

ارزیابی آزمایشگاهی روند ایجاد آشفته‌گی جریان در دریچه‌ی کنترل تخلیه‌کننده‌ی تحتانی سد بر پایه‌ی نظریه‌ی کولموگروف

محمدحسین میرآبی* (دانشجوی دکتری)

احسان جباری (دانشیار)

طاهر رجایی (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم

کیوان سیدی نیازی (هم‌پای)

بزهشکده‌ی مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۴۰۱)
دوره ۲ - ۳۸، شماره ۱/۱، ص. ۱۳۴-۱۳۳، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، بارگذاری نوسانی دریچه‌ی کنترل در مدل آزمایشگاهی تخلیه‌کننده‌ی تحتانی سد ارزیابی شده است. با استفاده از روش پردازش تصاویر جریان زیر دریچه‌ی کنترل و سری‌های زمانی، نوسان‌های میدان‌های سرعت و فشار استاتیکی، تولید، انتقال و استهلاك ادی‌های جریان آشفته بر پایه‌ی نظریه‌ی کولموگروف بررسی شده‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهند که علل آشفته‌گی جریان به این شرح هستند: ۱) درگشودگی ۱۰٪ دریچه‌ی کنترل، ادی‌های بزرگ خطوط جریان میانی و نیمه‌ی پایینی مجرای بالادست دریچه. ۲) درگشودگی ۳٪ دریچه‌ی کنترل، ادی‌های بزرگ خطوط جریان نیمه‌ی پایینی مجرای بالادست دریچه. ۳) درگشودگی‌های ۵° و ۷° درصد دریچه‌ی کنترل، ادی‌های بزرگ خطوط جریان نیمه‌ی بالایی مجرای بالادست دریچه. بر اساس نتایج اخیر در گشودگی‌های کمتر دریچه‌ی کنترل، خطوط میانی و نیمه‌ی پایینی جریان مجرای بالادست درگشودگی‌های بیشتر، خطوط نیمه‌ی بالایی جریان مجرای بالادست، بیشترین نقش را در تولید ادی‌های کولموگروف و ایجاد آشفته‌گی ایفا کرده‌اند. ادی‌های بزرگ مذکور با ابعادی در حدود ۷/۵ تا ۲۵ میلی‌متر، بسامدی در محدوده‌ی ۱/ تا ۲ هرتز دارند.

واژگان کلیدی: تخلیه‌کننده‌ی تحتانی سد، جریان آشفته، ادی، کولموگروف، مدل آزمایشگاهی.

۱. مقدمه

دریچه‌ی کنترل جریان در تخلیه‌کننده‌ی تحتانی سدها، اهمیت زیادی دارد و در هنگام سیلاب، عملکرد مناسب آن برای تخلیه‌ی حجم مازاد مخزن سد حیاتی است. به دلیل سرعت زیاد و آشفته‌گی جریان، نوسان‌های فشار استاتیکی در زیر دریچه‌ی کنترل، باعث ایجاد بارگذاری نوسانی در دریچه و بروز مشکلاتی در عملکرد مکانیکی آن می‌شوند. این مشکلات می‌توانند در درازمدت، سامانه‌ی حرکتی بخش‌های متحرک دریچه را تحت تأثیر قرار دهند. شناخت و ارزیابی چگونگی ایجاد نوسان‌های فشار استاتیکی جریان در زیر دریچه، کنترل و کاهش آثار آن را در دریچه موجب می‌شود. کولموگروف (۱۹۶۲)،^[۱] ساختار جریان آشفته در رقوم بالای عدد رینولدز را ارزیابی کرد و با استناد به مطالعات ریچاردسون پیرامون ابعاد و اندازه‌ی ساختارهای چرخشی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۷/۷/۱۴۰۰، اصلاحیه ۶/۹/۱۴۰۰، پذیرش ۱۵/۹/۱۴۰۰.

DOI:10.24200/J30.2021.59129.3030

mh.mirabi@hotmail.com
ehsan.jabbari@gmail.com
taher.rajaee@yahoo.com
ksniaki@yahoo.com

موجود در جریان آشفته (ادی‌ها^۱) و توسعه‌ی نظریه‌ی آبشار انرژی^۲، مکانیزم تولید، انتقال و استهلاك انرژی جنبشی آشفته‌ی جریان را توسعه داد. راجاراتام و سورامانیا^۳ (۱۹۶۷)،^[۱] یک معادله‌ی عمومی را برای توضیح جریان عبوری آزاد از زیر دریچه‌ی کنترل قائم در کانال مستطیلی به دست آوردند و برای معادله مذکور، رابطه‌ی تکانه را در جریان زیر دریچه‌ی کنترل به کار گرفتند. راجاراتام (۱۹۷۷)،^[۲] با بررسی پروفیل‌های سطح آب در کانال‌های مستطیلی بعد از دریچه‌ی کنترل، دریافت که پروفیل‌های مذکور با یکدیگر مشابه هستند. این موضوع نشان می‌داد که ضریب همگرایی جریان، از مقادیر پیش‌بینی شده توسط مطالعات تئوری بزرگ‌ترند و این نمی‌تواند فقط از اثر لایه‌ی مرزی ناشی شود. راجاراتام و هامفریز^۴ (۱۹۸۲)،^[۲] نتایج آزمایشگاهی رفتار جریان در بالادست دریچه‌ی کنترل قائم هم‌عرض با کانال مستطیلی را ارزیابی کردند. مطالعات ایشان پیرامون هندسه‌ی ادی‌های سطح جریان، نقص فشار در کف کانال، میدان سرعت در همگرایی پایین دست و با جت خروجی

صورت پذیرفته است. فانگ و ناداشر^۵ (۱۹۸۶)،^[۵] نوسان‌ها و نیروهای دینامیکی وارد بر دریچه‌های مستطیلی قائم در جریان روباز را بررسی کردند و دریافتند که در محدوده‌ی سرعت کم، نوسان‌های دریچه توسط اندرکنش دینامیکی بین رفتار کشسانی دریچه‌ی کنترل و لایه‌ی برشی ناپایدار زیر آن رخ می‌دهد. مونتس^۶ (۱۹۹۷)،^[۶] یک روش عددی برای حل جریان غیرلزج در زیر دریچه‌ی مسطح ارائه کرد. مقایسه‌ی نتایج روش عددی با نتایج آزمایشگاهی، تطابق مناسبی برای پروفیل سطح آب و میدان‌های سرعت و فشار نشان می‌داد. وی همچنین اختلاف ضریب همگرایی جریان غیرلزج در حل عددی و نتایج آزمایشگاهی را ارزیابی کرد. روث و هگر^۷ (۱۹۹۹)،^[۷] اثر لزجت و تنش سطحی را بررسی کردند و با به کارگیری قانون تشابه فرود، گشودگی‌های کوچک دریچه‌ی کنترل، تابعی از عرض کانال در نظر گرفته شد. المان‌های ضدگرداب به کار رفته، ۵۰٪ امواج ضربه‌یی را در مقایسه با حالت عادی کاهش دادند. نگاهاشی و اوهتسو^۸ (۲۰۱۷)،^[۸] نفوذ هوا داخل پرش هیدرولیکی ایجاد شده در قسمت زیر دریچه‌ی کنترل را مطالعه و جریان فوق را به دو قسمت انتقال - انتشار و شکست تفکیک کردند و دریافتند که تمرکز هوا در قسمت شکست، تقریباً مستقل از شرایط ورودی توسعه‌ی لایه‌ی مرزی است. آنها همچنین مکانیزم هواده‌ی در پرش هیدرولیکی هر دو قسمت را توضیح دادند. لی و همکاران (۲۰۱۸)،^[۹] روش کاهش نوسان‌های ناشی از جریان در دریچه‌ی کنترل رادیال را برای بهره‌برداری نرمال و طولانی‌مدت ارزیابی کردند. ایشان یک صفحه‌ی مکمل در قسمت پایین سطح بالادست دریچه نصب و رفتار اندرکنش سیال و سازه را تحلیل کردند و دریافتند که شتاب نوسان‌ها به میزان ۷۰٪ کاهش یافته است. میرآبی و منصور (۲۰۱۸)،^[۱۰] نشان دادند در جریان‌هایی با آشفته‌گی متغیر، مانند جت‌های مستغرق تحت تأثیر دیواره، مدل ریاضی آشفته‌گی تنش رینولدز در کنار معادلات ناویر استوکس آشفته، دقت بالایی از خود نشان می‌دهد. نتایج کار ایشان بیان‌گر آن بود که نرم‌کنش فشاری و نرم‌استهلاک انرژی جنبشی آشفته در معادله‌ی آشفته‌گی تنش رینولدز، به دقت پیش‌بینی‌ها افزایش می‌یابد. فلدر^۹ و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۱] توزیع و مشخصات جریان دوفازی آب - هوا را در طول تونل انتقال ارزیابی کردند و دریافتند که افزایش هواده‌ی جریان، با افزایش هد بالادست و سرعت جریان انجام می‌پذیرد. میرآبی و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۲] با مطالعه‌ی رفتار سازه‌ی تاج و گلوگاه سرریز نیلوفری طی سه سناریوی مختلف، میزان تنش‌های ناشی از بارگذاری نوسانی جریان را بر پیکر سازه سرریز محاسبه کردند و دریافتند که بحرانی‌ترین حالت، طی سناریوی شروع حرکت سیلاب بر روی تاج سرریز ایجاد می‌شود.

در پژوهش حاضر، چگونگی ایجاد آشفته‌گی در جریان دریچه‌ی کنترل تخلیه‌کننده‌ی تحتانی سد ارزیابی شده است. برای نیل به این موضوع، مدل آزمایشگاهی تخلیه‌کننده‌ی تحتانی سد با مقطع مستطیلی ساخته شده است. به کمک پردازش تصاویر برداشت شده از جریان و سری‌های زمانی به دست آمده از حس‌گرهای الکترونیکی میدان‌های سرعت و فشار استاتیکی، رفتار ادی‌های جریان زیر دریچه‌ی کنترل مطالعه شده است. نوسان‌های میدان فشار استاتیکی زیر دریچه‌ی کنترل و متعاقباً نوسان دریچه، متأثر از رفتار ادی‌های مذکور هستند. با تحلیل مکانیزم‌های تولید، انتقال و استهلاک ادی‌های جریان عبوری دریچه‌ی کنترل، از عوامل ایجاد آشفته‌گی مشخص شده‌اند.

پژوهش‌دهی مکانیک سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ساخته شد. مدل آزمایشگاهی مذکور از ۶ قسمت اصلی تشکیل شده است. قسمت اول، مخزن ۳۰۰۰ لیتری ایستاده به ارتفاع ۳ متر در بالادست از جنس فولاد، که هد‌های مورد نیاز جریان را تأمین می‌کند. برای جلوگیری از ایجاد تلاطم سطح آب داخل مخزن هنگام ورود جریان، از دو فیلتر سنگی درشت‌دانه در مقابل ورودی مخزن استفاده شده است. در حقیقت، مخزن مذکور برای ایجاد شرایط واقعی مخزن سد اجرا شده است. قسمت دوم، مجرای جریان تحت فشار است، که در قسمت پایین دست مخزن ایستاده قرار دارد. مجرا به طول ۱ متر و سطح مقطع آن مستطیلی و به ابعاد $3^m \times 0.23^m$ بوده است. دیواره‌های بالا، پایین و یک سمت مجرا از جنس HDPE^{۱۰} و سمت دیگر آن برای مشاهده‌ی الگوی جریان، از جنس پلکسی‌گلس^{۱۱} بوده است. جریان در قسمت ذکر شده، کاملاً تحت فشار است. قسمت سوم، مجموعه‌ی سیستم کنترل جریان مشتمل بر دریچه‌ی متحرک به همراه قاب ثابت آن است. دریچه‌ی متحرک در داخل قاب، قابل حرکت با یک درجه‌ی آزادی در راستای قائم است. قاب ثابت دریچه از قسمت بالادست، به مجرای تحت فشار و از قسمت پایین دست، به مجرای آزاد متصل شده است. گستره‌ی بازشدگی دریچه از ۰ الی ۱۰۰ درصد و زاویه‌ی زیرین آن صفر درجه است. برای آب‌بند کردن دریچه، شیارهایی در طرفین و زیر قاب ثابت در نظر گرفته شده است. قسمت چهارم، مجرای تخلیه‌ی جریان با سطح آزاد است، که طول آن ۳ متر و سطح مقطع آن مستطیلی و به ابعاد $45^m \times 0.3^m$ بوده است. دیواره‌های بالا، پایین و یک سمت مجرا از جنس فولاد و سمت دیگر آن برای مشاهده‌ی الگوی جریان، از جنس پلکسی‌گلس است. جریان در این قسمت کاملاً آزاد و ترکیبی از آب و هواست. قسمت پنجم، مخزن ۲۰۰۰ لیتری افقی از جنس فولاد است، که در پایین دست قسمت مجرای آزاد قرار دارد و وظیفه‌ی آن جمع‌آوری جریان تخلیه شده از مجرای است. قسمت ششم، سامانه‌ی پمپاژ جریان است. لوله‌ی پلی‌اتیلن PN۱۶ به قطر داخلی ۲۰۰ میلی‌متر، جریان را از مخزن پایین دست به دهانه‌ی مکش پمپ هدایت می‌کند. این قسمت از دو بخش الکتروموتور الفائی آسنکرون^{۱۲} و پمپ گریز از مرکز حلزونی تشکیل شده است. شفت دورانی الکتروموتور و پمپ، توسط کوپلینگ^{۱۳} به یکدیگر متصل شده‌اند. پمپ گریز از مرکز حلزونی می‌تواند در نقطه‌ی کاری با راندمان حدود ۸۲٪، آب را با دبی حدود ۱۰۰ لیتر بر ثانیه در هر ۸ متر تحویل دهد. دبی پمپ در حالت تحویل آزاد^{۱۴} در حدود ۱۵۰ لیتر بر ثانیه است. جنس بدنه‌ی پمپ از چدن و سرعت دورانی پروانه، ۱۴۵ دور بر دقیقه است. قوای محرکه‌ی پمپ گریز از مرکز، از الکتروموتور آسنکرون با توان شفت ۱۵ کیلووات تأمین می‌شود. تغذیه‌ی الکتریکی الکتروموتور به صورت جریان سه‌فاز است. برای کنترل دبی، از ترکیب یک شیر پروانه‌یی و یک اینورتر درایو استفاده شده است. شیر پروانه‌یی در محل لوله‌ی رانش پمپ قرار دارد و با توجه به میزان گشودگی، می‌تواند هد‌های مختلفی را برای پمپ ایجاد کند. اینورتر درایو نیز با تغییر بسامد برق ورودی الکتروموتور آسنکرون، سرعت دورانی شفت را تغییر می‌دهد. برای این کار از اینورتر درایو IIS مدل IP۵A با توان ۲۰ کیلووات استفاده شده است. در نهایت، لوله‌ی رانش پمپ گریز از مرکز، به کلکتور اتصال یافته و دو لوله‌ی فولادی با قطرهای ۲۰۰ میلی‌متر به مخزن ایستاده‌ی بالادست متصل شده است، تا سیکل جریان کامل شود. در شکل‌های ۱ الی ۴، قسمت‌های مختلف تخلیه‌کننده‌ی تحتانی مشاهده می‌شوند.

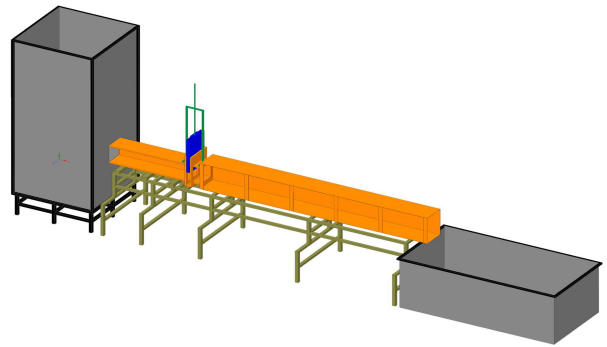
۱.۲. اندازه‌گیری پارامترهای جریان

برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان در مدل آزمایشگاهی، حس‌گرهایی استفاده شده

۲. مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی تخلیه‌کننده‌ی تحتانی سد، مجهز به دریچه‌ی کنترل جریان، در

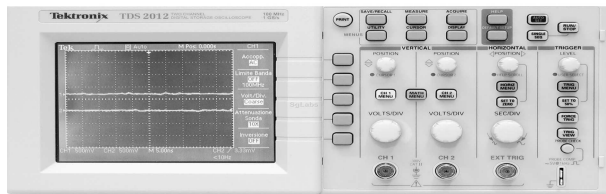
است که بزرگی و نوسان‌های فشار استاتیکی و سرعت جریان را اندازه می‌گیرند. اندازه‌گیری‌ها در مجرای تحت فشار، قسمت‌های مختلف دریچه‌ی کنترل جریان، قاب ثابت دریچه‌ی کنترل و مجرای جریان با سطح آزاد انجام شده است. ۱۰ مانومتر در قسمت مجرای کنترل تحت فشار، ۱۲ مانومتر در بخش متحرک قسمت دریچه‌ی کنترل و ۶ مانومتر در فریم ثابت قسمت دریچه‌ی کنترل، فشار استاتیکی جریان را اندازه‌گیری می‌کنند. مانومترهای بخش متحرک قسمت دریچه‌ی کنترل، در زیر و کنار آن توزیع شده‌اند. برای اندازه‌گیری سرعت جریان از دستگاه ADV^{۱۵} و مانومتر فشار دینامیکی استفاده شده است. داده‌های فشار استاتیکی و دینامیک جریان به کمک حسگر فشار Omega و حسگرهای پیزوالکتریک^{۱۶} اندازه‌گیری می‌شوند. داده‌های ذکر شده توسط اسیلوسکوپ ۲۰۱۲ Tektronix جمع‌آوری شده و به کمک کارت پیمان‌نامه مدباس^{۱۷}، به رایانه منتقل شده است. در شکل ۵، تصاویر دستگاه‌های اندازه‌گیری استفاده شده مشاهده می‌شوند. برای اطمینان از صحت اندازه‌گیری دستگاه‌های به کار رفته برای انجام آزمایش‌ها، گواهی کالیبراسیون آنها قبلاً از مؤسسات دارای صلاحیت ارائه‌ی گواهی‌نامه کالیبراسیون اخذ شده است. آزمایش‌ها بر اساس ترکیبی از هدهای مختلف مخزن بالادست و درصدگشودگی دریچه‌ی کنترل انجام شده‌اند. اندازه‌گیری دبی‌ها با سه روش حجمی، محاسبه‌ی پروفیل سرعت جریان و منحنی‌های فشار استاتیکی - دبی پمپ‌گریز از مرکز انجام می‌شود. برای افزایش دقت در اندازه‌گیری دبی‌ها، از هر سه روش استفاده شده است. پس از اندازه‌گیری هر دبی، سری زمانی فشار استاتیکی و سرعت نوسانی قسمت‌های



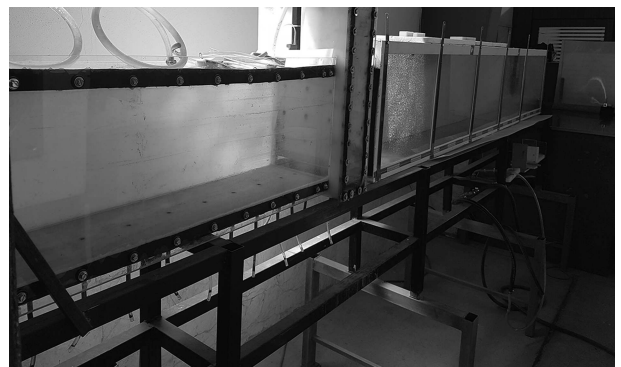
شکل ۱. شکل شماتیک سه بعدی از کل مجموعه‌ی مدل آزمایشگاهی.



شکل ۲. نمای قسمت‌های مخزن بالادست، مجرای تحت فشار، دریچه‌ی کنترل و مجرای جریان آزاد.



شکل ۵. دستگاه اسیلوسکوپ Tektronix (بالا)، حسگر ADV (پایین سمت راست) و حسگر فشار (پایین، سمت چپ).



شکل ۳. نمای قسمت‌های مجرای تحت فشار، دریچه‌ی کنترل، مجرای جریان آزاد و مخزن پایین دست.



شکل ۴. نمای قسمت‌های دریچه‌ی کنترل به همراه هاوزینگ دریچه (شکل راست) و مجموعه‌ی الکتروموتور آسنکرون جفت شده به شفت دورانی پمپ‌گریز از مرکز و تجهیزات جانبی آن (شکل چپ).



شکل ۶. نمونه‌ی الگوی متلاطم جریان عبوری از زیر دریچه‌ی کنترل درگشودگی ۳۰٪.



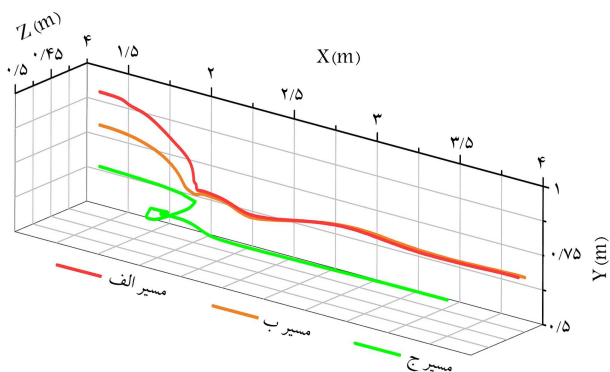
شکل ۷. نمای فوقانی شکل ۶ از وضعیت تلاطم جریان عبوری از زیر دریچه‌ی کنترل.

۳. تحلیل نتایج

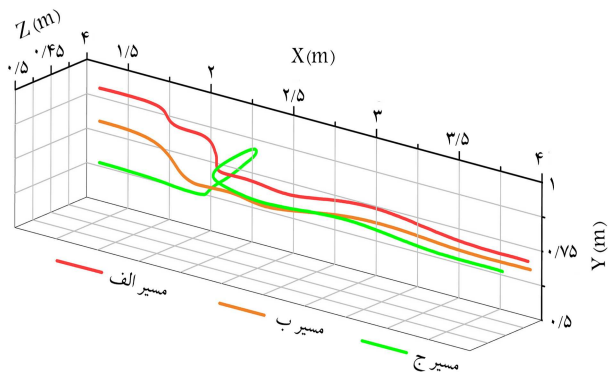
جریان گذرنده از زیر دریچه‌ی کنترل تخلیه‌کننده‌ی تحتانی سد، همواره تحت بارگذاری نوسانی ناشی از آشفته‌گی جریان است. برای درک بهتر رفتار آشفته‌گی جریان در هنگام عبور از زیر دریچه‌ی کنترل، باید مسیر حرکت و وضعیت نوسان‌های میدان‌های فشار و سرعت جریان ارزیابی شوند. درگشودگی‌های مختلف دریچه، آشفته‌گی و تلاطم جریان گذرنده از زیر آن قابل مشاهده است. در شکل‌های ۶ و ۷، نمونه‌ی جریان عبوری از زیر دریچه‌ی کنترل درگشودگی ۳۰٪ مشاهده می‌شوند.

با توجه به شکل‌های ۶ و ۷، عبور جریان آشفته از زیر دریچه‌ی کنترل، باعث بارگذاری نوسانی با آهنگ نامنظم بر آن می‌شود. مقدار بزرگی و بسامد نوسان‌ها در میدان فشار استاتیکی، با گشودگی‌های مختلف دریچه تغییر می‌کند. بنابراین استفاده از دریچه‌ی کنترل درگشودگی‌های مختلف و مدت زمان کارکرد طولانی، می‌تواند مشکلاتی را برای دریچه‌ی کنترل ایجاد کند. برای کاهش نوسان‌های دریچه، لازم است عامل بارگذاری نوسانی آن به درستی شناخته شود. در صورتی که نوسان‌های میدان فشار استاتیکی در مجاورت دریچه‌ی کنترل کاهش یابند، میزان بارگذاری نوسانی بر دریچه کاهش می‌یابد و نوسان‌های آن کم می‌شوند. مسیر حرکت جریان از زیر دریچه‌ی کنترل، یکی از پارامترهای مهم در شناخت عوامل ایجادکننده‌ی نوسان است. بر پایه‌ی نظریه‌ی کولموگروف، جریان در طی مسیر ذکر شده، نکانه‌ی خود را با دیواره‌ی جامد دریچه‌ی کنترل تبادل می‌کند و با تغییرات نسبتاً سریع میدان سرعت، نوسان‌های میدان فشار استاتیکی پدیدار می‌شوند. در شکل‌های ۸ الی ۱۱، خطوط سیر جریان در سه مسیر انتخابی مختلف، که طی ۴ گشودگی ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد به دست آمده‌اند، مشاهده می‌شوند.

سه مسیر نشان داده شده در شکل‌ها، نمونه‌یی از چندین مسیر عکس‌برداری شده هستند، که آشفته‌گی نسبی مناسبی را برای نمایش و ارزیابی از خود نشان



شکل ۸. مسیر خطوط جریان درگشودگی ۱۰٪ دریچه‌ی کنترل.



شکل ۹. مسیر خطوط جریان درگشودگی ۳۰٪ دریچه‌ی کنترل.

تعقیب میدان سرعت مسیر حرکت جریان، نوسان‌های مکانی سریع رؤیت می‌شود. پس از اندازه‌گیری سرعت در سه جهت محور مختصات، سری‌های زمانی به دست می‌آیند. با استفاده از سری‌های زمانی، تولید، استهلاک و خالص انرژی آشفته جریان محاسبه می‌شوند. برای محاسبه پارامترهای آشفستگی جریان، روابط ۱ الی ۵ استفاده می‌شوند:^[۱۲]

$$\bar{F}_T(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(x, t) dt \quad (۱)$$

$$u = \bar{U} + u' \quad (۲)$$

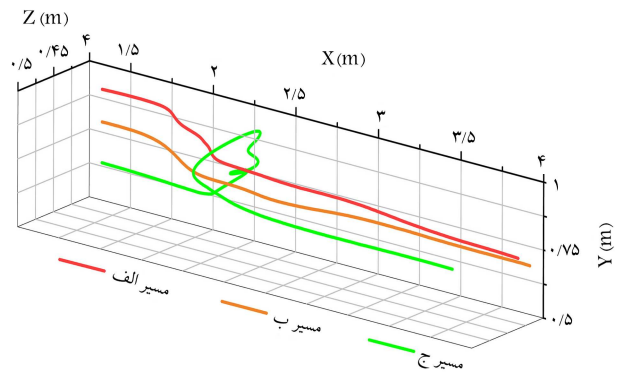
$$P_{ij} = - \left(\overline{\rho u'_j u'_k} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_k} + \overline{\rho u'_i u'_k} \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_k} \right) \quad (۳)$$

$$\rho \varepsilon_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u'_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} + \left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u'_k}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right] \quad (۴)$$

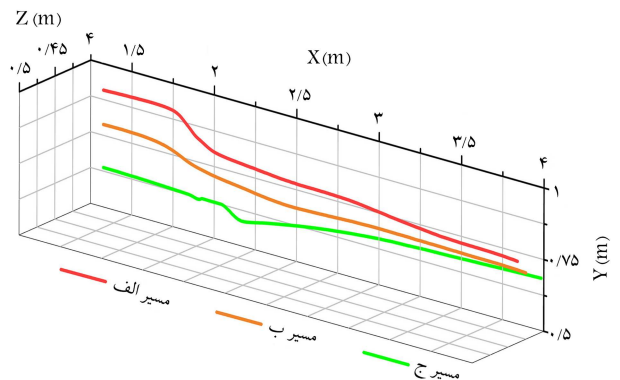
$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (۵)$$

که در آنها، $f(x, t)$ میدان جریان، $\bar{F}_T(x)$ میدان جریان متوسط‌گیری شده در بازه زمانی T توسط رابطه رینولدز، u' قسمت نوسانی میدان سرعت، U قسمت غیرنوسانی میدان سرعت، u میدان سرعت لحظه‌ی جریان P_{ij} مؤلفه‌های تولید انرژی جنبشی آشفته، ε_{ij} مؤلفه‌های استهلاک انرژی جنبشی آشفته و k انرژی جنبشی آشفته هستند. روابط اخیر از مهم‌ترین روابط ارزیابی وضعیت آشفستگی جریان هستند. روابط ۱ و ۲، روش متوسط‌گیری رینولدز برای معادله‌های انتقال تکانه و آشفستگی هستند. روابط ۳ و ۴، به ترتیب بیان‌گر تولید و استهلاک انرژی جنبشی آشفته از طریق گرادیان‌های میدان سرعت نوسانی جریان هستند. انرژی جنبشی آشفته حاصل از رابطه‌ی ۵ نیز از اثر تبدیل دو رابطه‌ی ۱ و ۲ بر روی میدان سرعت نوسانی حاصل می‌شود. این تبدیل منجر به ایجاد تانسور تنش آشفته جریان می‌شود. همان‌طور که مشخص است، پارامتر اساسی برای یافتن متغیرهای مورد نظر، میدان سرعت لحظه‌ی جریان است. در شکل‌های ۱۲ الی ۱۷، نتایج حاصل از پارامترهای آشفستگی و میدان سرعت در سه راستای محور مختصات در گشودگی ۱۰٪ در چیهی کنترل مشاهده می‌شوند.

محور افقی شکل‌های ۱۲ الی ۱۷، معرف خط سیر حرکت جریان در هر یک از مسیرهای شکل ۸ است. مترای ۵/۰ در شکل‌های اخیر، لیه‌ی بالادست در چیهی کنترل است. تولید و استهلاک انرژی جنبشی آشفته در مترای ۵/۰ تا ۱ در مسیر ج بیشترین مقدار را داشته است. با توجه به شکل ۸، مسیر ج، خط سیر انحرافی از مسیر مستقیم دارد. این موضوع نشان‌دهنده‌ی آن است که بر پایه‌ی نظریه‌ی کولموگوروف، تولید و استهلاک انرژی جنبشی در مسیر ج، تمایل به ایجاد ادی‌های بزرگ و واپاشی آنها به اندازه‌های کوچک‌تر و نابودی آنها در قسمت زیرین در چیهی کنترل دارد. وضعیت موجود انرژی جنبشی آشفته در طول خط سیر جریان، گواه مطلب مذکور است. در مترای ۷۵/۰، میزان انرژی جنبشی آشفته به صورت ناگهانی افزایش یافته و پس از اوج‌گیری در مترای ۸۵/۰، به صورت ناگهانی دچار افت شده است. این محدوده، در فاصله‌ی ۱۵/۰ متری از پایین‌دست در چیهی کنترل قرار دارد. ادی‌های بزرگ با انرژی بالاتر کولموگوروف، توانایی بیشتری در ایجاد نوسان‌ها با دامنه‌ی بزرگ‌تر و بسامد کمتر دارند.^[۱] لذا میدان سرعت در سه راستای مختصات، دست‌خوش تغییرات ناگهانی مکانی می‌شوند. تغییرات بزرگ‌تر عمدتاً توسط ادی‌های بزرگ‌تر با انرژی بالاتر ایجاد می‌شود و تغییرات کوچک‌تر توسط ادی‌های کوچک‌تر انجام می‌پذیرد. با توجه به شکل‌های ۱۲ الی ۱۴، مسیر ج در محدوده‌ی تقریبی مترای ۵/۰ تا ۶/۰ واقع در زیر در چیهی کنترل، بیشترین سهم در تولید ادی‌ها را

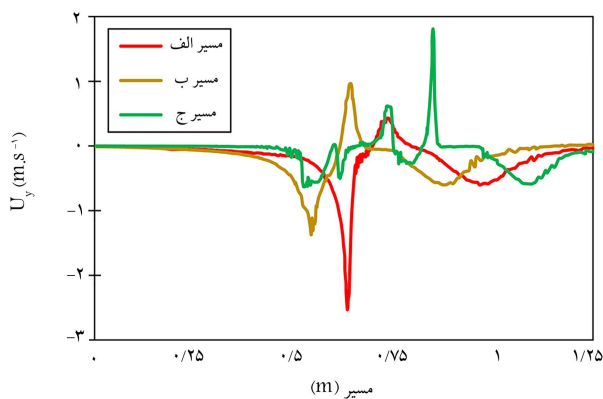


شکل ۱۰. مسیر خطوط جریان در گشودگی ۵٪ در چیهی کنترل.

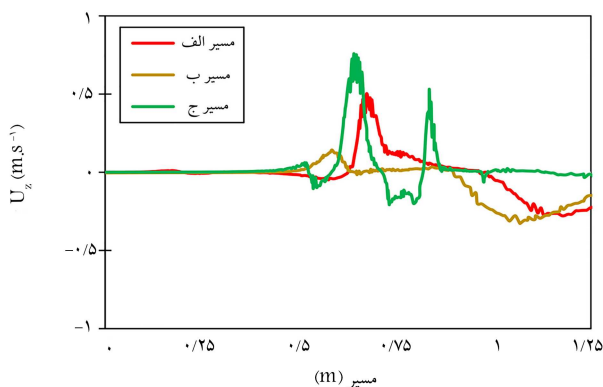


شکل ۱۱. مسیر خطوط جریان در گشودگی ۷٪ در چیهی کنترل.

داده‌اند. نقطه‌ی صفر مختصات راستای X ، منطبق بر دهانه‌ی ورودی مجرای تحت فشار است. دیواره‌ی بالادست در چیهی کنترل در مترای ۲/۰ و دیواره‌ی پایین‌دست آن در مترای ۱۱/۲ راستای X قرار دارند. در مترای بزرگ‌تر از ۲۳/۲ راستای X ، ابتدای مجرای جریان آزاد قرار گرفته است. با توجه به شکل‌های اشاره شده، مسیرهای حرکت جریان در هنگام رسیدن به در چیهی کنترل، عمدتاً در راستای منفی محور Y حرکت می‌کنند. در برخی از مسیرها به دلیل وجود جریان‌های ثانویه‌ی قوی ناشی از گرادیان‌های فشار استاتیکی آشفته، جابه‌جایی در راستای محور Z نیز مشاهده می‌شود. هر شکل شامل سه مسیر با مبادی مختصاتی مختلف است. این مبادی مختصاتی در تمامی شکل‌ها یکسان هستند. اما با توجه به گشودگی‌های مختلف در چیهی کنترل، مسیر حرکت آنها در مقایسه با سایر گشودگی‌ها متفاوت است. نوسان‌ها در در چیهی کنترل، هنگامی رخ می‌دهند که در هر مسیر حرکت جریان، نوسان‌های سریع مکانی میدان سرعت در هر سه جهت مختصاتی، فشار استاتیکی آن محدوده را به نوسان وادارد. هر چه تغییرات میدان سرعت در بازه‌ی پیمایش کوتاه‌تر، تغییرات بزرگ‌تری داشته باشد، میزان تغییرات میدان فشار استاتیکی، بزرگ‌تر خواهد بود. بنابراین تبادل تکانه‌ی متغیر جریان با دیواره‌ی در چیهی کنترل، مستلزم وجود آشفستگی در جریان و تغییرات مکانی سریع در میدان سرعت است. مطابق شکل‌های ۸ الی ۱۱ مشخص است که مسیر ج، بیشترین تأثیر را از جریان‌های ثانویه‌ی آشفته پذیرفته و پدیده‌ی اخیر در گشودگی‌های مختلف در چیهی کنترل رؤیت است. اما مسیرهای الف و ب، کمتر تحت تأثیر جریان‌های ثانویه هستند. این احتمال وجود دارد که تغییرات سریع در میدان سرعت مسیرهای مذکور در راستای محور X ، نوسان‌هایی را در میدان فشار استاتیکی محلی ایجاد کنند. در این صورت، انحراف‌های سیر حرکت جریان در مجاورت در چیهی کنترل اتفاق نمی‌افتد، اما در

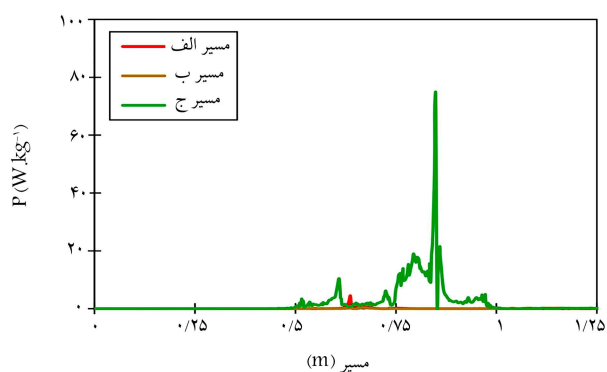


شکل ۱۶. میدان سرعت راستای Y در گشودگی ۱۰٪ دریچه‌ی کنترل.

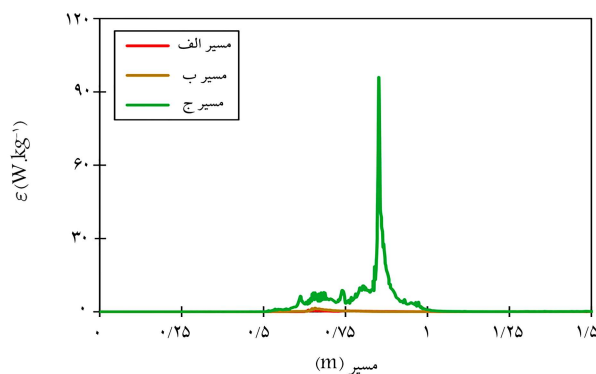


شکل ۱۷. میدان سرعت راستای Z در گشودگی ۱۰٪ دریچه‌ی کنترل.

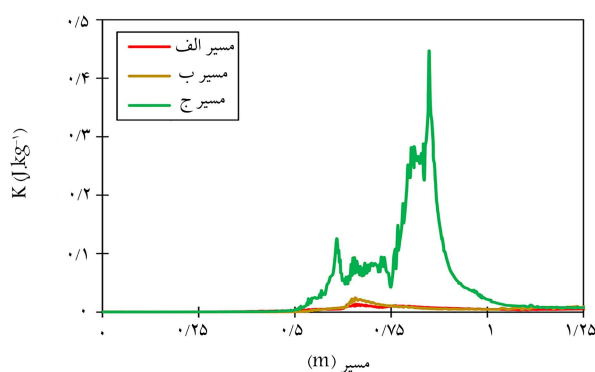
دارد. در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که مسیر ب، پس از رسیدن به زیر دریچه کنترل، دچار تغییرات ناگهانی مکانی سرعت در راستای X می‌شود. مسیر الف، در فاصله‌ی از پایین دست دریچه، تغییرات ناگهانی سرعت در راستای X را در مسیر تجربه می‌کند. مسیر ج نیز در لبه‌ی بالادست دریچه دچار جابه‌جایی بردار سرعت در راستای X می‌شود. مسیر ج، نیز در ادامه پس از گذشتن از پایین دست دریچه کنترل دچار تغییرات ناگهانی بزرگ‌تری در سرعت شده است؛ اما با توجه به این‌که پدیده‌ی ذکر شده در فاصله‌ی دورتر از دریچه رخ داده است، آثار نوسان کم‌رنگ‌تر بوده است. تغییرات ناگهانی مکانی سرعت، نوسان‌های میدان فشار استاتیکی را موجب شده است، بنابراین نوسان‌های میدان فشار در قالب بارگذاری نوسانی بر دریچه اعمال شده و آن را به نوسان وا داشته است. لذا در راستای X، مسیرهای ب و ج بیشترین اثر را در ایجاد نوسان‌های میدان فشار استاتیکی را بر عهده دارند. در شکل ۱۶، وضعیت تغییرات ناگهانی مکانی سرعت در راستای Y مشاهده می‌شود، که مطابق آن، سرعت در راستای Y در محدوده‌ی دریچه کنترل به دو مسیر ب و ج محدود می‌شود. مسیر ب، در مقایسه با مسیر ج، تغییرات بیشتری را در بزرگی سرعت ایجاد کرده است. در شکل ۱۷، نیز تغییرات سرعت در راستای Z مشاهده می‌شود. در مسیر ج، در لبه‌ی پایین دست زیرین دریچه کنترل، بیشترین تغییرات ناگهانی مکانی سرعت ایجاد شده است. دو مسیر دیگر، یکی از لحاظ بزرگی و دیگری از لحاظ محل تغییرات، نوسان‌های قابل توجهی را در زیر دریچه ایجاد نکرده‌اند. بنابراین می‌توان گفت که در گشودگی ۱۰٪ دریچه کنترل، به ترتیب نوسان‌های سرعت در راستای X مسیرهای ج و ب، نوسان‌های سرعت در راستای Y مسیر ب و نوسان‌ها در راستای Z مسیر ج، عوامل مؤثر در ایجاد نوسان‌های میدان فشار استاتیکی جریان دریچه هستند. مسیرهای ب و ج، در حقیقت خطوط سیر نیمه‌ی



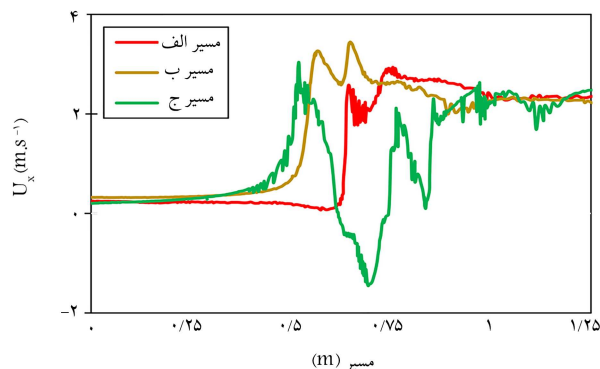
شکل ۱۲. مجموع مؤلفه‌های تولید انرژی جنبشی آشفته در گشودگی ۱۰٪ دریچه‌ی کنترل.



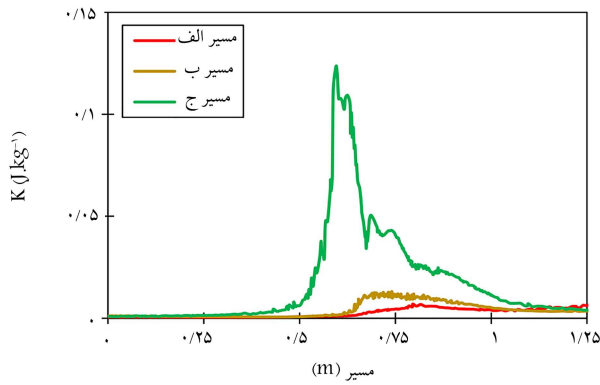
شکل ۱۳. مجموع مؤلفه‌های استهلاک انرژی جنبشی آشفته در گشودگی ۱۰٪ دریچه‌ی کنترل.



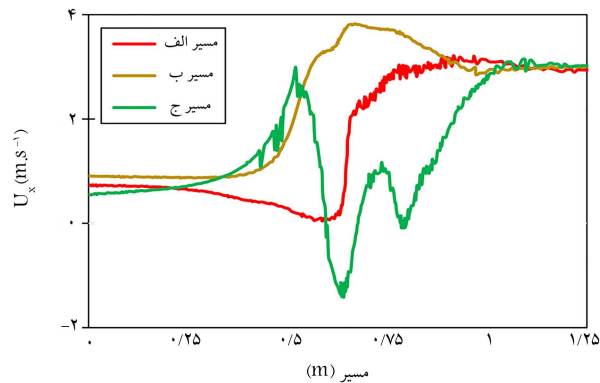
شکل ۱۴. انرژی جنبشی آشفته در گشودگی ۱۰٪ دریچه‌ی کنترل.



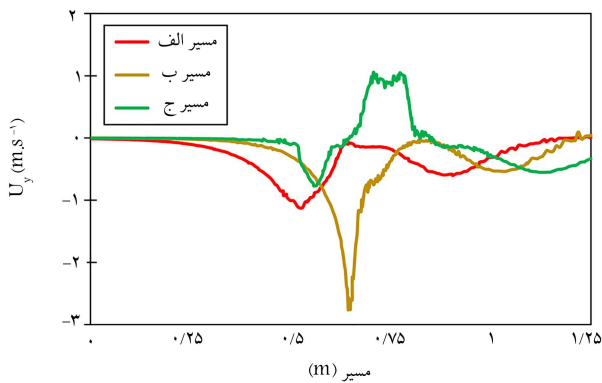
شکل ۱۵. میدان سرعت راستای X در گشودگی ۱۰٪ دریچه‌ی کنترل.



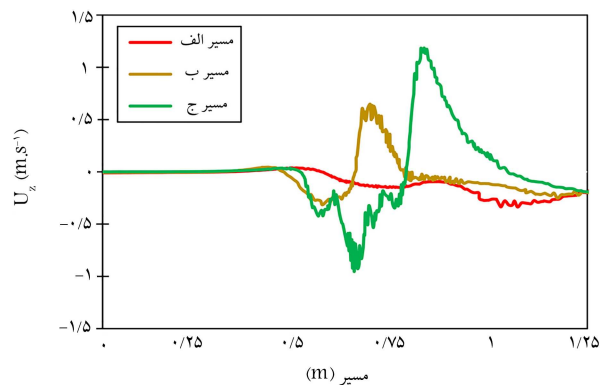
شکل ۲۰. انرژی جنبشی آشفته درگشودگی ۳۰٪ دریچه‌ی کنترل.



شکل ۲۱. میدان سرعت راستای X درگشودگی ۳۰٪ دریچه‌ی کنترل.



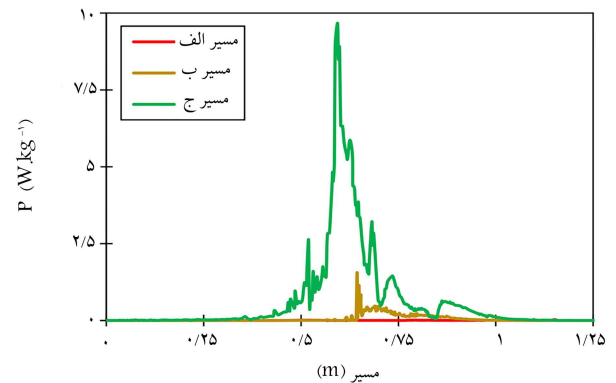
شکل ۲۲. میدان سرعت راستای Y درگشودگی ۳۰٪ دریچه‌ی کنترل.



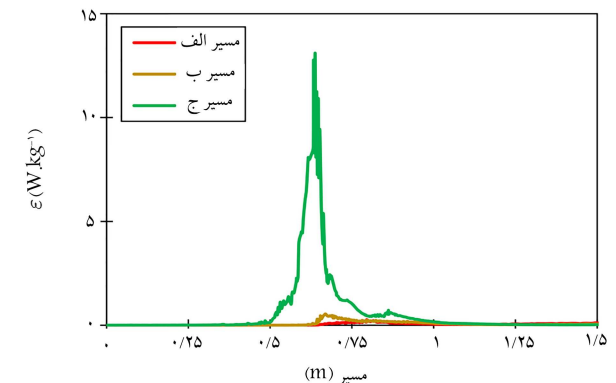
شکل ۲۳. میدان سرعت راستای Z درگشودگی ۳۰٪ دریچه‌ی کنترل.

پایینی جریان گذرنده از مجرای تحت فشار هستند. در شکل‌های ۱۸ الی ۲۳، نتایج اخیر برای گشودگی ۳۰٪ دریچه‌ی کنترل مشاهده می‌شود.

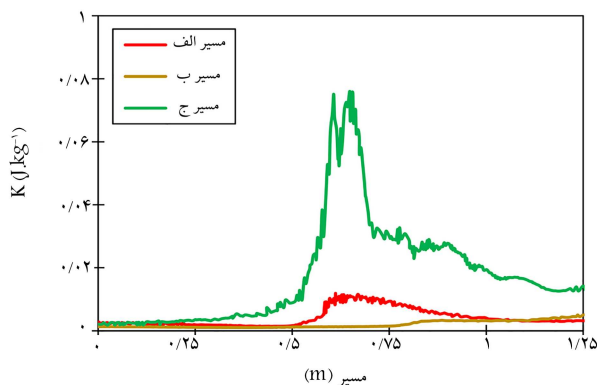
همان‌گونه که مشخص است، درگشودگی ۳۰٪، میزان تولید و استهلاك انرژی جنبشی آشفته در محدوده‌ی زیر دریچه‌ی کنترل، تقریباً با گشودگی ۱۰٪ برابر است؛ اما در قسمت پایین دست دریچه‌ی کنترل، کاهش قابل ملاحظه‌ی دارد. این امر ناشی از کاهش توانایی ایجاد لایه‌های برشی با گرادیان‌های بزرگ است. لذا بزرگی تولید و استهلاك انرژی جنبشی درگشودگی‌های کمتر، قابل انتظار است. با توجه به شکل‌های ۱۸ الی ۲۰، محل بیشینه‌ی نمودار، در محدوده‌ی لبه‌ی پایین دست زیرین دریچه‌ی کنترل قرار دارد. همانند گشودگی ۱۰٪، مسیر ج بیشترین توانایی در ایجاد انرژی جنبشی آشفته و تولید ادی‌های در اندازه‌های گوناگون دارد. با توجه به شکل ۱۹، زیر دریچه‌ی کنترل، محلی است که حضور ادی‌های پرنگ تراست و آنها فقط سرعت در راستای X، مسیر ج را وادار به تغییرات ناگهانی مکانی در زیر دریچه می‌کنند. سایر خطوط سیر، تغییرات ناگهانی مکانی را در زیر دریچه موجب نمی‌شوند. تغییرات آنها در فواصل دورتر از پایین دست دریچه است. سرعت در راستای Y، فقط در مسیر ج، تغییرات ناگهانی مکانی دارد. مسیرهای الف و ب به ترتیب، تغییرات با شیب کم و تغییرات فاصله‌دار با دریچه دارند. سرعت در راستای Z نیز در مسیر ج، تغییرات ناگهانی سرعت با بزرگی کمتری را تجربه می‌کند. تغییرات ناگهانی مکانی دو مسیر دیگر (الف و ب)، با فاصله از پایین دست دریچه‌ی کنترل رخ داده است. بنابراین درگشودگی ۳۰٪، سهم مسیر ج در ایجاد نوسان‌های میدان فشار استاتیکی در زیر دریچه، نسبت به سایر مسیرها بیشتر است. مسیرهای الف و ب با



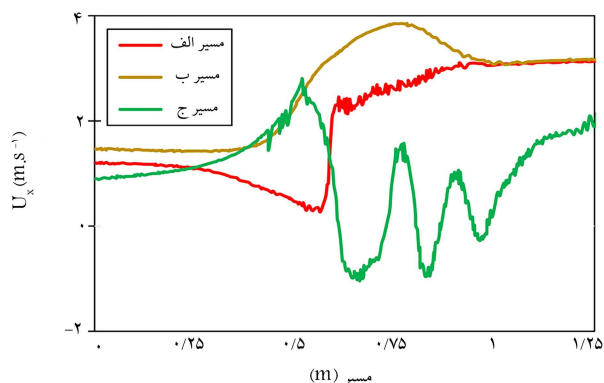
شکل ۱۸. مجموع مؤلفه‌های تولید انرژی جنبشی آشفته درگشودگی ۳۰٪ دریچه‌ی کنترل.



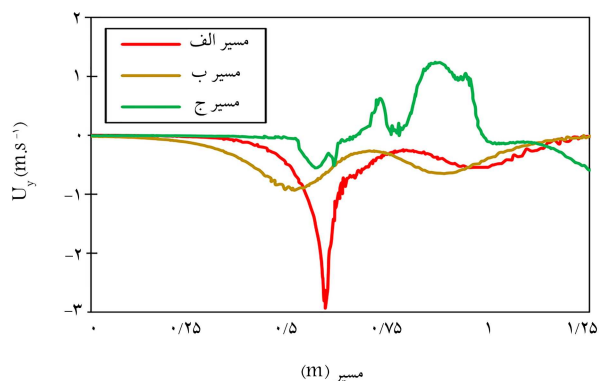
شکل ۱۹. مجموع مؤلفه‌های استهلاك انرژی جنبشی آشفته درگشودگی ۳۰٪ دریچه‌ی کنترل.



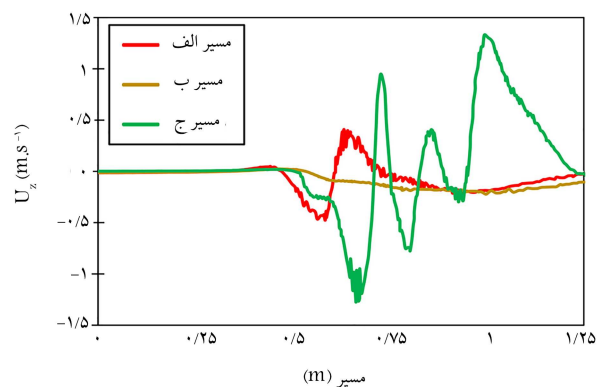
شکل ۲۶. انرژی جنبشی آشفته در گشودگی ۵۰٪ دریچه کنترل.



شکل ۲۷. میدان سرعت در راستای X در گشودگی ۵۰٪ دریچه کنترل.

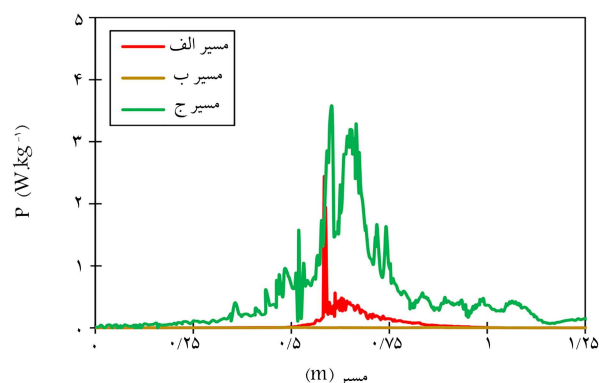


شکل ۲۸. میدان سرعت در راستای Y در گشودگی ۵۰٪ دریچه کنترل.

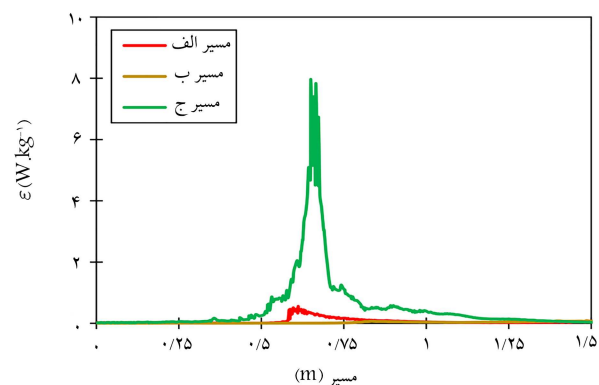


شکل ۲۹. میدان سرعت در راستای Z در گشودگی ۵۰٪ دریچه کنترل.

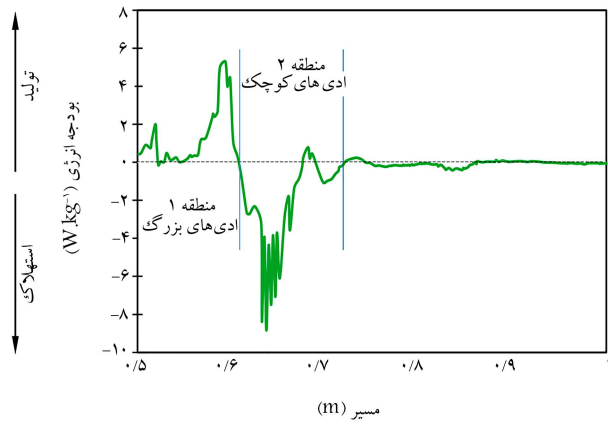
داشتن فاصله از محل دریچه کنترل، میدان فشار را نوسانی می‌کنند. نوسان‌های اخیر با توجه به داشتن فاصله از دریچه، آثار چشمگیری ندارند. در شکل‌های ۲۴ الی ۲۹، نتایج میدان سرعت برای گشودگی ۵۰٪ دریچه کنترل مشاهده می‌شوند. نرخ تولید و استهلاک انرژی جنبشی آشفته در گشودگی ۵۰٪ دریچه کنترل، در مقایسه با گشودگی‌های قبلی کاهش یافته است. اما در مسیر الف، تولید انرژی جنبشی آشفته، افزایش یافته است، که می‌توان آن را در شکل ۲۶، در متراس سیر خط جریان برابر مشاهده کرد. به همین جهت انتظار می‌رود در یکی از راستاهای میدان سرعت مسیر الف، تغییرات ناگهانی مکانی در زیر دریچه مشاهده شود. با توجه به شکل ۲۷، تغییرات ناگهانی مکانی سرعت در راستای X، در هر دو مسیر ج و الف مشاهده می‌شود. اما به صورت نسبی، بزرگی تغییرات در مسیر ج بیشتر است. سرعت در راستای Y نیز در مسیر الف، دارای بزرگ‌ترین تغییرات ناگهانی مکانی است، که در لبه‌ی پایین دست زیرین دریچه رخ داده است. بنابراین با توجه به شکل ۲۶، در گشودگی ۵۰٪ دریچه کنترل، مقدار بودجه‌ی لازم برای تولید انرژی جنبشی آشفته در مسیر الف وجود دارد، و این موضوع باعث می‌شود که بر پایه‌ی نظریه‌ی کولموگوروف، مکانیزم‌های انتقال ادی‌های از مسیرهای دیگر کمتر باشد. به همین علت در تمامی راستاهای میدان سرعت، مسیر الف تغییرات ناگهانی مکانی را تجربه می‌کند. این پدیده در شکل ۲۹ نیز مشخص است. سرعت در راستای Z نیز برای مسیرهای الف و ج، تغییرات ناگهانی دارد، که مطابق شکل ۱، برای مسیر الف در مجاورت لبه‌ی پایین دست زیرین دریچه و برای مسیر ج با فاصله از پایین دست دریچه رخ داده است. با استناد به توضیحات اخیر، مسیر الف در



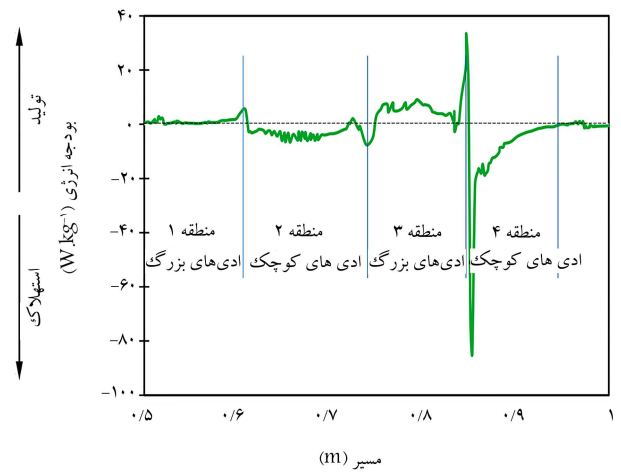
شکل ۲۴. مجموع مؤلفه‌های تولید انرژی جنبشی آشفته در گشودگی ۵۰٪ دریچه کنترل.



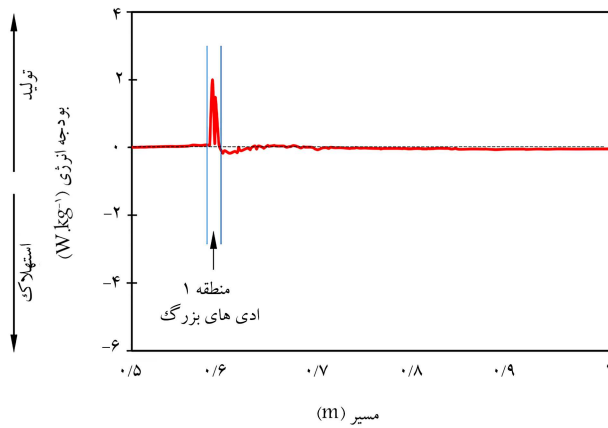
شکل ۲۵. مجموع مؤلفه‌های استهلاک انرژی جنبشی آشفته در گشودگی ۵۰٪ دریچه کنترل.



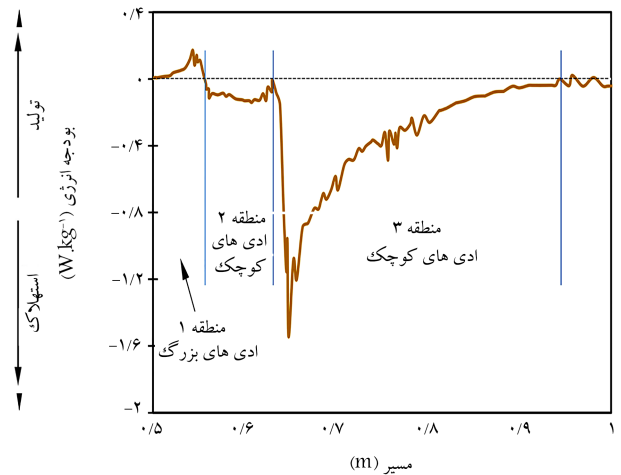
شکل ۳۲. موقعیت مکانی و وضعیت اندازه‌ی ادی‌های مسیر ج درگشودگی ۳۰٪ درپچه‌ی کنترل.



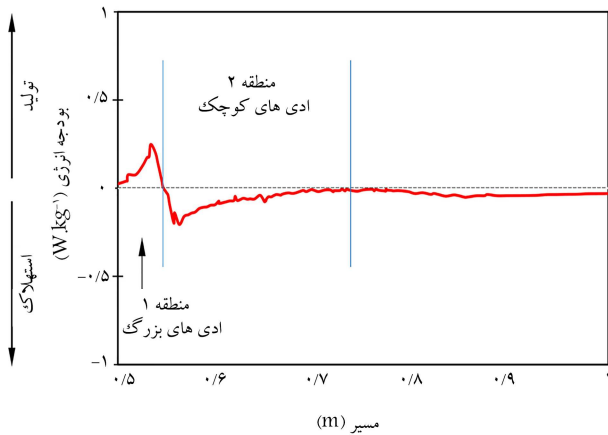
شکل ۳۰. موقعیت مکانی و وضعیت اندازه‌ی ادی‌های مسیر ج درگشودگی ۱۰٪ درپچه‌ی کنترل.



شکل ۳۳. موقعیت مکانی و وضعیت اندازه‌ی ادی‌های مسیر الف درگشودگی ۵۰٪ درپچه‌ی کنترل.



شکل ۳۱. موقعیت مکانی و وضعیت اندازه‌ی ادی‌های مسیر ب درگشودگی ۱۰٪ درپچه‌ی کنترل.



شکل ۳۴. موقعیت مکانی و وضعیت اندازه‌ی ادی‌های مسیر الف درگشودگی ۷۰٪ درپچه‌ی کنترل.

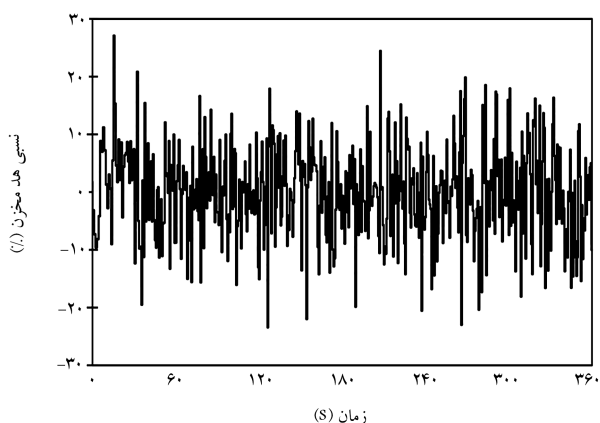
محدوده‌ی ناحیه‌ی ۱ زیر درپچه، ادی‌های اندازه‌ی بزرگ را با خود حمل می‌کند. در پایین‌دست درپچه، اندازه‌ها کوچک‌تر بوده و ادی‌های مستهلک‌کننده‌ی انرژی جنبشی آشفته ظاهر شده‌اند. بنابراین درگشودگی ۱۰٪، عمده‌ی نوسان‌های میدان فشار استاتیکی زیر درپچه، از ادی‌های اندازه‌ی بزرگ با بسامدهای نوسانی کم است. درگشودگی ۳۰٪ درپچه‌ی کنترل، ادی‌های مسیر ج، در ناحیه‌ی ۱ زیر درپچه،

گشودگی ۵۰٪، نقش بیشتری در ایجاد نوسان‌های میدان فشار استاتیکی زیر درپچه از خود نشان داده است. می‌توان گفت میزان بودجه‌ی در دسترس انرژی جنبشی آشفته در هر مسیر، آثار تغییرات ناگهانی مکانی سرعت در راستاهای مختلف را موجب می‌شود. در مورد گشودگی ۷۰٪، نیز درپچه‌ی کنترل مسیر الف، تغییرات ناگهانی بیشتری را در هر سه راستای میدان سرعت از خود نشان داده است. بنابراین تغییرات ناگهانی مکانی مسیر الف درگشودگی ۷۰٪، عامل نوسان‌های میدان فشار استاتیکی در زیر درپچه‌ی کنترل بوده است. در شکل‌های ۳۰ الی ۳۴، موقعیت و وضعیت اندازه‌ی ادی‌های موجود در هر یک از مسیرهای اثرگذار شکل‌های ۸ الی ۱۱ مشاهده می‌شوند.

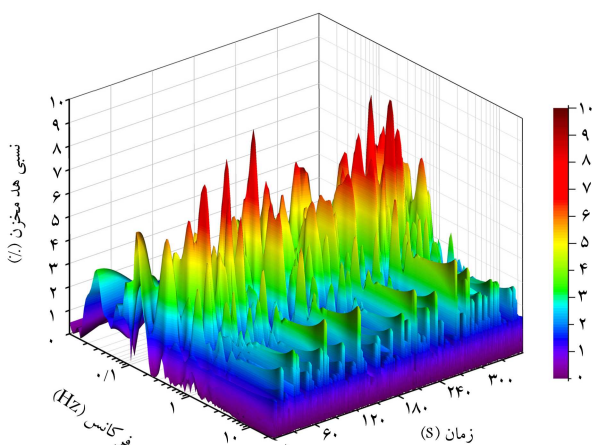
با توجه به شکل ۳، در مسیر ج گشودگی ۱۰٪ درپچه‌ی کنترل، در محدوده‌ی ناحیه‌ی ۱ زیر درپچه (متراژ ۵/۵ تا ۰/۶)، بودجه‌ی کمی برای ادی‌ها مشاهده می‌شود. در نزدیکی متراژ ۰/۶ و یا همان لبه‌ی پایین‌دست درپچه، بودجه‌ی تولید ادی‌های مقداری افزایش یافته و نوسان‌های میدان سرعت در راستای X مشخص شده در شکل ۱۵ را ایجاد می‌کند. ناحیه‌های ۱، ۲، و ۳ در شکل ۳۰، محدوده‌ی با فاصله از پایین‌دست درپچه بوده و اندازه‌ی ادی‌های تأثیر چندانی در نوسان‌های میدان فشار استاتیکی نداشته است. شکل ۳۱ نشان می‌دهد که مسیر ب در

جدول ۱. اندازه‌ی ادی‌های بزرگ کولموگروف ایجاد شده در زیر دریچه‌ی کنترل.

اندازه‌ی ادی‌های بزرگ (میلی‌متر)	مسیر	منطقه	گشودگی دریچه‌ی کنترل (%)
۲۵	ج	۱	۱°
۸	ب	۱	۱°
۱۰	ج	۱	۳°
۹	الف	۱	۵°
۷/۵	الف	۱	۷°



شکل ۳۵. نوسان‌های میدان فشار استاتیکی زیر دریچه در گشودگی ۱۰٪ دریچه‌ی کنترل.



شکل ۳۶. تحلیل موجک پیوسته از سری زمانی شکل ۳۵ برای گشودگی ۱۰٪ دریچه‌ی کنترل.

که در آن، سری زمانی فشار استاتیکی نوسانی و Ψ موجک هستند. پس از تحلیل موجک سری زمانی فشار استاتیکی نوسانی، نتایج بزرگی و بسامد امواج فشاری به دست می‌آیند. اهمیت نتایج اخیر در ارزیابی توزیع بزرگی امواج در بسامدهای آنهاست. نتایج تحلیل موجک در شکل ۳۶ مشاهده می‌شود.

بسامد پایین نوسان‌های فشار استاتیکی با بزرگی نسبی، نشان‌دهنده‌ی تولید ادی‌های در زیر دریچه‌ی کنترل هستند. ادی‌های مستهلک‌کننده‌ی انرژی جنبشی آشفته‌ی جریان، بسامدهای بالاتری دارند و توزیع بزرگی‌های آنها در جریان توسعه‌یافته، یک‌نواخت‌تر است. به همین جهت در زیر دریچه، استهلاك انرژی جنبشی آشفته، کمتر مشاهده می‌شود و مکانیزم‌های تولید و انتقال ادی‌ها، بیشتر رخ می‌دهند. توزیع امواج فشاری با بزرگی نسبی در محدوده‌ی بسامدهای ۱/۸ تا ۲ هرتز، گواه حضور

ادی‌های اندازه‌ی بزرگ را با خود حمل می‌کنند. وضعیت دو قله‌یی ناحیه‌ی ۱ در شکل ۳۲ نشان می‌دهد که در طرفین زیر دریچه، میزان بزرگی نوسان‌های میدان فشار استاتیکی در مقایسه با قسمت میانی زیر دریچه افزایش دارند. در گشودگی اخیر نیز اندازه‌ی ادی‌های بزرگ، عامل نوسان‌ها هستند. برای گشودگی‌های ۵۰٪ و ۷۰٪ دریچه‌ی کنترل، مسیر الف در ناحیه‌ی ۱ زیر دریچه، ادی‌های اندازه‌ی بزرگ نوسان‌های میدان فشار استاتیکی را ایجاد می‌کنند. در شکل ۳۳ مشاهده می‌شود که ادی‌های بزرگ در لبه‌ی پایین دست دریچه نوسان می‌کنند. در شکل ۳۴، نیز مشاهده می‌شود که ادی‌های عامل نوسان در میانه‌ی دریچه‌ی کنترل قرار دارند. بنابراین به صورت کلی می‌توان گفت با توجه به شکل‌های ۳۰ الی ۳۴، ادی‌های اندازه‌ی بزرگ، عامل نوسان‌های میدان فشار استاتیکی در تمامی گشودگی‌ها هستند و نوسان‌ها، عمدتاً بزرگی زیاد و بسامد کم دارند. این بدان معنی است که جریان عبوری از زیر دریچه‌ی کنترل و یا همان ناحیه‌ی ۱، بیشتر در محدوده‌ی ابتدایی نمودار آبشار انرژی کولموگروف قرار دارد. قسمت‌های پایین دست دریچه و یا همان نواحی ۲ و بالاتر، عمدتاً در محدوده‌ی انتهایی نمودار آبشار انرژی هستند. در جدول ۱، اندازه‌ی ادی‌های تشکیل شده در هر یک از مسیرهای زیر دریچه‌ی کنترل ارائه شده‌اند. مسیرهای مذکور، در شکل‌های ۳۰ الی ۳۴ مشاهده می‌شوند.

با توجه به جدول ۱، بزرگ‌ترین ادی‌های در گشودگی ۱۰٪ مسیر ج ظاهر می‌شوند. به دلیل بزرگی ادی‌های گشودگی ۱۰٪، میزان بزرگی نوسان‌های میدان فشار استاتیکی نیز قابل توجه‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که ادی‌ها، قدرت بیشتری برای ایجاد نوسان‌ها با دامنه‌ی بزرگ‌تر دارند. می‌توان به صورت کلی گفت که با افزایش میزان گشودگی دریچه‌ی کنترل، اندازه‌ی ادی‌های بزرگ دارای انرژی، رو به کاهش می‌گذارد. بنابراین از میزان نوسان‌های میدان فشار استاتیکی در گشودگی‌های بیشتر دریچه، کاسته می‌شود. در شکل ۳۵، یک نمونه سری زمانی برداشت شده از میدان فشار استاتیکی نوسانی در زیر دریچه‌ی کنترل، طی گشودگی ۱۰٪ مشاهده می‌شود.

نوسان‌های میدان فشار استاتیکی یا همان p' در سری زمانی ۶ دقیقه‌یی، عامل بارگذاری نوسانی دریچه‌ی کنترل است. برای ارزیابی بزرگی و بسامد فشار استاتیکی نوسانی ایجاد شده در زیر دریچه، از تبدیل موجک پیوسته استفاده شده است. موجک مورس، برای سری‌های زمانی مشتمل بر امواج با بزرگی و بسامد متغیر، دقت مناسبی دارد. مزیت روش تحلیل موج پیوسته، نمایش مشخصات هر یک از امواج ایجاد شده در سری زمانی است. به همین جهت، نتایج حاصل شده به صورت سه‌بعدی است. با روش تحلیل موج پیوسته می‌توان مشخص کرد که ترکیب چه امواجی در چه زمانی ایجاد نوسان می‌کند و بارگذاری نوسانی را موجب می‌شوند. رابطه‌ی تبدیل موجک پیوسته (W) به صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود^[۱۴]:

$$W(t, s) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{s} \psi\left(\frac{u-t}{s}\right) x(u) du \quad (6)$$

میدان فشار استاتیکی ایفا کرده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که درگشودگی‌های بزرگ‌تر در پیچه کنترل، مسیرهای دارای رقوم ارتفاعی بزرگ‌تر راستای Y نسبت به کف مجرای تحت فشار، سهم بیشتری در ایجاد نوسان‌های زیر در پیچه به کمک ادی‌های پرانرژی کولموگروف دارند. درگشودگی‌های کمتر در پیچه کنترل، این سهم متعلق به مسیرهایی با رقوم ارتفاعی کمتر راستای Y نسبت به کف مجرای تحت فشار است. بر پایه نظریه‌ی کولموگروف، مسیرهای فوق با ایجاد ادی‌های دارای انرژی و تغییر اندازه و نیز شکل آنها در طول مسیر، میدان سرعت جریان را دچار تغییرات ناگهانی مکانی می‌کنند و تغییرات مذکور باعث بروز نوسان‌ها در میدان فشار استاتیکی می‌شوند. تحلیل مویک پیوسته‌ی سری‌های زمانی به دست آمده از میدان فشار استاتیکی جریان در زیر در پیچه کنترل نشان می‌دهد که امواج فشاری با دامنه‌ی نوسانی بزرگ‌تر، بسامدی در حدود $1/10^5$ تا 2 هرتز دارند. این نتیجه مؤید وجود ادی‌های اندازه‌ی بزرگ کولموگروف با اندازه‌های $7/5$ تا 25 میلی‌متر دارای انرژی، در مسیرهای ایجادکننده‌ی نوسان‌هاست. عمدتاً ادی‌های اندازه‌ی کوچک‌تر، در قسمت‌های با فاصله از پایین دست در پیچه کنترل ایجاد می‌شوند. لذا با اتکا بر دانستن مسیرهای مولد بارگذاری نوسانی بر پیکره‌ی در پیچه کنترل تخلیه‌کننده‌ی تحتانی، می‌توان با به کارگیری کنترل‌کننده‌های آشفستگی جریان، میزان نوسان‌های مذکور را کنترل کرد.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از شرکت دانش‌بنیان دانش پژوهان انرژی گستر تهویه واقع در پارک علم و فناوری سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، که نویسندگان را در انجام پژوهش حاضر یاری کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

ادی‌های بزرگ دارای انرژی است. علت نوسان ادی‌های بزرگ در بازه‌ی بسامد مذکور، اندازه‌ی آنهاست. هر چقدر که اندازه‌ی ادی‌های بزرگ‌تر باشد، بسامد آنها کمتر و هر چقدر که اندازه‌ی آنها کوچک‌تر و در مقیاس‌های استهلاک کولموگروف باشند، بسامد آنها بالاتر است. اصل پایستگی انرژی در چارچوب‌های دورانی مؤید این مسئله است. این مطلب در سایر گشودگی‌های دیگر در پیچه کنترل نیز رؤیت شده است. بنابراین می‌توان گفت عامل نوسان‌های فشار استاتیکی و متعاقباً بارگذاری نوسانی در پیچه کنترل از تشکیل و انتقال ادی‌های دارای انرژی با اندازه‌ی نسبی بزرگ تأثیر می‌پذیرد.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ارزیابی بارگذاری نوسانی در پیچه کنترل تخلیه‌کننده‌ی تحتانی سد، بر پایه‌ی نظریه‌ی ادی‌های کولموگروف، با ساخت مدل آزمایشگاهی تخلیه‌کننده‌ی تحتانی با مقطع مستطیلی انجام شده است. با به کارگیری روش عکس‌برداری سریع و پردازش تصویرهای به دست آمده، مسیرهای حرکت جریان بررسی شدند. از کل مسیرهای مورد مطالعه، سه مسیر به عنوان نماینده‌ی سایر مسیرها انتخاب و نتایج آن در پژوهش حاضر ارائه شده است. مسیرهای طی گشودگی‌های 10^5 الی 70^5 درصد در پیچه کنترل ایجاد و با استفاده از حسگرهای الکترونیکی، اطلاعات میدان سرعت در سه راستا و میدان فشار استاتیکی خطوط سیر جریان در قالب سری‌های زمانی جمع‌آوری شدند. با استناد به تحلیل به عمل آمده بر روی نتایج، درگشودگی $1/10^5$ ، در پیچه کنترل مسیرهای ب و ج؛ درگشودگی $3/10^5$ ، در پیچه کنترل مسیر ج و درگشودگی‌های 50^5 و 70^5 درصد، مسیر الف بیشترین تأثیر را در ایجاد نوسان‌های

پانویس‌ها

- Eddy
- energy cascade
- Rajaratnam & Subramanya
- Humphries
- Thang & Naudascher
- Montes
- Roth & Hager
- Takahashi & Ohtsu
- Felder
- high density poly ethylene
- plexiglass
- asynchronous
- coupling
- free delivery
- acoustic doppler velocimetry
- piezoelectric
- modbus

منابع (References)

- Kolmogorov, A.N. "A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high Reynolds number", *Journal of Fluid Mechanics*, **13**(1), pp. 82-85 (1962).
- Rajaratnam, N. and Subramanya, K. "Flow equation for the sluice gate", *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, **93**(3), pp. 167-186 (1967).
- Rajaratnam, M. "Free flow immediately below sluice gates", *Journal of the Hydraulics Division*, **103**(4), pp. 345-351 (1977).
- Rajaratnam, M. and Humphries, J.A. "Free flow upstream of vertical sluice gates", *Journal of Hydraulic Research*, **20**(5), pp. 427-437 (1982).

5. Thang, N.D. and Naudascher, E. "Vortex-excited vibrations of underflow gates", *Journal of Hydraulic Research*, **24**(2), pp. 133-151 (1986).
6. Montes, J.S. "Irrotational flow and real fluid effects under planar sluice gates", *Journal of Hydraulic Engineering*, **123**(3), pp. 219-232 (1997).
7. Roth, A. and Hager, W.H. "Underflow of standard sluice gate", *Experiments in fluids*, **27**(4), pp. 339-350 (1999).
8. Takahashi, M. and Ohtsu, I. "Effects of inflows on air entrainment in hydraulic jumps below a gate", *Journal of Hydraulic Research*, **55**(2), pp. 259-268 (2017).
9. Lee, S.O., Seong, H. and Kang, J.W. "Flow-induced vibration of a radial gate at various opening heights", *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, **12**(1), pp. 567-583 (2018).
10. Mirabi, M.H. and Mansoori, A. "Assessment of multi-equation mathematical models of turbulence in estimation of hydrodynamic parameters at submerged jet", *Modares Civil Engineering Journal*, **17**(6), pp. 245-258 (in Persian) (2018).
11. Felder, S., Hohermuth, B. and Boes, R.M. "High-velocity air-water flows downstream of sluice gates including selection of optimum phase-detection probe", *International Journal of Multiphase Flow*, **116**, pp. 203-220 (2019).
12. Mirabi, M.H., Alembagheri, M., Jabbari, E. and et al. "I the dynamic interaction of morning glory spillway with reservoir water using the coupled finite element-finite volume method", *Sharif Civil Engineering Journal*, **36.2**(1.2), pp. 133-141 (in Persian) (2020).
13. Durbin, P.A. and Reif, B.P. "Statistical theory and modeling for turbulent flows", *John Wiley & Sons*, UK (2011).
14. Lilly, J.M. and Olhede, S.C. "Higher-order properties of analytic wavelets", *IEEE Transactions on Signal Processing*, **57**(1), pp. 146-160 (2008).