



مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات هیدرولیکی جریان چگال با تحلیل تئوری فضای فاز

محمد حسینی*

گروه مهندسی عمران، مرکز میمند، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران.

محمد شعبانی

گروه مهندسی آب، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

چکیده مبسوط

مقدمه: جریان های چگال یا دانسیه به علت ورود یک سیال سنگین تر تحت اثر شتاب ثقل زمین به درون یک سیال سبک تر ایجاد می شوند. جریان چگال ماهیت غیرخطی دارد و نسبت به شرایط اولیه حساس می باشد. تکامل زمانی جریان چگال با استفاده از خطوط تراژکتوری در فضای فاز بیان می شود. هدف از این پژوهش، استخراج اطلاعات نهفته درون سیستم با استفاده از تئوری فضای فاز در خصوص تکامل جریان چگال با تغییر در پارامترهای هیدرولیکی ورودی جریان چگال که بتوان ماهیت سیستم و الگوی شکل گرفته جریان چگال در بستر زمان را بیان کرد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

مواد و روش ها: جریان چگال طی ۲۸ آزمایش مختلف در یک فلوم آزمایشگاهی با طول ۸m، عرض ۳۵cm و ارتفاع ۶۰cm با تغییر شیب، غلظت و دبی ورودی صورت گرفت. جهت تشریح سیستم، با استفاده از تئوری فضای فاز، سیگنال زمانی بصورت شیئی در فضا منتقل شد و آنالیز در فضا جایگزین آنالیز در زمان شد.

نتایج و بحث: با افزایش شیب، تمرکز داده ها روی نیم ساز ترسیم شده و از بالا به سمت پایین حرکت می کند و به عبارتی تراژکتوری ها در نمودار فضای فاز باز تر شده و سیستم جهت تعادل به زمان بیشتری نیاز دارد. زمانی که دبی ورودی ۵۰ l/min باشد تمرکز داده های سرعت در بازه ۴ cm/s تا ۴/۵ cm/s می باشد و حالت جاذب به خود گرفته است و آشوب بیشتری در آن دیده می شود. با تغییر چگالی از ۱۰۰۵ kg/m³ به ۱۰۱۰ kg/m³، از جاذب بودن خطوط سیر کاسته شده و تراژکتوری ها در نمودار فضای فاز بازتر و ماکزیمم های بیشتری به خود گرفته است.

واژه های کلیدی: جریان چگال، فضای فاز، تراژکتوری، جاذب، بعد محاط

نتیجه گیری: با افزایش شیب از ۱٪ به ۳٪ زمانیکه فلوم بدون تنگ شدگی هست از جاذب آن کاسته شده و در حقیقت زمان بیشتری برای به تعادل و تکامل رسیدن پدیده لازم دارد. اما در اثر تنگ شدگی ممتد یا موضعی باعث شد که نمودار فضای فاز متمرکزتر و جاذب بیشتر شود. به طور کلی با افزایش شیب، ماهیت آشوبناکی سیستم افزایش یافته و تکامل جریان زودتر رخ می دهد. سیستم در بعد محاط ۱۳/۸ سیستم شروع به اشباع شدن می نماید.

نویسنده مسئول: محمد حسینی

نشانی: گروه مهندسی عمران، مرکز میمند، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران. تلفن: ۰۹۱۷۷۰۲۳۳۴۸. پست الکترونیکی: m.h.8894@gmail.com

استناد: حسینی محمد، شعبانی محمد. مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات هیدرولیکی جریان چگال با تحلیل تئوری فضای فاز. پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست. ۱۴۰۲؛

(۴) ۵۵-۴۰

حقوق نویسندگان محفوظ است. این مقاله با دسترسی آزاد و تحت مجوز مالکیت خلاقانه <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0> در

فصلنامه پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست منتشر شده است. هرگونه استفاده غیرتجاری فقط با استناد و ارجاع به اثر اصلی مجاز

است.



مقدمه

فضای فاز و تفسیر آنچه که در دیاگرام فضای فاز ترسیم می‌شود، می‌باشد. نتایج نشان داد که داده‌های ماهانه آشوبی تر از داده‌های هفتگی و روزانه می‌باشد که نشان می‌دهد زمان بهینه به یک ماه نزدیکتر است. محل قرار گیری بارندگی‌های شدید قابل تشخیص است. جریان ثابت رودخانه بصورت روزانه بین دبی ۰ تا ۱۴۰، هفتگی بین دبی ۱/۵ تا ۶۰ و ماهانه بین دبی ۱ تا ۲۳ متر مکعب بر ثانیه قرار گرفته است. نوع جریان رودخانه، ثابت یا فصلی، قابل شناسایی است. پدیده‌های هیدرولوژیکی به صورت تصادفی اتفاق می‌افتند و هیچ‌گونه نظمی در آن‌ها دیده نمی‌شود. ولی با کشف آشوب و پیشرفت تکنولوژی، مشاهده شد که بسیاری از این پدیده‌ها آشوبی هستند و می‌توان نظمی را از دل بی‌نظمی ظاهری آن‌ها خارج کرد (اویانگ و همکاران ۲۰۱۶؛ سیواکومار و همکاران ۲۰۲۲).

فرزین و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از داده‌های سری زمانی بارش دریاچه ارومیه به تحلیل توسعه فضای فاز پدیده پرداختند. با استفاده از روش میانگین اطلاعات متقابل و بعد محاط با استفاده از الگوریتم نزدیک ترین همسایگی کاذب فضای فاز ترسیم گردیده است نمودارهای فضای فاز نشان دهنده تکامل یک گروه زمانی می‌باشند. بنابراین رفتار سیستم غیرتصادفی است و به عبارتی جزو فرایندهای استوکاستیکی و نویز دار مطرح نمی‌شود. هونگ و همکاران (۲۰۱۶) به پیش بینی دوره متوسط و دراز مدت رواناب با استفاده از مدل بازسازی توسعه فضای فاز پرداختند. استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌تواند ساختار فضای فاز را بهبود بخشد. که در اینجا از یک مدل غیر خطی ماهانه رواناب استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که رواناب متوسط و دراز مدت پیش بینی رضایت بخشی را از ایستگاه‌های هیدرولوژی بجا می‌گذارند. که پیش بینی‌های خوبی با ۱۵ درصد خطا در ترسالی و خشکسالی بیان می‌کنند. با مقایسه با برخی روشهای مفهومی و تجربی قابل اطمینان، مدل رواناب در طولانی مدت با استفاده از توسعه فضای فاز مطابقت و بهبود سازی بیشتری را برقرار می‌کند که می‌توان مدل رواناب ماهانه‌ای دقیقی را مطرح کرد (دل افروز و همکاران ۱۳۹۶؛ جانگ و همکاران ۲۰۲۰).

جین و همکاران (۲۰۱۷) به ارائه یک مدل ریاضی جریان سیال در محیط متخلخل ریز بر اساس فرضیات آشوبی فراکتال پرداختند. خطیبی و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی آشوب در رودخانه و تاثیر آن بر دبی سری زمانی در ایستگاه هیدرومتری سقوتلحان ترکیه پرداختند. که در این تحقیق پنج روش دینامیک غیرخطی باسازی فضای فاز، الگوریتم نزدیکترین همسایه، روش بعد همبستگی، ضرایب لیاپانوف و روش تقریب محلی استفاده کردند. نتایج از سیگانال‌های آشوبی نشان می‌دهد که وجود آشوب کم بعدی از دو سری زمانی به چشم می‌خورد که می‌تواند تاثیرات

جریان‌های چگال، جزء جریان‌هایی محسوب می‌شوند که به دلیل نفوذ یا ورود یک سیال با دانسیته سنگین تر به داخل یک سیال سبک‌تر تشکیل می‌شوند. تفاوت وزن مخصوص که در اثر ورود مواد معلق، مواد محلول یا ترکیبی از آن‌ها می‌باشد. تاثیرات شتاب ثقل زمین بر روی اختلاف جرم مخصوص موجب ایجاد این گونه جریان‌ها می‌باشند که جزء جریان‌های ثقلی محسوب می‌شوند و اگر این اختلاف چگالی در اثر مواد معلق صورت گیرد می‌تواند آنها را جزء جریان‌های گل آلود بیان کرد. عمدتاً الگوی شکل گرفته جریان چگال از سه ناحیه دماغه، بدنه و دنباله تشکیل شده است جریان چگال در قسمت دماغه یا پیشانی غیر دائمی بوده و نیروی محرک آن گرا دیان فشار ناشی از اختلاف دانسیته بین دماغه و سیال پیرامون می‌باشد ولی جریان در بدنه تقریباً دائمی است و نیروی ثقل موثر بر سیال سنگین تر باعث نیروی محرکه بدنه می‌باشد.

در برخی از پدیده‌های ژئوفیزیکی همچون جریان چگال، نمودارهای بر اساس زمان نگرش دقیق و کاملی از رفتار پدیده مورد نظر نشان نمی‌دهد. به همین امر، پوانکاره سعی نمود که یک سیگنال زمانی را به صورت شی ای در فضا منتقل کند. به عبارتی می‌توان آنالیز در فضا را جانشین آنالیز در زمان کرد. به چنین فضایی، فضای فاز یا فضای حالت و شی درون فضای حالت را تنظیمات فضای حالت یا فضای فاز بیان نمودند و به انجام انتقال سیگنال زمانی به فضای فاز نهشتن می‌گویند. حالت کلی سیستم به وسیله یک نقطه در فضای فاز نمایش می‌دهند که انحراف این نقطه در فضای فاز نشان دهنده تغییرات حالت در زمان می‌باشد و به مسیر یا خط‌های این نقطه در فضای فاز آن را تراژکتوری (خط سیر) می‌نامند. خط سیر شاخص سرعت تغییرات در زمان نمی‌باشد بلکه فقط جهت حرکت را نشان می‌دهد.

فهیم فرد و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی وجود الگوی آشوبی در سری زمانی دبی رودخانه به روش توسعه فضای فاز (مطالعه موردی رودخانه قره آغاج) پرداختند. با استفاده از توسعه فضای فاز به بررسی سری زمانی دبی روزانه، هفتگی و ماهانه ایستگاه‌های هیدرومتری پرداختند. خطوط تراژکتوری نشان داد که می‌توان نوع رودهای فرعی و اصلی، جریان‌های برفی و بارانی، مناطق گرمسیری یا سردسیری، افت آب رودخانه ناشی از افت طولی مسیر و همچنین تعداد بارندگی‌های شدید که در منطقه اتفاق می‌افتند را تفسیر نمود. فتاحی و تراهی (۱۳۹۵) به رفتارنگاری آشوبی رودخانه به کمک روش توسعه فضای فاز پرداختند. روش توسعه فضای فاز به روش تأخیر زمانی به جهت شناسایی آشوب مورد بررسی قرار دادند. هدف از این مطالعه بررسی روش توسعه

و به روز تر باشد، فضای فاز بازسازی شده از دقت بالاتری برخوردار بوده است. بوستانی و همکاران (۱۳۹۶) بررسی ماهیت آشوبناکی جریان در بالادست و پایین دست مخزن سد زاینده رود با روش فضای فاز مورد تحلیل قرار دادند. هوشمند زاده و همکاران (۱۴۰۰) بررسی آشوبناکی و بازسازی فضای فاز دینامیک تبخیر با استفاده از نظریه آشوب در ایستگاه سینوپتیک سمنان مورد مطالعه قرار دادند. برآورد بعد همبستگی در ایستگاه سینوپتیک سمنان در دو مقیاس روزانه و ماهانه به ترتیب ۸.۸ و ۸.۹ بدست آمدند که مقادیر غیر صحیح این پارامتر گویای آشوبی بودن تبخیر در این ایستگاه است. برخلاف اکثر روشهای پیچیده، تمامی نتایج با مشاهده و در حداقل زمان حاصل می شود. ذونعمت و امیرخانی (۱۳۹۴) به منظور بازسازی فضای فاز سری زمانی روش تاکنر مبتنی بر محاسبه زمان تأخیر مناسب و بعد محاط مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از پیشبینی های رخ داد در مقیاس های روزانه و هفتگی بر مبنای توسعه فضای فاز نسبت به تحلیل با شبکه عصبی مصنوعی برتر بوده است و این امر خود دلیلی بر آشوب بودن ماهیت پدیده دارد. ادب و همکاران (۱۳۹۶) تحلیل جریان رودخانه کارون در سه مقیاس روزانه، ماهانه و فصلی با استفاده از تئوری فضای فاز مورد بررسی قرار دادند. در مقیاس فصلی، روند تغییرات بعد همبستگی در برابر بعد محاط نشان داد که رفتار جریان تصادفی است و بنابراین جریان رودخانه پیش بینی نشدنی است. پساب های خروجی صنایع مختلف در رودخانه یا دریا، به علت تفاوت در غلظت، چگالی، دما و غیره نسبت به سیال محیطی، می تواند آثار سوئی بر محیط زیست منطقه بگذارد و باعث تغییر و از بین رفتن اکوسیستم آبی منطقه می شود به عنوان نمونه بابایی نژاد و خرسندی (۱۳۹۹) مهمترین خسارت ناشی از کارخانه های آب شیرین کن، آسیب رساندن به اکوسیستم و آبریزان در هنگام آبرگیری از دریا، رودخانه و یا هنگام تخلیه پساب با غلظت و دمای بالا به محیط های آبی است. پساب کارخانه های آب شیرین کن به دلیل شوری بالا نسبت به محیط پذیرنده، پس از تخلیه به سمت بستر محیط آبی حرکت می کند که این امر باعث افزایش غلظت محیط در نزدیکی محل تخلیه و همچنین باعث مرگ و میر آبریزان، مهاجرت آنها و باعث تغییر اکوسیستم منطقه می شود. همچنین در طبیعت جریان چگال یا گل آلود ثقلی که در اثر سیلاب ایجاد می شود منجر به ایجاد رسوب گذاری یا فرسایش بستر رودخانه یا کانال می شود و محیط زیست منطقه را تغییر یا از بین می برد. از این رو شناخت کلی اینگونه جریان ها می تواند در جهت کنترل و مهار آنها و آسیب حداقلی به محیط زیست منطقه موثر باشد.

در اینجا فرضیاتی مطرح می شود که جریان چگال مانند بسیاری از پدیده های ژئوفیزیکی ماهیت غیرخطی دارند و اینگونه

زیادی بر تولید الگوی رفتاری آنها بگذارد. پیچیدگی داده ها و اطلاعات هیدرولوژیکی جهت مدل سازی و پیش بینی کارآمد نیاز به درک و فهم تکامل مکانی و زمانی آن دارد. با افزایش مقیاس زمانی، بعد مورد نیاز برای اکثر ایستگاه ها کاهش می یابد که نشان دهنده تغییر در پویایی متغیرها است. جهت جریانهای رودخانه، پیش بینی های بلند مدت بی اثر می باشد (رولهیم و سوزافیلو ۲۰۲۳؛ تاو و همکاران ۲۰۱۸)

رضایی و همکاران (۱۳۹۹) تحلیل جریان ماهانه رودخانه سفید رود با استفاده تئوری آشوب فضای فاز مورد بررسی قرار دادند. زمان تأخیرهای به دست آمده برای سری های روزانه، هفتگی و ماهانه حاکی از وجود وابستگی بیش تر بین داده های روزانه نسبت به داده های هفتگی و ماهانه است. که این موضوع در تحلیل جریان های سیلابی و استخراج مشخصه های آن از اهمیت به سزایی برخوردار است. فهیم فرد و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از بازسازی فضای فاز و بعد همبستگی به بررسی تأثیر سد بر الگوی آشوبی انتقال بار معلق رود در سد کرج پرداختند. نتایج نشان داد که گروه زمانی رسوب دارای الگوی آشوبی کم دامنه است، و در بازه های زمانی کوتاه مدت ده روزه، سد بر پویایی آن موثر بوده و آن را از پدیده های آشوبی به تصادفی تبدیل می کند، اما اگر در بازه زمانی بلند مدت تر مانند ماهانه به دلیل خلق اطلاعات و قطع ارتباط با شرایط اولیه که در سامانه های آشوبی رخ میدهند، این تأثیر از بین رفته و گروه زمانی دوباره رفتار آشوبی را به خود می گیرند. به کارگیری از روشهای پیش بینی بر پایه توسعه فضای فاز در سری های جریانات رودخانه، کمک شایانی به تحلیل خشکسالی ها، جریان های سیلابی و تحلیل حجم مخازن ذخیره سدها با روش های مختلف بر مبنای سری های زمانی می نماید (جانگ و همکاران ۲۰۲۱؛ قربانی و همکاران ۱۳۹۹).

ماژور و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از تئوری فضای فاز به بررسی و تکامل مورفولوژی رودخانه انتقال آب پرداختند. آدان و نورانی (۲۰۱۴) تحلیل و پیش بینی جریان رودخانه با استفاده از روش پیش بینی غیرخطی مبتنی بر تئوری آشوب با روش فضای فاز پرداختند. بازسازی فضای فاز به وسیله بازسازی یک متغیر واحد در فضای فاز چند بعدی صورت گرفته و از روش تقریب خطی محلی، پیش بینی صورت گرفته است. در کل، نتایج پیش بینی برای همه ایستگاه های با ضریب همبستگی خوب به وقوع نمی رسند. نتایج نشان داد که رفتار آشوبی بر سیستم و همچنین بیش از شش متغیر بر پویایی رودخانه پاهانگ، رودخانه مودا و رودخانه کینتا تأثیر گذاشته است. حسینی و ذاکرمشفق (۱۳۹۳) مقایسه مدل های محلی آشوبناکی مبتنی بر فضای فاز در پیش بینی جریان رودخانه مورد بررسی قرار دادند. معادلات حاکم بر جریان رودخانه کشکان از الگوی رفتار آشوبی پیروی می کند و هر چه داده ها بیشتر

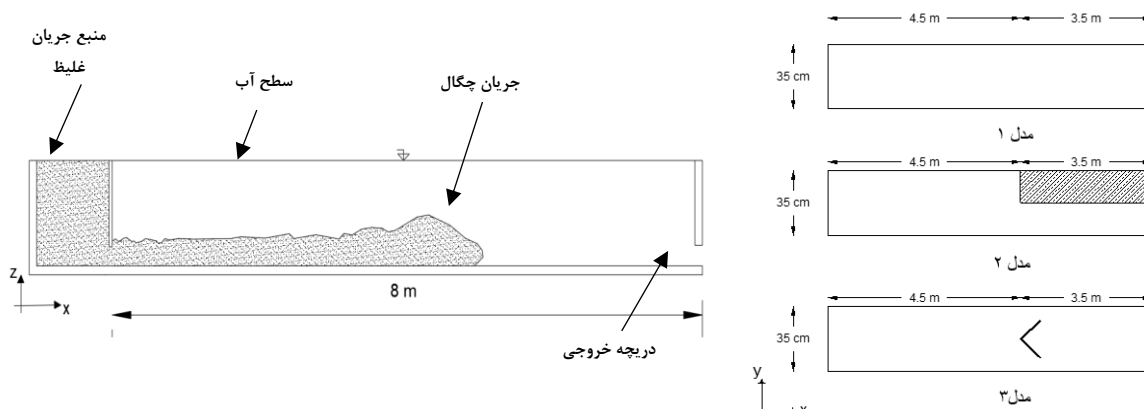
نمره ۸۰ استفاده شده است حجم مخزن ۶۰۰ لیتر می‌باشد که توسط یک همزن به‌طور پیوسته جریان در حال گردش می‌باشد. توسط یک پمپ کف‌کش جریان غلیظ از منبع وارد فلوم می‌گردد در این مسیر از یک فلومتر برای کنترل دبی ورودی به مخزن با حداکثر دبی ۲۰۰ l/min انتخاب شده است. به دلیل شرایط یک سان، ارتفاع باز شدگی در پیچه ورودی جریان چگال ۱ cm نظر گرفته شده است. جهت برداشت داده‌های سرعت جریان چگال از دستگاه سرعت سنج ۲ بعدی الکترومغناطیسی ولپورت ساخت کشور انگلستان استفاده شده است که دقت آن ۵ mm/s می‌باشد همچنین با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی جهت برداشت غلظت جریان چگال از یک سری سیفون که به صورت عمقی در کانال قرار گرفته است، داده‌ها برداشت شده است. وزن مخصوص پودر سنگ $2/65 \text{ t/m}^3$ و سرعت ته‌نشینی مواد $0/1 \text{ mm/s}$ و دانسیته آب $998/7 \text{ kg/m}^3$ در نظر گرفته شده است. از ۳ شیب کف کانال ۱، ۲ و ۳ در صد و دو دبی ورودی جریان چگال ۵۰ l/min و ۱۰۰ l/min به کار گرفته شده است. از ۲ چگالی ورودی جریان غلیظ 1005 kg/m^3 و 1010 kg/m^3 استفاده شده است. در موقعیت ۴/۵ m از در پیچه، کانال دارای تنگ شدگی‌های ممتد و موضعی قرار می‌گیرد و در ۳ حالت سری زمانی جریان چگال مورد بررسی قرار می‌گیرد در شکل ۱ و جدول ۱ نمای شماتیکی فلوم جریان چگال و شرایط اولیه ورودی جریان چگال طی ۲۸ آزمایش مختلف نشان می‌دهد. با تغییر در پارامترهای هیدرولیکی ورودی جریان چگال، تکامل جریان چگال با توسعه فضای فاز مورد تحلیل قرار گرفت.

سیستم‌های غیرخطی، پدیده‌هایی پیچیده و حساس نسبت به شرایط اولیه هستند که تغییرات جزئی در سیستم باعث اثر قابل توجهی در رفتار و الگوی دینامیکی سیستم منجر می‌شود. جریان چگال ماهیتا الگوی آشوبی دارد و تغییرات خصوصیات هیدرولیکی جریان با الگوی تشکیل جریان چگال ارتباط معناداری دارد. هنگامیکه جریان چگال به مسیر خود در کانال یا رودخانه ادامه می‌دهد در حقیقت در هر زمان به تکامل شکل و الگوی تشکیل شده خود منجر می‌شود که برای درک بهتر می‌توان تکامل زمانی یک پدیده همچون جریان چگال با استفاده از خطوط تراژکتوری یا خطوط سیر در فضای فاز بیان نمود و از آنجایی که تاکنون رفتار جریان چگال با تحلیل تئوری فضای فاز که بتوان ماهیت درونی جریان چگال تشریح شود، مطالعه‌ای صورت نگرفته است به همین امر، هدف از انجام این تحقیق استخراج اطلاعات نهفته درون سیستم با استفاده از تئوری فضای فاز در خصوص تکامل جریان چگال با تغییر در پارامترهای هیدرولیکی ورودی جریان چگال می‌باشد که ماهیت سیستم و الگوی شکل گرفته جریان چگال در بستر زمان را بیان کرد.

مواد و روش‌ها

Earth شرایط آزمایشگاهی

جهت بررسی تکامل جریان چگال از یک فلوم آزمایشگاهی در بخش هیدرولیک دانشگاه شیراز استفاده شد. فلوم مربوطه دارای ابعادی با طول ۸m، عرض ۳۵cm و ارتفاع ۶۰cm می‌باشد. از یک منبع جریان غلیظ که حاوی پودر سنگ الک شده عبوری از



شکل ۱- شکل کلی فلوم جریان چگال و تغییرات مدل‌های مختلف

جدول ۱- مقادیر ورودی جریان چگال به فلوم آزمایشگاهی

مدل کانال	شماره آزمایش	شیب کانال (%)	چگالی غلیظ (kg/m ³)	دبی ورودی (L/min)
۱	۱	۱	۱۰۰۵	۵۰
۱	۲	۲	۱۰۰۵	۵۰
۱	۳	۳	۱۰۰۵	۵۰
۱	۴	۱	۱۰۱۰	۵۰
۱	۵	۲	۱۰۱۰	۵۰
۱	۶	۳	۱۰۱۰	۵۰
۱	۷	۱	۱۰۰۵	۱۰۰
۱	۸	۲	۱۰۰۵	۱۰۰
۱	۹	۳	۱۰۰۵	۱۰۰
۱	۱۰	۱	۱۰۱۰	۱۰۰
۱	۱۱	۲	۱۰۱۰	۱۰۰
۱	۱۲	۳	۱۰۱۰	۱۰۰
۲	۱۳	۱	۱۰۰۵	۵۰
۲	۱۴	۳	۱۰۰۵	۵۰
۲	۱۵	۱	۱۰۱۰	۵۰
۲	۱۶	۳	۱۰۱۰	۵۰
۲	۱۷	۱	۱۰۰۵	۱۰۰
۲	۱۸	۳	۱۰۰۵	۱۰۰
۲	۱۹	۱	۱۰۱۰	۱۰۰
۲	۲۰	۳	۱۰۱۰	۱۰۰
۳	۲۱	۱	۱۰۰۵	۵۰
۳	۲۲	۳	۱۰۰۵	۵۰
۳	۲۳	۱	۱۰۱۰	۵۰
۳	۲۴	۳	۱۰۱۰	۵۰
۳	۲۵	۱	۱۰۰۵	۱۰۰
۳	۲۶	۳	۱۰۰۵	۱۰۰
۳	۲۷	۱	۱۰۱۰	۱۰۰
۳	۲۸	۳	۱۰۱۰	۱۰۰

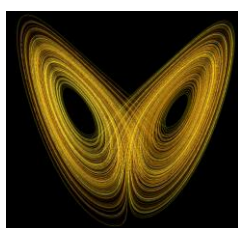
فضای فاز

در برخی از پدیده‌ها ژئوفیزیکی همچون جریان چگال، نمودارهای بر اساس زمان نگرش دقیق و کاملی را از رفتار پدیده‌ی مورد نظر، به ما نمی‌دهد. به همین علت، پوانکاره تلاش نمود که یک سیگنال زمانی را به صورت شی ای در فضا منتقل کند. در تئوری سیستم‌های دینامیکی تعداد درجه‌ی آزادی به عنوان تعداد متغیرهای مستقل مورد نیاز برای تعیین حالت پویای سیستم تعریف می‌شوند. تعداد متغیرهای لازم برای انتخاب حالت پویای سیستم، در واقع بعد فضای فاز را مشخص می‌نمایند. فضای فاز و شرایطی که تکامل شروع خط تراژکتوری‌ها را در حالت‌های

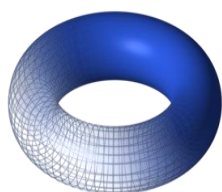
گوناگون اولیه دنبال می‌کند، سیستم دینامیکی می‌نامند. جهت رفتار خط تراژکتوری در نزدیکی نقاط ثابت در ابتدا نوع نقطه را انتخاب نمود. در فضای فاز سه نقطه جاذب، دافع با زینی وجود دارد. جاذب‌ها الگوهای خود متشابه تولید می‌کنند و همچنین یک وابستگی شدیدی به شرایط اولیه از خود نشان می‌دهند یعنی آن که هر دو شرایط اولیه‌ی کاملاً نزدیک به هم می‌تواند عامل مسیریایی که به سرعت واگرا می‌باشند شود که معروف ترین مثال برای این موضوع، اثر پروانه‌ای لورنز (۱۹۸۴) می‌باشد. در حالت جاذب تمامی تراژکتوری‌های نزدیک خود را جذب می‌کند و در دافع تمامی تراژکتوری‌های اطراف خود را دفع می‌کند و در حالت زینی از یک طرف جذب و از طرف دیگر دفع می‌نماید. در

می‌شود و یا از دیگری فاصله می‌گیرد. جاذب چرخه‌ای به این صورت عمل می‌نماید که ابتدا به سمت یک چیز کشیده می‌شود و پس از آن دوباره به یک سمت دیگر کشیده می‌شود به عنوان نمونه مثل آهنربای گردان عمل می‌کند. یکی از پیچیده ترین جاذب‌ها، جاذب چنبره‌ای است بصورتیکه که این جاذب به سمت جلو حرکت می‌کند و زمانی که خودش را تکرار می‌کند متفاوت می‌باشد. بعد آن، بعد سوم جسم است و سه بعدی می‌باشد که از مجموعه‌ای از تعداد نامحدود صفحات تشکیل شده است. این جاذب به نظر می‌رسد که هیچ نظم خاصی در آن وجود ندارد این جاذب در سطح آشوب خالص به نظر می‌رسد که نظمی به طور نامحسوس که تنها در یک طول زمان که چشم انداز واقعی پدیدار می‌شود، وجود دارد که این نظم از نوع فراکتالی می‌باشد. بعد مورد نیاز جهت توسعه فضای حالت از طریق کمترین درجه آزادی انتخاب می‌شود. تعداد درجه آزادی یک سامانه دینامیک به وسیله تعداد متغیرهای مستقل مورد نیاز جهت توصیف حالات لحظه‌ای سامانه تعریف می‌گردند. به عبارتی تعداد درجات آزادی با تعداد شرایط اولیه که برای تعیین کردن سامانه دینامیکی مورد نیاز است برابر است.

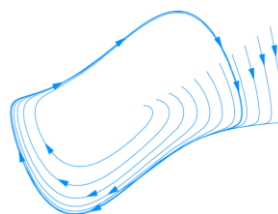
سیستم آشوبی بطور کلی چهار نوع جاذب از نوع جاذب نقطه‌ای، جاذب چرخه‌ای، جاذب چنبره‌ای و جاذب عجیب وجود دارد. شایان ذکر است که این جاذب‌ها مخالف یک دیگر هستند. در حقیقت این‌ها جاذب‌های کیهان می‌باشند که آشوب را به سمت یک تعادل هدایت می‌نمایند. از آشوبی که در این چهار جاذب وجود دارد یک نظم استخراج می‌شود. کیهان یک الگوی چهار گانه‌ای در تمام مقیاس‌ها دارد که زمانی که در طبیعت رخ می‌دهد، قانون چهارم خود را به صورت چهار جاذب به نمایش می‌گذارد. این جاذب‌ها وظیفه‌ی متعادل نگه داشتن آنروپی‌ها را به عهده دارند و آن‌ها را از حالت آشوب خارج می‌کنند. زمانی که در مقیاس بسیار کوچک وارد شویم، این چهار جاذب خود را به شکل چهار نیرو یا انرژی اساسی نشان می‌دهند که آن نیروها شامل: الکترومغناطیس، گرانش، نیروهای ضعیف و نیروهای قوی می‌باشند. در شکل ۲ نمای کلی از جاذب‌ها را نشان می‌دهد. جاذب نقطه‌ای است که برای خارج کردن نظم از دل آشوب موجود می‌باشد. در واقع بعد آن، بعد اول خط است و شامل مجموعه‌ای از تعداد بی‌نهایتی از نقطه می‌باشد. به عنوان نمونه می‌توان ذکر کرد که با استفاده از جاذب نقطه‌ای شخص همواره به یک فعالیت خاص متمایل



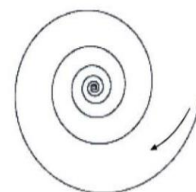
الف) جاذب عجیب



الف) جاذب چنبره‌ای



الف) جاذب چرخه‌ای



الف) جاذب نقطه‌ای

شکل ۲- انواع جاذب‌های یک سیستم آشوبناک در فضای فاز

در شرایطی که تابع تاخیر با هم نزدیک می‌شوند روی هم اتفاق می‌افتند که به این جاذب می‌گویند و حالت جاذب خود نشان دهنده تعادل سیستم می‌باشد و نشان می‌دهد که پدیده مورد نظر یک فراینده پیوسته‌ای می‌باشد و تکامل در آن حادث می‌شود. در فضای فاز نقاط ماکزیمم تراژکتوری‌ها تعیین کننده می‌باشند بطوریکه هر چه تراژکتوری‌ها بازرتر باشد یعنی زمان بیشتری نیاز بوده که سیستم به تعادل برسد و به عبارتی آشوبناکی پدیده کاهش می‌یابد و به عبارتی در جریانهای چگالی که تکامل دیرتر اتفاق می‌افتد فضای فازش ماکزیمم‌های بالاتری از خود نشان می‌دهد. هنگامیکه زمان زیادی طول بکشد که فرآیند به تعادل برسد این نشان دهنده مولفه‌های تصادفی در فضای فاز می‌باشد. هر نقطه بر روی جاذب سیستم، رابطه‌ای نظیر به نظیر با اندازه

فضای فاز در واقع فضایی هست که می‌توان حالت ممکن یک پدیده در آن، در یک جا و هم زمان به تصویر کشید و در حقیقت وابستگی سیستم به زمان را از بین برد. در برخی از پدیده‌ها، نمودارهای بر حسب زمان، دید کامل و مشخصی از رفتار پدیده را به ما نمی‌دهند. از این رو می‌توان یک سیگنال زمانی را بصورت شیئی در فضا منتقل کند. در پدیده‌های طبیعی مانند جریان چگال، فضای فاز معمولاً به حالت پایدار می‌رسد که معمولاً تعادل در فضای فاز به طرق مختلف خودش را نشان می‌دهد. گاهی اوقات این تعادل حول محور Xها و بعضی مواقع حول محور Yها و گاهی اوقات روی نیمساز خطوط تراژکتوری ترسیم می‌شود بر حسب شرایط اولیه سیستم در یک جایی به تعادل می‌رسد. که در اصطلاح جاذب می‌شود. یعنی در واقع نزدیک شدن تراژکتوری‌ها

می‌گیرد. از روش تاخیر جهت نگاشتن یک سری زمانی واحد در یک فضای n بعدی استفاده نمود که شبکه‌ای به طول n از روی سری زمانی عبور داده می‌شود که یک ماتریس به تعداد سطرهای n تشکیل می‌شود. که جهت سری زمانی معادله (۱) ماتریس باسازی مطابق معادله (۲) بیان می‌گردد.

$$x(t) = (x_0, x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (1)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & \dots & x_{m-1} \\ x_0 & x_1 & x_2 & \dots & x_m \\ x_0 & x_1 & x_2 & \dots & x_{m+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (2)$$

(۳) بیان می‌شود

$$Y_j = (X_j, X_{j+\tau}, X_{j+2\tau}, \dots, X_{j+(m-1)\tau}) \quad (3)$$

گیری بخشی از خروجی‌های گروه زمانی تحلیل نمود. به عبارتی می‌توان مدار تناوبی پایدار را در فضای نهشتن تشکیل داد هر زمان که بعد نهشتن مناسب $m \geq 2d+1$ که در آن d بعد سامانه آشوبی است، مشخص نمود جهت داشتن یک سامانه دینامیک واقعی، بعد نهشتن باید به میزان کافی بزرگ باشد. در نهایت باسازی زمان تاخیر در فضای m بعدی بردارهای $u_i(x)$ به شکل معادله (۴) می‌باشند. که دقت τ و m بطور مستقیم به دقت ویژگی‌های توصیف شده ثابت جاذب‌های عجیب در باسازی فضای فاز وابسته است.

$$u_i(x) = \{u_i(x), u_i(x+\tau), \dots, u_i(x+(q-1)\tau)\} \quad (4)$$

بررسی وجود یا عدم وجود آشوب در سری‌های زمانی بکار گرفته می‌شود. برای فضای فاز m بعدی تابع همبستگی $C(r)$ بصورت زیر تعریف می‌گردد (گراسبرگر و پروکاسیا ۱۹۸۳).

$$C(r) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2}{n(n-1)} \right) \sum_{1 \leq i < j \leq n} H(r - |Y_i - Y_j|) \quad (5)$$

و فاصله بین بردار تاخیر m بعدی به دست آمده می‌باشد. هنگامیکه سری زمانی به صورت یک جاذب توصیف شود. انتگرال همبستگی $C(r)$ با شعاع r به فرم زیر تعیین می‌شود.

$$C(r)_{r \rightarrow 0, n \rightarrow \infty} \approx \alpha r^v \quad (6)$$

رابطه زیر بیان می‌گردد. هنگامیکه توان همبستگی با افزایش بعد محاط به مقدار اشباع برسد، بطور کلی سیستم دارای دینامیک آشوبناک است و مقدار اشباع از توان همبستگی به عنوان بعد همبستگی k بیان می‌شود (گراسبرگر و پروکاسیا ۱۹۸۳).

گیرهای صورت گرفته از متغیر پویا سیستم دارد و به دلیل اینکه این نقاط نشان دهنده وضعیت سیستم در هر لحظه می‌باشند اطلاعات سیستم پویا را به شکل نمودار فاز بیان کند. فضای فاز سری‌های زمانی به روش تیکن ترسیم می‌شوند که سری زمانی اسکالر آن می‌باشد که فضای فاز آن با استفاده از تاخیرها صورت

که چنین ماتریسی تمامی خصوصیات هندسی سیستم پویا اولیه را نشان می‌دهد. بنابراین جاذب باسازی شده Y_j به فرم معادله

که m بعد برداری Y_j می‌باشد و τ زمان تاخیر و $j = 1, 2, \dots, N$ $(m-1)\tau$ می‌باشد. زمان تاخیر در مقایسه با مقیاس زمانی مربوط به ذات سیستم کوچک انتخاب شود، $x(t)$ و $x(t+\tau)$ به هم نزدیک و وابسته می‌باشند به همین دلیل تمامی بردارهای تاخیر در نزدیکی محور قطری فضا متمرکز می‌گردند و اگر زمان تاخیر بزرگ انتخاب شوند، $x(t)$ و $x(t+\tau)$ مستقل از یکدیگرند.

بعد نهشتن

خصوصیات جاذب یک سامانه آشوبناک را می‌توان به وسیله نمونه

بعد همبستگی

روش آنالیز تابع همبستگی، که روش بعد همبستگی نیز عنوان می‌شود یکی از معمول ترین روشهایی است که بطور گسترده برای

که در آن H تابع هویساید پله‌ای با $H(z)=1$ برای مقادیر $z>0$ و $H(z)=0$ برای مقادیر $z \leq 0$ و $z = r - |Y_i - Y_j|$ می‌باشد. N تعداد نقاط در فضای فاز و r شعاع کره به مرکز Y_i یا Y_j می‌باشد

که در آن α یک میزان ثابت بوده و k توان همبستگی یا شیب منحنی $\log C(r)$ در مقابل $\log(r)$ می‌باشد که نشان دهنده میزان انحراف یک سری زمانی از حالت تصادفی است و به صورت

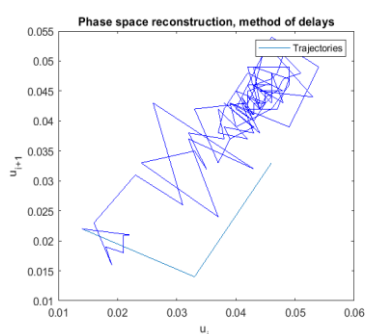
$$k = \lim_{r \rightarrow 0, n \rightarrow \infty} \frac{\log C(r)}{\log(r)}$$

نتایج و بحث

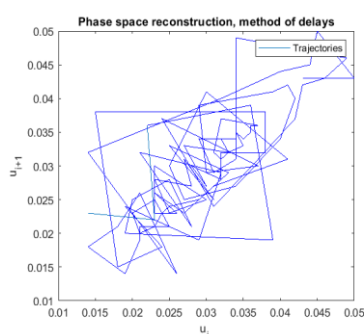
شده و این تراژکتوری‌ها در نمودار فضای فاز بازتر شده و جاذب آن کاهش یافته و در حقیقت نیاز به زمان بیشتری برای تعادل دارد و در نتیجه آشوبناکی کمتر شده. همچنین خطوط سیر با افزایش شیب کانال از ۱٪ به ۳٪ زمانی که دبی در ۵۰ l/min قرار دارد، جاذب هستند اما با افزایش دبی جاذب بودن داده‌ها در اثر تغییر شیب کاهش یافته و به عبارتی تغییر قابل ملموسی مشاهده نمی‌شود. بطور کلی با افزایش شیب، تمرکز داده‌ها روی نیم‌ساز ترسیم شده و از بالا به سمت پایین حرکت می‌کند و به عبارتی تراژکتوری‌ها در نمودار فضای فاز باز تر شده یعنی در زمان بیشتری نیاز بوده که سیستم به تعادل برسد و تراژکتوری‌ها ماکزیم‌های بالاتری را ترسیم کرده است که نشان می‌دهد تکامل جریان چگال دیرتر اتفاق می‌افتد و دقیقاً در آزمایشات ۳، ۶، ۹ و ۱۲ که شیب فلوم افزایش یافته تراژکتوری‌ها بازتر شده و تکامل دیرتر اتفاق می‌افتد و هنگامیکه که شیب فلوم کم می‌باشد، نمودار حالت جاذب قوی تری به خود گرفته و نشان از به تعادل رسیدن سیستم می‌باشد و هنگامی که تعادل برسد نشان دهنده این است که پدیده جریان چگال یک فرآیند پیوسته می‌باشد. همچنین خطوط سیر با افزایش چگالی ورودی از 1005 kg/m^3 به 1010 kg/m^3 ، جاذب آن کاهش یافته و از آشوبی بودن آن کاسته شده به عبارتی نسبت به تغییرات کوچک اولیه حساس نمی‌باشد که در آزمایشات ۴، ۵، ۶، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. تراژکتوری‌ها در آن بازتر شده و نیاز به زمان بیشتری دارد که به تعادل برسد و به همین خاطر تکامل جریان چگال با افزایش چگالی دیرتر اتفاق می‌افتد.

بنابراین در جریان چگال پس از اندازه‌گیری بعد تعبیه یا نهشتن توسط روش تاخیر زمانی، این مقدار برابر با ۴ بدست می‌آید. پس برای رسم فضای فاز مقدار m برابر با ۴ در نظر گرفته می‌شود. در مرحله رسم فضای فاز، معادله فضای فاز نشان می‌دهد که خطوط سیر در صفحه و یا فضای سه بعدی واقع می‌شوند که پس از رسم فضای فاز می‌توان نتیجه گرفت که صفحه $\{X_i, X_{i+1}\}$ می‌تواند تمام خصوصیات جاذب، دافع و تصادفی و خطوط سیر را بصورت نسبتاً کاملی نمایان سازد. در حقیقت خطوط سیر ترسیم شده وابستگی داده‌ها به زمان را از بین می‌برد. پس فضای فاز در صفحه مطابق شکل ۳ الی ۴ برای ۲۸ آزمایش رسم می‌شود. لازم به ذکر است به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی فقط سری‌های زمانی سرعت در فاصله $4/5 \text{ m}$ از دریچه ورودی برداشت شده است.

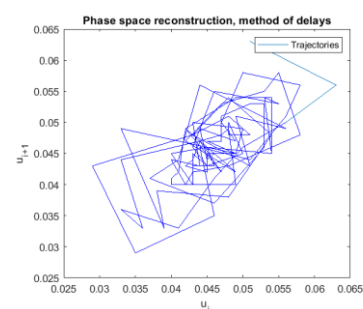
خطوط سیر در مدل شماره ۱ (بدون تنگ شدگی) زمانیکه دبی ورودی 50 l/min باشد تمرکز داده‌های سرعت در بازه $3/5 \text{ cm/s}$ تا $5/5 \text{ cm/s}$ می‌باشد حالت جاذب به خود گرفته است و آشوب در آن دیده می‌شود البته هر چه داده‌ها بیشتر باشد ترسیم فضای فاز بهتری بدست می‌آید اما به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی تعداد داده‌های مورد نیاز کم می‌باشد با افزایش دبی به 1 l/min تمرکز داده‌ها سرعت در بازه 4 cm/s الی 12 cm/s می‌باشد و خطوط سیر بصورت پراکنده می‌باشد و جاذب آن کاهش یافته و نظم خاصی در آن دیده نمی‌شود با افزایش دبی جریان به عنوان نمونه در آزمایشات ۷ الی ۱۲ مشاهده می‌شود که تمرکز داده‌ها کمتر شده و همچنین تراژکتوری‌ها بر روی نیم‌ساز نمودار تشکیل



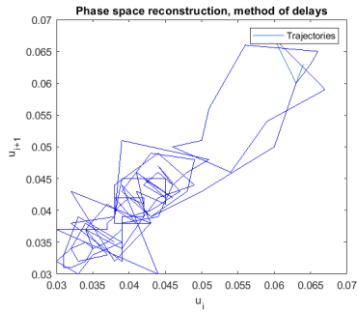
Exp. No 1



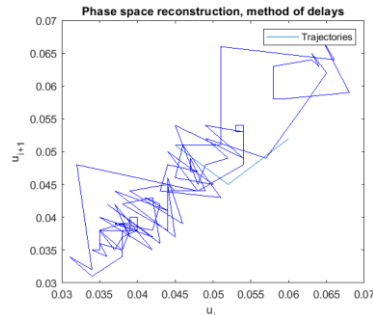
Exp. No 2



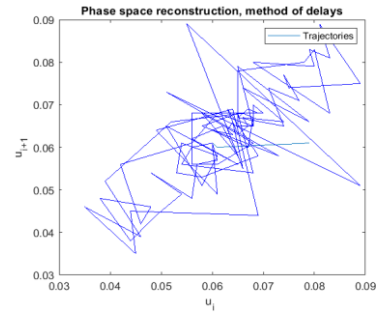
Exp. No 3



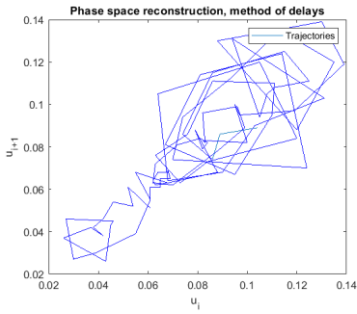
Exp. No 4



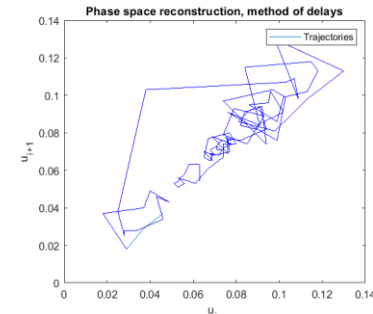
Exp. No 5



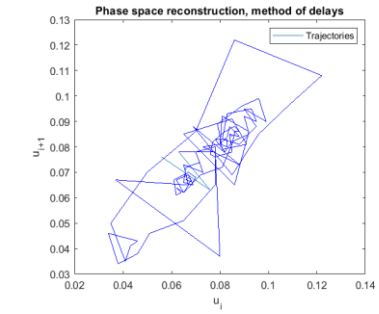
Exp. No 6



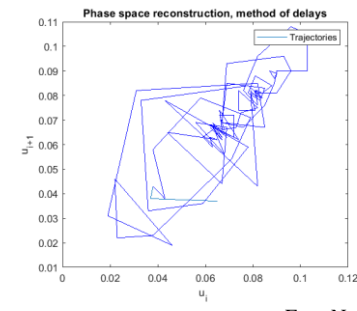
Exp. No 7



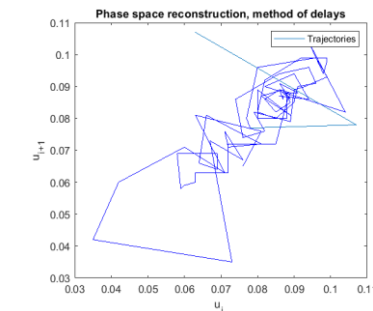
Exp. No 8



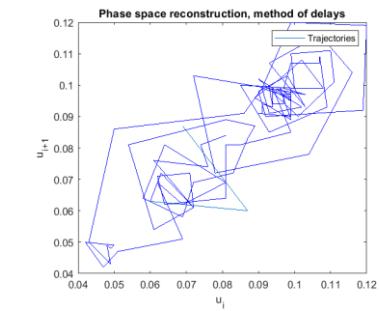
Exp. No 9



Exp. No 10

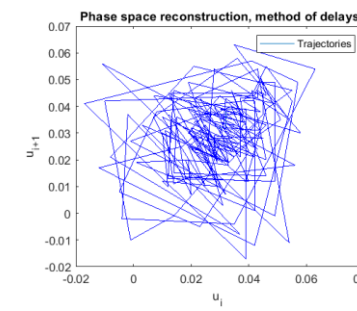


Exp. No 11

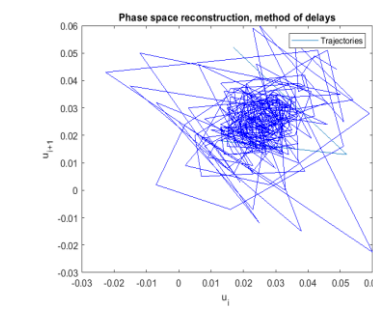


Exp. No 12

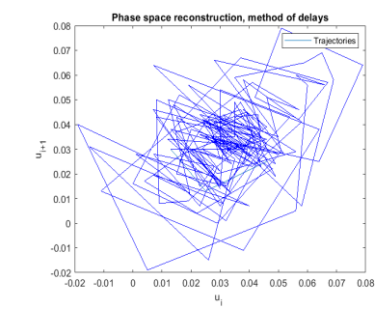
شکل ۳- فضای فاز بازسازی شده برای داده‌های سرعت در مدل شماره ۱



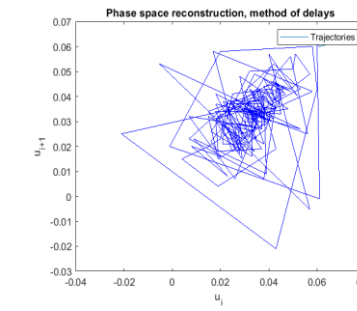
Exp. No 13



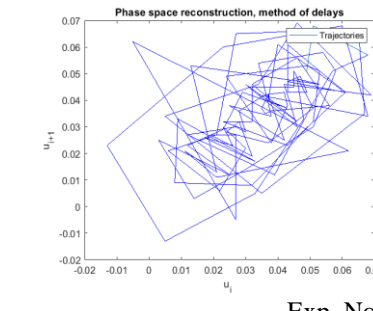
Exp. No 14



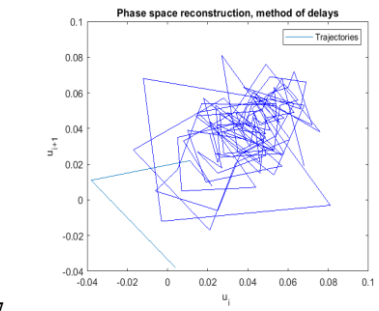
Exp. No 15



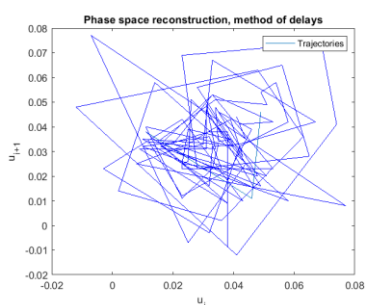
Exp. No 16



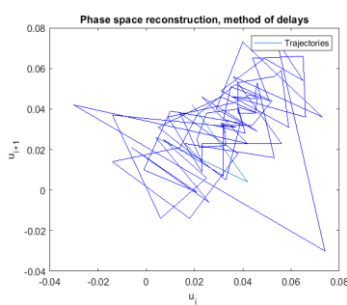
Exp. No 17



Exp. No 18



Exp. No 19

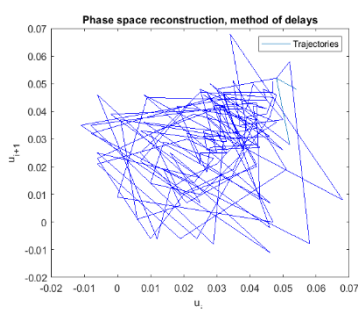


Exp. No 20

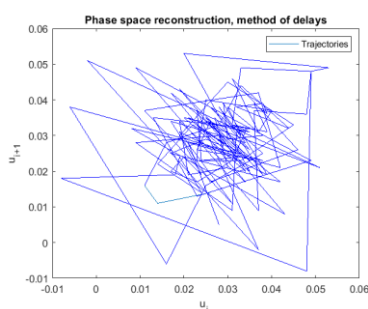
شکل ۴- فضای فاز بازسازی شده برای داده‌های سرعت در مدل شماره ۲

مشاهده است. همچنین خطوط سیر با افزایش شیب کانال از ۱٪ به ۳٪ تمرکز داده‌ها بیشتر می‌شود و حالت آشوبی‌تری به خود می‌گیرد و نسبت به تغییرات کوچک شیب حساسیت نشان می‌دهد، و زمانی که تراژکتوری‌ها در فضا جمع‌تر شود به عبارتی زودتر به تعادل رسیده و تکامل جریان چگال زودتر اتفاق می‌افتد همچنین خطوط سیر با افزایش چگالی ورودی از 1005 kg/m^3 به 1010 kg/m^3 ، جاذب آن کاهش یافته و از آشوبی بودن آن کاسته شده به عبارتی نسبت به تغییرات کوچک اولیه حساس نمی‌باشد در آزمایشات ۱۵، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ نشان می‌دهد که با افزایش چگالی تراژکتوری‌ها در نمودار فضای فاز بیشتر باز شده و به مراتب زمان بیشتری لازم دارد که جریان چگال به تکامل برسد.

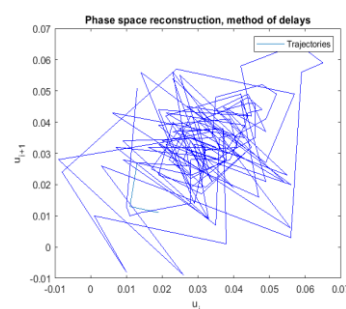
خطوط سیر در مدل شماره ۲ (تنگ‌شدگی ممتد) زمانی که دبی ورودی 50 l/min باشد تمرکز داده‌های سرعت در بازه 2 cm/s تا $4/5 \text{ cm/s}$ می‌باشد و حالت جاذب به خود گرفته است و آشوب بیشتری در آن دیده می‌شود و نسبت به تغییرات محلی کوچک حساس می‌باشد اما با افزایش دبی به 100 l/min تمرکز داده‌ها سرعت در بازه $2/5 \text{ cm/s}$ الی 8 cm/s می‌باشد و جاذب آن کاسته شده و کم‌کم خطوط سیر بصورت پراکنده مشاهده می‌شود و نظم خاصی در آن دیده نمی‌شود با افزایش دبی، تمرکز داده‌ها بیشتر حول مرکز نیم‌ساز نمودار قرار می‌گیرد و زمان بیشتری لازم دارد که به تعادل برسد و تراژکتوری‌های آن ماکزیمم‌های بالاتری را نشان می‌دهد و در حقیقت با تنگ‌شدگی ممتد در اثر افزایش دبی، آشوبناکی سیستم را کاهش می‌دهد و این امر تکامل جریان چگال را به تاخیر می‌اندازد که نمودار آن در آزمایشات ۱۷ الی ۲۰ قابل



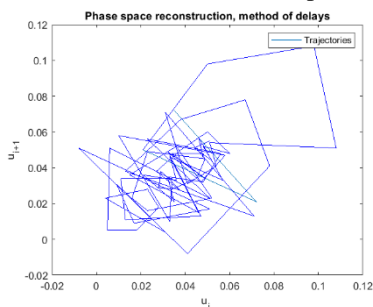
Exp. No 21



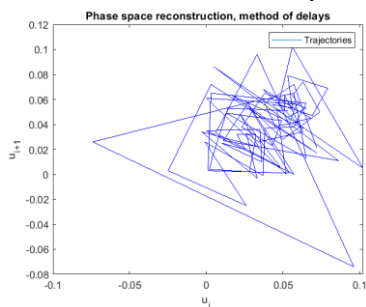
Exp. No 22



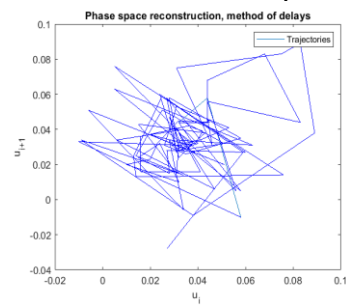
Exp. No 23



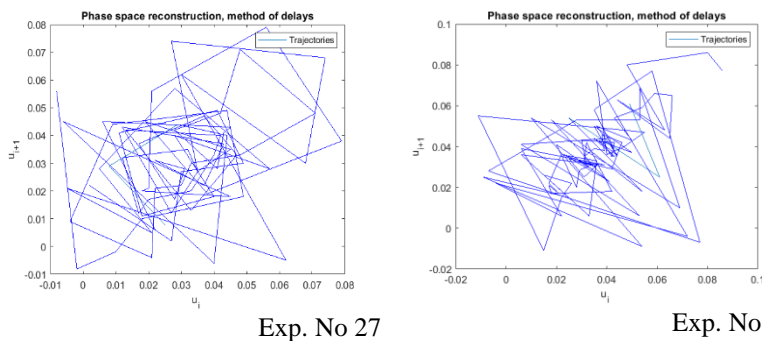
Exp. No 24



Exp. No 25



Exp. No 26



شکل ۵- فضای فاز بازسازی شده برای داده‌های سرعت در مدل شماره ۳

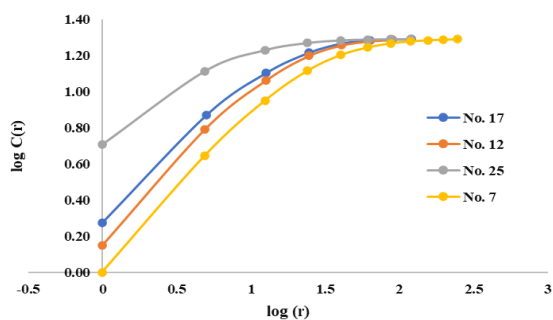
چگال دیرتر اتفاق می‌افتد اما ماهیت کلی تراژکتوری‌ها (خطوط سیر) جاذب بوده ولی با افزایش دبی از جاذب آن کاسته شده و آشوبناکی آن کمتر شده و نسبت به تغییرات کوچک اولیه جریان حساس نمی‌باشند همچنین با افزایش شیب از ۱٪ به ۳٪ زمانیکه فلوم بدون تنگ شدگی هست از جاذب آن کاسته شده و در حقیقت زمان بیشتری برای به تعادل و تکامل رسیدن پدیده لازم دارد اما در عامل تنگ شدگی (ممتد یا موضعی) باعث گردیده که نمودار فضای فاز متمرکز تر شده و جاذب بیشتر گردد و به عبارتی تکامل جریان چگال زودتر شده و تراژکتوری‌ها بسته تر شده و در اثر تنگ شدگی با افزایش شیب فلوم، ماهیت آشوبناکی جریان بیشتر شده و نسبت به تغییرات کوچک شیب حساس تر می‌باشد اما با تغییر چگالی از 1005 kg/m^3 به 1010 kg/m^3 ، از جاذب بودن خطوط سیر کاسته شده و تراژکتوری‌ها در نمودار فضای فاز بازتر و ماکزیم‌های بیشتری به خود گرفته است و زمان بیشتری برای به تعادل رسیدن نیاز دارد و ماهیت آشوبی جریان کمتر شده و تکامل جریان چگال دیرتر اتفاق می‌افتد و به عبارتی نسبت به تغییرات کوچک چگالی ورودی حساس نمی‌باشند.

با بررسی رفتار آشوبی فضای فاز در مدل شماره ۱ (فلوم بدون تنگ شدگی)، زمانیکه دبی ورودی 50 l/min باشد تمرکز داده‌های سرعت در بازه $3/5 \text{ cm/s}$ تا $5/5 \text{ cm/s}$ می‌باشد حالت جاذب به خود گرفته است و آشوب در آن دیده می‌شود و افزایش دبی ورودی، تراژکتوری‌ها بازتر شده و زمان بیشتری برای به تعادل رسیدن سیستم نیاز دارد و از جاذب آن کاسته شده و تکامل جریان چگال دیرتر اتفاق می‌افتد افزایش شیب کانال از ۱٪ به ۳٪ زمانیکه دبی در 50 l/min قرار دارد، جاذب هستند اما با افزایش دبی جاذب بودن داده‌ها در اثر تغییر شیب کاهش یافته و به عبارتی و زمان بیشتری برای رسیدن به تکامل نیاز دارد همچنین خطوط سیر با افزایش چگالی ورودی از 1005 kg/m^3 به 1010 kg/m^3 ، و تراژکتوری‌ها در نمودار فضای فاز، بازتر شده و از جاذب آن کاسته شده و در نتیجه آشوبناکی سیستم کاهش یافته و تکامل دیرتر رخ می‌دهد به عبارتی نسبت به تغییرات کوچک اولیه

خطوط سیر در مدل شماره ۳ (تنگ‌شدگی موضعی) زمانی که دبی ورودی 50 l/min باشد تمرکز داده‌های سرعت در بازه 1 cm/s تا 5 cm/s می‌باشد و جاذب شکل گرفته است و حساسیت آن نسبت به تغییرات کوچک زیاد شده اما با افزایش دبی به 100 l/min تمرکز داده‌ها سرعت در بازه 2 cm/s الی $6/5 \text{ cm/s}$ می‌باشد و جاذب آن کاسته شده و کم کم خطوط سیر بصورت پراکنده مشاهده می‌شود به عبارتی هنگامی که دبی جریان چگال افزایش می‌یابد، تراژکتوری‌ها بیشتر حول مرکز نیم‌ساز قرار گرفته و نمودار فضای فاز آن ماکزیم‌های بالاتری از خود نشان می‌دهد و زمان بیشتری لازم دارد که سیستم به تعادل برسد و در حقیقت با افزایش دبی تکامل جریان چگال دیرتر اتفاق می‌افتد که نمودار آن در آزمایشات ۲۵ الی ۲۸ قابل مشاهده هست و به مراتب آشوبناکی سیستم کاهش می‌یابد. همچنین خطوط سیر با افزایش شیب کانال از ۱٪ به ۳٪ تمرکز داده‌ها بیشتر می‌شود و از بازه 1 cm/s تا 6 cm/s به بازه 2 cm/s تا $4/5 \text{ cm/s}$ متمرکزتر می‌شود و حالت آشوبی تری به خود می‌گیرد و نسبت به تغییرات کوچک شیب حساسیت نشان می‌دهد و تراژکتوری‌ها در آن جمع‌تر شده و زمان کمتری لازم دارد که سیستم به تعادل برسد و پایدار گردد و تکامل جریان چگال زودتر اتفاق افتاد که در آزمایشات ۲۲، ۲۴، ۲۶ و ۲۸ قابل مشاهده می‌باشد، همچنین خطوط سیر با افزایش چگالی ورودی از 1005 kg/m^3 به 1010 kg/m^3 ، تراژکتوری‌ها بازتر شده و ماکزیم‌های بیشتری از خود نشان می‌دهد و به مراتب از جاذب آن کاسته شده و نسبت به تغییرات کوچک چگالی حساسیت نشان نداده است و در حقیقت زمان بیشتری لازم دارد که به تعادل برسد و تکامل جریان چگال دیرتر اتفاق می‌افتد و آشوبناکی سیستم کاهش پیدا می‌کند.

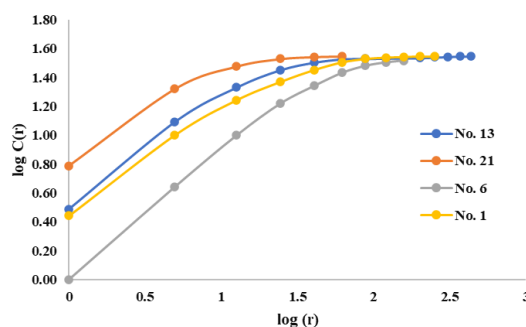
با بررسی رفتار آشوبی فضای فاز برای همه آزمایشات، هنگامیکه دبی ورودی از 50 l/min به 100 l/min افزایش یابد تراژکتوری‌های در نمودار فضای فاز بازتر شده و ماکزیم‌های بالاتری به خود گرفته است و به عبارتی با افزایش دبی، زمان بیشتری لازم است که سیستم به تعادل برسد و تکامل جریان

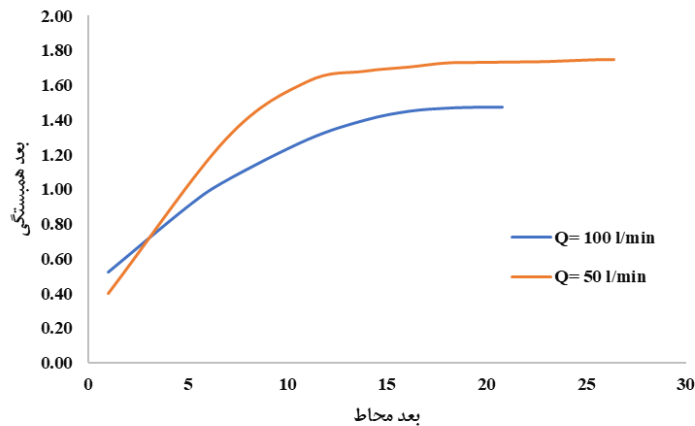
زمان بیشتری لازم دارد که به تعادل برسد و تکامل جریان چگال دیرتر اتفاق می‌افتد و و آشوبناکی سیستم کاهش پیدا می‌کند. از آنجایی که بعد همبستگی مقدار بی‌نظمی و پیچیدگی پنهان یک سامانه را تشریح می‌نماید. جهت محاسبه این بعد از مجموع همبستگی $C(t)$ بر حسب t که شعاع همبستگی می‌باشد ترسیم و در شکل ۶ نشان داده شده است. قسمتی از نمودار دارای شیب تند و قسمتی دیگر دارای شیب یکنواخت می‌باشد که هر چه میزان شیب یکنواخت تر باشد و به عبارتی طول این ناحیه بیشتر باشد، سیستم آشوبی‌تر می‌باشد و نسبت به شرایط اولیه حساس‌تر می‌باشد و هر چه قدر طول این ناحیه کم باشد سیستم از حالت آشوبی به تصادفی میل می‌نماید. به عنوان نمونه در اثر افزایش دبی جریان از 50 l/min به 100 l/min در تمامی آزمایشات طول ناحیه با شیب یکنواخت کمتر می‌باشد بطوریکه با افزایش دبی ورودی جریان چگال، حدود ۲۷ درصد طول ناحیه با شیب یکنواخت کمتر شده است و سیستم رفتار آشوبناکی کمتری از خود نشان می‌دهد اما نسبت به تغییرات شرایط اولیه حساس می‌باشد. همچنین انتخاب دامنه آشوبی سیستم، بعد همبستگی در برابر بعد نهشتن، نمودار آن رسم می‌شود و که اگر بعد همبستگی بعد از یک میزان مشخص بعد نهشتن به اشباع برسد و میزان آن افزایش نیابد. این میزان به عنوان بعد همبستگی جاذب تعریف می‌گردد که در شکل ۷ مشاهده می‌شود. بعد نهشتن حاصل شده و حداقل تعداد میزان متغیرهای لازم را برای شبیه سازی دینامیکی جاذب مشخص می‌نماید. بعد همبستگی برای مقادیر دبی بعد از یک میزان مشخص به حالت اشباع می‌رسند که این میزان برابر بعد همبستگی است که برای دبی ورودی 50 l/min در بعد محاط $13/8$ شروع به اشباع شدن می‌کند و این مقدار از $1/75$ بالاتر نمی‌رود و برای دبی ورودی 100 l/min در بعد محاط $16/1$ شروع به اشباع شدن می‌کند و این مقدار از $1/47$ بالاتر نمی‌رود. آشوبناکی سیستم در حالتی که دبی افزایش یابد کمتر است و تقریباً ۲۰ درصد دیرتر به اشباع می‌رسد و از رفتار آشوب‌پذیر بودن سیستم می‌کاهد.

ب) دبی ورودی 100 l/min

حساس نمی‌باشد. با بررسی رفتار آشوبی فضای فاز در مدل شماره ۲ (فلوم با تنگ‌شدگی ممتد)، زمانیکه دبی ورودی 50 l/min باشد تمرکز داده‌های سرعت در بازه 2 cm/s تا $4/5 \text{ cm/s}$ می‌باشد و حالت جاذب به خود گرفته است و آشوب بیشتری در آن دیده می‌شود و نسبت به تغییرات محلی کوچک حساس می‌باشد که با افزایش دبی، تراژکتوری‌ها در نمودار فضای فاز بازتر شده و به عبارتی زمان به تعادل رسیدن الگوی جریان چگال بیشتر شده و تکامل دیرتر رخ می‌دهد. همچنین خطوط سیر با افزایش شیب کانال از 1% به 3% تمرکز داده‌ها بیشتر می‌شود و حالت آشوبی‌تری به خود می‌گیرد و نسبت به تغییرات کوچک شیب حساسیت نشان می‌دهد و تراژکتوری‌ها جمع‌تر شده و تکامل زودتر رخ می‌دهد همچنین با افزایش چگالی ورودی از 1005 kg/m^3 به 1010 kg/m^3 ، خطوط سیر در نمودار فضای فاز بازتر شده و جاذب آن کاهش یافته و از آشوبی بودن آن کاسته شده و تکامل دیرتر رخ می‌دهد به عبارتی نسبت به تغییرات کوچک اولیه حساس نمی‌باشد.

با بررسی رفتار آشوبی فضای فاز در مدل شماره ۳ (فلوم با تنگ‌شدگی موضعی)، زمانیکه دبی ورودی 50 l/min باشد تمرکز داده‌های سرعت در بازه 1 cm/s تا 5 cm/s می‌باشد و جاذب بیشتری به خود گرفته است و آشوب در آن دیده می‌شود اما با افزایش دبی تراژکتوری‌ها بازتر شده و زمان به تعادل رسیدن فرآیند افزایش یافته و تکامل جریان چگال دیرتر رخ می‌دهد، همچنین خطوط سیر با افزایش شیب کانال از 1% به 3% تمرکز داده‌ها بیشتر می‌شود و از بازه 1 cm/s تا 6 cm/s به بازه 2 cm/s تا $4/5 \text{ cm/s}$ متمرکزتر می‌شود و حالت آشوبی‌تری به خود می‌گیرد و نسبت به تغییرات کوچک شیب حساسیت نشان می‌دهد و تراژکتوری‌ها جمع‌تر شده و تکامل زودتر رخ می‌دهد، همچنین خطوط سیر با افزایش چگالی ورودی از 1005 kg/m^3 به 1010 kg/m^3 تراژکتوری‌ها بازتر شده و ماکزیمم‌های بیشتری از خود نشان می‌دهد و به مراتب از جاذب آن کاسته شده و نسبت به تغییرات کوچک چگالی حساسیت نشان نداده است و در حقیقت

الف) دبی ورودی 50 l/min

شکل ۶- نمودار $\log(r)$ در مقابل تابع همبستگی برای مقادیر دبی ورودی به فلوم

شکل ۷- نمودار بعد همبستگی به ازای بعد محاط برای دبی‌های مختلف ورودی جریان چگال

نمودار فضای فاز بازتر و ماکزیم‌های بیشتری به خود گرفته است و زمان بیشتری برای به تعادل رسیدن نیاز دارد و ماهیت آشوبی جریان کمتر شده و تکامل جریان چگال دیرتر اتفاق می‌افتد و به عبارتی نسبت به تغییرات کوچک چگالی ورودی حساس نمی‌باشند.

بطور کلی با افزایش دبی و چگالی ورودی، از ماهیت آشوبناکی سیستم کاسته شده که نشان‌دهنده مولفه‌های تصادفی در فضای فاز می‌باشد و تکامل جریان چگال دیرتر رخ می‌دهد و با افزایش شیب، ماهیت آشوبناکی سیستم افزایش یافته و جاذب در نمودار فضای فاز بیشتر شده و تکامل جریان زودتر رخ می‌دهد.

در نمودارهای توزیع بعد همبستگی با افزایش دبی جریان ۲۷ درصد طول ناحیه‌ای با شیب یکنواخت کمتر شده است. بطور کلی در دبی‌های کم، سیستم آشوبناک‌تر شده و تقریباً در بعد محاط ۱۳/۸ سیستم شروع به اشباع شدن می‌نماید. پیشنهاد می‌شود جهت درک بهتر و مقایسه تکامل جریان چگال، پارامترهای هیدرولیکی جریان مانند عدد ریچاردسون و عدد فرود در جریان های نمکی بررسی گردد. همچنین اثر پرش هیدرولیکی جریان‌های چگال با استفاده توسعه فضای فاز مورد بررسی قرار گیرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با بررسی رفتار آشوبی فضای فاز برای همه آزمایش‌ها، هنگامی که دبی ورودی از ۵۰ l/min به ۱۰۰ l/min افزایش یابد تراژکتوری‌های در نمودار فضای فاز بازتر شده و ماکزیم‌های بالاتری به خود گرفته است و به عبارتی با افزایش دبی، زمان بیشتری لازم است که سیستم به تعادل برسد و تکامل جریان چگال دیرتر اتفاق می‌افتد اما ماهیت کلی تراژکتوری‌ها (خطوط سیر) جاذب بوده ولی با افزایش دبی از جاذب آن کاسته شده و آشوبناکی آن کمتر شده و نسبت به تغییرات کوچک اولیه جریان حساس نمی‌باشند.

برای همه آزمایش‌ها، با افزایش شیب از ۱٪ به ۳٪ زمانی که فلوم بدون تنگ‌شدگی هست از جاذب آن کاسته شده و در حقیقت زمان بیشتری برای به تعادل و تکامل رسیدن پدیده لازم دارد اما در عامل تنگ‌شدگی (ممتد یا موضعی) باعث گردیده که نمودار فضای فاز متمرکزتر شده و جاذب بیشتر گردد و به عبارتی تکامل جریان چگال زودتر شده و تراژکتوری‌ها بسته‌تر شده و در اثر تنگ‌شدگی با افزایش شیب فلوم، ماهیت آشوبناکی جریان بیشتر شده و نسبت به تغییرات کوچک شیب حساس‌تر می‌باشد.

برای همه آزمایش‌ها، با تغییر چگالی از 1005 kg/m^3 به 1010 kg/m^3 ، از جاذب بودن خطوط سیر کاسته شده و تراژکتوری‌ها در

References

1. Adab F. Karami H. Mousavi SF. Farzin S. Application of Chaos Theory in Modeling and Analysis of River Discharge under Different Time Scales (Case Study: Karun River). *JPHGR*. 2018; 50(3): 443-457. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/JPHGR.2018.234491.1007061>
2. Adenan N. Noorani M. Nonlinear Prediction of River Flow in Different Watershed Acreage. *KSCSE*. 2014; 18(7): 2268-2274. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0646-4>
3. Babaiynejad V. Khorsandi B. Influence of ambient flow on the behavior of dense effluent discharged into the water environment. *AJCE*.

- 2021; 53(9): 4081-4102. <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2020.18190.6798>
4. Delafrouz H. Ghaheri A. Ghorbani M. A novel hybrid neural network based on phase space reconstruction technique for daily river flow prediction. *SJR*. 2018; 22(1): 2205-2215. [In Persian]. <https://doi.org/10.1007/s00500-016-2480-8>
 5. Fahimfard S. Fattahi Mh. Shamsai A. Farzin S. Application of the Chaos Theory, the Reconstructed Phase Space and Correlation Dimensions in the Suspended Load Transport Patterns as Affected by a Dam: The Case of the Karaj River. *Water Res Eng*. 2016; 8(26): 89-100. [In Persian]. <https://doi.org/20.1001.1.20086377.1394.8.26.7.7>
 6. Fahimfard S. Shamsai A. Fattahi MH. Farzin S. 2015. The effect of the dam on the dynamics of sediment transfer of river suspended load from the perspective of chaos theory" *10th International Congress of Civil Eng*, Faculty of Civil Engineering, Tabriz. [In Persian].
 7. Farzin S. Sheikholeslami SR. Hasanzadeh Y. 2010. Analyzing the volatility of time series using phase space drawing and correlation dimension method of a case study of monthly rainfall in Lake ormia. *The 4th Iran Water Resources Manage Conf*. Amir Kabir University of Technology. Tehran. [In Persian].
 8. Fattahi MH. Tarahi M. chaotic monitoring of river flow using phase space reconstruction method. *Iran- Water Res*. 2017; 13(2): 221-225. [In Persian]. https://www.iwrr.ir/article_34197.html?lang=fa
 9. Ghorbani MA. Karimi V. Ruskeepaa H. Sivakumar B. Pham Q. Mohammadi F. Yasamin N. Application of complex networks for monthly rainfall dynamics over central Vietnam. *SERRA*. 2021; 35(1): 535-548. [In Persian]. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01962-2>
 10. Grassberger P. Procaccia I. Characterization of Strange Attractors. *Phys. Review Letters*. 1983; 50(1): 3460- 3490. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.50.346>
 11. Hong M. Wang D. Wang Y. Zeng X. Ge S. Yan H. Singh N. Mid- and long-term runoff predictions by animproved phase-space reconstruction model. *Environmental Res*. 2016; 148(1): 560–573. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.11.024>
 12. Hooshmandzade F. Yazdani M. Mousavi F. Chaotic Study and Reconstruction of the Dynamic Phase Space of Evaporation Using Chaos Theory (Case Study: Semnan Synoptic Station). *JWSS*. 2022; 26(1): 117-129. [In Persian]. <https://doi.org/10.47176/jwss.26.1.4393>
 13. Hosseini M. Zakemoshfegh M. Comparison between phase space-based local chaotic models for riverflow forecasting. *TMUJS*. 2015; 15(3): 13-24. [In Persian]. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-4895-en.html>
 14. Jiang J. Tang S. Liu R. Sivakumar B. Wu X. Tianrui P. A hybrid wavelet-Lyapunov exponent model for river water quality forecast. *Journal of Hydro*. 2021; 23(4): 864-878. <https://10.2166/hydro.2021.023>.
 15. Jiang Y. Bao X. Hao S. Zhao H. Li X. Wu X. Monthly Streamflow Forecasting Using ELM-IPSO Based on Phase Space Reconstruction. *Water Res Manag*. 2020; 34(1): 3515-3531. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02631-3>
 16. Jin Y. Li X. Zhao M. Liu X. Li H. A mathematical model of fluid flow in tight porous media based on fractal assumptions. *JHMT*. 2017; 108(1): 1078–1088. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.096>
 17. Khatibi R. Sivakumar B. Ghorbani M.A. Kisi O. Kocak K. Farsadizadeh D. Investigating chaos in river stage and discharge time series. *Journal of Hydro*. 2012; 414(1): 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.026>
 18. Lorenz E. The Local Structure of Chaotic Attractor in Four Dimensions. *Physica D: Non Phenomena*. 1984; 13(1): 90-104. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(84\)90272-0](https://doi.org/10.1016/0167-2789(84)90272-0)
 19. Major J. Zheng S. Mosbrucker A. Spicer K. Christianson T. Thorne C. Multidecadal Geomorphic Evolution of a Profoundly Disturbed Gravel Bed River System—A Complex, Nonlinear Response and Its Impact on Sediment Delivery. *Journal of Geo Res*. 2019; 124(5): 1281-1309. <https://doi.org/10.1029/2018JF004843>
 20. Rezaei H. Garebahi P. Khani Z. Mirabbasi R. Monthly flow analysis of Sefidrood River using Chaos theory. *WSMM*. 2021; 2(1): 27-41. [In Persian]. <https://doi.org/10.22098/MMWS.2021.9431.1043>
 21. Rolim LZ. Souzafilho F. Exploring spatiotemporal chaos in hydrological data: evidence from Ceará, Brazil. *SERRS*. 2023; 37(1): 4513-4537. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02501-5>
 22. Sivakumar B. Jayawardena AW. Fernando T. River flow forecasting: use of phase-space reconstruction and artificial neural networks approaches. *Journal of Hydro*. 2022; 265(1): 225-245. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00112-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00112-9)
 23. Tao H. Sulaiman S. Yaseen Z. Asadi H. Mehram S. Ghorbani M. What Is the Potential of Integrating Phase Space Reconstruction with

- SVM-FFA Data-Intelligence Model? Application of Rainfall Forecasting over Regional Scale. *Water Res Manag.* 2018; 32(1): 3935-3959. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2028-z>
24. Uuyang Q. Lu W. Xin X. Zhang Y. Cheng W. Yu T. Monthly Rainfall Forecasting Using EEMD-SVR Based on Phase-Space Reconstruction. *Water Res Manag.* 2016; 30(1): 2311-2325. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1288-8>
25. Zounemat M. Amirkhani Kh. Efficiency Assessment of Local Prediction Method Considering Reconstruction of Phase Space and Artificial Neural Network Model for Prediction of Runoff (Case Study: Pole-Kohneh Station, Kermanshah). *Ferdowsi Civil Eng.* 2016; 28(2): 91-108. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/CIVIL.V28I2.41135>



Laboratory Study of Hydraulic Characteristics of Density Current with Phase Space Theory Analysis

Mohammad Hosseini*

Department of Civil Engineering, Meymand Center, Firoozabad Branch, Islamic Azad University, Firoozabad, Iran.

Mohammad Shabani

Department of Water Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

Extended Abstract

Received: 24 Jan 2024

Accepted: 16 Mar 2024

Keywords: Density current, Phase space, Trajectory, Absorber, Surrounding Dimension.

Introduction: Density currents are created due to the entry of a heavier fluid into a lighter fluid due to the acceleration of the earth's gravity. Density current is non-linear in nature and is sensitive to initial conditions. The time evolution of the dense flow is expressed using trajectory lines in the phase space. The purpose of this research is to extract information hidden inside the system using the phase space theory regarding the evolution of the dense flow with changes in the hydraulic parameters of the dense flow input, so that the nature of the system and the formed pattern of the dense flow can be expressed in the bed of time.

Materials and Methods: Density current was conducted with 28 different tests in a laboratory flume with a length of 8 m, a width of 35 cm and a height of 60 cm by changing the slope, concentration and inlet flow rate. In order to describe the system, using the phase space theory, the time signal was transmitted as an object in space, and the analysis in space replaced the analysis in time.

Results and Discussion: With the increase of the slope, the data concentration is drawn on the semi-conductor and moves from top to bottom. When the inlet flow rate is 50 l/min, the concentration of the speed data is in the range of 2 cm/s to 4.5 cm/s, and it has taken on an absorbing state, and more chaos is seen in it. By changing the density from 1005 kg/m³ to 1010 kg/m³, the absorption of flow lines is reduced and the trajectories in the phase space diagram are more open and have more maxima.

Conclusion: By increasing the slope from 1% to 3%, when the flume is without narrowing, its absorber is reduced and in fact it takes more time to reach the equilibrium and evolution of the phenomenon, but due to continuous or local narrowing, becomes more absorbent. In general, with the increase of the slope, the evolution of the flow occurs earlier. The system begins to saturate in the surrounding dimension of 13.8.

Corresponding author: Mohammad Hosseini

Address: Meymand Center, Firoozabad Branch, Islamic Azad University, Firoozabad. **Tel:** +989177023348

Email: m.h.8894@gmail.com

Citation: Hosseini M, Shabani M. Laboratory Study of Hydraulic Characteristics of Density Current with Phase Space Theory Analysis. Journal of New Researches in Environmental Engineering. 2024; 1(4): 40-55.



© 2024, This article published in Journal of New Researches in Environmental Engineering (JNREE) as an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>). Non-commercial use, distribution and reproduction of this article is permitted in any medium, provided the original work is properly cited.