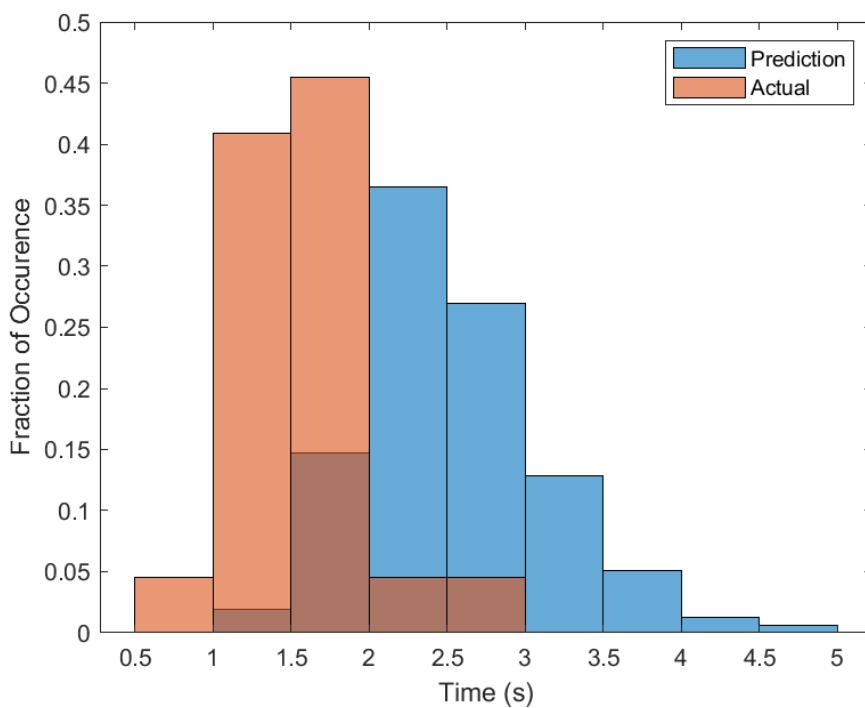
با دقت در نمودارهای هیستوگرام برای بررسی تفاوت در مدل‌های مبتنی بر زنجیره‌های مارکوف یکپارچه می‌توان به نکات زیر رسید:

- 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.

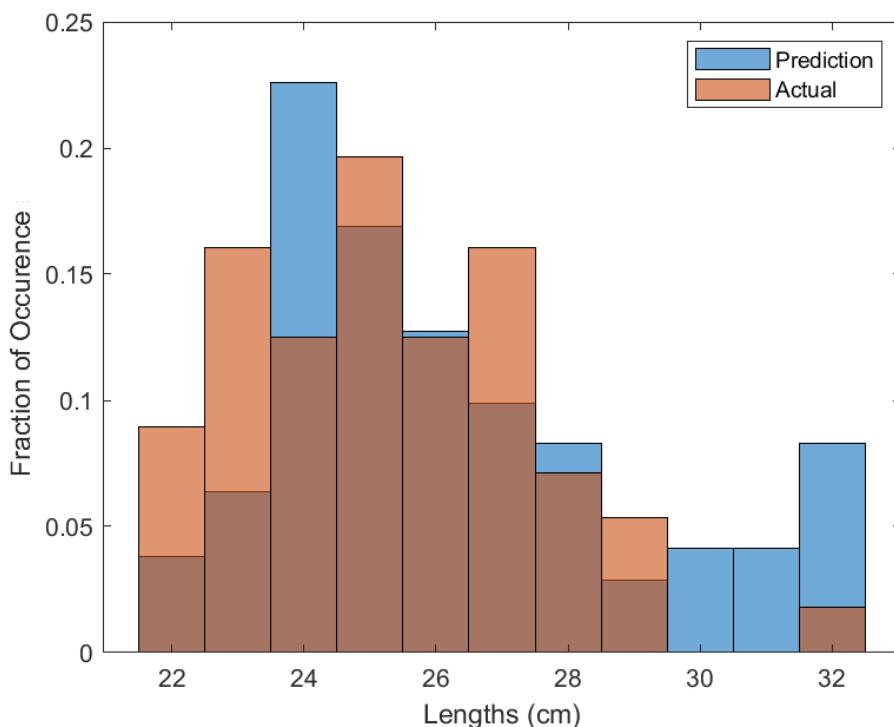
میانگین زمان جابجایی‌های طی شده بدست آمده از مدل، مقادیر بالاتری نسبت به داده‌های تجربی متناظر هستند.



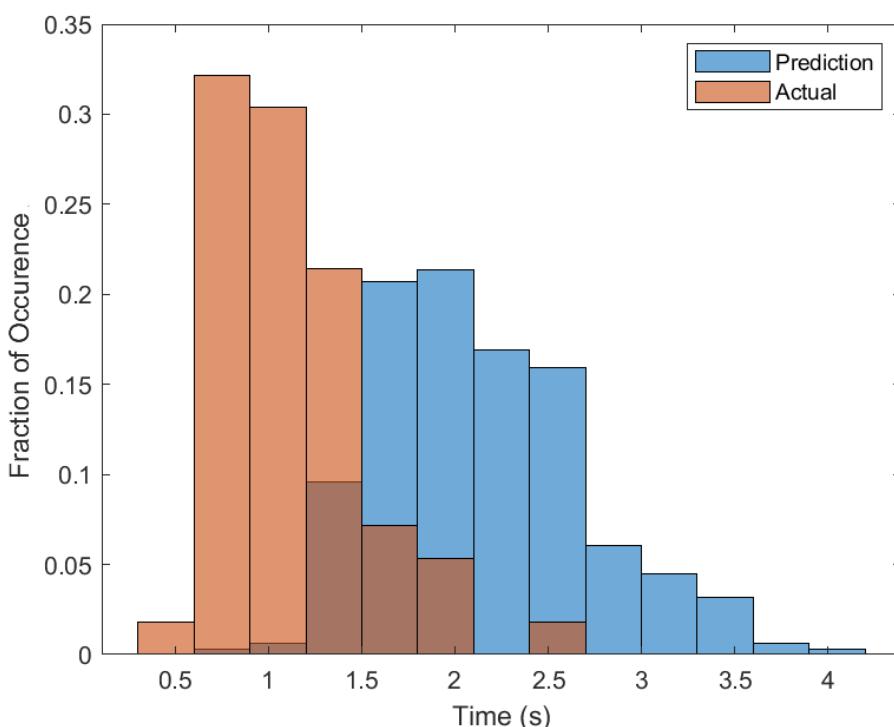
شکل ۴-۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



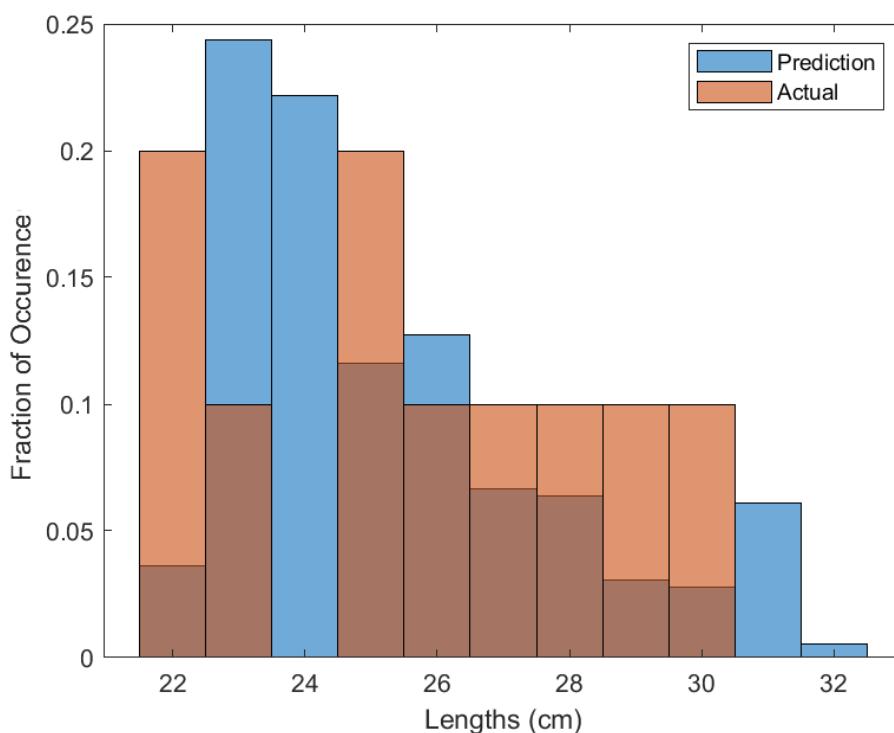
شکل ۴-۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



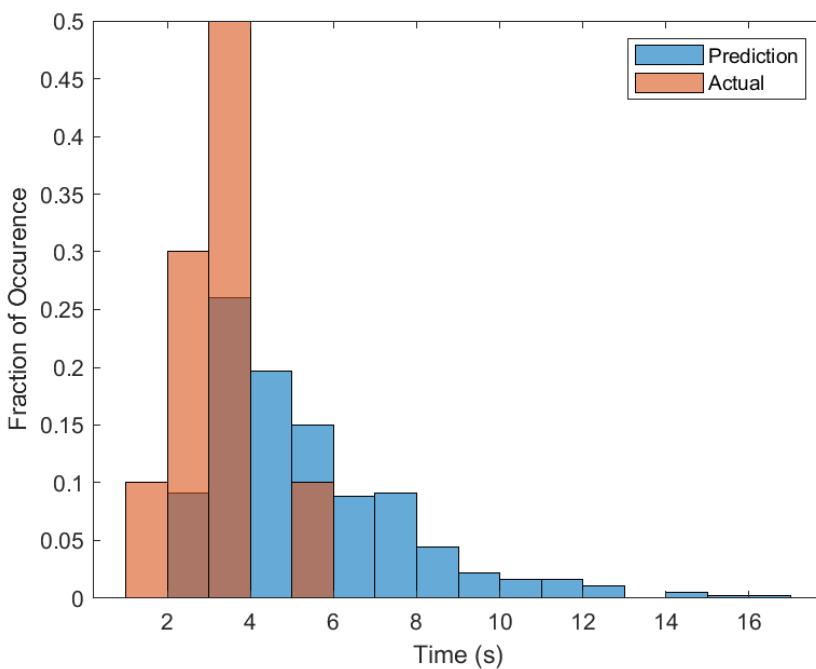
شکل ۴-۱۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



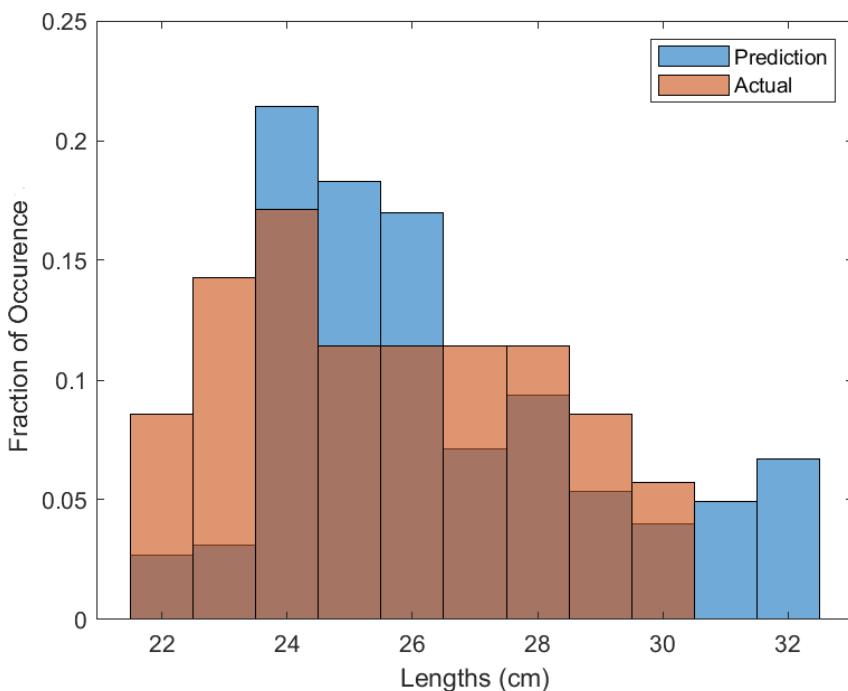
شکل ۴-۱۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۲۵،۰ متر بر ثانیه)



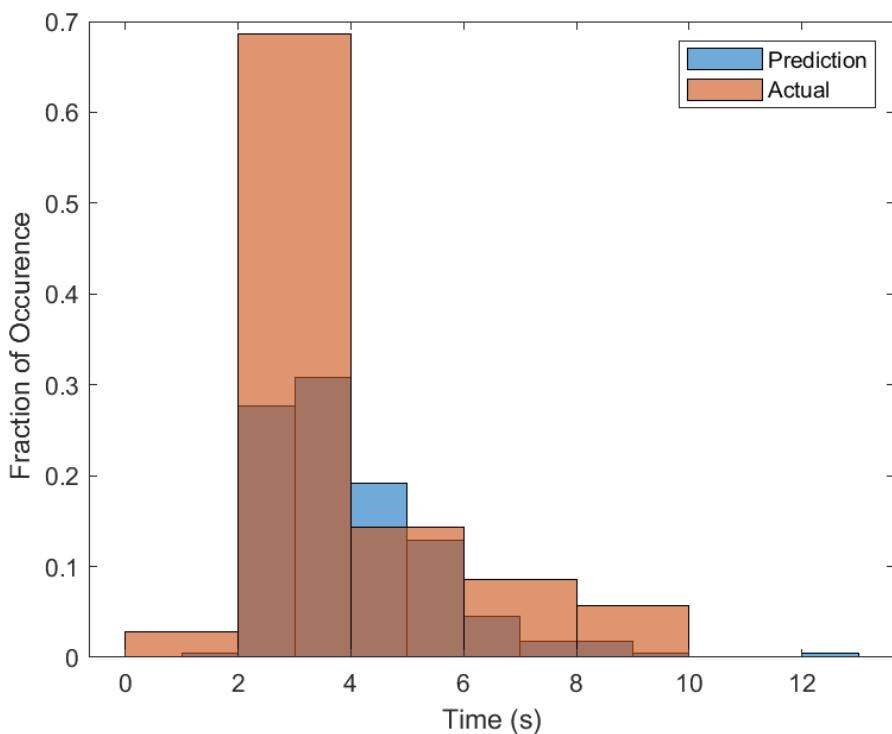
شکل ۴-۱۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۲۵،۰ متر بر ثانیه)



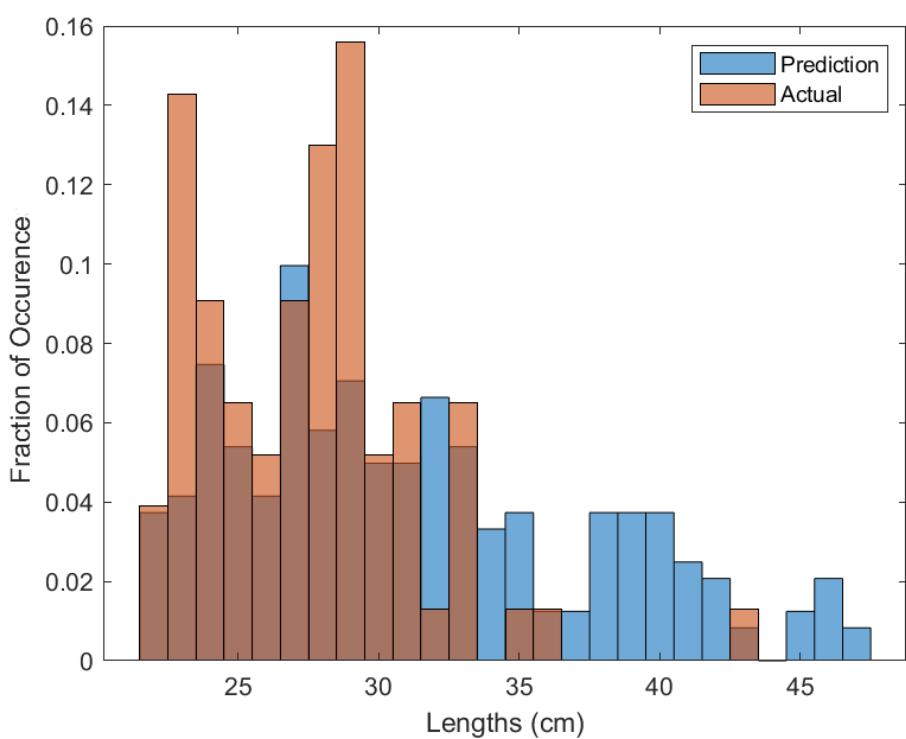
شکل ۴-۱۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۲۵،۰ متر بر ثانیه)



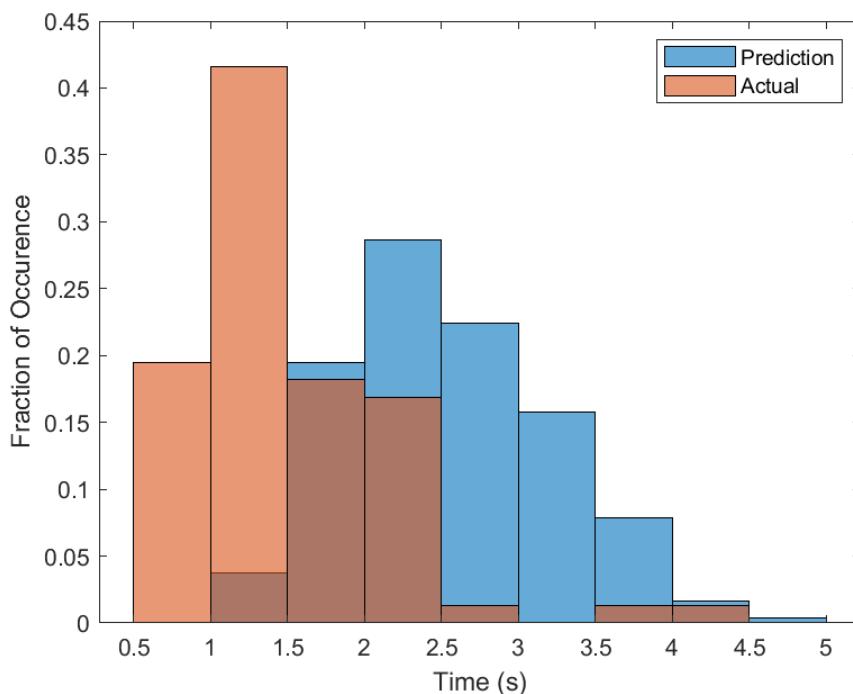
شکل ۴-۱۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۲۵،۰ متر بر ثانیه)



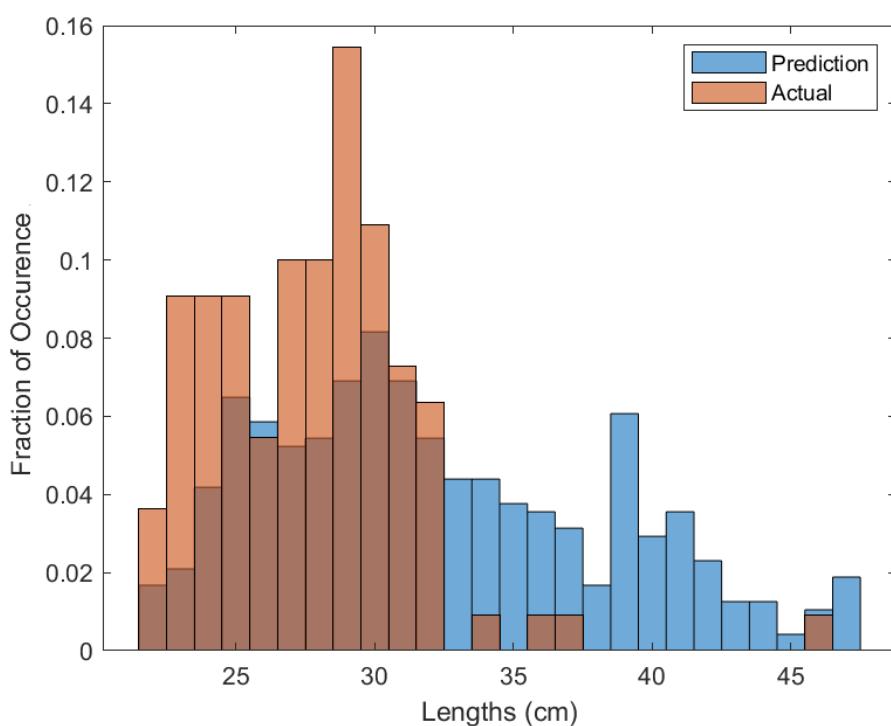
شکل ۴-۱۵ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



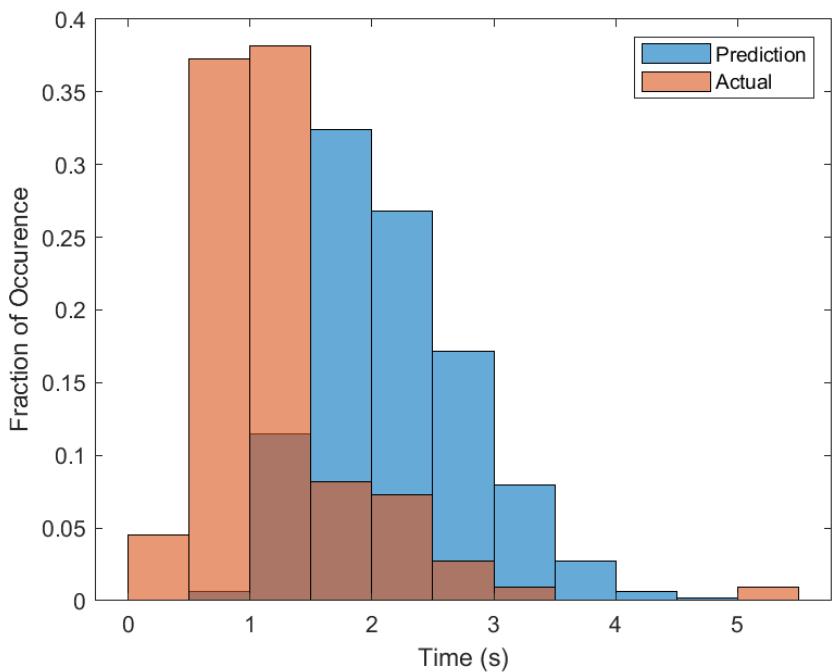
شکل ۴-۱۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



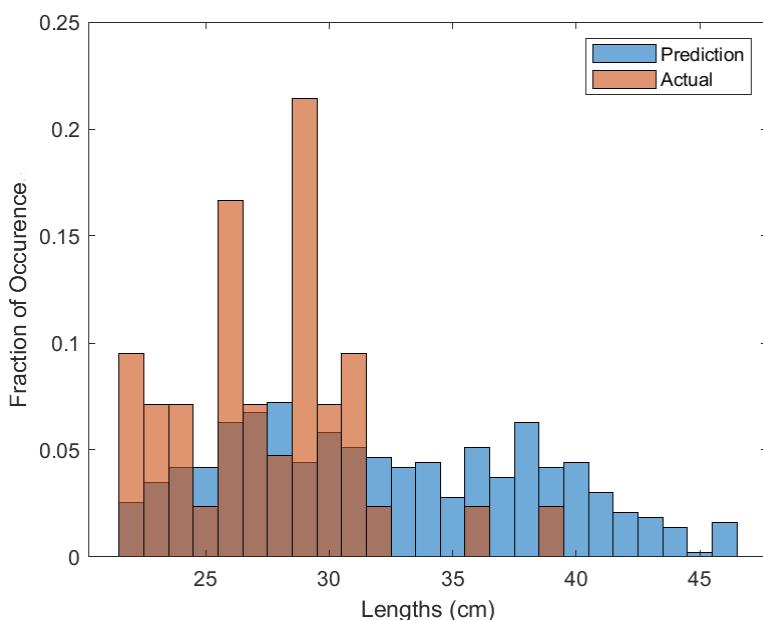
شکل ۱۷-۴ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



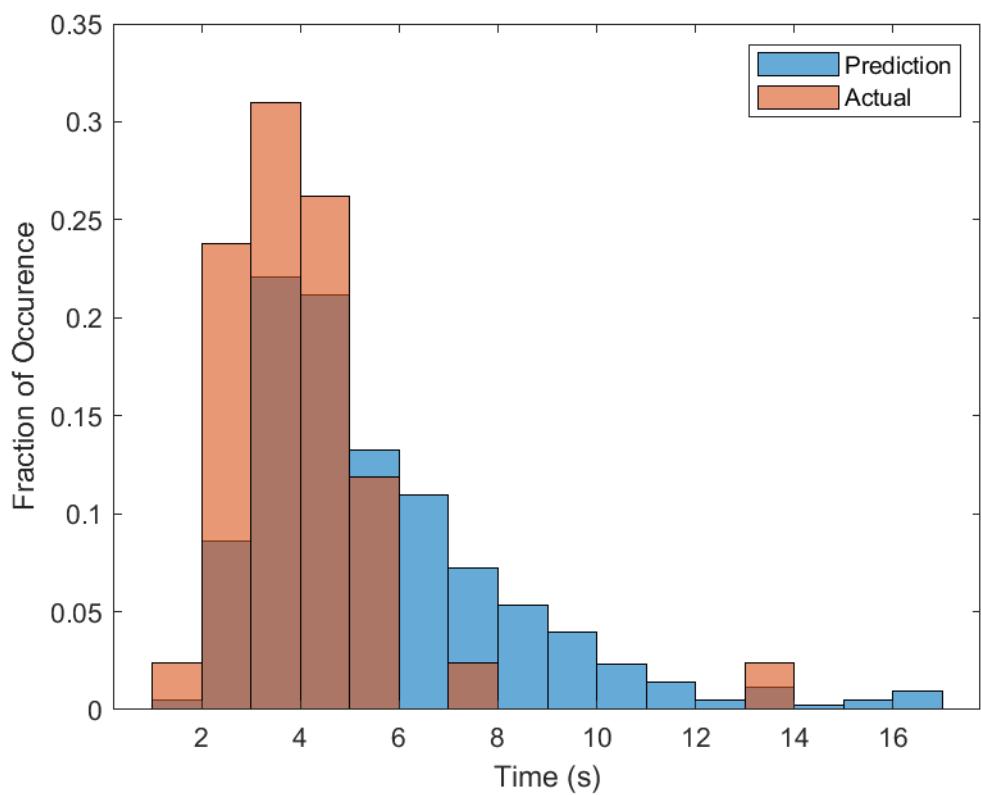
شکل ۱۸-۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



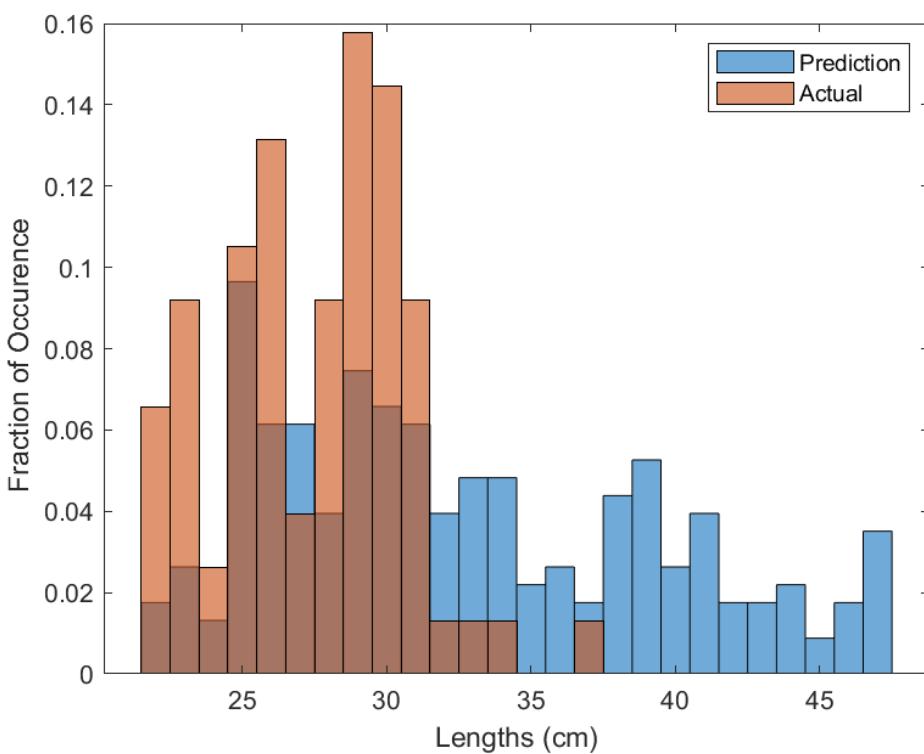
شکل ۴-۱۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



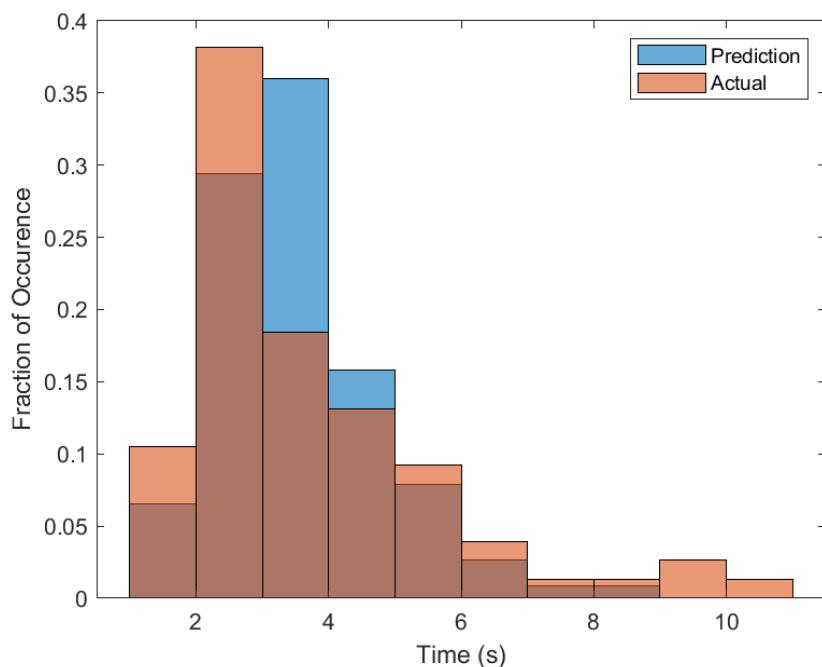
شکل ۴-۲۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



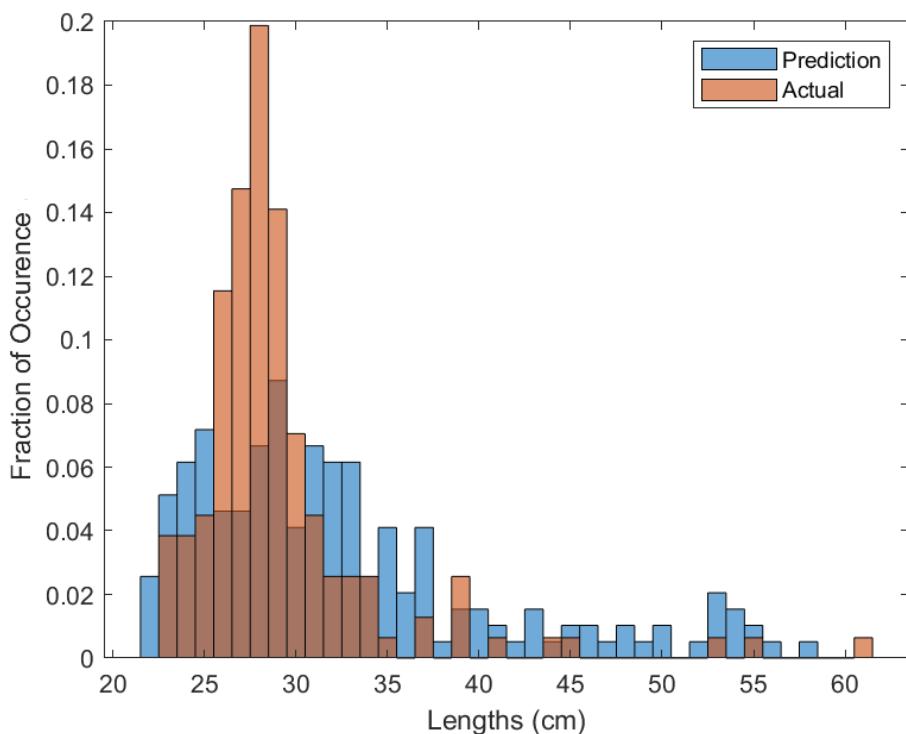
شکل ۴-۲۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



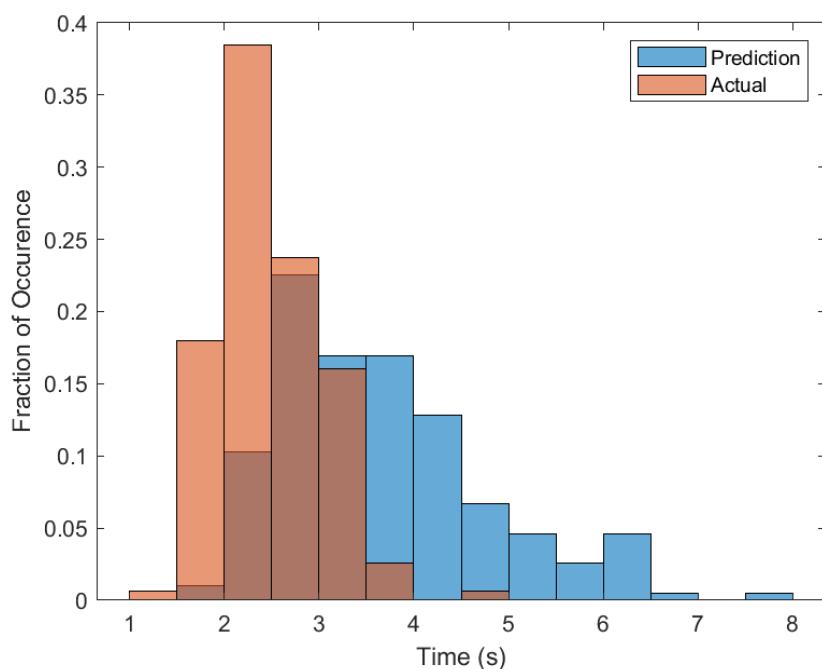
شکل ۴-۲۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



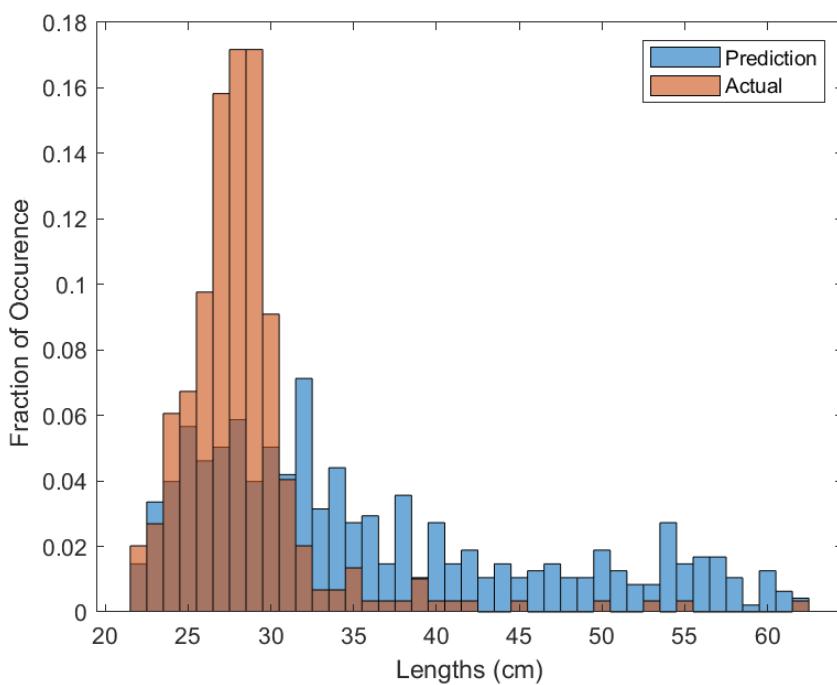
شکل ۴-۲۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



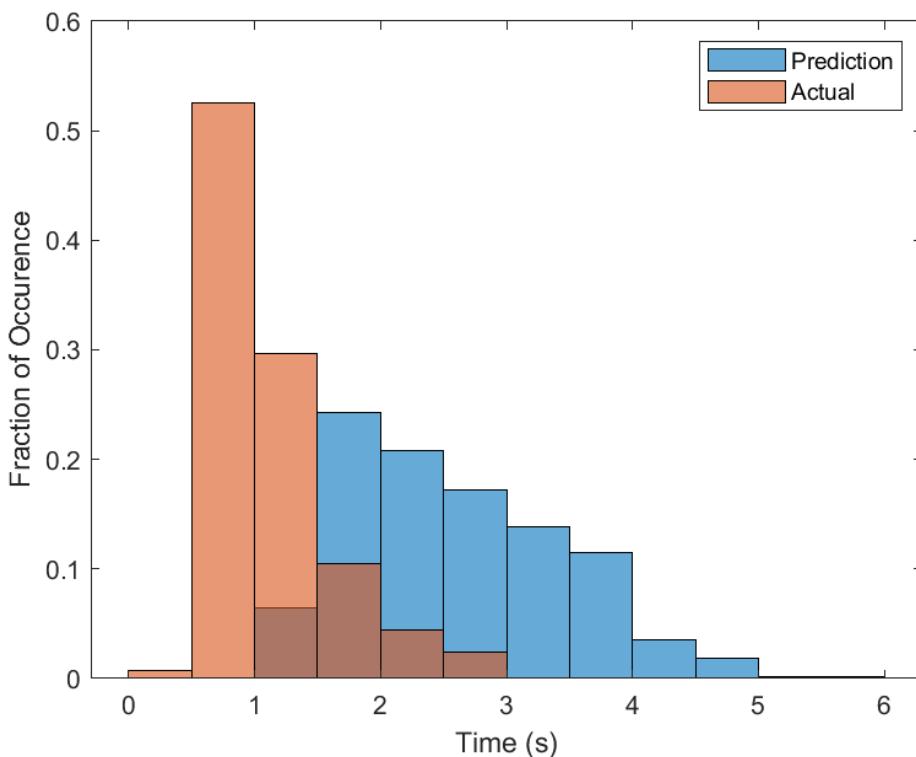
شکل ۴-۲۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



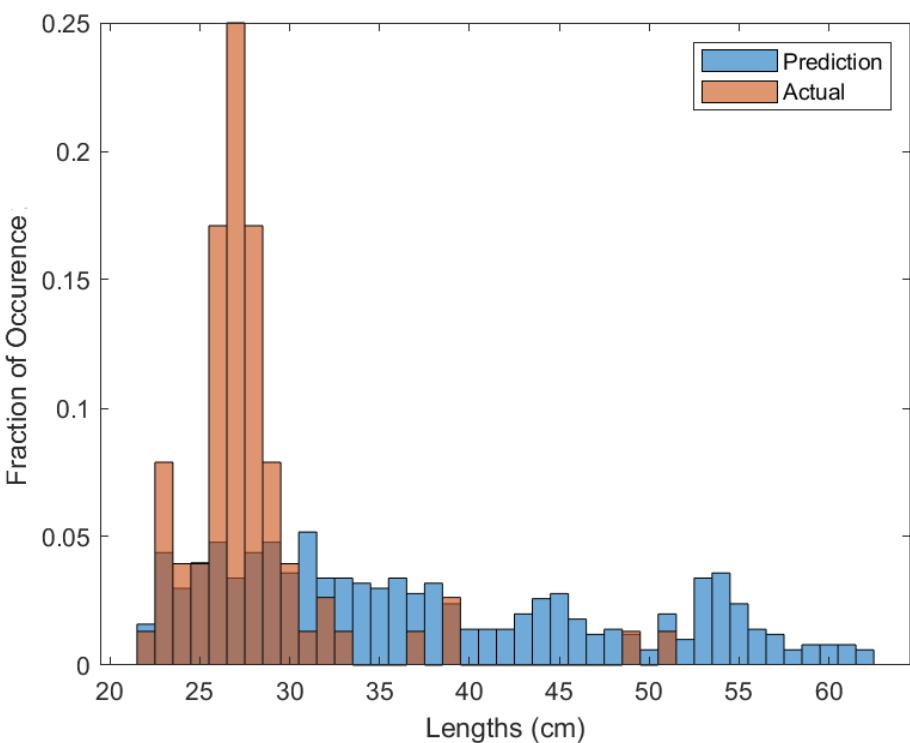
شکل ۴-۲۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



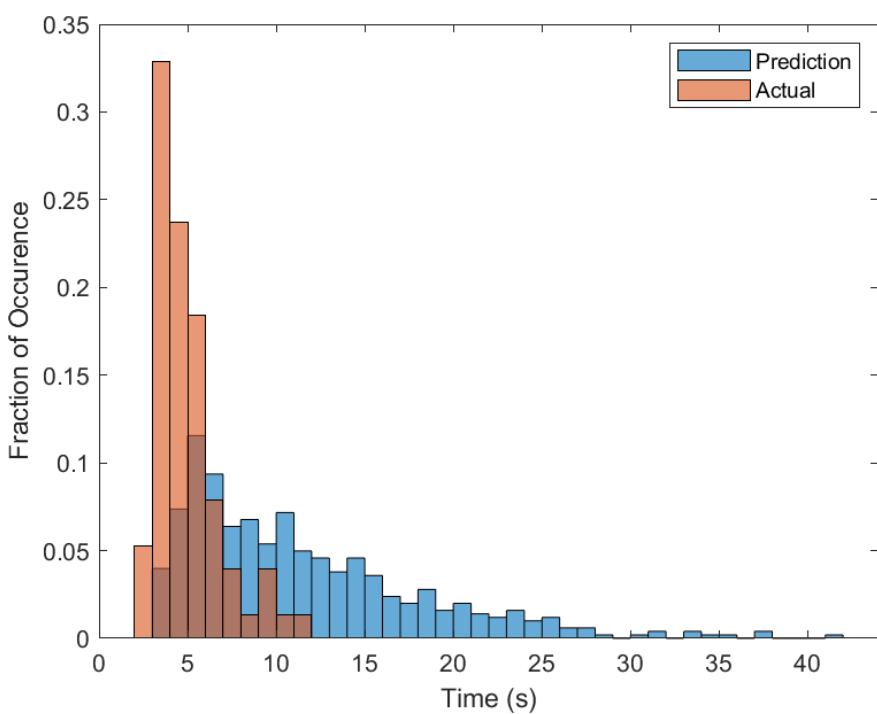
شکل ۴-۲۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



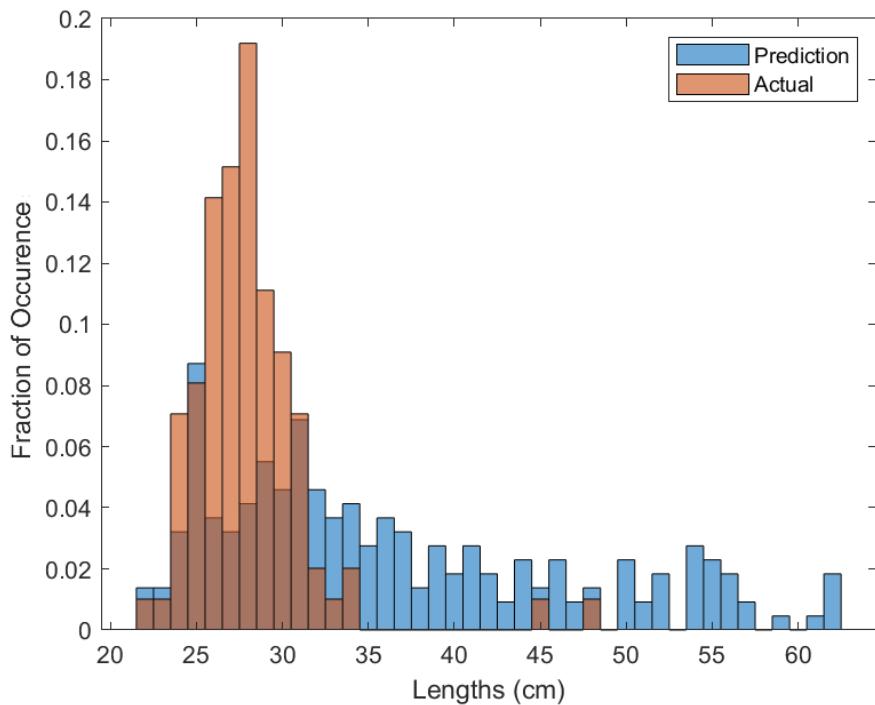
شکل ۴-۲۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



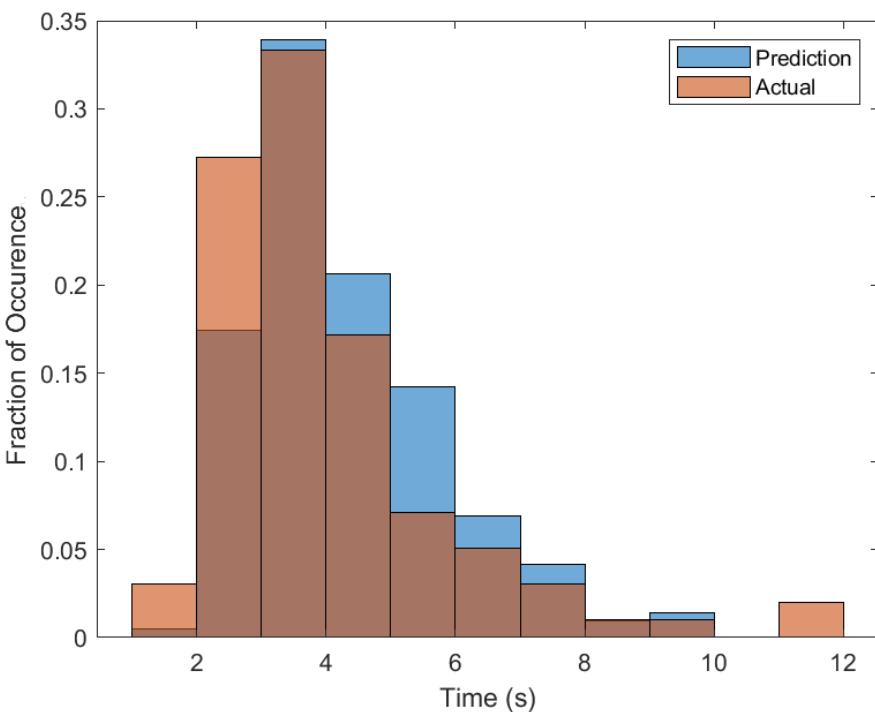
شکل ۴-۲۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



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 ۲۵،۰ 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 ۲۵،۰ متر بر ثانیه)

۴-۷ بررسی نتایج روش زنجیره‌های مارکوف دوفازی

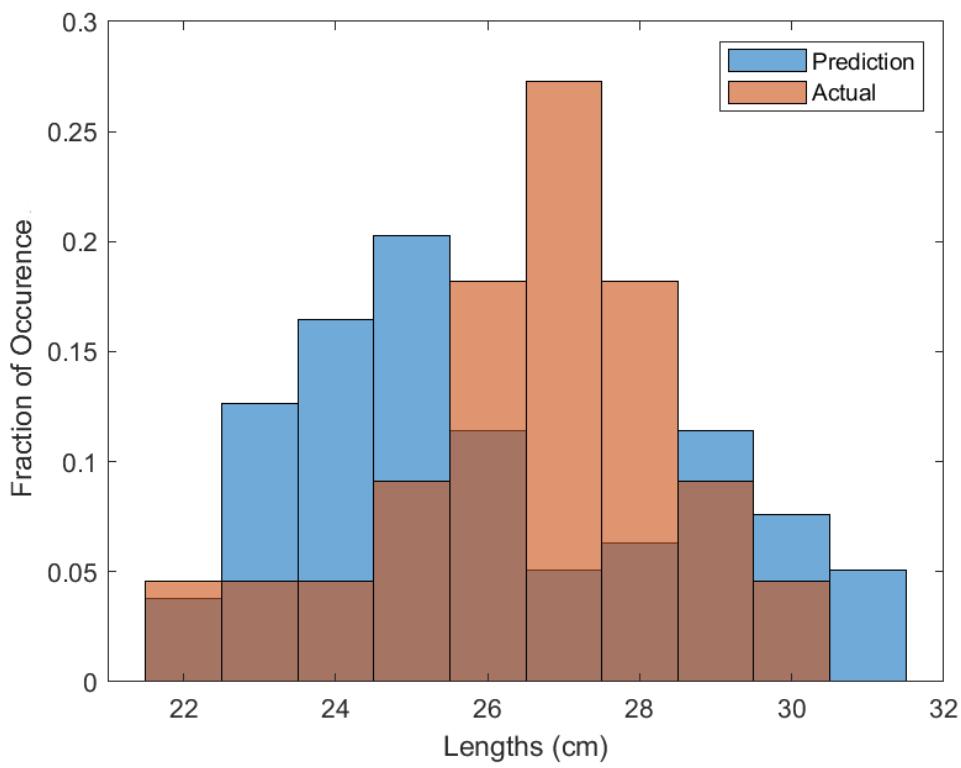
مدل‌سازی به روش زنجیره‌های مارکوف دوفازی بر طبق جزئیات گفته شده انجام شده است و نتایج آن در جداول ۴-۹ تا ۱۳-۴ و نمودارهای زیر آمده‌اند.

لازم به ذکر است که روند مدل سازی، مطابق متدهای بیان شده در بخش ۳-۷ می‌باشد. اولین بروزی 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 پستر، 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.

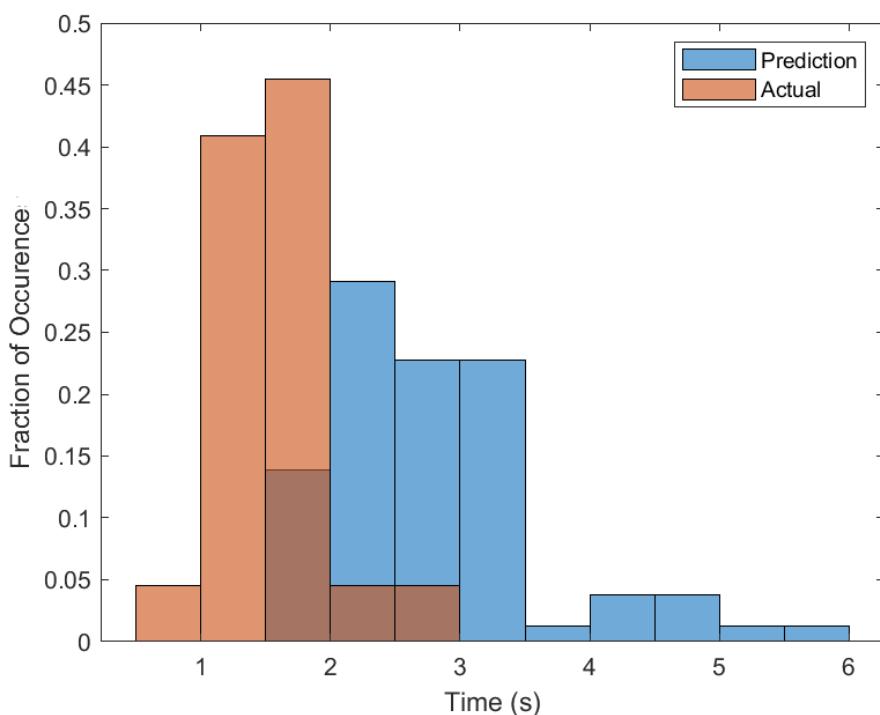
با دقت در نمودارهای هیستوگرام برای بروزی تفاوت در مدل‌های مبتنی بر زنجیره‌های مارکوف دوفازی می‌تواند به نکات زیر رسید:

- این روش مدل سازی، 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.

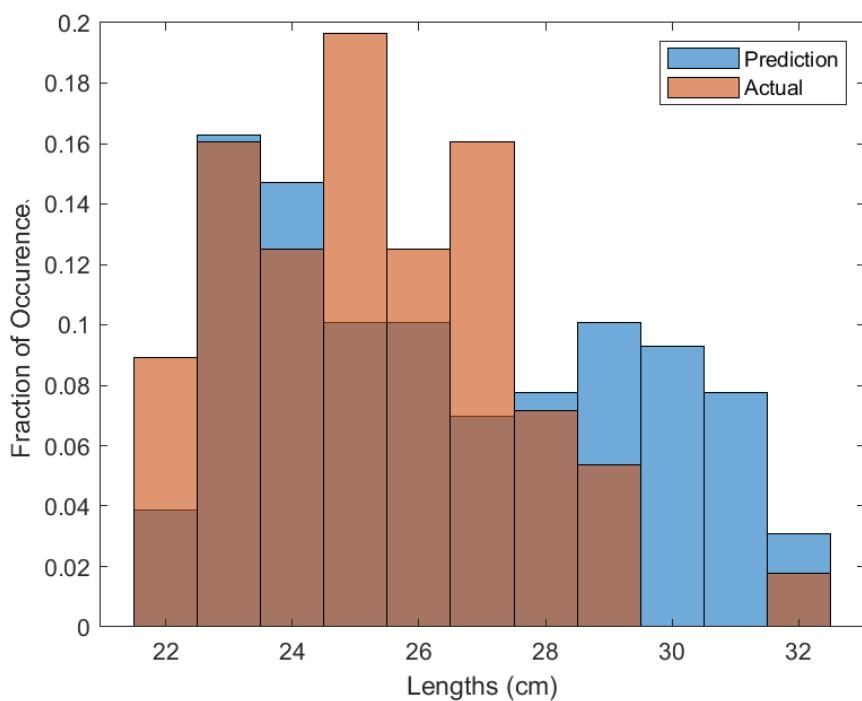
میانگین زمان جابجایی‌های طی شده بدست آمده از مدل، مقادیر بالاتری نسبت به داده‌های تجربی متناظر هستند.



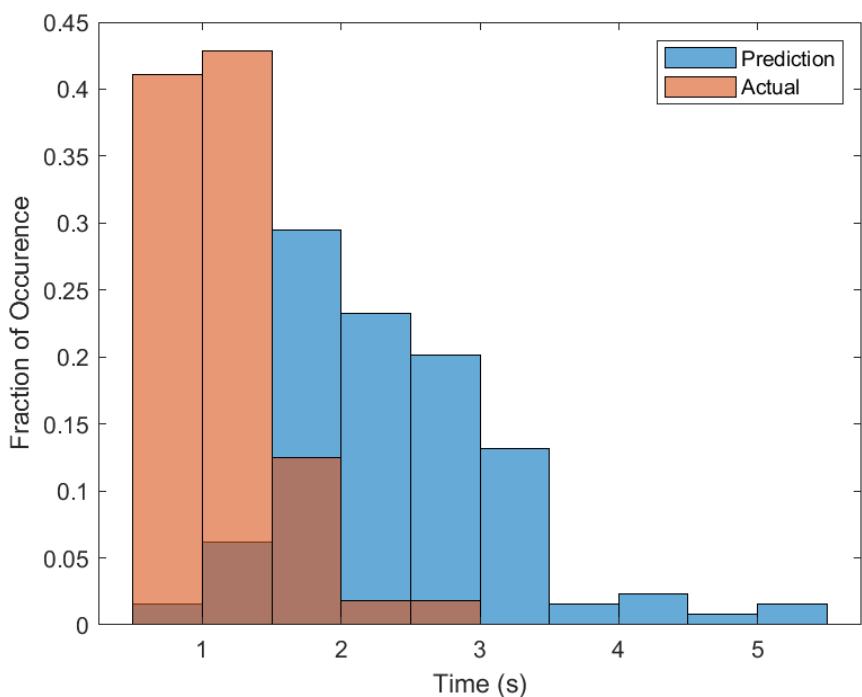
شکل ۴-۳۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۲۵،۰ متر بر ثانیه)



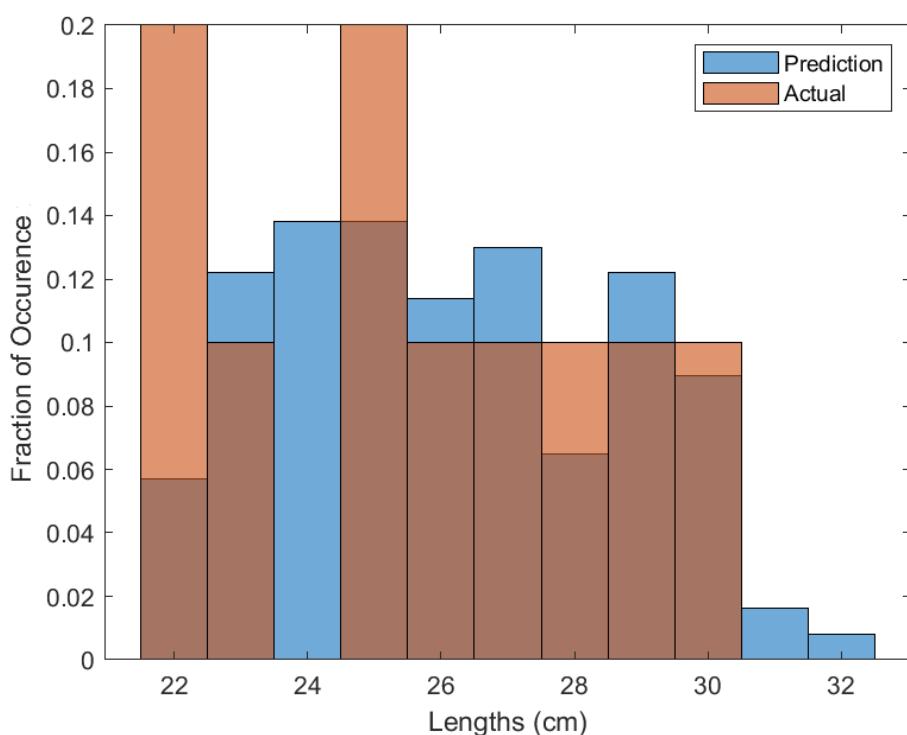
شکل ۴-۳۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۲۵،۰ متر بر ثانیه)



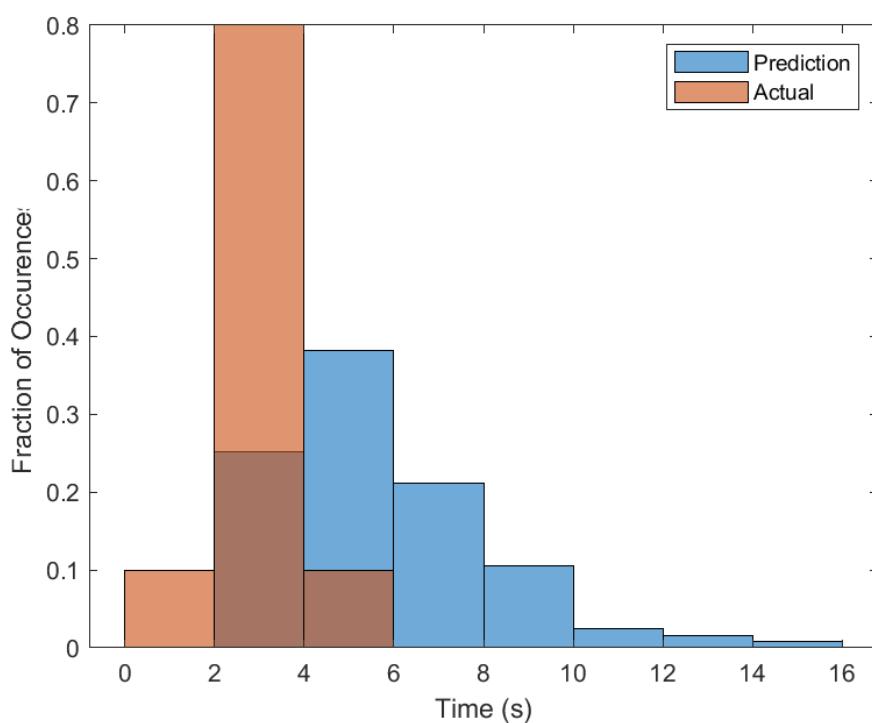
شکل ۴-۳۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



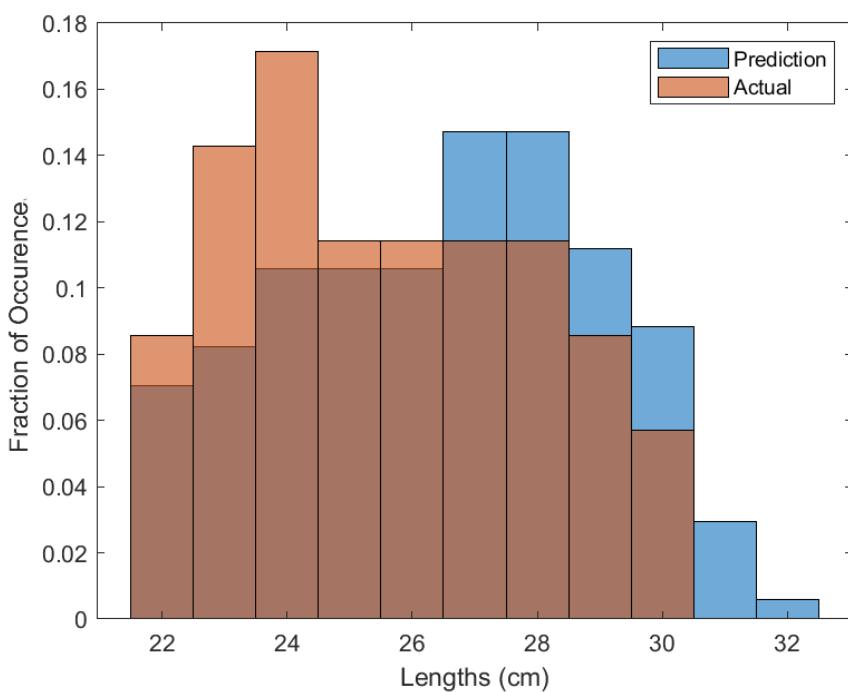
شکل ۴-۳۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



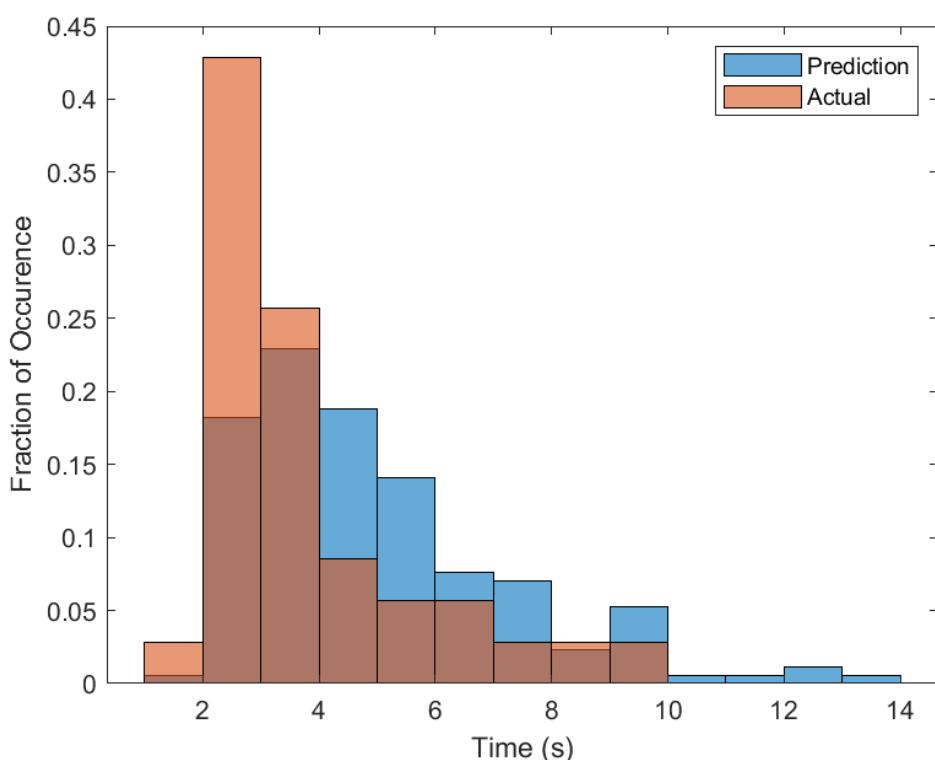
شکل ۴-۳۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۲۵،۰ متر بر ثانیه)



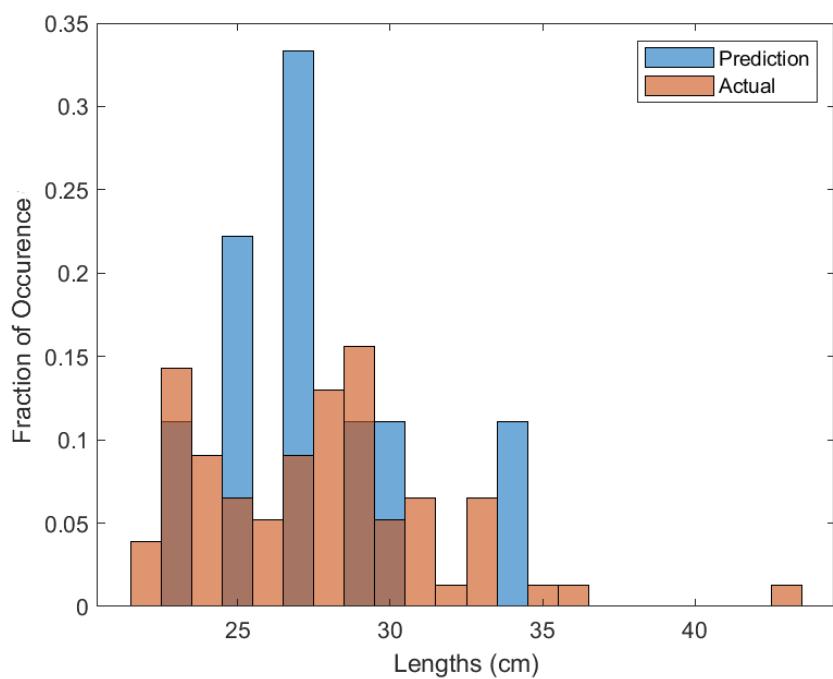
شکل ۴-۳۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۲۵،۰ متر بر ثانیه)



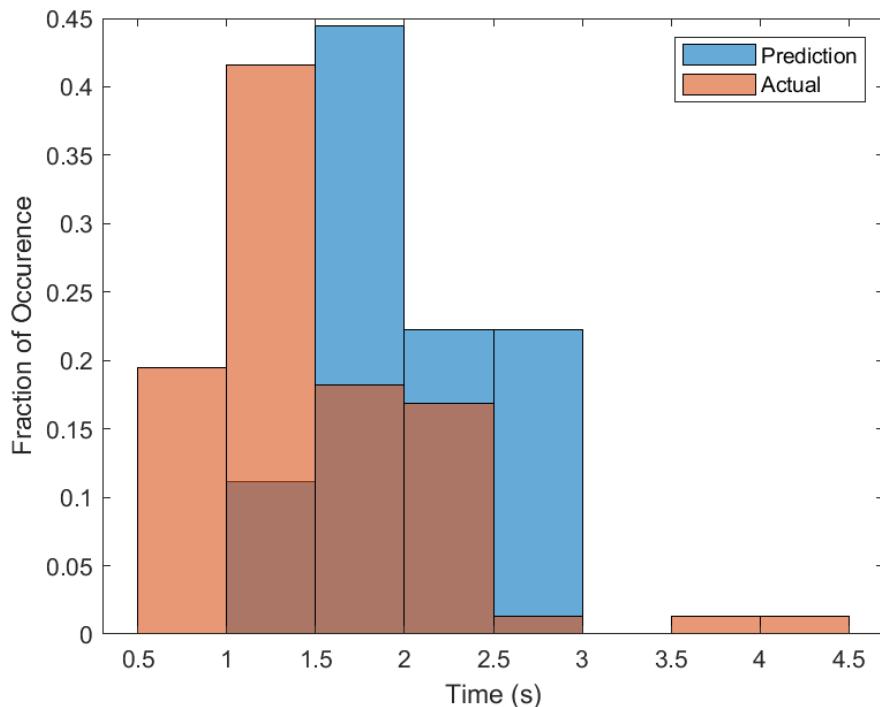
شکل ۴-۳۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۲۵، ۰ متر بر ثانیه)



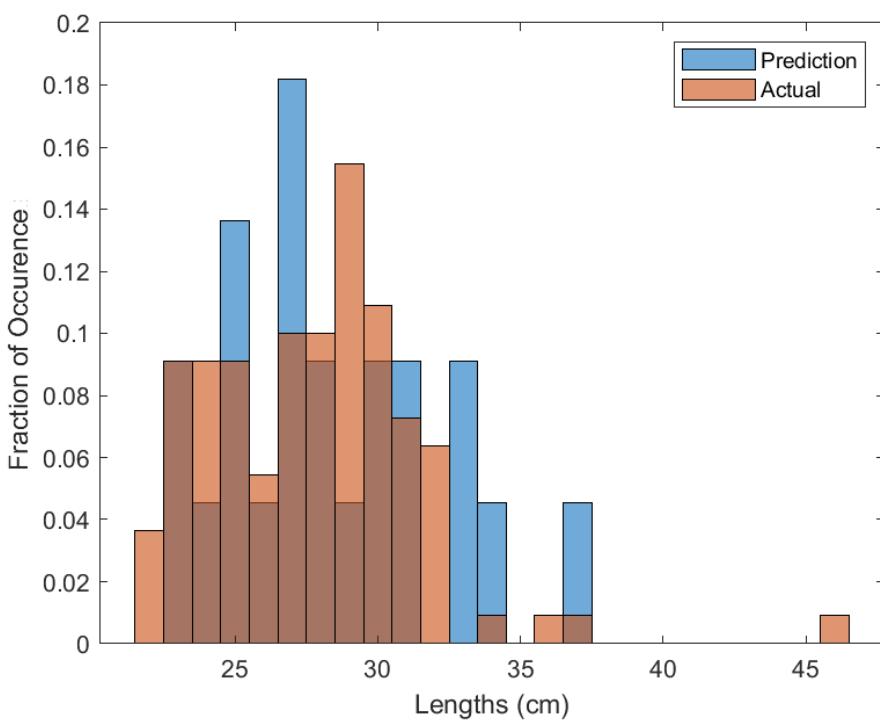
شکل ۴-۳۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۲۵، ۰ متر بر ثانیه)



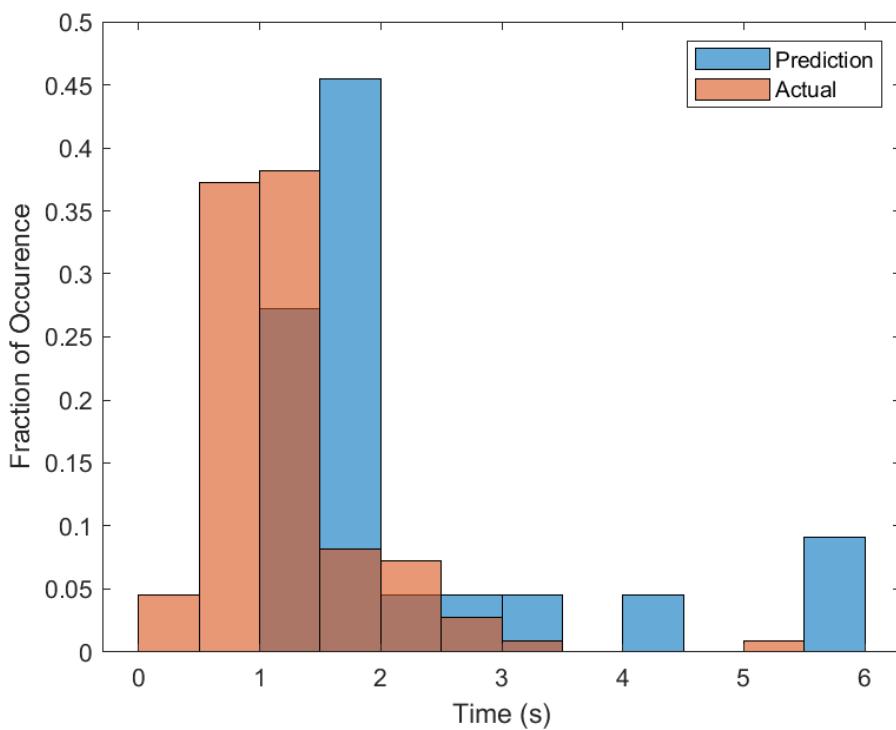
شکل ۴-۴۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



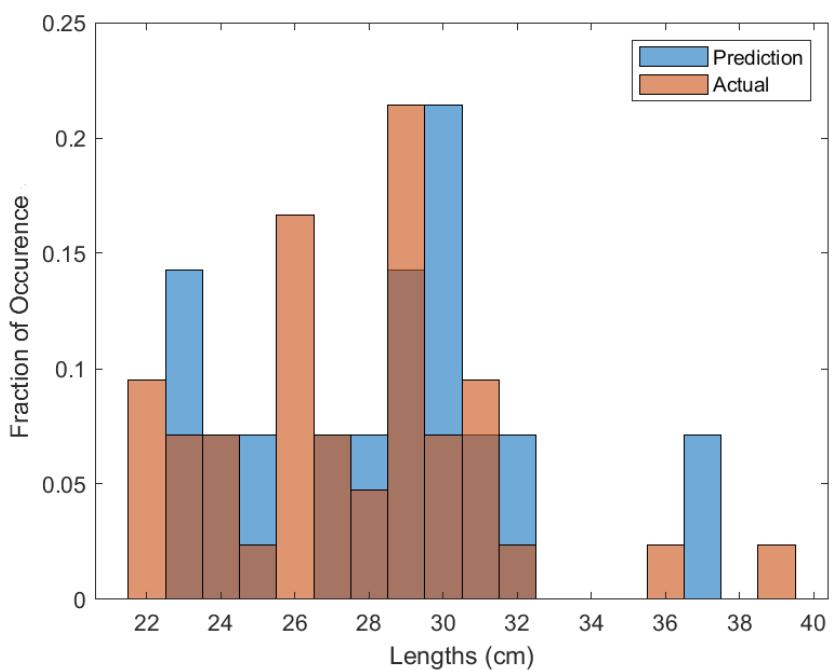
شکل ۴-۴۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



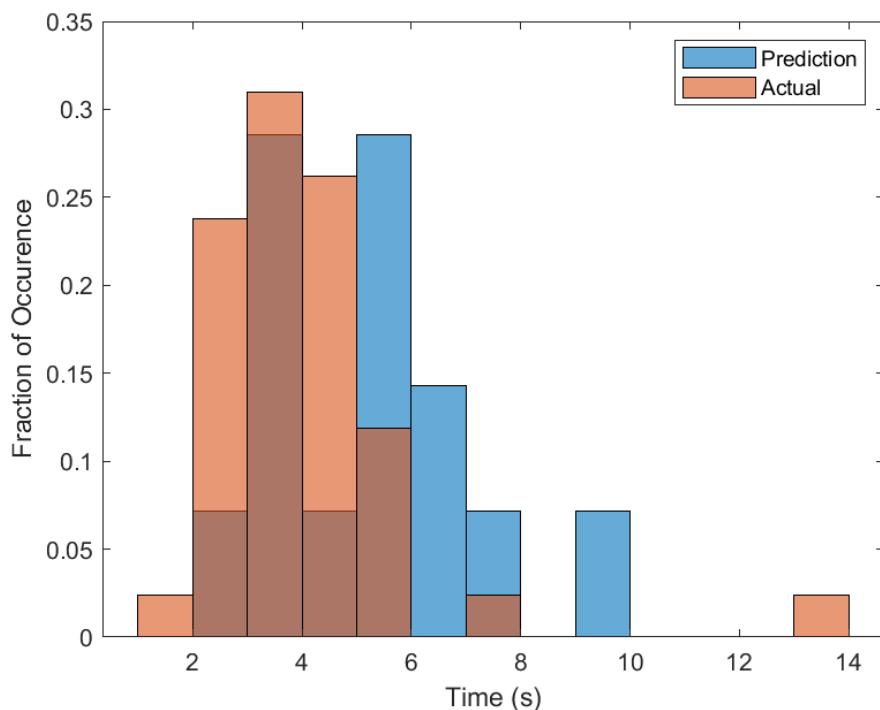
شکل ۴-۴۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افروude ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



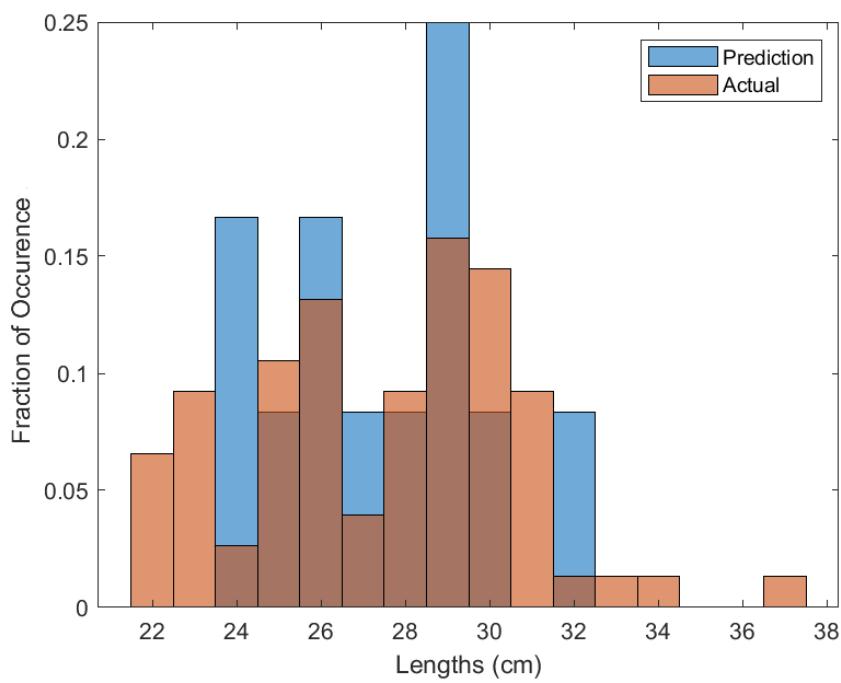
شکل ۴-۴۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افروude ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



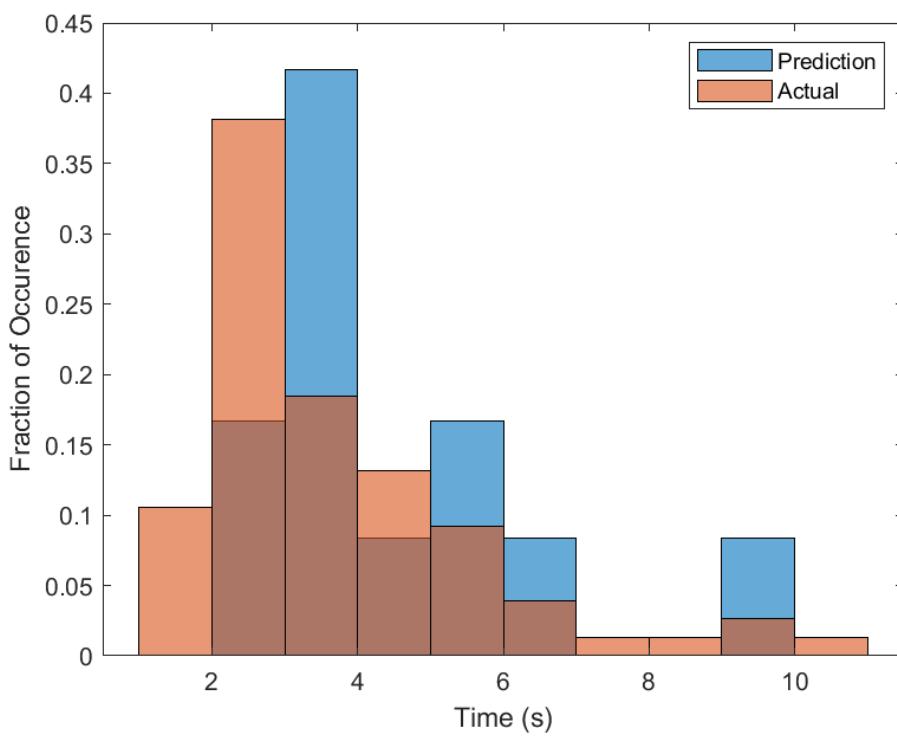
شکل ۴-۴۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



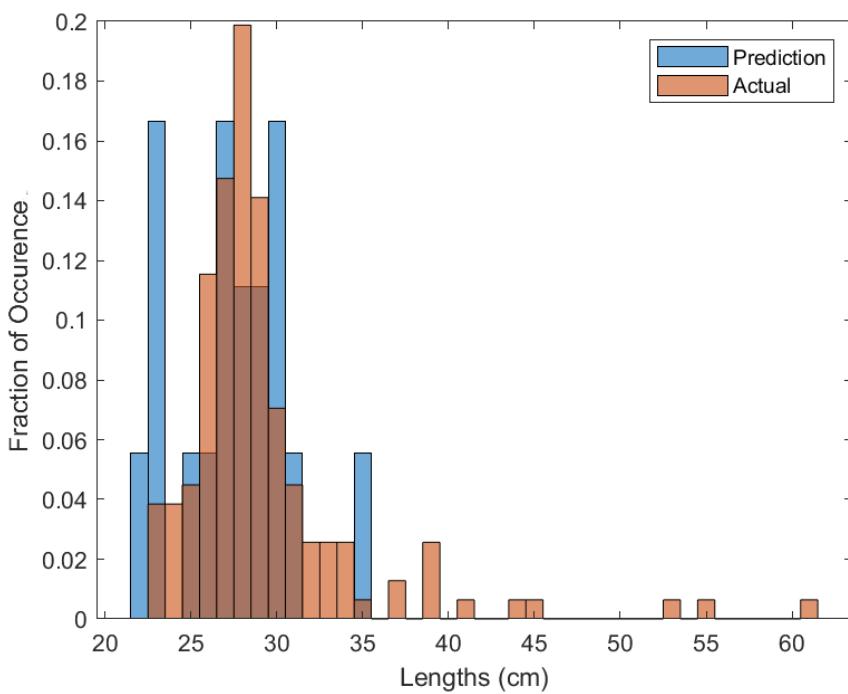
شکل ۴-۴۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



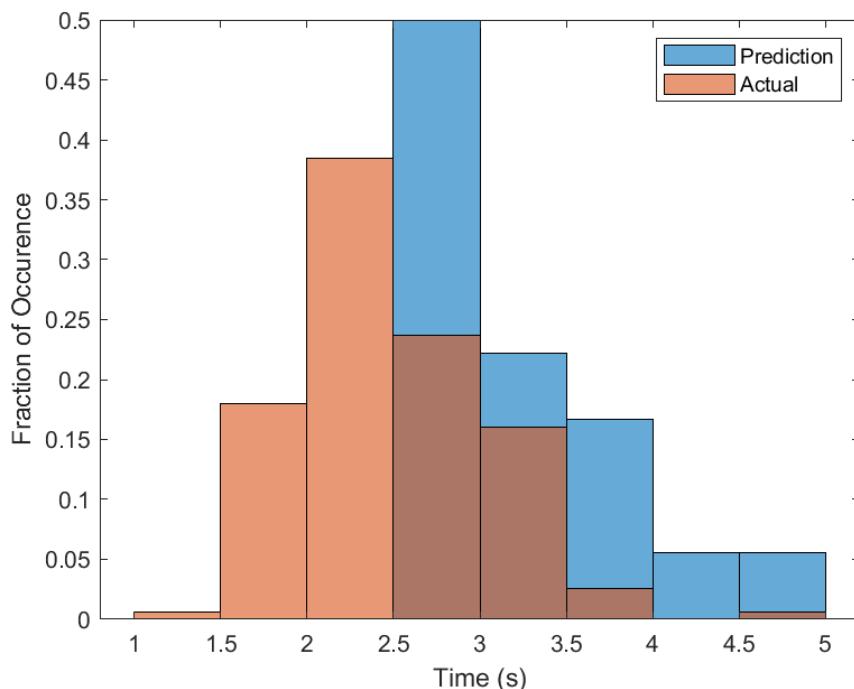
شکل ۴-۴۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



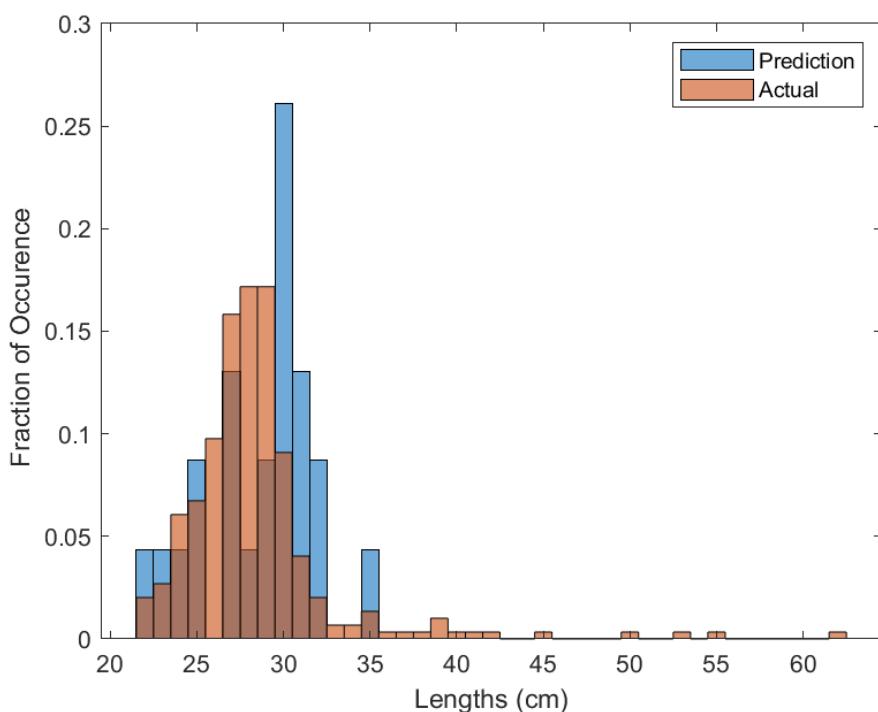
شکل ۴-۴۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



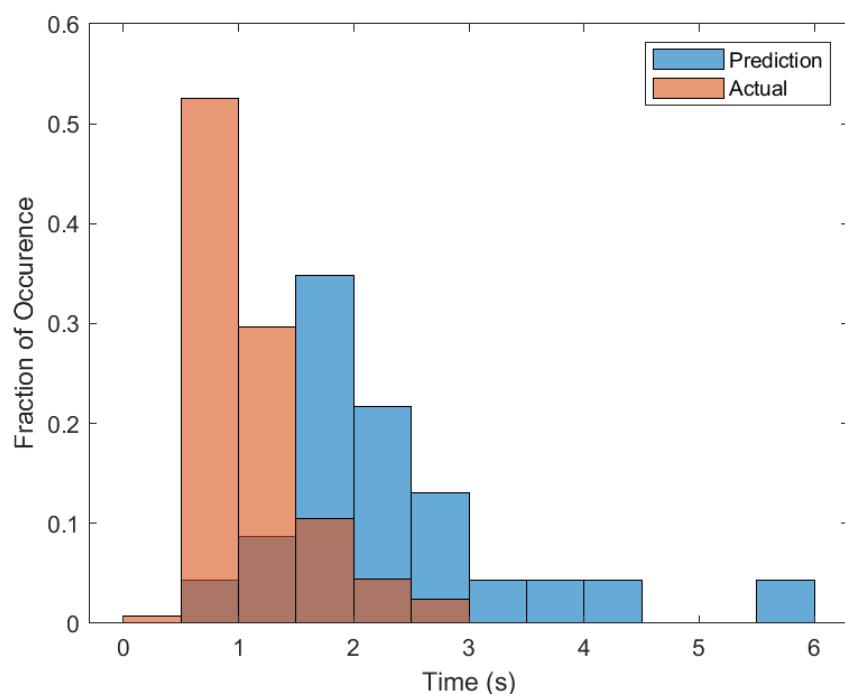
شکل ۴-۴۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



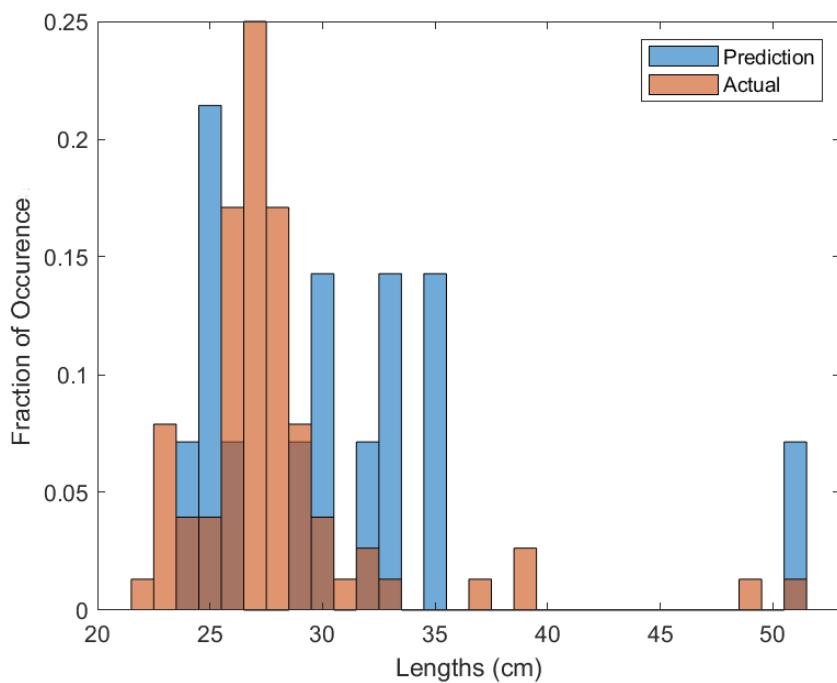
شکل ۴-۴۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



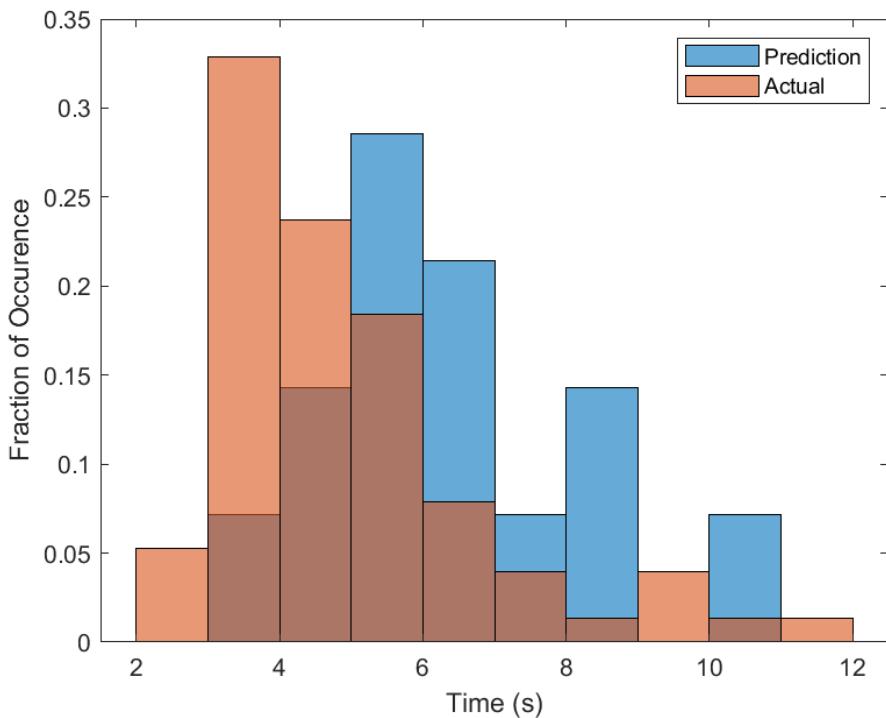
شکل ۴-۵۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۲۵،۰ متر بر ثانیه)



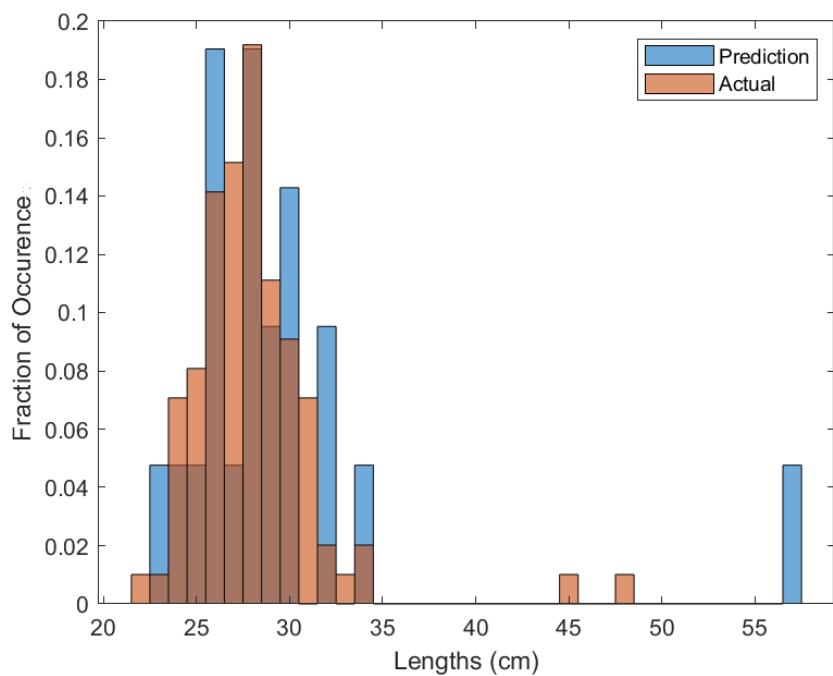
شکل ۴-۵۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۲۵،۰ متر بر ثانیه)



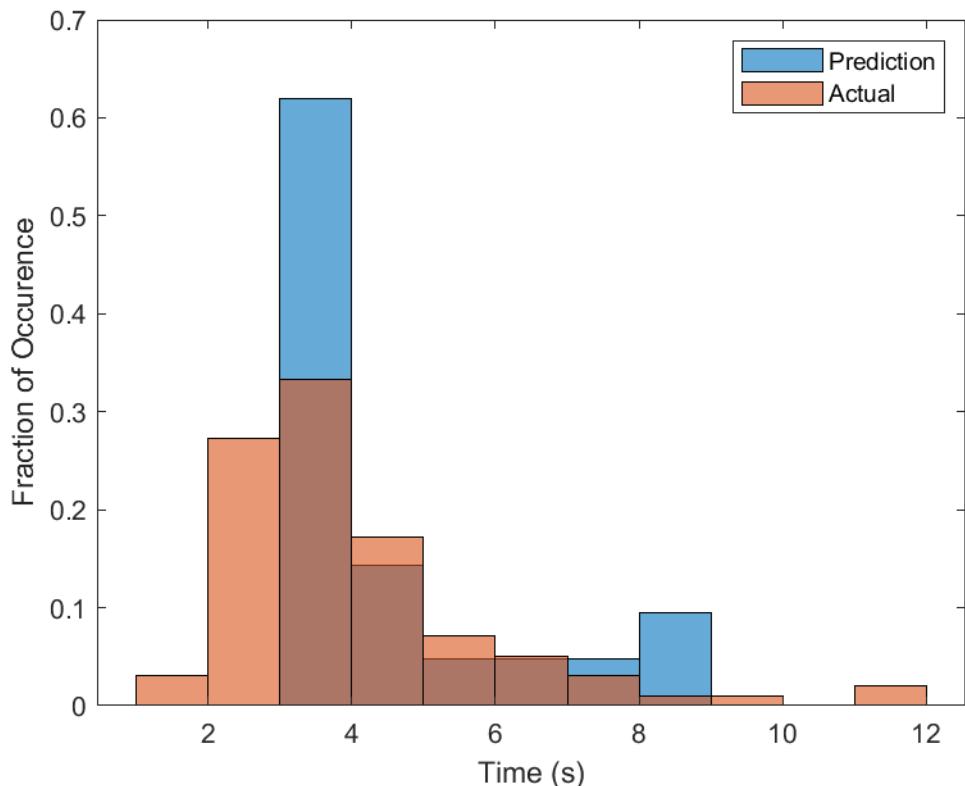
شکل ۴-۵۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



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 ۲۵،۰ 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 ۲۵،۰ متر بر ثانیه)

۴-۸ بررسی نتایج روش زنجیره‌های مارکوف سه فازی

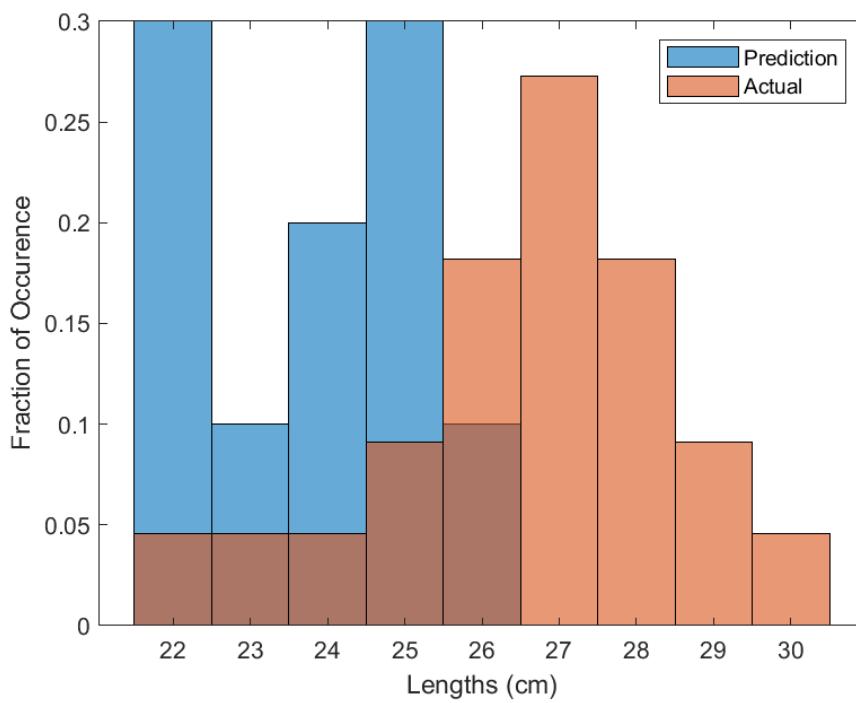
مدل‌سازی به روش زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی بر طبق جزئیات گفته شده انجام شده است و نتایج آن در جداول ۱۴-۴ تا ۱۸-۴ و نمودارهای زیر آمده‌اند.

لازم به ذکر است که مدل‌سازی نتایج عنوان شده در این بخش، مطابق با روند مدل‌سازی بیان شده در بخش ۷-۳ 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.

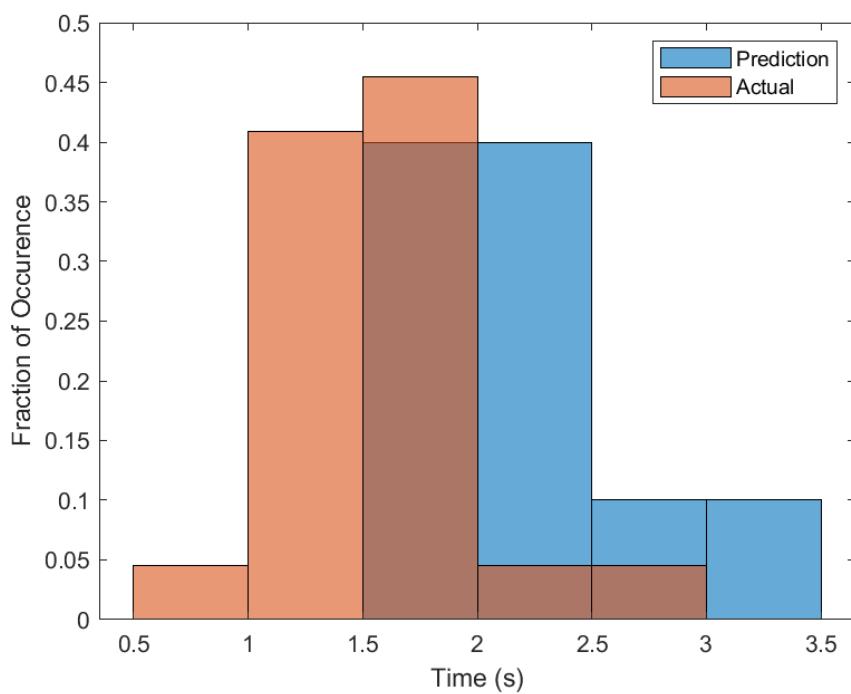
با دقت در نمودارهای هیستوگرام برای بررسی تفاوت در مدل‌های مبتنی بر زنجیره‌های مارکوف دو فازی می‌تواند به نکات زیر رسید:

- 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.

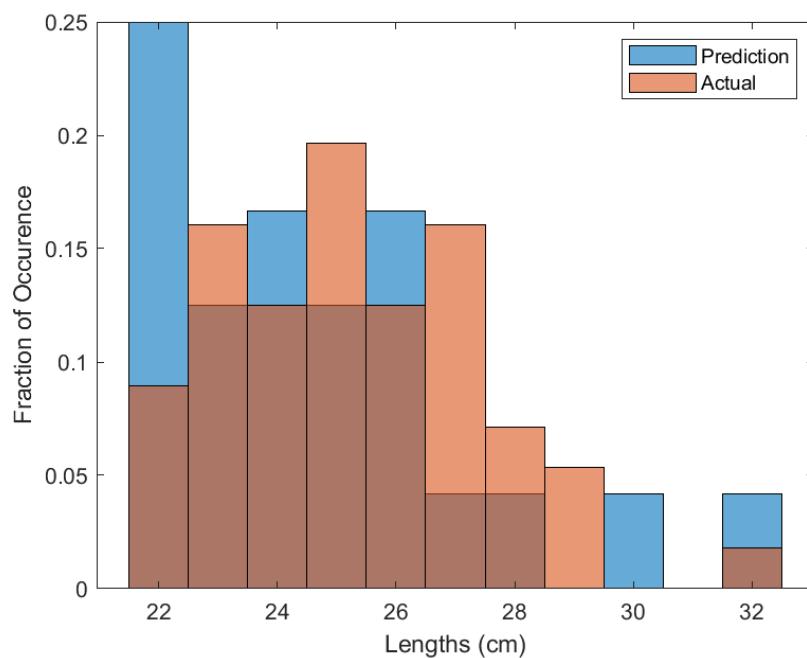
میانگین زمان جابجایی‌های طی شده بدست آمده از مدل، مقادیر بالاتری نسبت به داده‌های تجربی متناظر هستند.



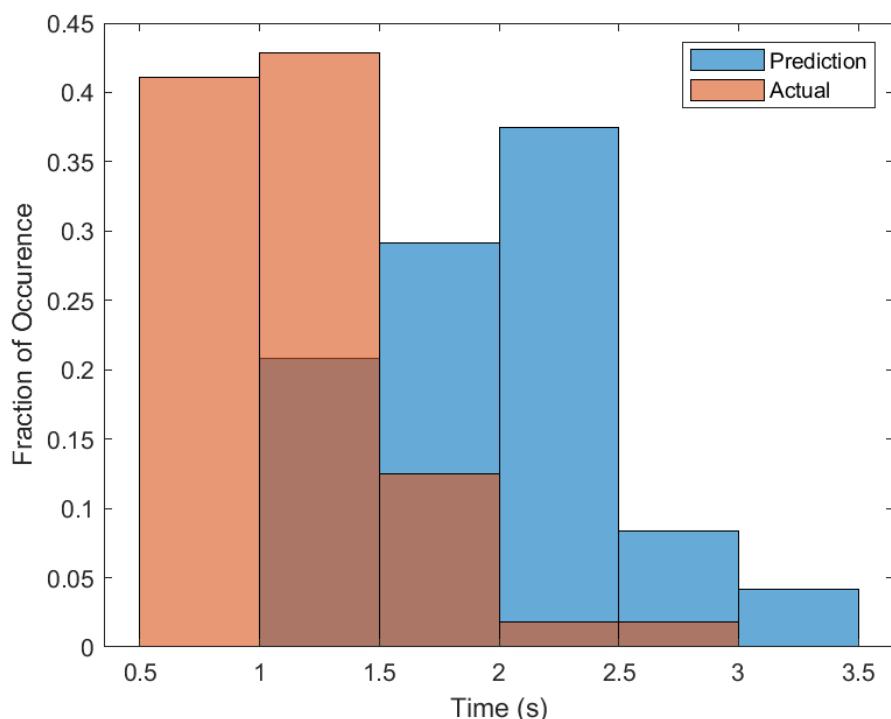
شکل ۴-۵۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



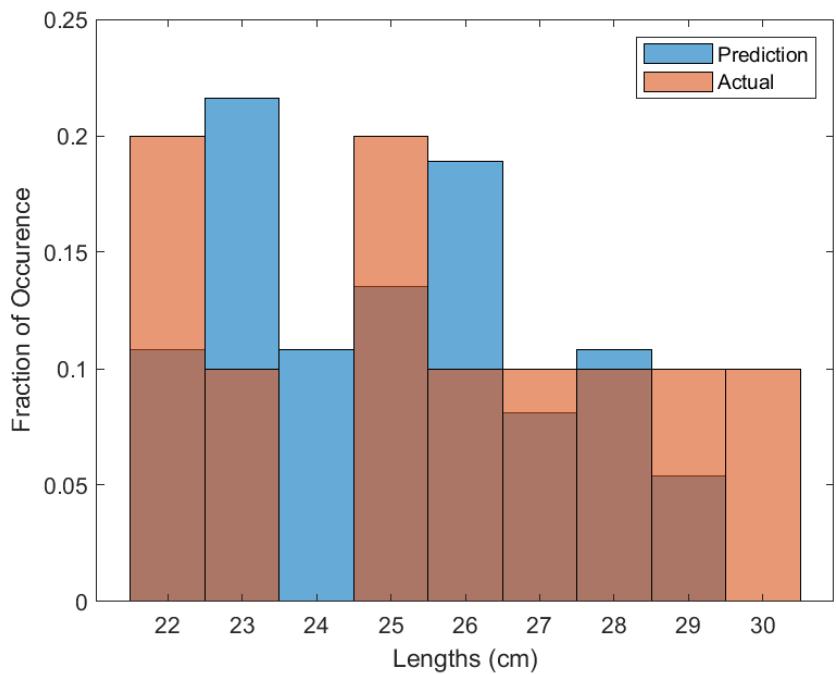
شکل ۴-۵۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



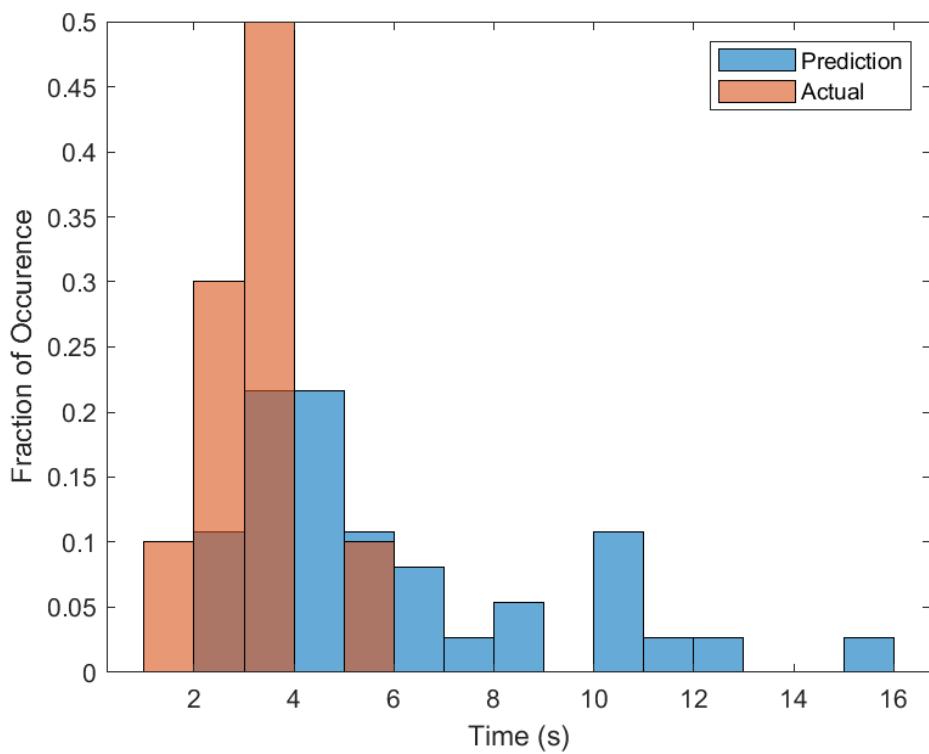
شکل ۴-۵۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



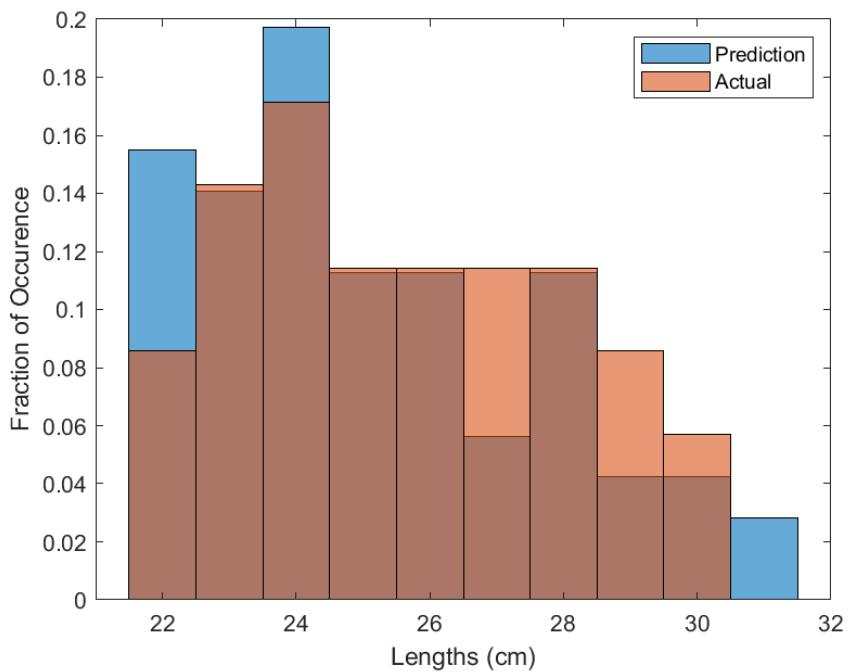
شکل ۴-۵۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



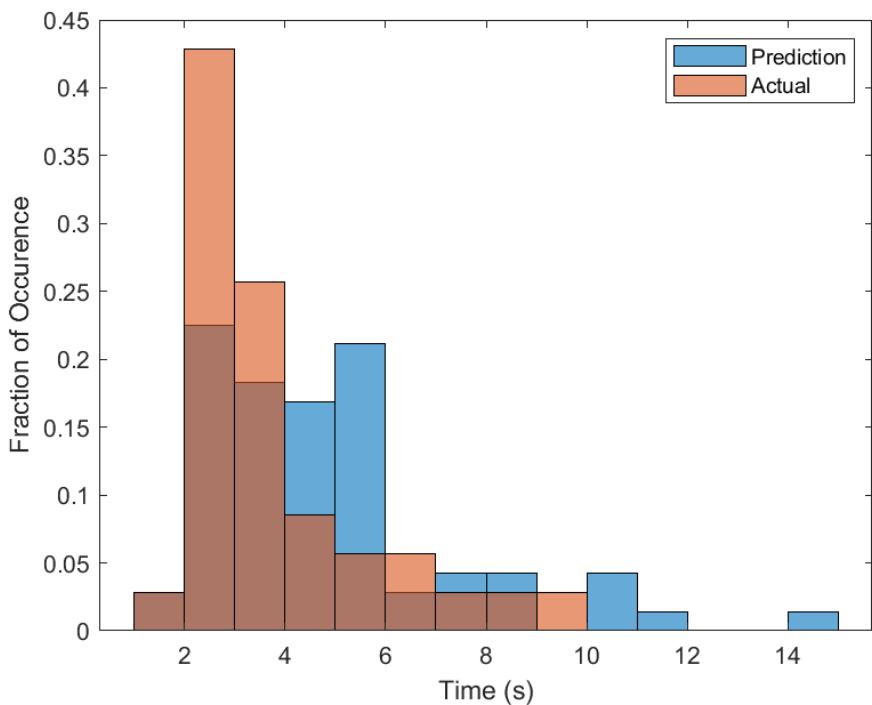
شکل ۴-۶۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر مایه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



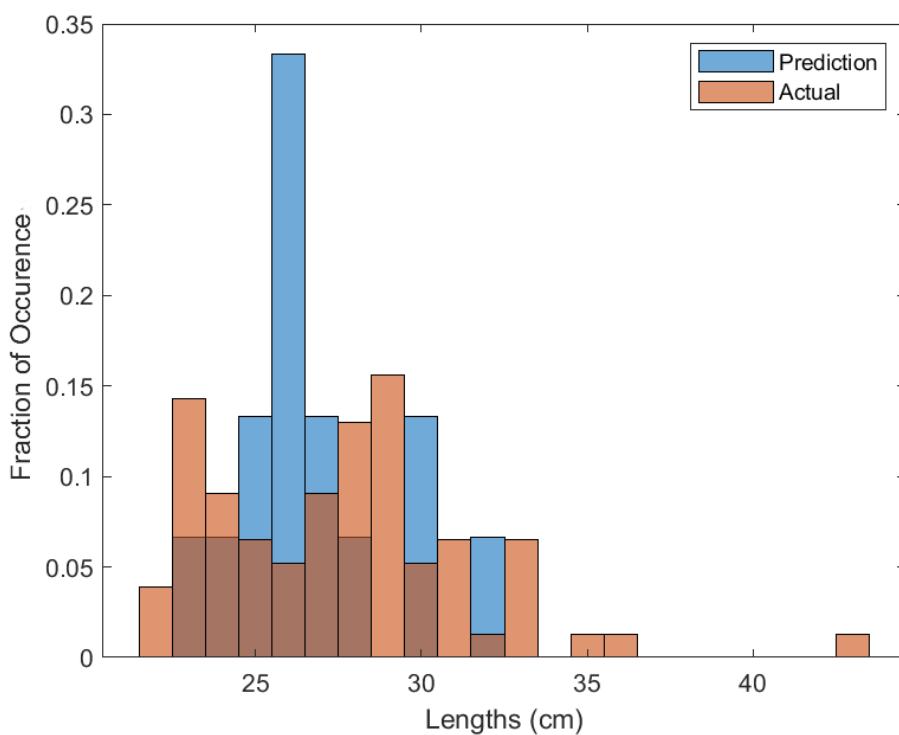
شکل ۴-۶۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



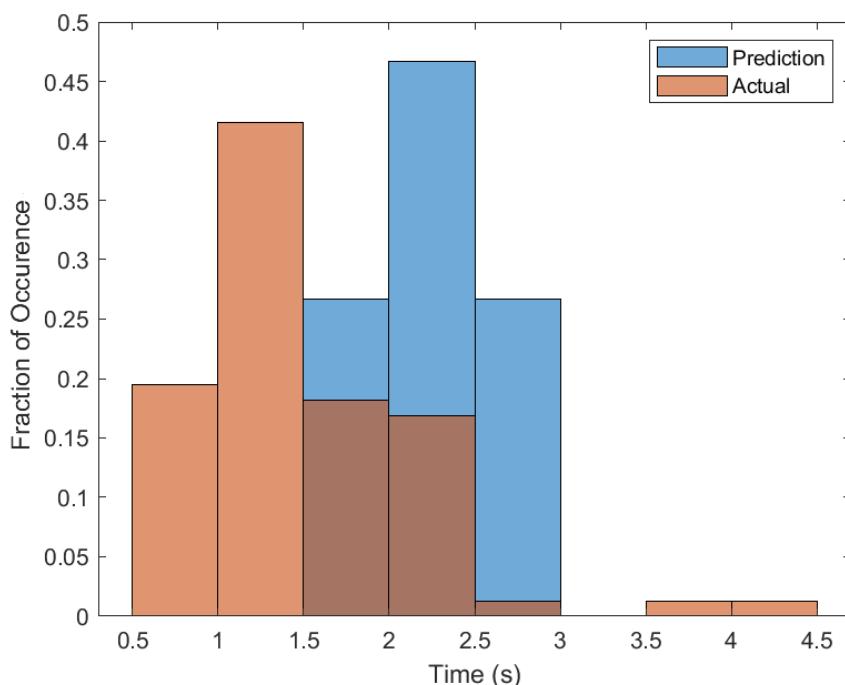
شکل ۴-۶۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



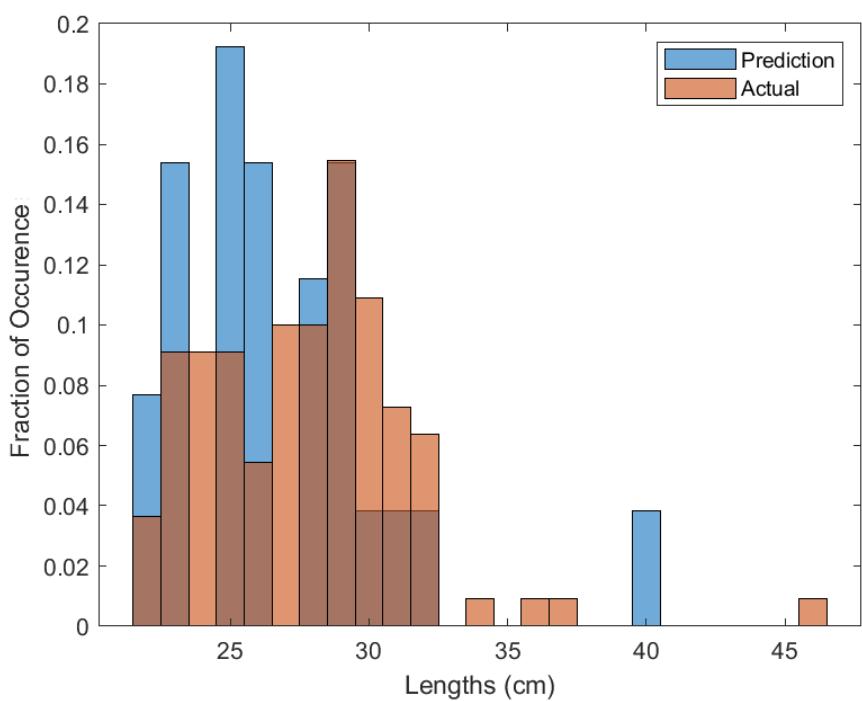
شکل ۴-۶۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه درشت و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



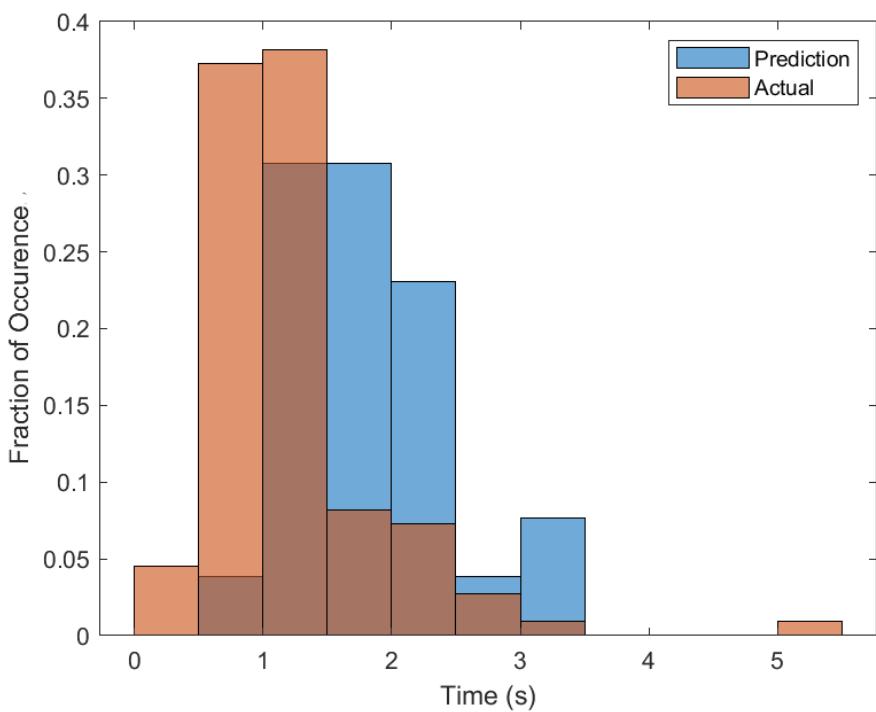
شکل ۴-۶۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



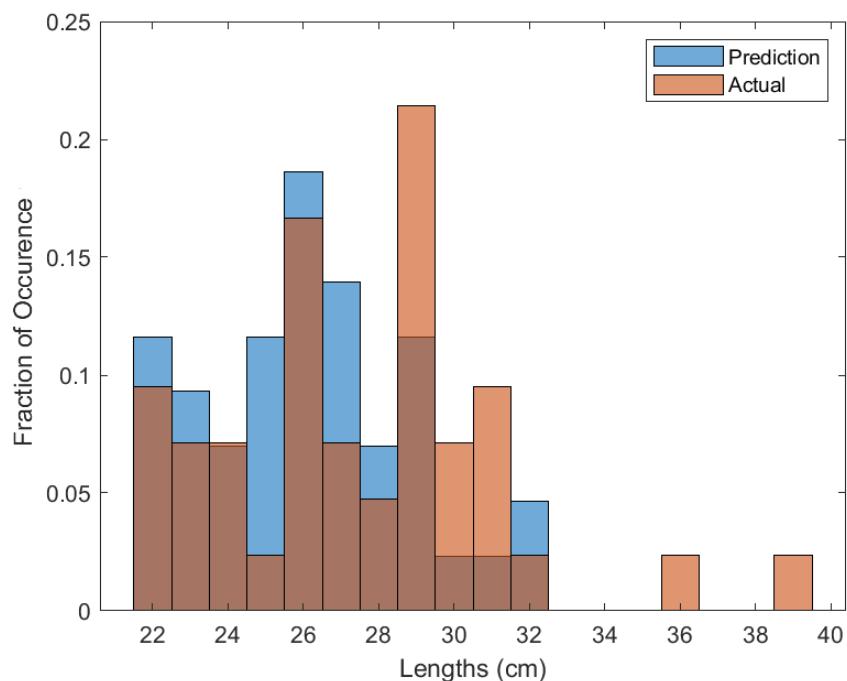
شکل ۴-۶۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



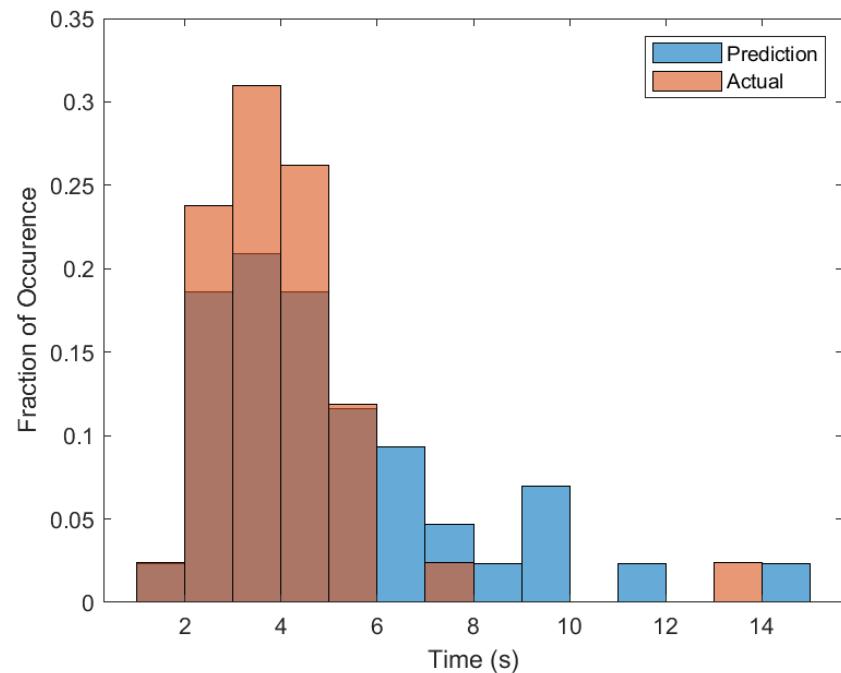
شکل ۴-۶۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



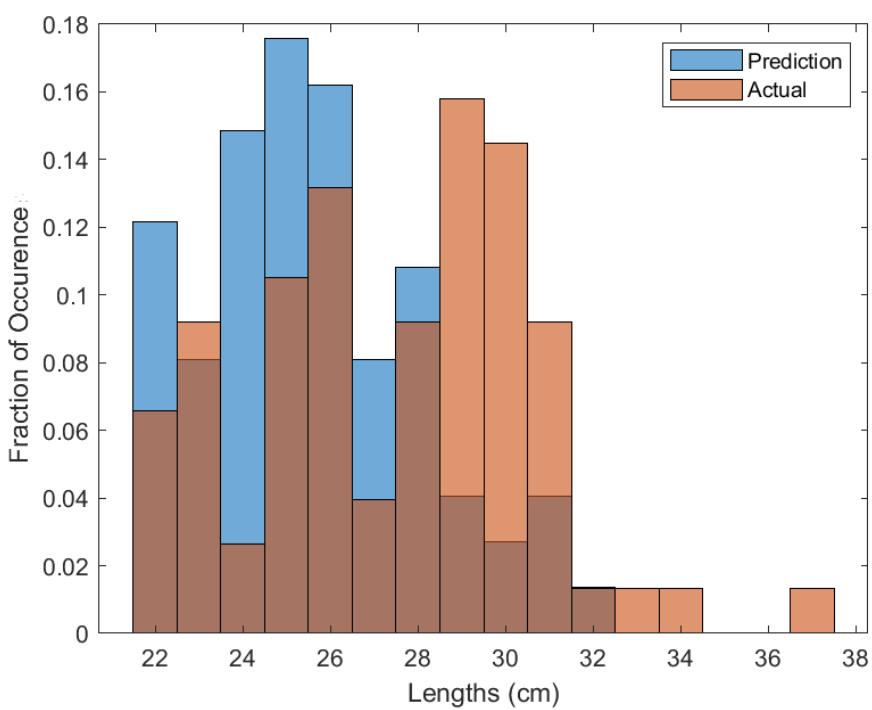
شکل ۴-۶۷ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



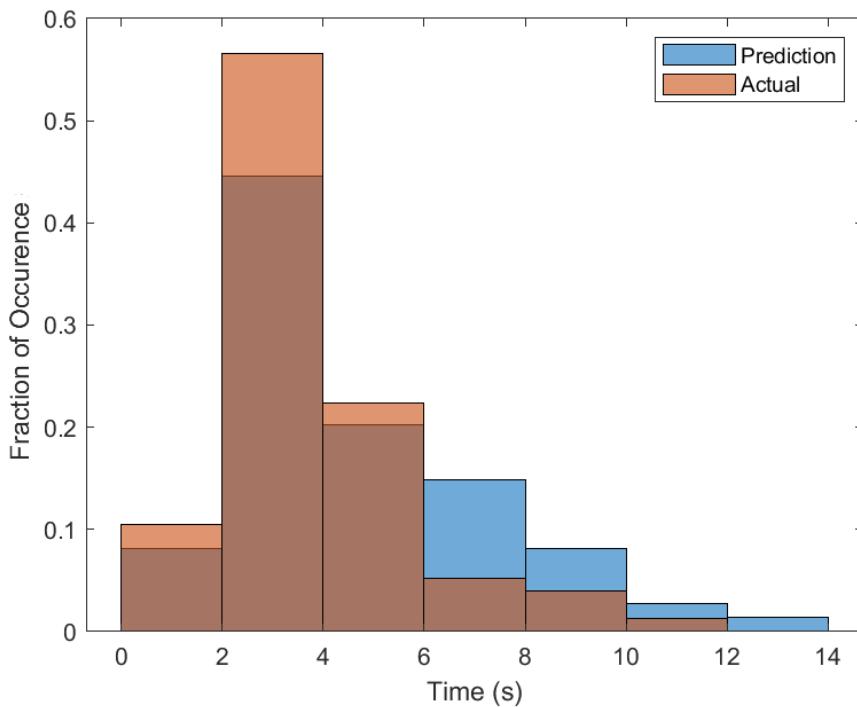
شکل ۴-۶۸ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



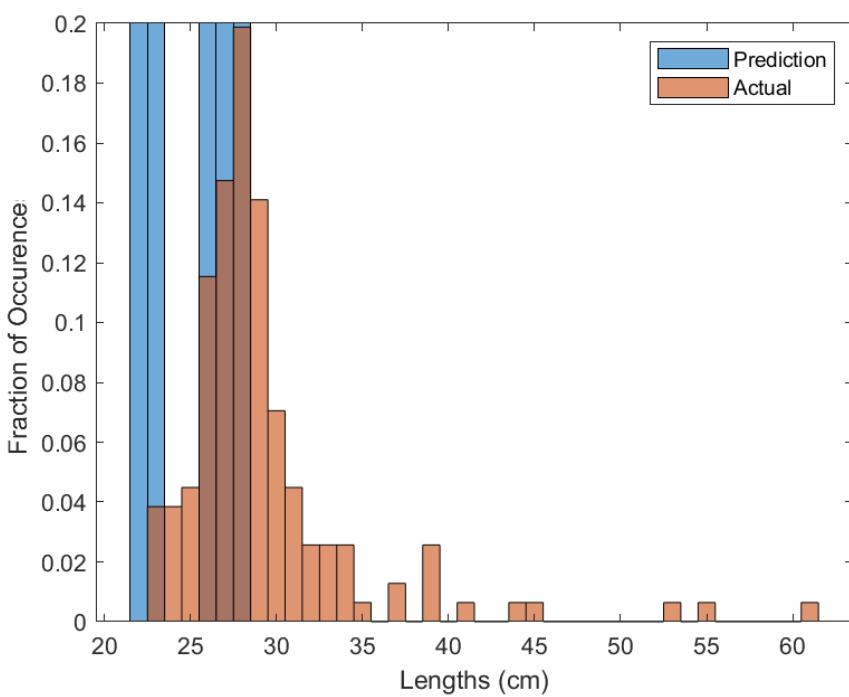
شکل ۴-۶۹ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



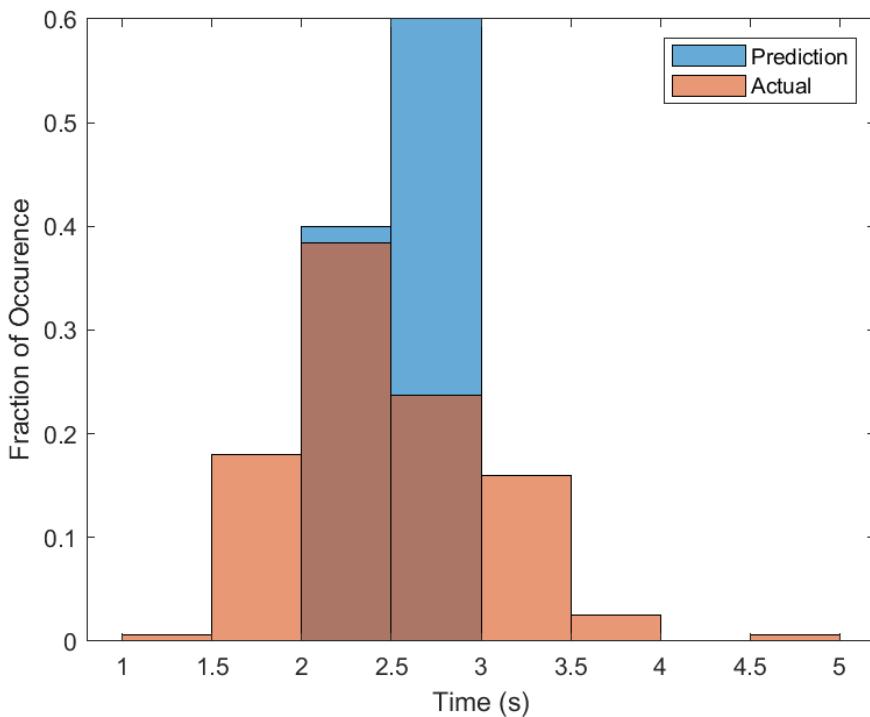
شکل ۴-۷۰ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



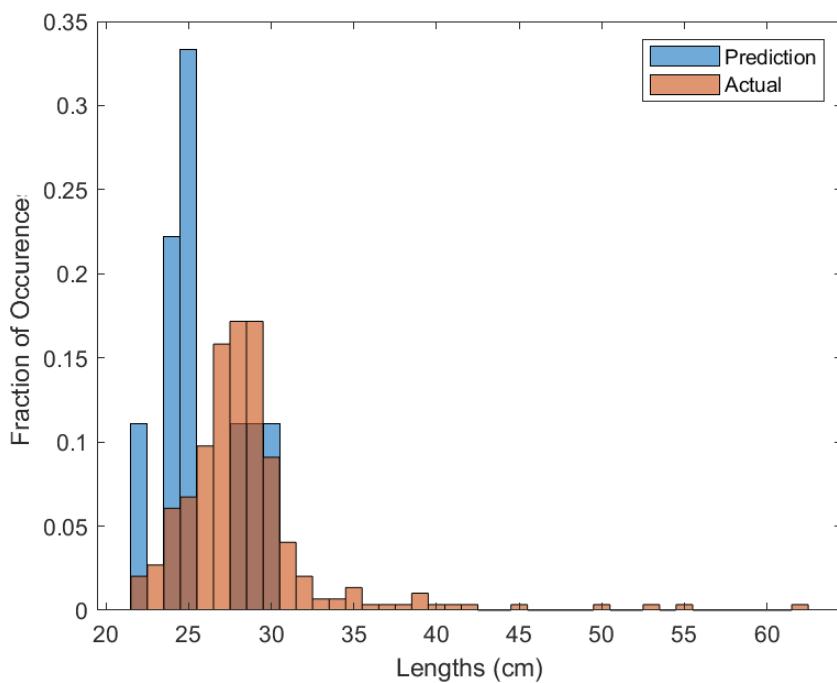
شکل ۴-۷۱ هیستوگرام زمان جابجایی‌های نامقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر کاتالیست FCC و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



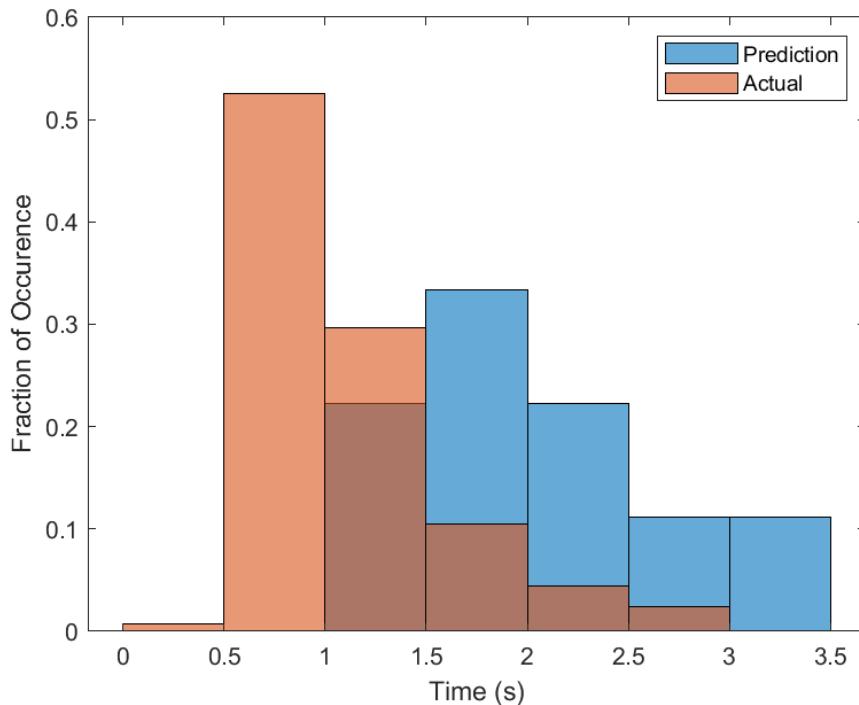
شکل ۴-۷۲ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



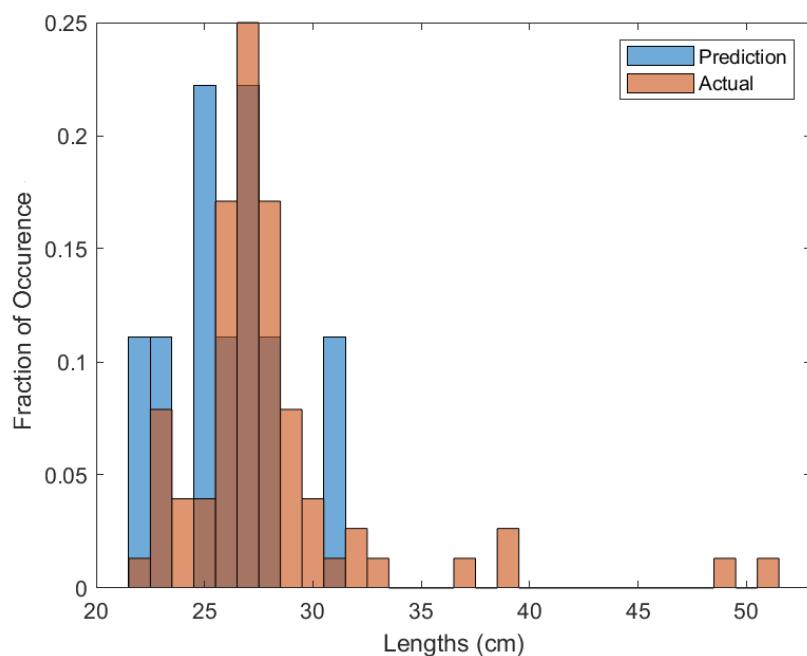
شکل ۴-۷۳ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



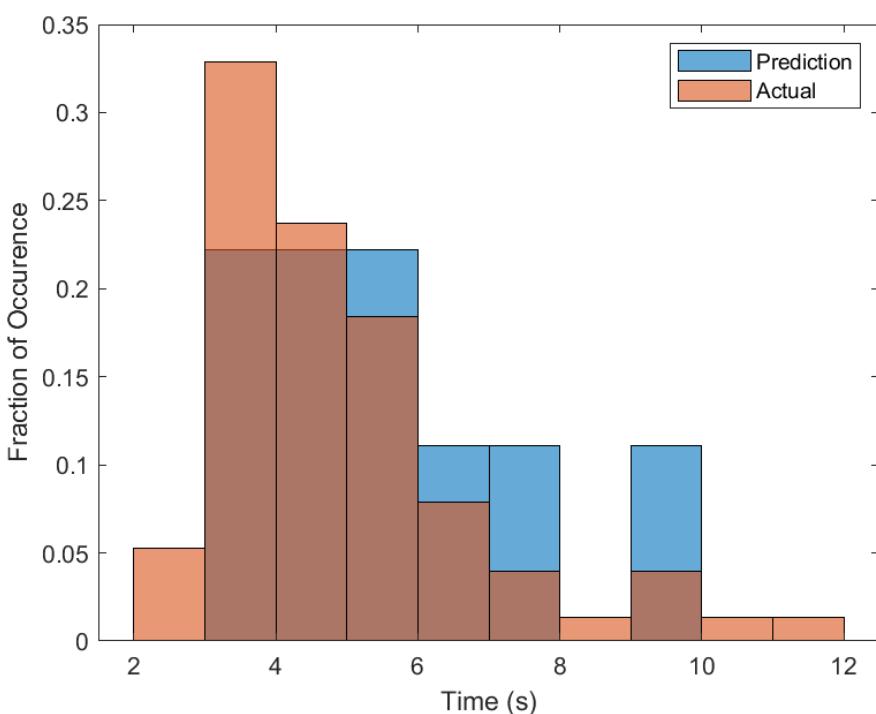
شکل ۴-۷۴ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



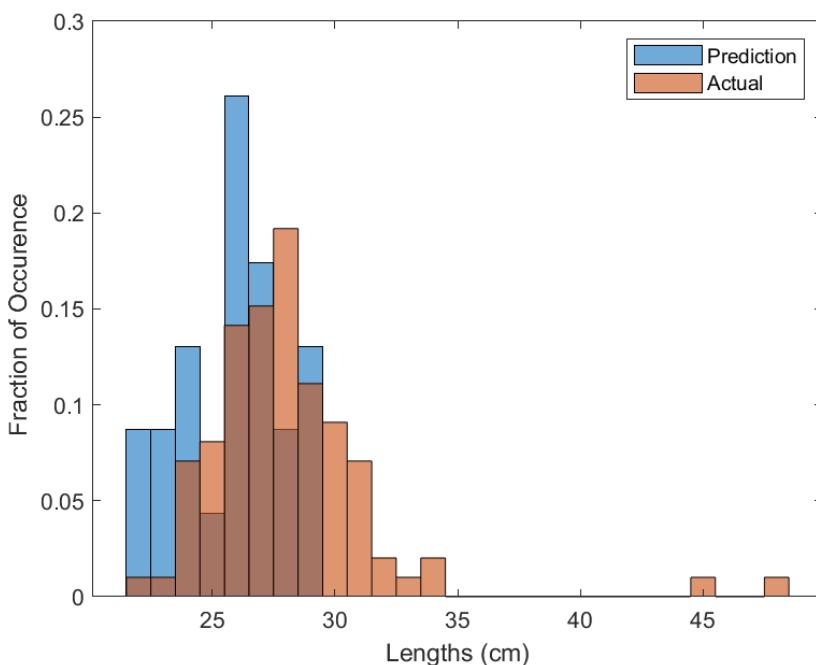
شکل ۴-۷۵ هیستوگرام زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



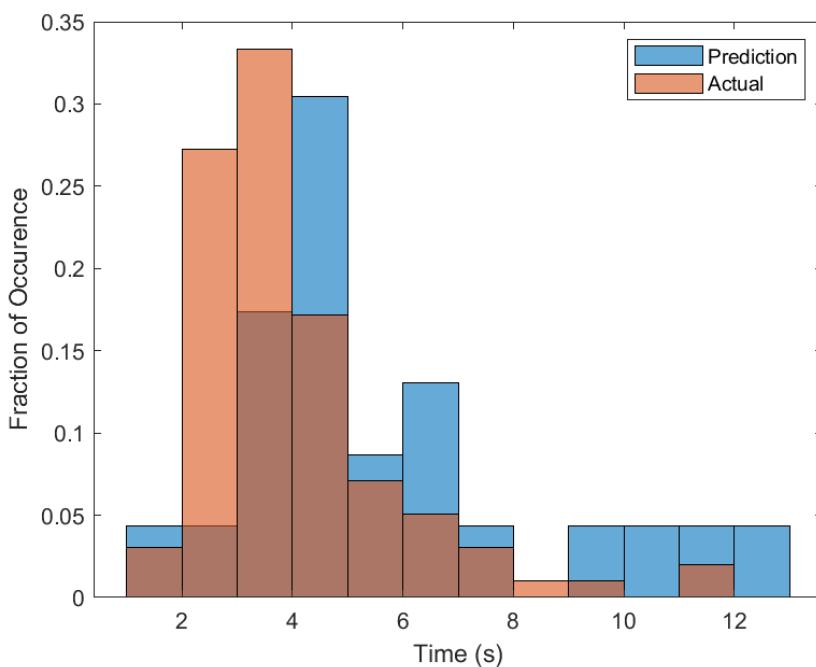
شکل ۴-۷۶ هیستوگرام مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین برای داده‌های تجربی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه فازی (ذره استال کوچک در بستر ماسه ریز و با سرعت افزوده ۰،۲۵ متر بر ثانیه)



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 افروده ۲۵، ۰ 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 افروده ۲۵، ۰ متر بر ثانیه)

۴-۹ اعتبارسنجی مدل‌ها

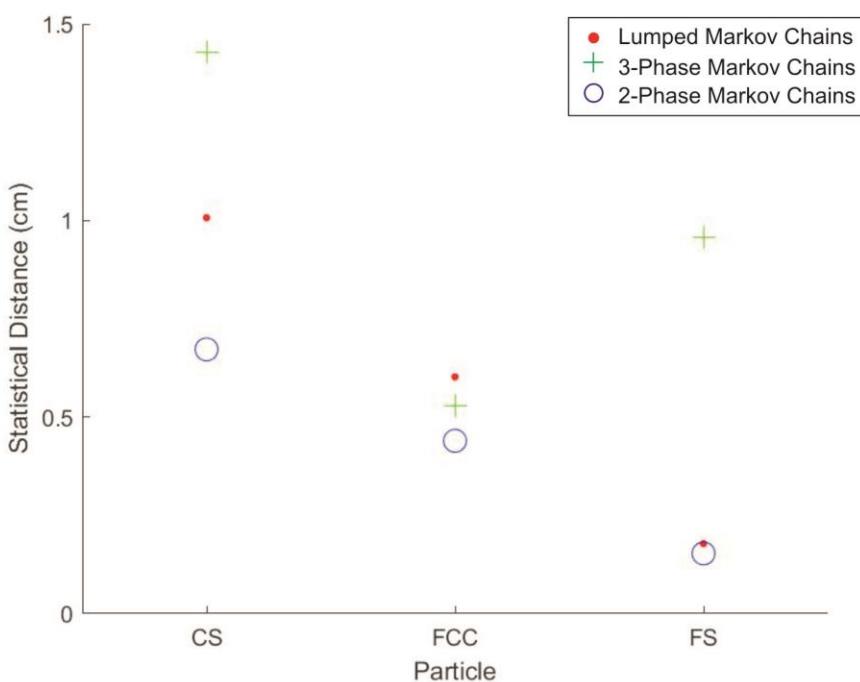
با توجه به ذات آماری روش‌های زنجیره‌های مارکوف مورد استفاده برای مدل‌سازی، از پارامتر فاصله آماری برای مقایسه و بررسی مدل‌سازی‌ها استفاده شده است. در تئوری احتمال، فاصله آماری^۱ به اختلاف میان دو توزیع آماری اطلاق می‌شود و بر طبق آن، دو توزیع X و Y بر روی یک دامنه محدود D ، اختلاف آماری $(\Delta(X, Y))$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

$$\Delta(X, Y) = \frac{1}{q} \sum_{a \in D} |Pr[X = a] - Pr[Y = a]| \quad (4-5)$$

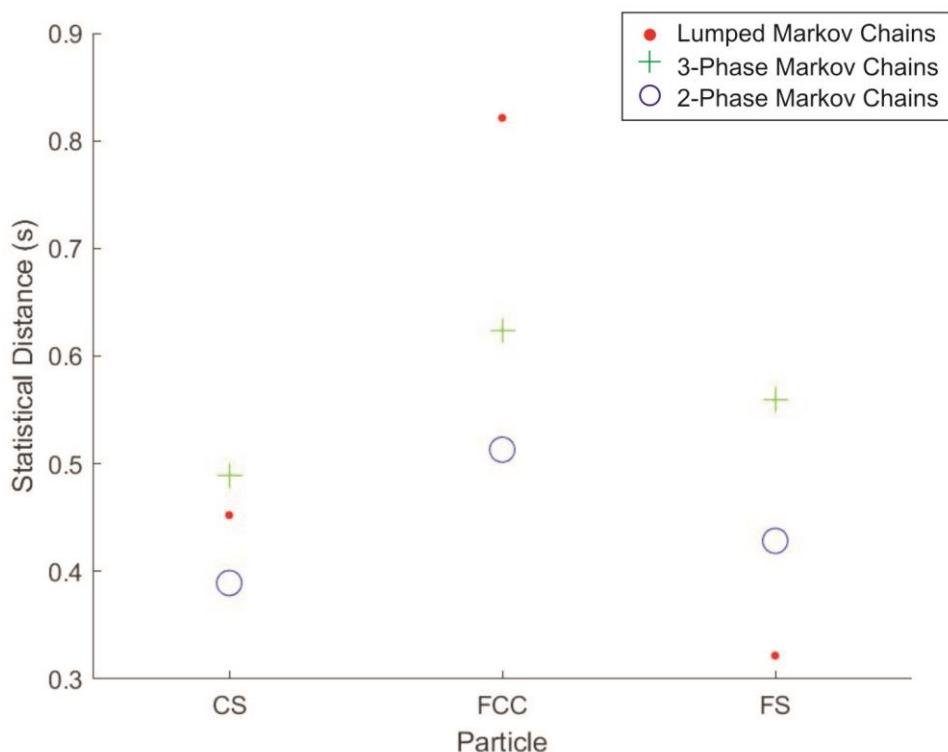
۴-۹-۱ مقایسه نتایج

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 ۷۵،^۰ 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 ۲۵،^۰ متر بر ثانیه در نمودارهای ۴-۸۰ تا ۴-۸۷ آمده است.

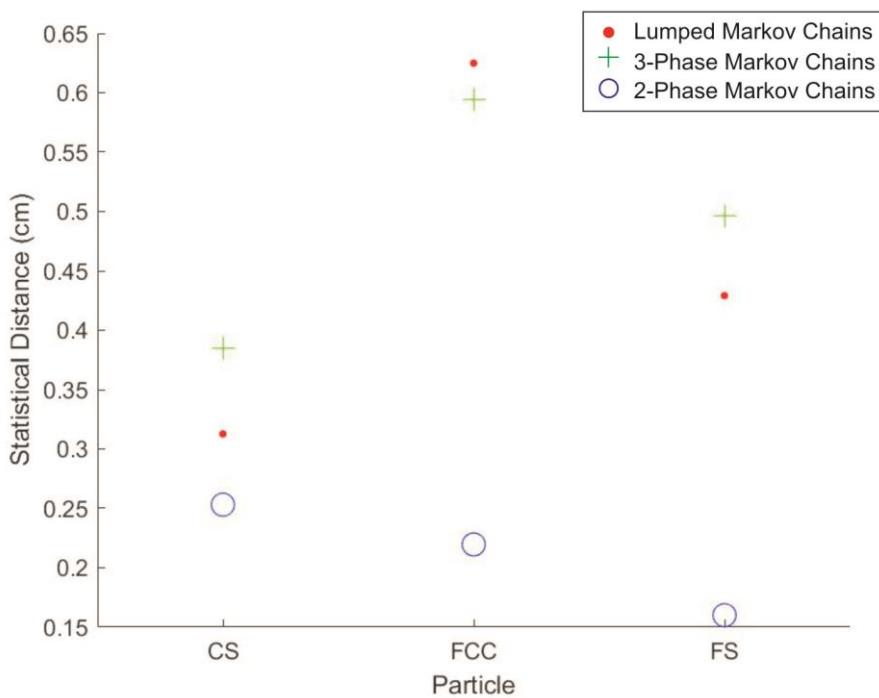
^۱Statistical Distance



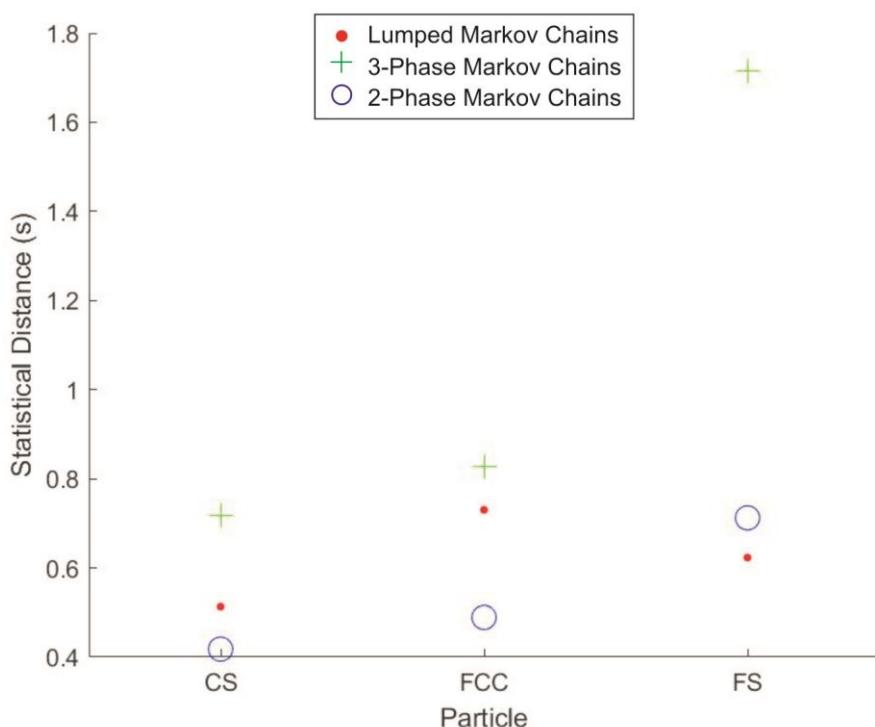
شکل ۴-۸۰ مقایسه فاصله آماری برای توزیع مسافت جابجایی‌های مقید به سمت پایین (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۲۵،۰ متر بر ثانیه)



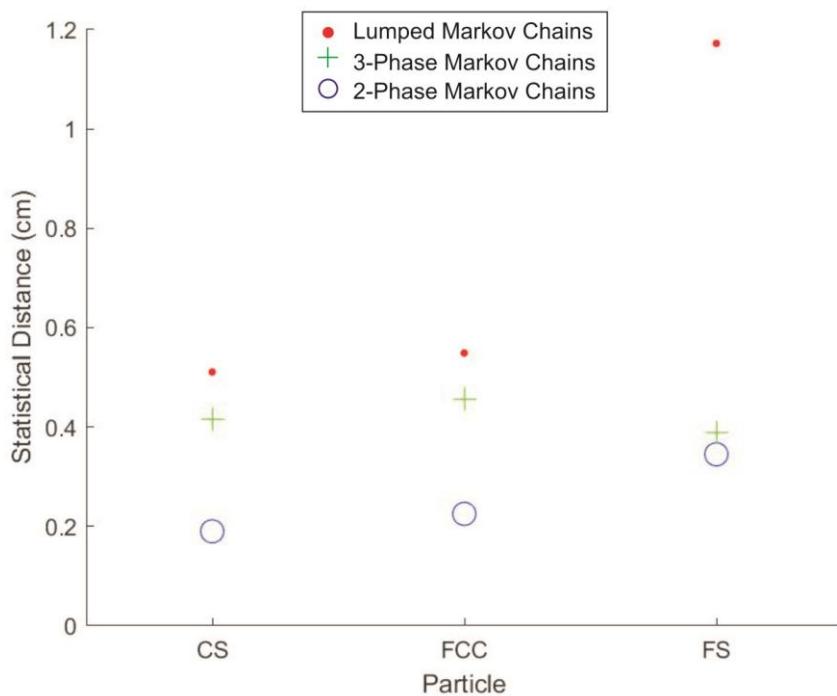
شکل ۴-۸۱ مقایسه فاصله آماری برای توزیع زمان جابجایی‌های مقید به سمت پایین (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۲۵،۰ متر بر ثانیه)



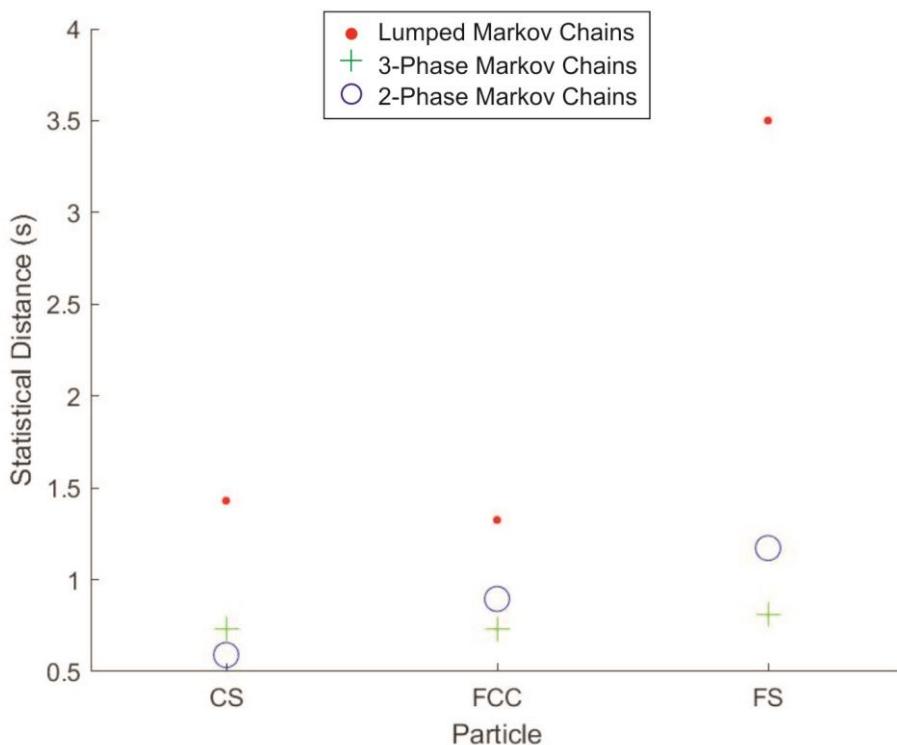
شکل ۴-۸۲ مقایسه فاصله آماری برای توزیع مسافت جابجایی‌های مقید به سمت بالا (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



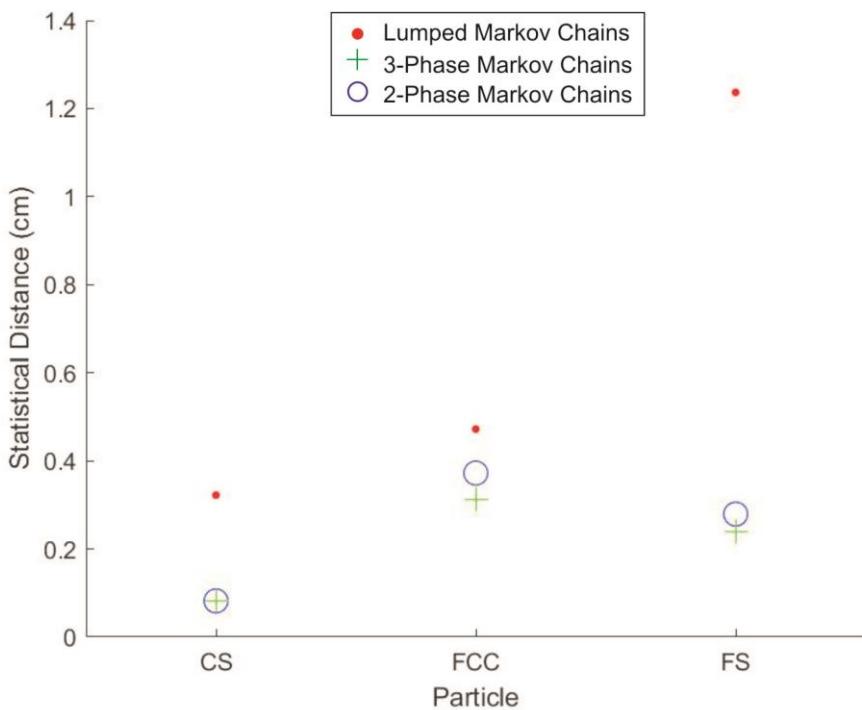
شکل ۴-۸۳ مقایسه فاصله آماری برای توزیع زمان جابجایی‌های مقید به سمت بالا (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



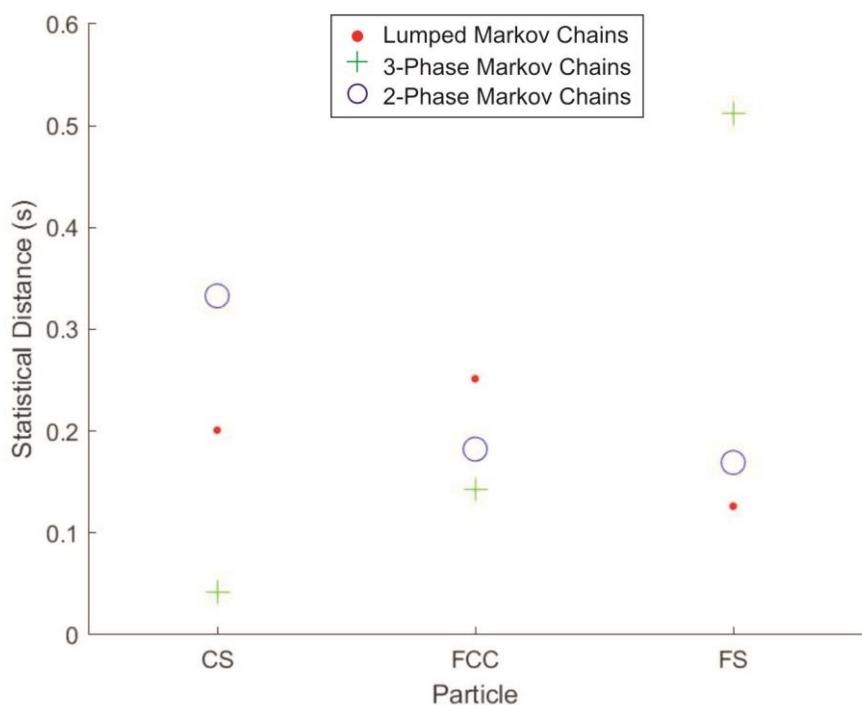
شکل ۴-۸۴ مقایسه آماری فاصله برای توزیع مسافت جابجایی‌های نامقید به سمت پایین (ذره استال کوچک با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه)



شکل ۴-۸۵ مقایسه آماری فاصله 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 دقต 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 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 می‌باشد، 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 می‌باشد، قابل مشاهده است که در جابجایی‌های به سمت پایین، بجز حالت مدل دوفازی برای بستر ماسه درشت، باقی مدل‌ها از دقتهای خوبی برخوردار نیستند. اما در رابطه با جابجایی‌های به سمت بالا، همه مدل‌ها از دقتهای خوبی در تخمین نتایج برخوردارند اما مدل سه فازی در دو حالت بستر ماسه درشت و همچنین کاتالیست FCC از بیشترین دقتهای برخوردار است.

به طور کلی همانطور که مشاهده می شود، با توجه به نمودارهای ۴-۸۰ تا ۴-۸۷، مدل‌های سه فازی و یکپارچه برای تخمین مسافت و زمان جابجایی‌های مقید از دقت نسبتاً یکسانی برخوردادند 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 ۰ شخص و مناسب مرز میان فازها نسبت به مدل سه فازی می‌باشد. البته در رابطه با تخمین مسافت و زمان جابجایی‌های نامقید، مدل یکپارچه دقت بسیار پایینی دارد و مدل‌های دو فازی و سه فازی از خطای بسیار کمتری برخوردارند. این نتیجه مربوط به ذات پیچیدگی‌های مرتبط با جابجایی‌های نامقید و همچنین تعریف گستره آن‌ها می‌شود که مدل یکپارچه از تخمین آن‌ها باز می‌ماند.

NEW SECTION

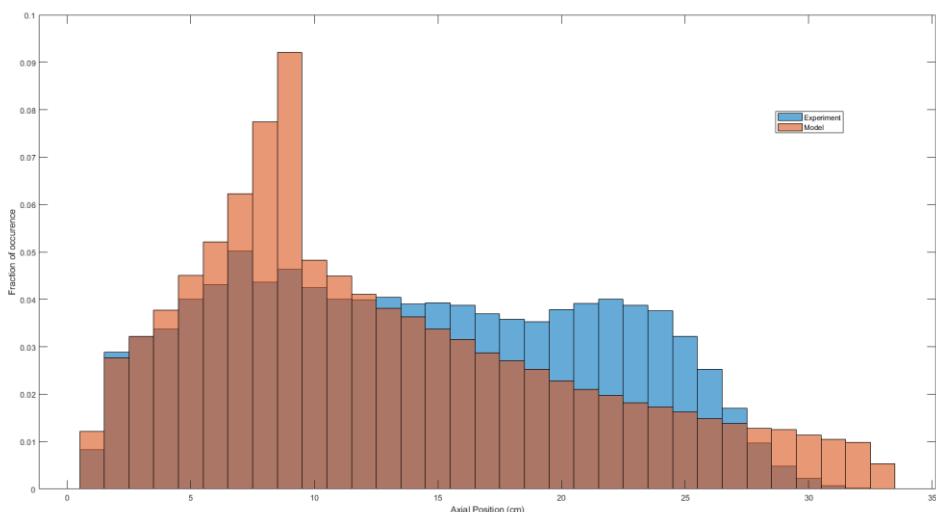
۴-۱۰ بررسی توزیع طولی حضور ذرات در بستر

برای بررسی عملکرد مدل‌های مختلف گسترش داده شده در پیش‌بینی توزیع طولی حضور ذرات در قسمت‌های مختلف بستر، نمودار توزیع فرکانس آن در مقایسه با منحنی مربوط به توزیع داده‌های آزمایشی رسم شده و مورد مطالعه قرار گرفت. شکل‌های ۴-۸۸ تا ۴-۹۶، مربوط به ذره استال کوچک و با سرعت افزوده ۰,۲۵ متر بر ثانیه می‌باشد در بسترهای متفاوت و مدل‌های مختلف بررسی شده می‌باشد. همانطور که از نمودارهای بر می‌آید، در مدل سازی‌های مربوط به بستر ما سه درشت، مدل زنجیرهای مارکوف یکپارچه، یک قله ناشی از اجتماع ذرات در ۱۰ سانتی‌متر پایینی بستر پیش‌بینی می‌کند که در داده‌های مربوط به آزمایشات مشابه آن دیده نمی‌شود.. در ضمن پس از این قله و در تناظر با داده‌های آزمایشات، فرکانس حضور ذره رو به کاهش است و پیش‌بینی می‌شود که ذره، به سلول‌های بالاتری از بستر برسد. مدل زنجیرهای مارکوف دو فازی نیز وجود یک قله با خاطر تجمع ذرات را پیش‌بینی می‌کند اما در نقطه پایین‌تری نسبت به مدل زنجیرهای مارکوف یکپارچه و همچنین در صورت حرکت در راستای طولی بستر، تطابق بیشتری را با داده‌های آزمایشی مشاهده می‌کنیم. مدل زنجیرهای مارکوف سه‌فازی نیز قله ابتدایی را پیش‌بینی می‌کند اما در اندازه بسیار کوچکتری نسبت به دو مدل دیگر و همچنین در صورت حرکت در راستای طولی بستر، تطابق بسیار بالایی را میان داده‌های مدل و آزمایشات مشاهده می‌کنیم.

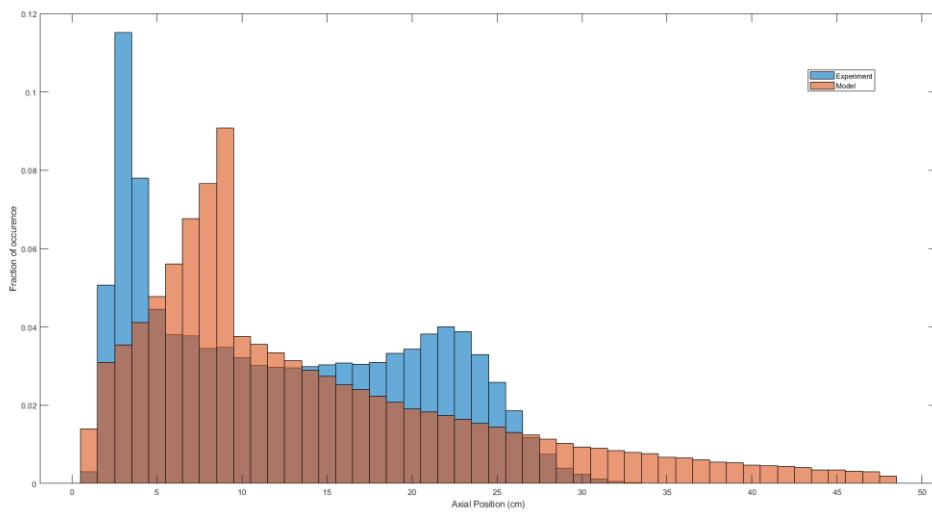
در مدل سازی‌های مربوط به بستر کاتالیست FCC، در داده‌های آزمایشی دو قله مشاهده می‌شود که قله‌ای که در نقطه پایین‌تری از بستر رخ می‌دهد، به دلیل وجود جت‌های ورودی جریان گاز است. قله

بالاتر که ارتفاع پایین‌تری نیز دارد، نشان‌دهنده ارتفاع موثر بستر سیال می‌باشد. مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه، تواناتی تشخص قله دوم را ندارد و قله اول را نیز با اختلاف ۵ سانتی‌متری پیش‌بینی می‌کند و علاوه بر این موارد، الگوی فرکانس حضور ذره در راستای طولی را نیز نمی‌تواند به درستی پیش‌بینی کند. مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی، محل قله اول را به درستی اما غلطت آن را بیشتر از میزان واقعی پیش‌بینی می‌کند. همچنین از شناسایی قله دوم باز می‌ماند. این مدل می‌تواند الگوی فرکانس ذره را به درستی پیش‌بینی کند اما میزان آن را خیر. اما مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی، هر دو قله را به درستی پیش‌بینی می‌کند و الگوی فرکانس حضور طولی ارائه شده توسط این مدل نیز تطابق بسیار بالایی با داده‌های آزمایشی دارد.

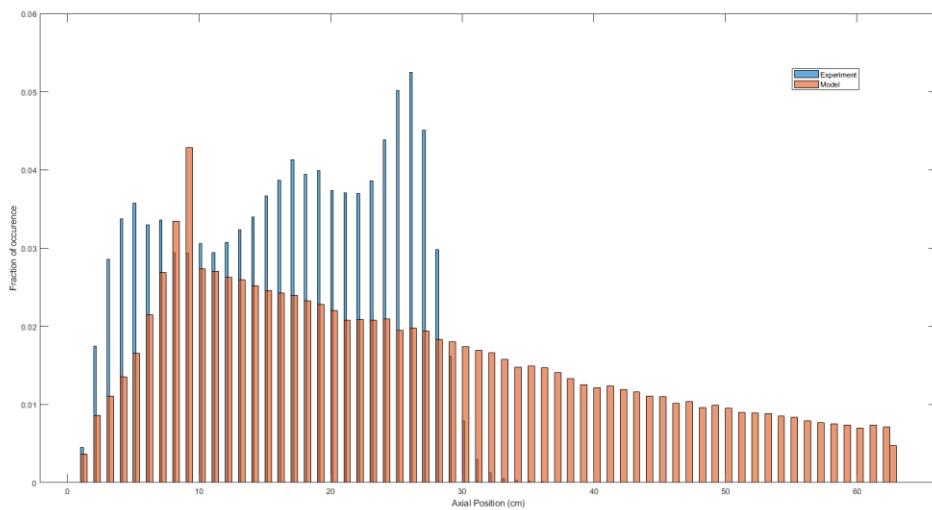
در مدل‌سازی‌های مربوط به بستر ماسه ریز، در داده‌های آزمایشی، یک قله در بالای بستر مشاهده می‌شود و توزیع آن از توزیع‌های دیگر بسترها متفاوت است. مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه همچنان از خطای بسیار بالایی برخوردار است. مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی، می‌تواند الگو و توزیع فرکانس را به درستی پیش‌بینی کند اما قله مورد نظر را در ابتدای بستر پیش‌بینی می‌کند و نه در بالای بستر. مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی در این حالت دقت کمتری نسبت به مدل زنجیره‌های مارکوف دوفازی دارد.



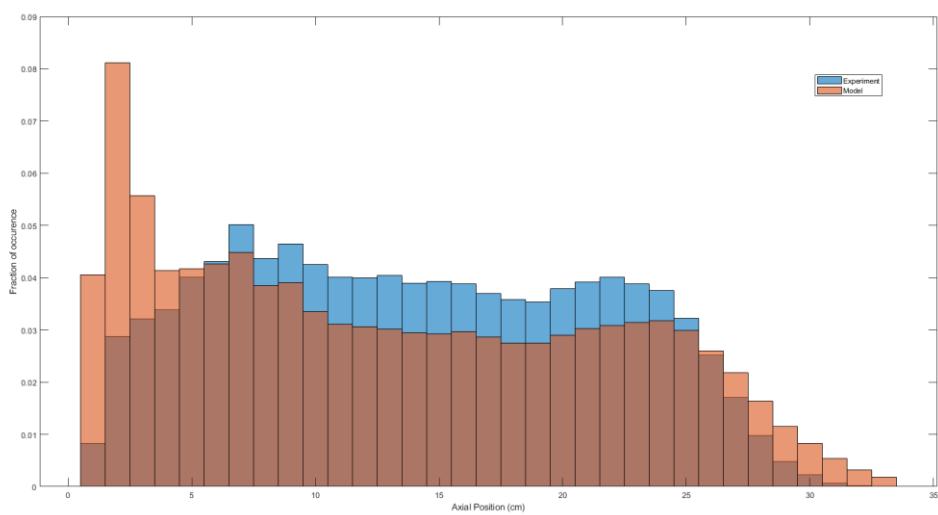
شکل ۴-۸۸ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه درشت و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه)



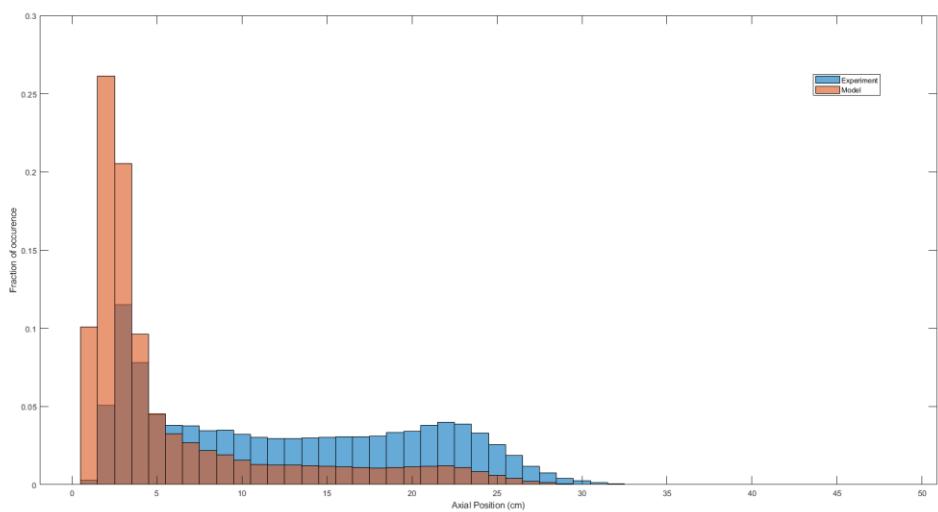
شکل ۴-۸۹ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر کاتالیست FCC و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه)



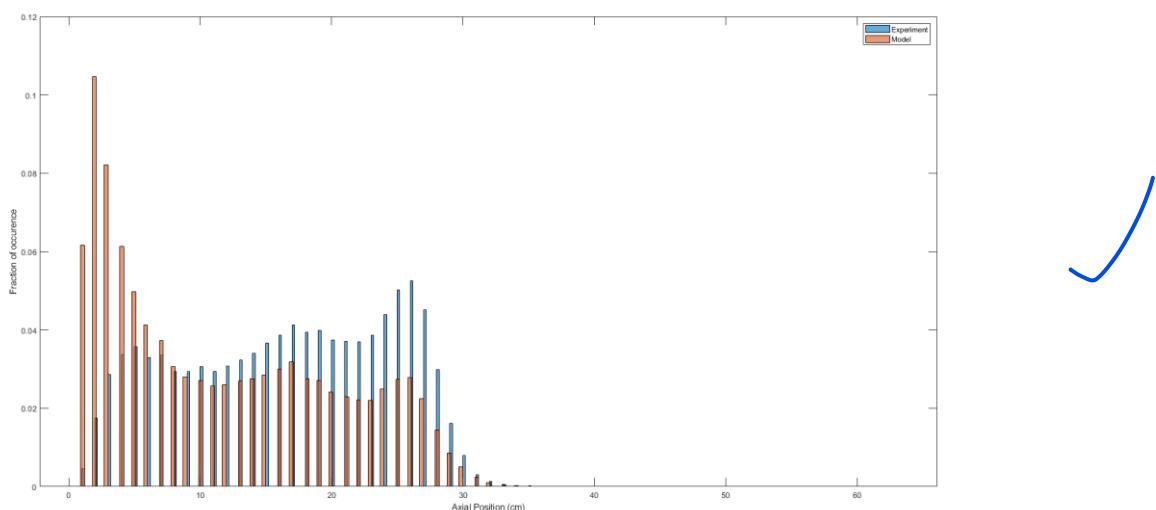
شکل ۴-۹۰ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه ریز و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه)



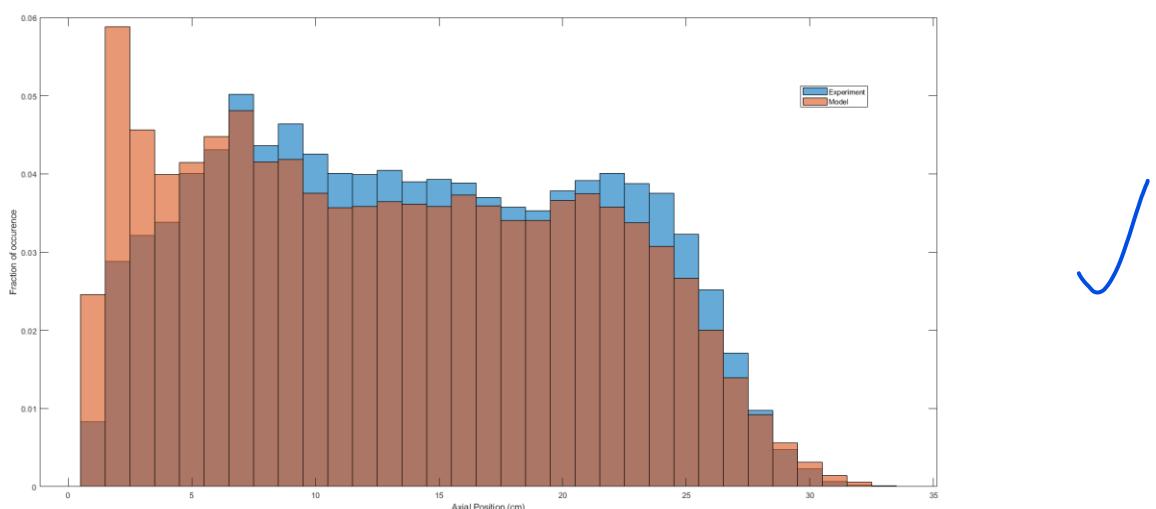
شکل ۴-۹۱ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه درشت و مدل زنجیرهای مارکوف دوفازی)



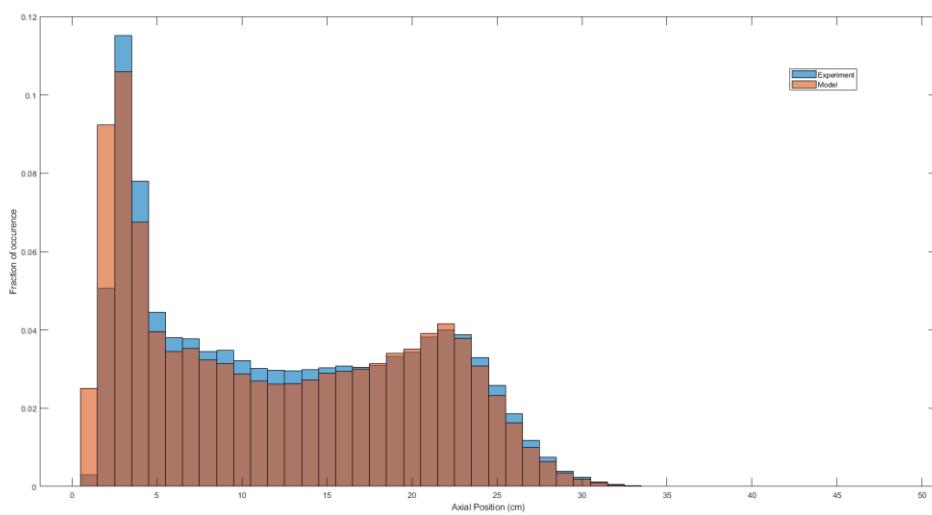
شکل ۴-۹۲ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر کاتالیست FCC و مدل زنجیرهای مارکوف دوفازی)



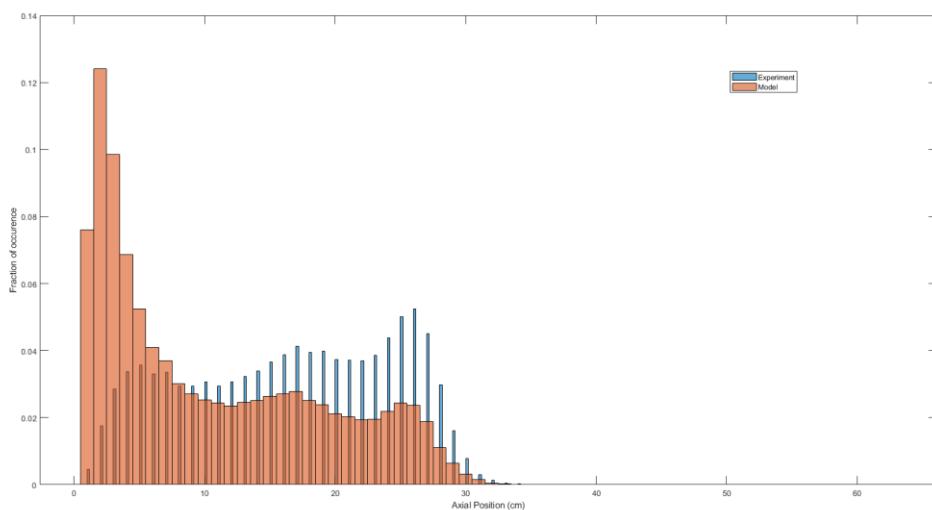
شکل ۴-۹۳ توزیع فرکانس حضور ذره در راستای طولی بستر (بستر ماسه ریز و مدل زنجیره‌های مارکوف دو fazی)



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



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 نتیجه‌گیری

بسترهاي سيال گاز-جامد به دليل کاربرد زيادي که در صنعت دارند، مورد توجه بسياري از محققين قرار گرفته‌اند و تلاش‌هاي تئوري و تجربى زيادي برای پيش‌بياني رفتار آن‌ها صورت گرفته است. بسترهاي سيال دوچرئي به طور خاص، رفتارهاي منحصر بفرد را از خود نشان مي‌دهند که نيازمند بررسی‌هاي بيشتری برای انجام مدل‌سازی است.

به عنوان هدف اصلی اين پژوهش سعی کردیم تا با استفاده از ابزارهای آماری، محاسباتی و پردازش کامپیوتري، رفتار حرکت ذرات درشت را در بسترهاي سيال حبابي مدل و مطالعه نمايم. برای اين منظور به استفاده از روش‌هاي آماري زنجيره‌هاي مارکوف و همچنین ارتباط دادن آن با روابط موجود برای بسترهاي سيال حبابي، به مدل‌سازی رفتار اين ذرات در بسترها و مقایسه آن‌ها پرداخته‌ایم.

مدل‌سازی‌هاي اين پژوهش با استفاده از نسخه **2018b** نرم‌افزار **MATLAB** در بخش تحليل داده‌ها، محاسبه پaramترها، مدل‌سازی و مقایسه نتایج صورت گرفته است. هدف از انجام مدل‌سازی‌هاي انجام شده، برر سی تواناني پيش‌بياني رفتار حرکت ذرات در شت در بسترهاي سيال حبابي و دوچرئي بوده است. برای اعتبار سنجي نتایج، از مقایسه توزيع زمان ماند حرکت‌هاي جابجايی استفاده شده است. همچنین سه مدل مختلف از روش‌هاي زنجيره‌هاي مارکوف مورد استفاده و با استفاده از فاصله آماري ميان توزيع‌هاي داده‌هاي نتایج، مورد مقایسه با يكديگر قرار گرفتند.

به طور کلي، مدل‌هاي سه فازی و يکپارچه برای تخمين مسافت و زمان جابجايی‌هاي مقيد از دقت نسبتا يكسانی برخوردارند و در اين موارد، مدل دو فازی از دقت بسيار بالاتری برخوردار است. دليل اين مهم مربوط به دخيل شدن پaramتر تغيير فاز نسبت به مدل يکپارچه و همچنین تعريف م شخص و مناسب مرز ميان فازها نسبت به مدل سه فازی مي‌باشد. البته در رابطه با تخمين مسافت و زمان جابجايی‌هاي نامقييد، مدل يکپارچه دقت بسيار پايانی دارد و مدل‌هاي دوفازی و سه فازی از خطاي بسيار كمتری برخوردارند. اين نتيجه مربوط به ذات پيچيدگي‌هاي مرتبط با جابجايی‌هاي نامقييد و همچنین تعريف گستره آن‌ها مي‌شود که مدل يکپارچه از تخمين آن‌ها باز مي‌ماند.

۱۲-۴ محدوديت‌ها

پژوهش حاضر شامل محدوديت‌هايی از جمله عدم تواناني برای بررسی نیروهای برهمکنش ميان ذرات درشت به دليل ذات رديابي‌هاي **RPT** و همچنین عدم وجود رابطه‌اي برای مجاسبه پaramتر انتقال

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

۴-۱۳ پیشنهادها و موضوعات آتی

محاسبه و مقایسه فاصله آماری برای ذرات در شت مختلف و مطالعه تاثیر فاکتورهای مختلف بر میزان دقیق مدل زنجیره‌های مارکوف در پیش‌بینی توزیع ذرات در شت در بسترهای 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 در شت 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 در شت در بسترهای سیال پرداخت.

مراجع

- [۱] International Energy Agency, "World Energy Investment ۲۰۲۳," IEA, .۲۰۲۳
- [۲] B. Wahlund, J. Yan and M. Westermark, "Comparisons of CO₂-Reducing Alternatives for Heat and Power Generation: CO₂-Capture and Fuel Shift to Biomass," در *Proceedings of the ۵th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies* .۲۰۰۰ ،
- [۳] A. Bhattacharya, A. Datta, "Effects of supplementary biomass firing on the performance of combined cycle power generation: A Comparison between NGCC and IGCC plants," *Biomass and Bioenergy*, ، ۵۴ شماره ۲۳۹-۲۴۹، .۲۰۱۳
- [۴] 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," ۲ در *world conference and technology exhibition on biomass for Energy, Industry and Climate Protection* .۲۰۰۴ ،
- [۵] Ehnberg J., Y. Liu and M. Grahn, Systems Perspectives on Renewable Power, Chalmers University of Technology, .۲۰۱۴
- [۶] A. Gomez-Barea, and B. Leckner, "Modeling of Biomass gasification in Fluidized bed," *Progress in Energy and Combustion Science*, ، ۳۶ شماره ۴۴۴-۵۰۹، .۲۰۱۱
- [۷] J. Koornneef, M. Junginger, A. Faaij, "Development of Fluidized Bed Combustion - An Overview of Trends, Performance and Cost," *Progress in Energy and Combustion Science*, ، ۳۶ شماره ۴۴۴-۵۰۹، .۲۰۰۷
- [۸] John R. Grace, Xiaotao Bi, and Naoko Ellis, *Essentials of Fluidization Technology*, Wiley-VCH, .۲۰۲۱
- [۹] D. Geldart, "Types of Gas Fluidization," *Powder Technology*, ، ۵ شماره ۷ جلد ۲۸۵-۲۹۲، .۱۹۷۳
- [۱۰] Farzam Fotovat, Jamal Chaouki, "Characterization of the upward motion of an object immersed in a bubbling fluidized bed of fine particles," *Chemical Engineering Journal*, ، ۲۸۰ جلد ۲۶-۳۵، .۲۰۱۵

- [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 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*, ٣٠٥, جلد ٢٠٢١, .٢٠٢١
- [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*, ٧٨, جلد ٢٠٠٠, .٢٠٠٠
- [١٦] O. Levenspiel, T. J. Fitzgerald, "A Warning on the misuse of the Dispersion Model," *Chemical Engineering Science*, ٣٨, جلد ٤٩١-٤٨٩, شماره ١٩٨٣
- [١٧] F. Larachi, J. Chaouki, G. Kennedy, "3-D mapping of solids flow fields in multiphase reactors with RPT," *AICHE*, ٤١, شماره ٢, جلد ٤٤٣-٤٣٩, .١٩٩٥
- [١٨] R. K. Upadhyay & S. Roy, "Investigation of hydrodynamics of binary fluidized beds via radioactive particle tracking and dual-densiometry," *Canadian Journal of Chemical Engineering*, ٤, شماره ٨٨, جلد ٦١٠-٦٠١, .٢٠١٠
- [١٩] H. G. Dehling, A. C. Hoffmann, and H. W. Stuut, "Stochastic Models for Transport in a Fluidized Bed," *Journal of Applied Mathematics*, ١, شماره ٦٠, جلد 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 ١٢٥-١١٨, .٢٠٠٧
- [٢١] Timo Gottschalk, Herold G. Dehling, and Alex Hoffmann, "Multiphase Stochastic Model for Fluidized Beds," *Physical Review E*, ٧٧, جلد ٢٠٠٨
- [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 ٢٨٠-٢٧٤, .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 ٥٣٠٠-٥٢٩١, .٢٠٠٠

- [۲۵] C.Crowe, M. Sommerfield, and Y. Tsuji, Multiphase Flows with Droplets and Particles, CRC Press, ۱۹۹۸
- [۲۶] R. D. Felice, “The Voidage Function for Fluid-Particle Interaction Systems,” *International Journal of Multiphase Flow*, ۵۰ جلد ۱۵۳-۱۵۹, ۱۹۹۴
- [۲۷] J. Leboreiro, 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*, ۱۸۴ جلد pp. ۲۷۵-۲۹۰, ۲۰۰۸
- [۲۸] O. Goldreich, Foundations of Cryptography: Basic Tools, Cambridge University Press, ۲۰۰۱
- [۲۹] I.N.S. Winaya, T. Shimizu, and D. Yamada, “A New Method to evaluate horizontal solid dispersion in a bubbling fluidized bed,” *Powder Technology*, ۱۷۸، شماره ۱، جلد ۱۷۸، pp. ۱۷۳-۱۷۸, ۲۰۰۷

ضمیمه

جدول ۴-۱ تعداد جابجایی‌های محصور در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه

| رده‌یار | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | تعداد مسیرهای مسیرهای محصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی آزمایش | تعداد مسیرهای مسیرهای محصور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی آزمایش | تعداد مسیرهای مسیرهای محصور به سمت پایین در داده‌های آزمایش | تعداد مسیرهای مسیرهای محصور به سمت پایین در داده‌های آزمایش |
|---------|-------------|-----------|--------------------------------------|--|---|---|---|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۳۱۵ | ۵۷ | ۱۵۷ | ۲۳ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۳۴۳ | ۲۱۰ | ۱۵۵ | ۱۳۰ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۸۹۱ | ۱۹۴۷ | ۵۸۵ | ۱۸۸۲ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۱۱۷۱ | ۲۲۳۹ | ۷۲۲ | ۲۱۷۰ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۱۱۷۰ | ۲۳۹۸ | ۷۳۰ | ۲۳۶۰ |
| ۶ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۵ | ۱۰۵۵ | ۱۹۹۷ | ۷۰۸ | ۱۹۶۰ |
| ۷ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۵ | ۷۰۳ | ۱۷۶۶ | ۵۰۱ | ۱۸۲۲ |
| ۸ | HDPE | FCC | ۰,۲۵ | ۸۳۰ | ۲۸۰ | ۳۶۰ | ۱۸۶ |
| ۹ | استال کوچک | FCC | ۰,۲۵ | ۴۷۹ | ۱۱۱ | ۲۴۲ | ۷۸ |
| ۱۰ | استال متوسط | FCC | ۰,۵ | ۷۳۱ | ۴۰۸ | ۴۲۰ | ۳۱۹ |
| ۱۱ | استال کوچک | FCC | ۰,۵ | ۸۶۸ | ۱۰۲۶ | ۴۷۰ | ۸۶۴ |
| ۱۲ | استال کوچک | ماسه ریز | ۰,۲۵ | ۴۷۸ | ۲۹۸ | ۱۹۶ | ۱۵۷ |

جدول ۴-۲ تعداد جابجایی‌های نامحصور در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف یکپارچه

| رده‌یار | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | تعداد مسیرهای مسیرهای نامحصور |
|---------|----------|----------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | | | | | | |

| نامحصور به سمت بالا در نتیجه مدل سازی | نامحصور به سمت بالا در داده های آزمایش | نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل سازی | نامحصور به سمت پایین در داده های 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 ۴ - ۳ 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 پایین در داده های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی های محصور به سمت پایین در نتیجه مدل سازی (ثانیه مریع) | میانگین زمان جابجایی های محصور به سمت پایین در داده های آزمایش (ثانیه مریع) | واریانس زمان جابجایی های محصور به سمت پایین در نتیجه مدل سازی (ثانیه مریع) |
|------|----------|----------|--------------------------------------|--|--|---|--|
| ۱ | | | | ۰,۲۵ | ۰,۱۹۰۲ | ۰,۳۴۶۲ | |

| | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|------|-----------|-------------|----|
| 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 جابجایی‌های محصور 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 محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های محصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های محصور به سمت بالا در نتیجه آزمایش (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت بالا در نتیجه آزمایش (ثانیه مریع) |
|------|-------------|-----------|--------------------------------------|---|--|--|---|
| ۱ | | | | | | | |
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱,۱۳۸۰ | ۲,۱۳۵۴ | ۰,۱۴۸۵ | ۰,۳۰۲۵ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱,۰۵۷۶ | ۲,۲۴۳۳ | ۸,۳۳۹۲ | ۰,۲۸۵۷ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۷۷۴ | ۱,۸۰۷۱ | ۰,۱۰۴۸ | ۰,۲۷۱۸ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۶۹۹ | ۱,۶۶۱۳ | ۰,۱۴۲۸ | ۰,۱۷۱۵ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۰۵۹ | ۱,۶۷۱۸ | ۰,۰۹۳۴ | 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 | ۲,۰۸۴۵ | 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 | سیال‌سازی | سمت پایین در داده‌های نتیجه مدل- سازی (ثانیه مریع) | سمت پایین در داده‌های نتیجه آزمایش (ثانیه (مریع)) | میانگین زمان نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل- سازی (ثانیه مریع) | واریانس زمان نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل- سازی (ثانیه مریع) |
|------|-------------|-----------|-----------|--|---|--|--|
| 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 | ۳,۱۳۴۳ | 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 | ۴,۰۵۰۶ | 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 جابجایی های نامحصور به سمت بالا 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 نامحصور به سمت بالا در داده های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی های نامحصور به سمت بالا در داده های آزمایش (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی های نامحصور به سمت بالا در داده های آزمایش (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی های نامحصور به سمت بالا در داده های آزمایش (ثانیه) |
|------|-------------|-----------|--------------------------------------|---|---|---|---|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۳,۸۲۲۰ | ۴,۰۱۴۷ | ۳,۵۹۴۷ | ۲,۳۸۷۲ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۵,۸۹۸۷ | ۴,۱۱۰۶ | ۱۹,۳۳۹۸ | ۲,۶۲۱۶ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۴۵۴۸ | ۲,۶۸۸۳ | ۱,۱۳۰۰ | ۰,۵۱۰۳ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۱۴۱۰ | ۲,۵۶۸۸ | ۰,۵۴۳۳ | ۰,۵۲۸۰ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۱۷۰۴ | ۲,۵۴۰۹ | ۰,۶۹۳۱ | ۰,۵۱۲۳ |
| ۶ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۰۵۱۴ | ۲,۶۶۴۹ | ۱,۰۹۷۹ | ۰,۵۵۴۹ |
| ۷ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۵ | ۲,۱۸۹۰ | ۲,۶۴۸۲ | ۰,۶۷۴۵ | ۰,۵۳۳۰ |
| ۸ | HDPE | FCC | ۰,۲۵ | ۳,۸۱۳۳ | ۳,۲۰۴۰ | ۵,۱۰۰۶ | ۱,۰۱۰۷ |
| ۹ | استال کوچک | FCC | ۰,۲۵ | ۳,۶۷۲۶ | ۳,۵۳۲۰ | ۳,۶۰۶۴ | ۱,۰۵۶۳۳ |
| ۱۰ | استال متوسط | FCC | ۰,۵ | ۲,۸۱۱۹ | ۲,۹۶۰۷ | ۰,۹۱۳۸ | ۰,۷۶۹۹ |
| ۱۱ | استال کوچک | FCC | ۰,۵ | ۲,۷۱۱۴ | ۳,۰۳۷۵ | ۱,۲۶۹۹ | ۰,۷۳۳۸ |
| ۱۲ | استال کوچک | ماسه ریز | ۰,۲۵ | ۴,۰۰۹۳ | ۴,۳۰۹۰ | ۳,۲۶۱۸ | ۲,۲۲۸۶ |

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

| رده‌بندی | ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | سرعت افزوده | تعداد مسیرهای نامحصور | تعداد مسیرهای محصور | تعداد مسیرهای نامحصور | تعداد مسیرهای محصور | تعداد مسیرهای نامحصور | تعداد مسیرهای |
|-------------|------|-----------|-----------|--------------------------|-------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|--|
| استال کوچک | ۱ | ماسه درشت | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۰,۲۵ | ۸۰ | ۲۳ | ۵۷ | ۱۳۰ | سمت بالا در داده‌های آزمایش | مسیرهای محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش |
| استال بزرگ | ۲ | ماسه درشت | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۰,۲۵ | ۹۴ | ۱۳۰ | ۲۱۰ | ۱۶۶ | سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی | مسیرهای محصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی |
| استال متوسط | ۳ | ماسه درشت | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۵ | ۱۸۸۲ | ۷۷۳ | ۱۹۴۷ | ۱۱۲۳ | سمت بالا در داده‌های آزمایش | مسیرهای محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش |
| PTFE | ۴ | ماسه درشت | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۵ | ۲۱۷۰ | ۸۵۰ | ۲۲۳۹ | ۱۲۶۲ | سمت بالا در داده‌های آزمایش | مسیرهای محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش |
| HDPE | ۵ | ماسه درشت | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۵ | ۲۳۶۰ | ۸۱۵ | ۲۳۹۸ | ۱۱۸۵ | سمت بالا در داده‌های آزمایش | مسیرهای محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش |
| استال کوچک | ۶ | ماسه درشت | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۵ | ۱۹۶۰ | ۸۵۳ | ۱۹۹۷ | ۱۲۱۷ | سمت بالا در داده‌های آزمایش | مسیرهای محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش |
| استال بزرگ | ۷ | ماسه درشت | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۵ | ۱۸۲۲ | ۷۲۳ | ۱۷۶۶ | ۹۷۴ | سمت بالا در داده‌های آزمایش | مسیرهای محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش |
| HDPE | ۸ | FCC | FCC | ۰,۲۵ | ۰,۲۵ | ۱۸۶ | ۲۲۰ | ۲۸۰ | ۳۶۷ | سمت بالا در داده‌های آزمایش | مسیرهای محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش |
| استال کوچک | ۹ | FCC | FCC | ۰.۲۵ | ۰.۲۵ | ۷۸ | ۱۰ | ۱۱۱ | ۲۳ | سمت بالا در داده‌های آزمایش | مسیرهای محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش |
| استال متوسط | ۱۰ | FCC | FCC | ۰,۵ | ۰,۵ | ۳۱۹ | ۳۱۰ | ۴۰۸ | ۵۱۴ | سمت بالا در داده‌های آزمایش | مسیرهای محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش |
| استال کوچک | ۱۱ | FCC | FCC | ۰,۵ | ۰,۵ | ۸۶۴ | ۵۶۶ | ۱۰۲۶ | ۸۵۶ | سمت بالا در داده‌های آزمایش | مسیرهای محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش |
| استال کوچک | ۱۲ | ماسه ریز | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۰,۲۵ | ۱۰۷ | ۱۹ | ۲۹۸ | ۲۴ | سمت بالا در داده‌های آزمایش | مسیرهای محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش |

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

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

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|------|-----------|-------------|----|
| 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 جابجایی‌های محصور 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 محصور به سمت پایین در داده‌های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های محصور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های محصور به سمت پایین در نتیجه آزمایش (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی (ثانیه مرربع) |
|------|-------------|-----------|--------------------------------------|--|---|---|---|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱,۴۸۶۸ | ۲,۸۰۳۰ | ۰,۱۹۰۲ | ۰,۶۹۱۲ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۱,۴۴۰۹ | ۲,۳۸۳۲ | ۰,۵۳۳۵ | ۰,۵۱۲۵ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۸۸۲ | ۱,۵۷۹۸ | ۰,۱۱۴۴ | ۰,۱۷۰۸ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۲۳۰ | ۱,۵۱۸۴ | ۰,۱۸۱۲ | ۰,۲۰۰۷ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | ۰,۵ | ۰,۹۶۸۹ | ۱,۰۵۰۳ | ۰,۱۴۷۸ | ۰,۱۶۶۶ |

| | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|------|-----------|-------------|----|
| 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 | ۰,۰۷۲۴ | ۲,۰۴۸۷ | ۱,۶۳۹۱ | ۰,۲۵ | FCC | HDPE | ۸ |
| ۰,۲۰۶۹ | ۰,۳۹۶۴ | ۲,۰۴۷۸ | ۱,۰۰۱۶ | 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 جابجایی های محصور به سمت بالا 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 بالا در نتیجه 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 مریع) | واریانس زمان جابجایی های محصور به سمت بالا در نتیجه مریع |
|------|----------|----------|--------------------------------------|---|--|---|--|
| ۱ | | | | ۰,۱۳۸۰ | ۰,۲۵ | ۰,۱۴۸۵ | ۰,۶۳۱۹ |
| ۲ | | | | ۱,۰۵۷۶ | ۰,۲۵ | ۲,۴۰۴۰ | ۰,۶۰۱۰ |
| ۳ | | | | ۰,۹۷۷۴ | ۰,۵ | ۱,۵۵۹۸ | ۰,۱۹۴۶ |
| ۴ | | | | ۰,۹۶۹۹ | ۰,۵ | ۱,۴۸۴۸ | ۰,۱۹۴۱ |
| ۵ | | | | ۰,۹۰۵۹ | ۰,۵ | ۱,۵۲۶۴ | ۰,۱۷۵۵ |
| ۶ | | | | ۰,۹۵۰۳ | ۰,۵ | ۱,۵۰۹۴ | ۰,۱۸۷۸ |
| ۷ | | | | ۰,۹۴۳۰ | ۰,۵ | ۱,۵۳۹۷ | ۰,۱۸۶۹ |
| ۸ | | | | ۰,۹۴۷۶ | ۰,۲۵ | ۲,۰۴۳۴ | ۱,۹۶۴۳ |
| ۹ | | | | ۱,۲۰۷۵ | ۰,۲۵ | ۲,۲۸۵۰ | 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 نتیجه مدل‌سازی(ثابت) | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی(ثانیه) | واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل-سازی (ثانیه) | واریانس زمان |
|------|-------------|-----------|-------------------------------------|---|--|---|--------------|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۳,۲۴۸۰ | ۵,۶۹۳۵ | ۰,۸۲۵۱ | ۵,۰۶۰۱ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | ۰,۲۵ | ۶,۱۳۶۵ | ۸,۰۵۲۱۷ | ۲۰,۷۷۴۹ | 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 | سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | سرعت افزوده | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در نتیجه داده‌های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در نتیجه مدل‌سازی(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 | ۱۱,۸۶۷۲ |
| 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 | سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | سرعت افزوده | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در پایین در داده‌های آزمایش مدل‌سازی | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش مدل‌سازی | 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 | ۲۲۹۸ | 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 | ۱۰۷ | ۰,۲۵ | ماسه ریز | استال کوچک | ۱۲ |

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

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

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|------|-----------|-------------|----|
| 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 جابجایی‌های محصور به سمت پایین در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | سرعت افزوده | میانگین زمان جابجایی‌های محصور به سمت پایین در داده‌های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های محصور به سمت پایین در نتیجه مدل‌سازی (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت پایین در نتیجه مدل-سازی (ثانیه مریع) |
|------|----------|----------|--------------------------|-------------|--|---|--|
| ۱ | | | | | | | ۰,۲۴۶۶ |
| ۲ | | | | | | | ۰,۳۵۴۳ |
| ۳ | | | | | | | ۰,۱۱۴۹ |
| ۴ | | | | | | | ۰,۱۱۷۵ |
| ۵ | | | | | | | ۰,۱۲۲۴ |
| ۶ | | | | | | | ۰,۱۰۷۱ |
| ۷ | | | | | | | ۰,۱۶۲۱ |
| ۸ | | | | | | | ۰,۸۸۱۳ |
| ۹ | | | | | | | ۰,۱۵۴۱ |
| ۱۰ | | | | | | | 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 جابجایی‌های محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سرعت افزوده سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی-های محصور به سمت بالا در نتیجه آزمایش (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت بالا در نتیجه مدل-سازی (ثانیه مرربع) | واریانس زمان جابجایی‌های محصور به سمت بالا در داده‌های آزمایش (ثانیه مرربع) |
|------|-------------|-----------|--------------------------------------|---|--|--|---|
| ۱ | استال کوچک | ماسه درشت | | ۱,۱۳۸۰ | ۱,۹۷۰۳ | ۰,۱۴۸۵ | ۰,۲۱۲۲ |
| ۲ | استال بزرگ | ماسه درشت | | ۱,۰۵۷۶ | ۲,۲۳۵۲ | ۸,۳۳۹۲ | ۰,۳۲۹۰ |
| ۳ | استال متوسط | ماسه درشت | | ۰,۹۷۷۴ | ۱,۳۸۲۲ | ۰,۱۰۴۸ | ۰,۱۱۵۵ |
| ۴ | PTFE | ماسه درشت | | ۰,۹۶۹۹ | ۱,۲۹۳۴ | ۰,۱۴۲۸ | ۰,۱۱۳۲ |
| ۵ | HDPE | ماسه درشت | | ۰,۹۰۵۹ | ۱,۳۳۹۴ | ۰,۰۹۳۴ | ۰,۱۰۳۰ |
| ۶ | استال کوچک | ماسه درشت | | ۰,۹۵۰۳ | ۱,۳۳۹۲ | ۰,۰۹۷۵ | ۰,۱۰۴۹ |
| ۷ | استال بزرگ | ماسه درشت | | ۰,۹۴۳۰ | ۱,۳۷۳۱ | ۰,۱۰۶۲ | ۰,۱۱۸۶ |
| ۸ | HDPE | FCC | | ۱,۴۳۷۶ | ۱,۶۶۰۷ | ۱,۹۶۴۴۳ | ۰,۸۱۳۱ |
| ۹ | استال کوچک | FCC | | ۱,۲۰۷۵ | ۱,۷۸۶۲ | ۰,۴۹۰۶ | ۰,۳۴۷۳ |
| ۱۰ | استال متوسط | FCC | | ۱,۴۲۱۲ | ۱,۶۶۹۲ | ۰,۳۲۷۳ | ۰,۳۲۷۳ |
| ۱۱ | استال کوچک | FCC | | ۱,۱۴۸۳ | ۱,۵۴۰۳ | ۰,۱۹۷۳ | ۰,۱۷۶۴ |
| ۱۲ | استال کوچک | ماسه ریز | | ۱,۱۰۶۱ | ۲,۰۶۲۲ | ۰,۲۲۰۸ | ۰,۲۸۱۶ |

جدول ۴-۱۷ میانگین و واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | افزوده | سرعت | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل- آزمایش (ثانیه) | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در داده‌های آزمایش (ثانیه) | واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت پایین در نتیجه مدل- آزمایش (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 جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در داده‌های آزمایشی و مدل زنجیره‌های مارکوف سه‌فازی

| ردیف | ذره درشت | ذره بستر | سیال‌سازی (متر بر ثانیه) | افزوده | سرعت | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در داده‌های | میانگین زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در نتیجه | واریانس زمان جابجایی‌های نامحصور به سمت بالا در |
|------|----------|----------|-----------------------------|--------|------|--|---|--|
| | | | | | | | | |

| نتیجه مدل-سازی (ثانیه) | داده‌های آزمایش (ثانیه) | مدل‌سازی (ثانیه) | آزمایش (ثانیه) | | | | |
|------------------------|-------------------------|------------------|----------------|------|-----------|-------------|----|
| ۵,۸۴۵۸ | ۳,۵۹۴۷ | ۴,۴۸۳۱ | ۳,۸۲۲۰ | ۰,۲۵ | ماسه درشت | استال کوچک | ۱ |
| ۳۶,۶۵۹۳ | ۱۹,۳۳۹۸ | ۹,۹۹۶۵ | ۰,۸۹۸۷ | 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 | ۲,۰۵۱۴ | 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 | ۰,۷۴۷۸ | 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