

تحول وابسته به زمان شارهای برافزایشی مغناطیده با حضور وشکسانی شعاعی

مریم قاسم نژاد بافنده

دانشکده فیزیک دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

پست الکترونیکی: m.ghasemnezhad@uk.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۰۶/۱۱)

چکیده

در این مطالعه، ما تحول زمانی قرص‌های برافزایشی با پهن‌رفت غالب را در حضور میدان مغناطیسی و وشکسانی شعاعی بررسی کرده‌ایم. از جواب‌های خودمشابهی وابسته به زمان برای حل معادلات مغناطو هیدرودینامیک یک بعدی در دستگاه مختصات کروی در صفحه قرص با صرف نظر کردن از وابستگی زاویه‌ای کمیات مسئله استفاده کرده‌ایم. اگرچه در مطالعات قبلی فقط از مؤلفه وشکسانی سمتی U به عنوان عامل تلاطم در انتقال تکانه زاویه‌ای و از پارامتر α به عنوان ضریب وشکسانی استفاده می‌شد، اخیراً مطالعات نشان می‌دهد که ساختار قرص تحت تأثیر مؤلفه شعاعی وشکسانی U_r است. در مطالعه حاضر، ما نسبت مؤلفه شعاعی به مؤلفه سمتی وشکسانی را برابر با کمیت بدون بعد γ فرض کرده‌ایم و از کمیت‌های γ و β (که نسبت فشار مغناطیسی به فشار گاز تعریف می‌شود) به عنوان پارامترهای آزاد، برای بررسی اثر وشکسانی شعاعی و میدان مغناطیسی استفاده کرده‌ایم. نتایج نشان می‌دهد که یک نقطه عبور صوتی وجود دارد که این نقطه با افزایش پارامتر میدان مغناطیسی و وشکسانی شعاعی به سمت نواحی بیرونی قرص حرکت می‌کند. با افزایش پارامتر β ، در نواحی بیرونی سرعت برافزایشی مواد کاهش می‌یابد و قرص متراکم‌تر می‌شود. همچنین در تمام نواحی چرخش زیرکپلری است. رفتار پارامتر γ در فواصل نزدیک و میانی قرص مشابه با پارامتر میدان مغناطیسی است. در نواحی دورتر با افزایش γ آهنگ فروریزش مواد بیشتر می‌شود و در نتیجه عمر قرص با حضور پارامتر وشکسانی شعاعی کمتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: برافزایش، قرص‌های برافزایشی، میدان مغناطیسی

۱. مقدمه

گرانشی جسم مرکزی به تدریج و به صورت مارپیچی بر روی آن فروریزش می‌کند و در نتیجه، انرژی و تکانه زاویه‌ای را تحت عامل تلاطم از دست می‌دهد. انرژی بستگی گرانشی آزاد شده با فروریزش مواد بر روی جسم مرکزی در گستره وسیعی از طول موج‌های الکترومغناطیسی قابل آشکارسازی خواهد بود.

برافزایش به عنوان منبع اصلی تابش دریافتی از بسیاری از اجسام جالب اخترفیزیکی نظیر کوازارها، فوران‌های پرتو گاما و دوتایی‌های پرتو ایکس است. در طی فرایند برافزایش، توده‌ای از گاز چرخان که عمدتاً گاز هیدروژن است تحت تأثیر میدان

توسط وشکسانی است. این مدل قرص‌ها از لحاظ هندسی ضخیم ($H/r \approx 1$) هستند. مدل ADAF از لحاظ نوری رقیق است و چگالی پایینی دارند لذا تابش در آنها نامؤثر است و می‌تواند منابعی چون سیاه‌چاله‌هایی با روشنایی کم، نظیر $Sgr A^*$ ، هسته‌های فعال کهکشانی با تابندگی پایین و دوتایی‌های پرتو ایکس در حالت (Low/Hard) را به خوبی توصیف کنند [۵ و ۶].

به نظر می‌رسد که عامل اصلی در توصیف نظری ساختار قرص برافزایشی که نقش عمده در انتقال تکانه زاویه‌ای و در نتیجه برافزایش در قرص بازی می‌کند، وشکسانی است. تلاطم ایجاد شده در قرص که از طریق عوامل مختلفی ایجاد می‌شود توسط وشکسانی توصیف می‌شود. انتخاب بهترین الگوی وشکسانی در بررسی ساختار تحولی قرص‌ها حائز اهمیت است. اولین بار در مرجع [۲] فرض کردند که مؤلفه سمتی-شعاعی تانسور وشکسانی متناسب با فشار گاز است و ضریب این رابطه را پارامتر α معرفی کردند به طوری که تمام عوامل ناشناخته درباره ماهیت تلاطم در این پارامتر قرار می‌گیرد.

انواع مختلف قرص‌های برافزایشی در حالت‌های مختلف وشکسانی (مدل آلفا و مدل بتا) توسط محققین زیادی مطالعه شده است [۷-۱۱]. در مرجع [۱۰] تحول زمانی قرص‌ها را با استفاده از الگوی بتا برای قرص‌های خودگرانشی بررسی کردند و نشان دادند که تحول قرص در دو مدل آلفا و بتا در حالت غیرخودگرانشی هم ارز است و تنها وجه تمایز این دو الگو، حضور خودگرانش در سیستم است. در مرجع [۱۰] نشان دادند که در قرص‌های خودگرانشی مدل بتا به خوبی طیف رصدی قرص‌های پیش سیاره‌ای را توصیف می‌کند. در مرجع [۸] نیز با به کار بردن الگوی بتا برای یک قرص خودگرانشی نازک اطراف ستارگان تازه متولد شده، نشان دادند که با وجود خودگرانشی رفتار و تحول شاره در دو مدل آلفا و بتا متفاوت است. با توجه به این که تصویر واضحی از تلاطم در قرص‌های برافزایشی نداریم تمامی این مدل‌های آلفا و بتا به لحاظ جنبه‌های فیزیکی در یک سطح قرار می‌گیرند. در یک مدل واقعی وشکسانی، می‌توان این دو مدل را با هم ترکیب کرد و

این برافزایش ماده می‌تواند یک قرص با ساختار تخت یا ساختار شبه کروی تشکیل دهد. فرایند برافزایش می‌تواند در اطراف ستاره‌های جوان در سیستم‌های پیش سیاره‌ای و در اطراف ستاره‌های مترکم نظیر سیاه‌چاله‌ها دیده شود. از آنجا که برافزایش یک فرایند انرژی بالا و تابان است در طی چهار دهه گذشته به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است تا ساختار دینامیکی و تحول زمانی این سیستم‌ها با جزئیات شناخته شوند. مقالات بسیاری در زمینه قرص‌های برافزایشی توسط محققین در این چهار دهه اخیر نوشته شده است به طوری که مرجع [۱] مقاله مروری جالبی در این زمینه است. علیرغم پیشرفت‌های قابل توجه اخیر در مدل سازی‌های عددی GRRMHD، دانش کنونی ما از شاره‌های برافزایشی اطراف سیاه‌چاله‌ها بر پایه مدل‌های تحلیلی استوار است. شناخته شده ترین مدل قرص‌ها، مدل استاندارد شاکورا و سانویف است [۲]. در این مدل انرژی اتلافی ناشی از تلاطم بلافاصله پس از تولید، به طور مؤثری تابش می‌شود لذا این مدل، یک قرص نسبتاً سرد و از لحاظ هندسی نازک ($H/r \ll 1$) را توصیف می‌کند. انرژی ناشی از وشکسانی با سرمایش ناشی از تابش برابر است و ساز و کار سرمایشی نظیر پهن‌رفت در این مدل در نظر گرفته نمی‌شود لذا این مدل غیر همرفتی ($Q_{adv}/Q_{vis} \approx f \ll 1$) است. این شاخه به خوبی هسته‌های فعال کهکشانی با تابندگی معمولی را توضیح می‌دهد [۱].

مدل استاندارد نمی‌تواند تابندگی‌های بالا و پایین را به خوبی توجیه کند لذا در حالت‌های با آهنگ برافزایش پایین، کسر کوچکی از انرژی تولید شده توسط وشکسانی تابش می‌شود و کسر بالایی از گرمای تولید شده توسط وشکسانی در قرص ذخیره می‌شود و به همراه شاره بر روی سیاه‌چاله مرکزی پهن‌رفت می‌کند. در این دسته از قرص‌ها که به نام مدل ADAF یا شاره‌های برافزایشی با پهن‌رفت غالب هستند، شاره دمایی بسیار بالایی در نتیجه ذخیره انرژی گرمایی ناشی از وشکسانی و تابش نامؤثر دارد. این مدل توسط مراجع [۳] و [۴] ارائه شد. آنها پارامتر پهن‌رفت (f) را معرفی کردند که نسبت انرژی ذخیره شده در اثر پهن‌رفت به انرژی حرارتی کل تولید شده

یک مدل دقیق را برای توضیح مناطق مختلف قرص‌های برافزایشی ارائه کرد [۸]. تحول زمانی قرص‌ها با مدل آلفا توسط محققین زیادی مطالعه شده است. در این مقاله ما هم تحول زمانی قرص‌های داغ را بر اساس این مدل مطالعه می‌کنیم [۱۲ و ۱۳].

اهمیت و حضور میدان مغناطیسی (چه به صورت بزرگ مقیاس و چه به صورت کوچک مقیاس) در قرص‌های برافزایشی توسط محققین بسیاری مطالعه شده است [۱۴-۱۷]. در مرجع [۱۶] نشان دادند که در بدنه قرص مؤلفه میدان مغناطیسی جنبه‌ای ($B\phi$) غالب است و هندسه میدان توسط ناپایداری مغناطو دورانی MRI کنترل می‌شود. هندسه میدان مغناطیسی در قرص‌ها یک مبحث بسیار مهمی است و به لحاظ رصدی کار مشکلی است که این هندسه تعیین شود. البته در سال‌های اخیر در مورد شارهای اطراف سیاه‌چاله‌ها نظیر M87، هندسه میدان مغناطیسی را براساس قطبش به دست آورده‌اند [۱۸]. البته این نوع تحلیل‌ها ترکیبی است به این معنا که یک بخش از داده‌ها از رصد و یک بخش از آن از شبیه‌سازی به دست می‌آید و کنار هم قرار می‌گیرند تا بتوانند هندسه را تعیین کنند. با این وجود هندسه میدان به لحاظ رصدی هنوز یک مسئله چالشی است. هنوز به لحاظ رصدی نمی‌توان با قطعیت در مورد هندسه میدان مغناطیسی در قرص‌ها صحبت کرد ولی به لحاظ شبیه‌سازی کارهای خیلی مهمی انجام شده است. میدان مغناطیسی می‌تواند اثرات مختلفی در دینامیک قرص‌ها و خواص رصدی آنها داشته باشد. شکل‌گیری جت‌ها و انتقال تکانه زاویه‌ای توسط پدیده مغناطوچرخشی در قرص‌ها، گرمایش کرونای قرص و تابش سینکروترونی در قرص‌ها از نتایج حضور میدان‌های مغناطیسی است [۱۹ و ۲۰]. میدان مغناطیسی به عنوان عامل تلاطمی می‌تواند ساختار و دینامیک تحولی قرص‌های داغ را تحت تأثیر قرار دهد. شبیه‌سازی‌های عددی و محاسبات تئوری نشان می‌دهد که مسئول انتقال تکانه زاویه‌ای در قرص، ناپایداری مغناطو دورانی (MRI) است. بسته به شرایط قرص عوامل دیگری مانند ناپایداری گرانشی و ناپایداری همرفتی نیز می‌توانند سبب انتقال تکانه زاویه‌ای باشند. اهمیت و اثرات میدان مغناطیسی روی

ساختار قرص‌ها به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۷]. در طول این چهار دهه، محققین با استفاده از راه‌حل‌های خود مشابهی قرص‌های ADAF را در حضور عوامل مختلفی نظیر میدان مغناطیسی، خودگرانش قرص، همرفت، هدایت گرمایی و نیروی وشکسانی سمتی - شعاعی مطالعه کردند. این مطالعات منجر به نتایج بسیار جالبی شدند. در این مقاله می‌خواهیم مؤلفه وشکسانی در راستای شعاعی را بررسی کنیم که در مقالات پایه‌ای در بررسی و مطالعه ADAF‌ها کمتر به آن پرداخته شده است. از آنجا که نسبت نیروی وشکسانی شعاعی به نیروی ناشی از مؤلفه شعاعی گرادیان فشار گرمایی متناسب با $\left(\frac{H}{r}\right)^2$ است که H نیم ضخامت قرص است و قرص‌های برافزایشی با پهن‌رفت غالب از لحاظ هندسی ضخیم هستند لذا در این نوع از شارها پارامتر نیروی وشکسانی شعاعی حائز اهمیت است و این پارامتر می‌تواند در ساختار این نوع از قرص‌ها اهمیت داشته باشد. نیروی وشکسانی شعاعی توسط فروریزش باد (wind inflow) تولید می‌شود که شامل گازهایی با دما و تکانه زاویه‌ای کمتر نسبت به شارهای برافزایشی موجود هستند که در حال برافزایش و سقوط آزاد هستند. یک چشمه پیشنهادی برای چنین گازهایی می‌تواند بادهای ستاره‌ای از ستارگان پرجرم در مرکز کهکشان راه شیری باشند [۲۱]. نیروی وشکسانی شعاعی یک اصطکاک مؤثر برای برافزایش سریع گاز در مدل ADAF و یک نیروی گرمایشی اضافی در این مدل فراهم می‌کند. نقش وشکسانی شعاعی در ساختار قرص‌های ADAF با حضور جریان‌های خروجی از قرص توسط مرجع [۲۱] مطالعه شده است. در مرجع [۲۲] اثر وشکسانی شعاعی را در مدل ADAF با حضور جریان‌های خروجی و میدان مغناطیسی در حالت ایستا مطالعه کردند و نتایج ارزنده‌ای را به دست آوردند. در مرجع [۱۳] تحول زمانی ADAF‌ها را در حضور میدان مغناطیسی جنبه‌ای در قرص بدون وارد کردن نیروی وشکسانی شعاعی بررسی کردند و آنها نشان دادند که رفتار شعاعی کمیات فیزیکی در مقایسه با حالت ایستا تفاوت خواهند داشت. در این تحقیق برای نخستین بار ما با گسترش کار

$$+\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_r \rho}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) \right) - \frac{v_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} (v_r \rho), \quad (2)$$

معادله حرکت در راستای سمتی:

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} (r^2 \Omega) + u_r \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \Omega) \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho v_r r^2 \frac{\partial \Omega}{\partial r} \right), \quad (3)$$

معادله انرژی:

$$\frac{1}{\gamma-1} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u_r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 u_r) = f \rho v_r r^2 \left(\frac{\partial \Omega}{\partial r} \right)^2 + 2v_r \rho \times \left[\left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u_r}{r} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) \right)^2 \right], \quad (4)$$

و معادله القای فارادی:

$$\frac{\partial B_\phi}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r B_\phi) = 0, \quad (5)$$

که $\Omega (= u_\phi / r)$ سرعت زاویه‌ای، u_r سرعت شعاعی، ρ چگالی قرص، p فشار گاز و v ضریب وشکسانی سینماتیکی

که بر اساس مدل آلفا به صورت $v = \frac{\alpha p_g}{\rho \Omega_K} = \alpha c_s H$ است که

$\Omega_K \left(= \sqrt{\frac{GM^*}{r^3}} \right)$ سرعت زاویه‌ای کپلری است [۱۳]. دو

جمله آخر در معادله (۲) نیروی وشکسانی شعاعی است و کمیت v_r ضریب وشکسانی شعاعی است. هر دو نوع وشکسانی تابع مکان و زمان هستند. در این مقاله نسبت ضریب

وشکسانی شعاعی به ضریب وشکسانی سینماتیکی $\left(\frac{v_r}{v} \right)$ را

کمیت بدون بعد ξ در نظر گرفتیم. اگر وشکسانی تلاطمی ناهمسانگرد باشد نمی‌توانیم وشکسانی شعاعی و سمتی را برابر

در نظر بگیریم. در این مقاله، کمیات α و ξ که نمایانگر وشکسانی در شاره اند کمیات بدون بعد و کمتر از واحد هستند. برای مطالعه اثر وشکسانی شعاعی، کمیت ξ به عنوان پارامتر آزاد در این مقاله فرض شده است.

قبل از حل معادلات (۱) تا (۵)، ابتدا معادلات را با استفاده

از روابط زیر بدون بعد می‌کنیم. متغیرهای بدون بعد زیر را

تعریف می‌کنیم:

$$r \rightarrow \hat{r}, t \rightarrow \hat{t}, p_{gas} \rightarrow \hat{p} p_{gas}, u_r \rightarrow \hat{u} u_r, \Omega \rightarrow \hat{\Omega} \Omega, B_\phi \rightarrow \hat{B} B_\phi, \quad (6)$$

که

مرجع [۱۳] و وارد کردن نیروی وشکسانی شعاعی می‌خواهیم تحول زمانی چنین سیستم‌های برافزایشی داغ را مطالعه کنیم. در قسمت بعدی معادلات اساسی به همراه فرضیات مسئله را بیان می‌کنیم و راه‌حل‌های خودمشابهی در قسمت ۳ ارائه خواهند شد و در قسمت ۴ نمودارها و نتایج نمایش داده می‌شود. قسمت ۵ به جمع‌بندی و ارائه خلاصه اختصاص یافته است.

۲. فرمول‌بندی مسئله و فرضیات حاکم

هدف ما بررسی ساختار و دینامیک قرص‌های داغ است که در آن وشکسانی شعاعی نقش مهمی در معادله حرکت و انرژی ایفا می‌کند. در این قسمت معادلات جرم، تکانه، انرژی و القای فارادی را در مختصات کروی به دست می‌آوریم. فرضیات استاندارد زیر را دنبال می‌کنیم:

(۱) گاز برافزایشی را در حالت یونیدگی بالا و داغ با پهن‌رفت

غالب و از لحاظ هندسی ضخیم ($\frac{H}{r} \leq 1$) در نظر گرفته‌ایم.

(۲) تنها مؤلفه سمتی میدان مغناطیسی را در نظر می‌گیریم.

(۳) معادلات در دستگاه کروی در صفحه استوای قرص

($\theta = \frac{\pi}{2}$) نوشته می‌شوند. تقارن محوری در نظر گرفته شده

است لذا همه کمیات سیستم تنها وابسته به شعاع و زمان خواهند بود.

(۴) از اثرات نسبیتی و خودگرانش گاز اطراف سیاه‌چاله صرف نظر کرده‌ایم.

(۵) برای سادگی از پتانسیل نیوتونی ($-\frac{GM^*}{r}$) استفاده می‌کنیم

که برای راه‌حل‌های خودمشابهی مناسب‌تر هستند که G ثابت گرانشی و M^* جرم ستاره مرکزی است.

با دنبال کردن مرجع [۱۳] و فرضیات بالا و وارد کردن اثر وشکسانی شعاعی، معادلات اساسی شماره به صورت زیرند:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho u_r) = 0, \quad (1)$$

معادله حرکت در راستای شعاعی:

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{GM^*}{r} = r \Omega^2 - \frac{B_\phi}{4\pi r \rho} \frac{\partial}{\partial r} (r B_\phi)$$

(۸) تا (۱۰)، توان‌های ثابت $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \epsilon_5$ و ϵ_1 و n به دست می‌آیند. این توان‌ها به صورت زیرند:

$$(17) \quad n = \frac{2}{3}, \epsilon_1 = -1, \epsilon_2 = -\frac{1}{3}, \epsilon_3 = -1, \epsilon_4 = -\frac{5}{3}, \epsilon_5 = -\frac{5}{6},$$

این روابط نشان می‌دهند شعاع با زمان افزایش می‌یابد و کمیات سیستم با زمان کاهش می‌یابند. از آنجا که معادلات بنیادی حاکم بر سیستم شامل جملات وابسته به زمان و مکان هستند با قرار دادن روابط خودمشابهی در معادلات اساسی شار، بعد زمان را در معادلات حذف می‌کنیم و نهایتاً معادلات را بر حسب کمیت بدون بعد η بازنویسی می‌کنیم. بنابراین معادلات اساسی به صورت زیر در می‌آیند:

$$(18) \quad -R + \left(V - \frac{2}{3}\eta \right) \frac{dR}{d\eta} + \frac{R}{\eta^2} \frac{d}{d\eta} (\eta^2 V) = 0,$$

$$-\frac{1}{3}V + \left(V - \frac{2}{3}\eta \right) \frac{dV}{d\eta} + \frac{1}{R} \frac{dP}{d\eta} + \frac{1}{\eta^2} = \eta \omega^2 - \frac{2B}{\eta R} \frac{d}{d\eta} (\eta B)$$

$$(19) \quad -\frac{2\alpha\xi}{\eta} \frac{V}{R} \frac{d}{d\eta} \left(P\eta^{\frac{2}{3}} \right) + \frac{2}{3} \frac{\alpha\xi}{R} \frac{d}{d\eta} \left(P\eta^{\frac{1}{3}} \frac{d}{d\eta} (\eta V) \right),$$

$$(20) \quad R \left[\frac{1}{3} (\eta^2 \omega) + \left(V - \frac{2}{3}\eta \right) \frac{d}{d\eta} (\eta^2 \omega) \right] = \frac{\alpha}{\eta^2} \frac{d}{d\eta} \left(P\eta^{\frac{11}{3}} \frac{d\omega}{d\eta} \right),$$

$$(21) \quad \frac{1}{\gamma-1} \left[\frac{-5}{3} P + \left(V - \frac{2}{3}\eta \right) \frac{dP}{d\eta} \right] + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P}{\eta^2} \frac{d}{d\eta} (\eta^2 V) = \alpha f P \eta^{\frac{2}{3}} \left(\frac{d\omega}{d\eta} \right)^2 + 2\xi \alpha P \eta^{\frac{2}{3}} \left\{ \left(\frac{dV}{d\eta} \right)^2 + \left(\frac{V}{\eta} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\eta} \frac{d}{d\eta} (\eta V) \right)^2 \right\},$$

$$(22) \quad -\frac{5}{6} R + \left(V - \frac{2}{3}\eta \right) \frac{dB}{d\eta} + \frac{B}{\eta} \frac{d}{d\eta} (\eta V) = 0,$$

آهنگ برافزایش را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$(23) \quad \dot{M} = -4\pi r^2 \rho u_r,$$

مشابه با روابط (۱۱) تا (۱۶) آهنگ برافزایش را به صورت زیر بیان می‌کنیم:

$$(24) \quad \dot{M}(r,t) = \dot{M}_e(t) \dot{m}(\eta),$$

با قرار دادن روابط خودمشابهی (۱۱) تا (۱۳) در معادله (۲۴)،

$$(7) \quad \hat{u} = \sqrt{\frac{GM^*}{\hat{r}}} = \frac{\hat{r}}{\hat{t}} = \hat{r}\hat{\Omega}, \quad \hat{p} = \frac{\hat{B}^2}{4\pi} = \hat{\rho}\hat{u}^2,$$

با استفاده از این تبدیلات و با استفاده از تعاریف بالا، معادلات (۱) و (۵) بدون تغییر باقی می‌مانند ولی معادلات (۲) تا (۴) به صورت زیر بدون بعد می‌شوند:

$$(8) \quad \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} = r\Omega^2 - \frac{B_\phi}{4\pi r \rho} \frac{\partial}{\partial r} (rB_\phi) + \frac{2\alpha\xi}{3} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \times \left(pr^{\frac{1}{3}} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) \right) - \frac{2\alpha\xi u_r}{r\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left(pr^{\frac{2}{3}} \right),$$

$$(9) \quad \rho \left(\frac{\partial}{\partial t} (r^2 \Omega) + u_r \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \Omega) \right) = \frac{\alpha}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(pr^{\frac{11}{3}} \frac{\partial \Omega}{\partial r} \right),$$

$$(10) \quad \frac{1}{\gamma-1} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u_r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 u_r) = f pr^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\partial \Omega}{\partial r} \right)^2 + 2\alpha\xi pr^{\frac{2}{3}} \left(\left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u_r}{r} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) \right)^2 \right),$$

۳. راه‌حل‌های خود مشابه

برای بررسی فیریک شار برافزایشی داغ و شکسان در حضور میدان مغناطیسی از روش خودمشابه استفاده می‌کنیم. این تکنیک خودمشابهی یک روش مفید در بسیاری از زمینه‌های تحقیقاتی در اخترفیزیک است که پیچیدگی حل معادلات دیفرانسیلی جزئی را کاهش می‌دهد. لذا ما معادلات (۱)، (۵) و (۸) تا (۱۰) را با استفاده از این جواب‌های خودمشابهی بدون بعد می‌کنیم. در این روش از کمیت بدون بعد η که تابع شعاع r و زمان t است، استفاده کرده‌ایم. همه کمیات سیستم تابع کمیت خودمشابهی زمان و مکان به شکل زیر هستند:

$$(11) \quad \eta = \frac{r}{r_e(t)}, \quad r_e(t) = t^n,$$

$$(12) \quad \rho(r,t) = R(\eta) t^{\epsilon_1},$$

$$(13) \quad u_r(r,t) = V(\eta) t^{\epsilon_2},$$

$$(14) \quad \Omega(r,t) = \omega(\eta) t^{\epsilon_3},$$

$$(15) \quad p(r,t) = P(\eta) t^{\epsilon_4},$$

$$(16) \quad B(r,t) = B(\eta) t^{\epsilon_5},$$

با جایگذاری معادلات (۱۱) تا (۱۶) در معادلات (۱)، (۵) و

$$\left(\frac{28\xi}{27f} + \frac{2\xi}{9} - \frac{1}{2}\right)V_0^2 + \left(\frac{5}{3\alpha} + \frac{2}{9f\alpha} \times \frac{(5-3\gamma)}{(\gamma-1)} + \frac{\beta}{3\alpha}\right)V_0 + 1 = 0, \quad (36)$$

همان‌طور که مشاهده می‌کنیم جواب‌های مجانبی وابسته به کمیات ثابت ξ ، β ، α ، γ و f هستند. همچنین راه‌حل‌های مجانبی نشان می‌دهد که پارامتر α در نواحی داخلی قرص و در کمیات فیزیکی مسئله تأثیر بسزایی دارد. به عنوان مثال از معادلات مجانبی (۳۲) تا (۳۶) پیداست که سرعت فروریزش مواد با افزایش پارامتر α افزایش می‌یابد. چگالی، فشار گاز و میدان مغناطیسی نیز در لبه داخلی قرص با افزایش وشکسانی α کاهش می‌یابد. این نتایج برای نقاط داخلی قرص مطرح است و مطابق با نتایج مرجع [۱۳] است.

۴. نتایج

ابتدا مقدار η_{in} نقطه‌ای نزدیک به مرکز را حدس می‌زنیم و سپس معادلات (۱۸) تا (۲۲) را به روش عددی از این نقطه به سمت فواصل دورتر انتگرال‌گیری می‌کنیم. نمونه‌ای از چنین راه‌حل‌هایی در نمودارهای ۱ تا ۵ نمایش داده شده است. نمودارهای ۱ و ۲ برای مقادیر مختلف پارامتر β که نقش میدان مغناطیسی را در دینامیک قرص‌های برافزایشی نشان می‌دهد، رسم شده است. کمیات سیستم مانند $-V\eta^{1/2}$ ، $R\eta^{3/2}$ و ... در حالت پایا مقادیر ثابتی دارند [۴]؛ در حالی که این کمیات در روش‌های خودمشابهی وابسته به زمان، با مکان تغییر می‌کنند.

نمودار ۱ نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر میدان مغناطیسی، سرعت فروریزش مواد کاهش می‌یابد و از آنجا که میدان مغناطیسی با افزایش پارامتر β افزایش می‌یابد بنابراین فشار مغناطیسی به همراه فشار گاز، مواد را به بیرون هدایت می‌کند. بنابراین انتظار داریم که با افزایش فشار مغناطیسی، فروریزش مواد به سمت داخل قرص کمتر می‌شود. همچنین با توجه به این که فقط مؤلفه سمتی میدان مغناطیسی را در قرص

$\dot{m}(\eta)$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{m}(t) = -4\pi\eta^2 R(\eta) V(\eta), \quad (25)$$

همچنین با توجه به روابط خود مشابهی، $\dot{M}_0(t)$ نسبت به زمان ثابت است.

برای بررسی شدت مغناطیسی، از پارامتر β پلاسما که به صورت نسبت فشار مغناطیسی به فشار گاز تعریف می‌شود استفاده می‌کنیم و آن را یک کمیت ثابت بدون بعد در مسئله در نظر گرفته‌ایم.

۳. ۱. رفتار مجانبی در نواحی داخلی $\eta \rightarrow$

در این قسمت رفتار مجانبی معادلات (۱۸) تا (۲۵) را بررسی می‌کنیم. راه‌حل‌های مجانبی به صورت زیر هستند:

$$R(\eta) = R_0 \eta^{-1/5}, \quad (26)$$

$$V(\eta) = V_0 \eta^{-5/5}, \quad (27)$$

$$\omega(\eta) = \omega_0 \eta^{-1/5}, \quad (28)$$

$$P(\eta) = P_0 \eta^{-2/5}, \quad (29)$$

$$B(\eta) = B_0 \eta^{-1/25}, \quad (30)$$

$$\dot{m}(\eta) = -4\pi R_0 V_0, \quad (31)$$

با توجه به معادله (۳۱)، کمیت $\dot{m}(\eta)$ مقدار ثابتی است و در این مقاله مقدار آن را برابر با $\dot{m} = 0.01$ در نظر گرفته‌ایم. با قرار دادن این روابط در معادلات (۱۸) - (۲۵) کمیت‌های B_0 ، P_0 ، V_0 ، R_0 و ω_0 به صورت زیر به دست می‌آیند:

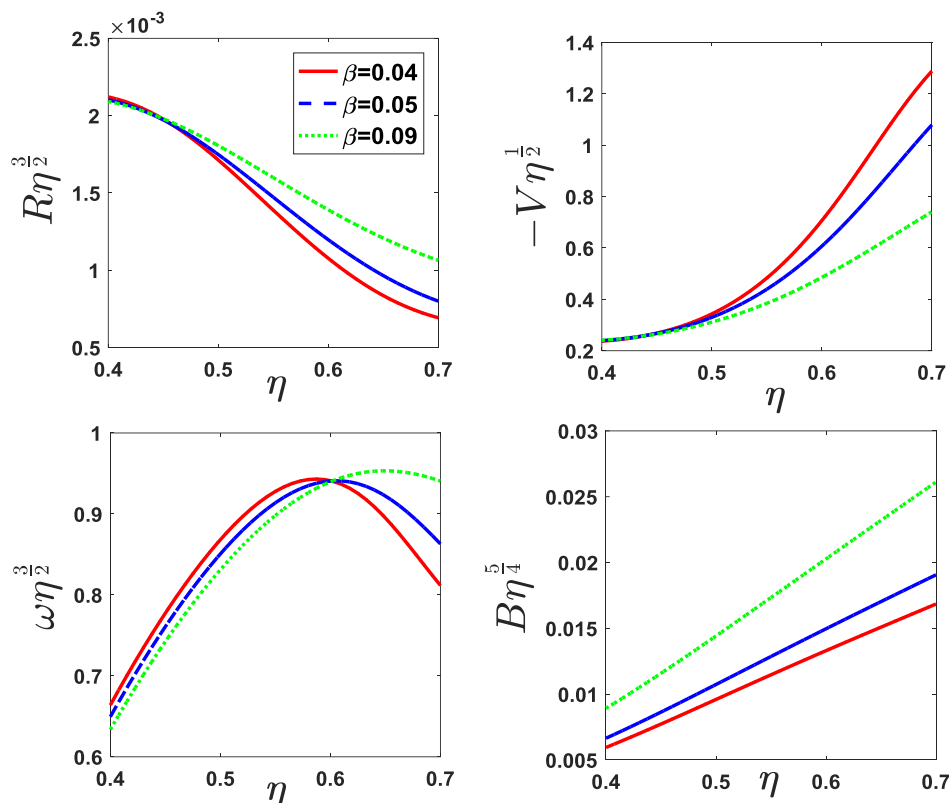
$$R_0 = \frac{-\dot{m}}{4\pi V_0}, \quad (32)$$

$$P_0 = \frac{\dot{m}}{6\pi\alpha}, \quad (33)$$

$$\frac{B_0^2}{R_0} = \frac{-2\beta}{3\alpha} V_0, \quad (34)$$

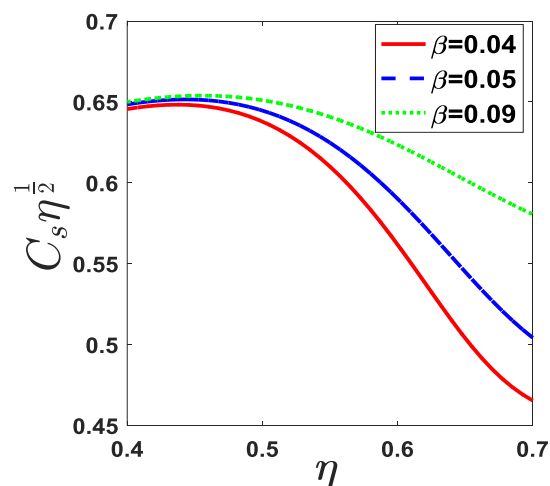
$$\omega_0^2 = \frac{-4}{9f\alpha} \left[\frac{\gamma}{3} \alpha \xi V_0^2 + \frac{(5-3\gamma)}{2(\gamma-1)} V_0 \right], \quad (35)$$

تمام کمیت‌های ثابت B_0 ، ω_0 ، P_0 ، R_0 تابع V_0 است و کمیت ثابت V_0 را از معادله درجه دو زیر به دست می‌آوریم:

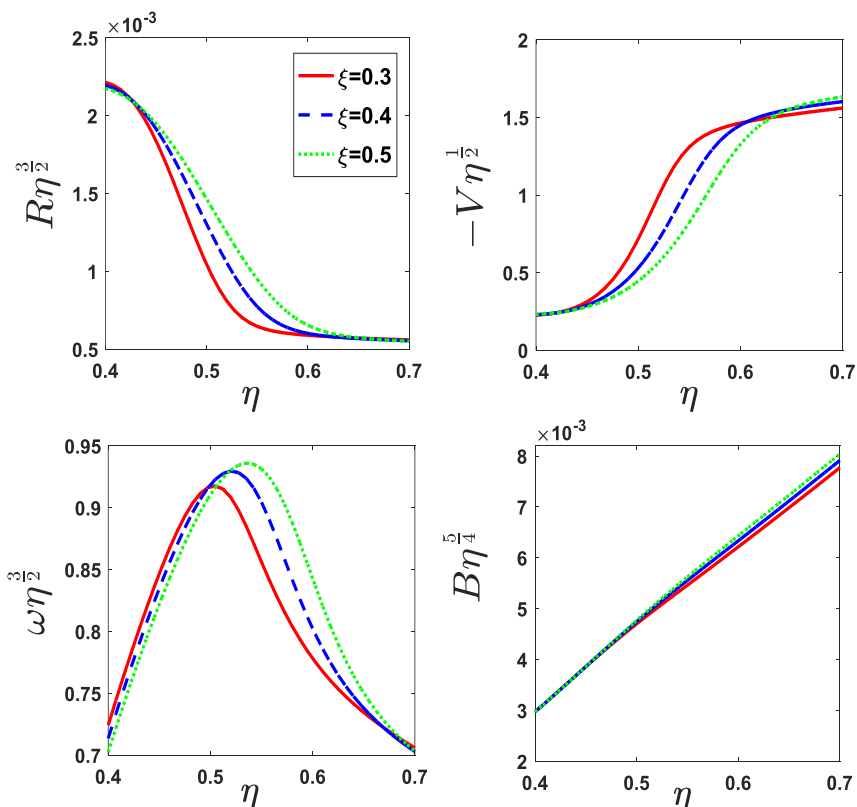


شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) راه حل‌های خودمشابهی وابسته به زمان η برای $\alpha = 0.06$ ، $\xi = 0.09$ ، $f = 0.07$ ، $m = 0.01$ و $\gamma = 1/33$. خط پر رنگ $(b = 0.04)$ ، خط چین $(b = 0.05)$ و خط نقطه چین $(b = 0.09)$ اثرات پارامتر مغناطیسی را روی کمیات چگالی، سرعت شعاعی، سرعت چرخشی و میدان مغناطیسی نشان می‌دهد.

در نظر گرفته‌ایم لذا با افزایش میدان مغناطیسی، انرژی مغناطیسی در فواصل دور بر انرژی جنبشی مواد در راستای شعاعی غلبه می‌کند در نتیجه مواد درون قرص داغ در راستای مؤلفه سمتی میدان مغناطیسی کشیده می‌شوند و انتظار داریم که با افزایش پارامتر β ، سرعت سمتی مواد در فواصل دورتر از ستاره مرکزی افزایش یابد. همانطور که مشاهده می‌شود اثر چشم‌گیر میدان مغناطیسی در لایه‌های بیرونی قرص مشاهده می‌شود. بنابراین با کاهش سرعت شعاعی مواد در فواصل دورتر، چگالی قرص در مناطق بیرونی با افزایش پارامتر β افزایش می‌یابد و این موجب می‌شود که مواد در نواحی بیرونی فرصت متراکم شدن را داشته باشند و این عوامل باعث کم شدن ضخامت قرص خواهد شد. در نمودار ۱ مشاهده می‌کنیم که چرخش شار در شعاع‌های بزرگ‌تر رفتار کپلری دارد و این نواحی رفتاری مشابه به راه‌حل‌های خودمشابهی پایا دارد.



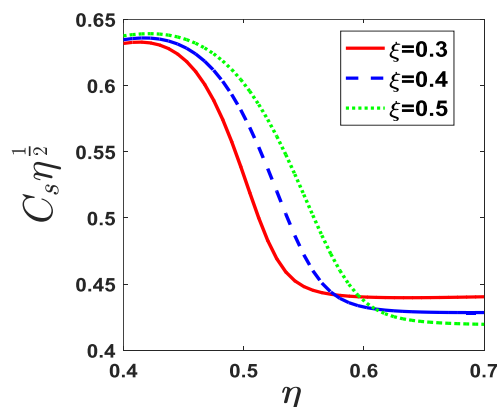
شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) راه حل‌های خودمشابهی وابسته به زمان η برای $\alpha = 0.06$ ، $\xi = 0.09$ ، $f = 0.07$ ، $m = 0.01$ و $\gamma = 1/33$. خط پر رنگ $(b = 0.04)$ ، خط چین $(b = 0.05)$ و خط نقطه چین $(b = 0.09)$ اثرات پارامتر مغناطیسی را روی دمای قرص نشان می‌دهد.



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) راه حل‌های خودمشابهی وابسته به زمان $m = 0.01$, $f = 0.07$, $\beta = 0.01$, $\alpha = 0.06$ و $\gamma = 1/33$. خط پر رنگ (رنگ $\xi = 0.3$)، خط چین (رنگ $\xi = 0.4$) و خط نقطه چین (رنگ $\xi = 0.5$) اثرات وشکسانی شعاعی را روی کمیات چگالی، سرعت شعاعی، سرعت چرخشی و میدان مغناطیسی نشان می‌دهد.

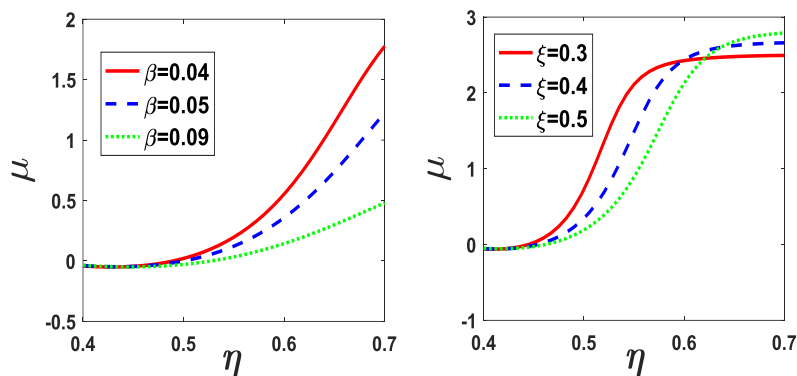
به دمای قرص است نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌کنیم در نواحی بیرونی قرص با افزایش شدت میدان مغناطیسی و فشار مغناطیسی دمای قرص افزایش می‌یابد.

در شکل‌های ۳ و ۴ مقادیر ξ نقش وشکسانی شعاعی را در دینامیک قرص برافزایشی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌کنیم تأثیر وشکسانی شعاعی در میدان مغناطیسی ناچیز است و تنها در فواصل دورتر، تأثیر اندکی روی میدان مغناطیسی می‌گذارد. با افزایش ξ در فواصل دورتر از ستاره مرکزی، سرعت فروریزش مواد بیشتر می‌شود و این به معنای افزایش آهنگ فروریزش و کم شدن چگالی قرص می‌شود. انتظار می‌رود که عمر قرص کوتاه‌تر از عمر قرص‌هایی باشد که فقط وشکسانی سمتی دارند و این امر توسط مشاهدات نشان داده شده است که عمر قرص‌های واقعی کوتاه‌تر است. همچنین در لبه‌های داخلی قرص، افزایش پارامتر وشکسانی شعاعی، سرعت چرخشی



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) راه حل‌های خودمشابهی وابسته به زمان $m = 0.01$, $f = 0.07$, $\beta = 0.01$, $\alpha = 0.06$ و $\gamma = 1/33$. خط پر رنگ (رنگ $\xi = 0.3$)، خط چین (رنگ $\xi = 0.4$) و خط نقطه چین (رنگ $\xi = 0.5$) اثرات وشکسانی شعاعی را روی دمای قرص نشان می‌دهد.

نمودار ۲ تأثیر میدان مغناطیسی را در سرعت صوت که وابسته



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) راه حل‌های خودمشابهی وابسته به زمان برای عدد ماخ. پارامترهای ورودی برای هر دو نمودار به صورت $\gamma = 1/33$ و $\alpha = 0/6$ ، $f = 0/7$ ، $\dot{m} = 0/01$ ، $\xi = 0/3$ ، $\beta = 0/04$ ، $\xi = 0/4$ ، $\xi = 0/5$ و خط نقطه چین $(b = 0/05)$ اثرات وشکسانی شعاعی را روی عدد ماخ نشان می‌دهد. نمودار سمت راست: خط پر رنگ $(\xi = 0/3)$ ، خط چین $(\xi = 0/4)$ و خط نقطه چین $(\xi = 0/5)$ اثرات وشکسانی شعاعی را روی عدد ماخ نشان می‌دهد. نمودار سمت چپ: خط پر رنگ $(b = 0/04)$ ، خط چین $(b = 0/05)$ و خط نقطه چین $(b = 0/09)$ اثرات پارامتر مغناطیسی را روی عدد ماخ نشان می‌دهد.

($|\mu| = 1$) وجود دارد که این نقطه با افزایش پارامتر میدان مغناطیسی و وشکسانی شعاعی به سمت نواحی بیرونی قرص حرکت می‌کند. همچنین پارامتر وشکسانی شعاعی مقدار عدد ماخ را در نقاط بیرونی افزایش می‌دهد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از جواب‌های نیمه تحلیلی خودمشابهی، معادلات وابسته به زمان شارهای برافزایشی با پهن‌رفت غالب در حضور میدان مغناطیسی و مؤلفه شعاعی وشکسانی حل شده‌اند. در این مقاله مقید به بسیاری از محدودیت‌ها در روش خودمشابهی پایا نیستیم، در نتیجه وابستگی شعاعی کمیات فیزیکی مسئله با جواب‌های حالت پایا متفاوت است. با افزایش پارامتر β ، میدان مغناطیسی، فشار مغناطیسی، چگالی، سرعت سمتی مواد و دمای قرص در فواصل دورتر از ستاره مرکزی افزایش می‌یابد در حالی که در این نواحی سرعت برافزایشی مواد و ضخامت قرص کاهش می‌یابد. همچنین در تمام نواحی چرخش زیرکپلری است. رفتار پارامتر ξ (مؤلفه شعاعی وشکسانی) در فواصل نزدیک و میانی قرص مشابه با پارامتر میدان مغناطیسی است؛ در حالی که در نواحی دورتر از ستاره مرکزی با افزایش ξ آهنگ فروریزش مواد بیشتر می‌شود و عمر قرص با حضور پارامتر وشکسانی شعاعی کمتر می‌شود. در این

کاهش می‌یابد و این به معنای کاهش چگالی قرص در این نواحی خواهد بود ولی در نواحی میانی و بیرونی قرص، با افزایش نیروی وشکسانی شعاعی چرخش سریع‌تر و چگالی افزایش پیدا می‌کند و همچنین سرعت شعاعی نیز کاهش می‌یابد. در نمودار ۴ تأثیر وشکسانی شعاعی را به عنوان یک عامل گرمایشی مشاهده می‌کنیم که سبب افزایش دمای قرص در نواحی نزدیک به جسم مرکزی می‌شود و این نتایج توافق خوبی با مرجع [۲۲] دارد.

برای بررسی نقطه عبور صوتی در شاره برافزایشی، نمودار عدد ماخ در **شکل ۵** نمایش داده شده است. عدد ماخ در چهارچوب مرجع متحرک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu = \frac{V - V_F}{C_s} = \frac{V - \frac{2}{3}\eta}{C_s}, \quad (37)$$

$$V_F = \frac{dr}{dt} = \frac{2}{3} \frac{r}{t} = \frac{2}{3} \eta.$$

کاملاً واضح است که عدد ماخ در جواب‌های خودمشابه وابسته به زمان با شعاع تغییر می‌کند در حالی که در جواب‌های پایا، عدد ماخ یک کمیت ثابت است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شماره در نقاط بیرونی با افزایش شدت میدان مغناطیسی زیرصوتی است؛ زیرا در این نواحی سرعت فروریزش با افزایش β کاهش می‌یابد. همچنین در نمودارهای سمت راست و چپ شکل ۵ مشاهده می‌کنیم که یک نقطه عبور صوتی

قرص ایستا جریان‌های خروجی می‌تواند انرژی را از سیستم خارج کند و دمای قرص را پایین بیاورد و در نتیجه چنین کاهش دمایی توسط اثرات باد و جریان‌های خروجی می‌تواند اختلاف بین دمای تئوری و دمای مشاهداتی از قرص‌ها را به خوبی توصیف کند. لذا اگر در کارهای آینده در چنین سیستمی اثرات باد و جریان‌های خروجی را در معادلات لحاظ کنیم می‌توانیم توصیف بهتری از تحول شاره‌های برافزایشی اطراف سیاه‌چاله‌ها ارائه دهیم.

مقاله اثر و شکسانی شعاعی را که می‌تواند از فروریزش بادهای ستاره‌ای از ستارگان پرجرم در مرکز کهکشان راه شیری تولید شود (wind inflow) بدون در نظر گرفتن اثرات جریان‌های خروجی و باد از خود قرص (outflow/wind) مطالعه کرده‌ایم. در حالی که مشاهدات رصدی از $Sgr A^*$ و منابع دیگر مانند GRS 1915+105 نشان می‌دهد که آهنگ برافزایش جرم به سمت داخل کاهش می‌یابد و این به معنای خروج جرم به شکل باد از سیستم است [۱۹ و ۲۰]. مرجع [۲۲] نشان داد در یک

مراجع

1. F Yuan and R Narayan, *ARA&A* **52** (2014) 529.
2. N I Shakura and R A Sunyaev, *A&A* **24** (1973) 337.
3. R Narayan and I Yi, *ApJ* **428** (1994) L13.
4. R Narayan and I Yi, *ApJ* **444** (1995) 231.
5. S Kato, J Fukue, and S Mineshige, "Black-Hole Accretion Disks - Towards a New Paradigm", Kyoto University Press, (2008).
6. S Ichimar, *ApJ* **214** (1977) 840.
7. S Mineshige, K Nakamaya and M Umemura, *PASJ*, **49** (1997) 439.
8. S Abbassi, J Ghanbari and F Salehi, *A&A* **460** (2006) 357.
9. S Shadmehri, *A&A* **460** (2006) 357.
10. W J Duschl, P A Strittmatter, and P L Biermann, *A&A* **357** (2000) 1123.
11. J Ghanbari, S Abbassi and N Jamialahmadi, *Iranian Journal of Physics Research* **11** (2011) 1 (Persian).
12. A Khesali, K Faghei, *MNRAS* **389** (2008) 1218.
13. A Khesali, K Faghei, *MNRAS* **398** (2009) 1361.
14. M Ghasemnezhad and S Abbassi, *MNRAS* **456** (2016) 71.
15. M Ghasemnezhad and S Abbassi, *MNRAS* **469** (2017) 3307.
16. S Hirose, J H Krolik, J P De Villiers, and J F Hawley, *ApJ*. **606** (2004) 1083.
17. C Akizuki and J Fukue, *PASJ*. **58** (2006) 469.
18. S Avachat, E S Perlman, K Li, and K Kosak, *AAS*. **231** (2018) 44007A.
19. R Narayan, A Sadowski, R F Penna, and A K Kulkarni, *MNRAS*. **426** (2012) 3241.
20. F Yuan, Z Gan, R Narayan, A Sadowski, D Bu, and X N Bai, *ApJ*. **804** (2015) 101.
21. T Beckert, *ApJ*. **539** (2000) 223.
22. S M Ghoreyshi and M Shadmehri, *MNRAS* **493** (2020) 5107G.
23. Q D Wang, *et al.*, *Science* **341** (2013) 981.
24. J M Miller, *et al.*, *ApJ*. **821**(2016) L9.