





دانشگاه تهران  
دانشکده‌گان علوم  
دانشکده فیزیک

رساله برای دریافت درجه دکتری تخصصی PhD در رشته فیزیک  
گرایش گرانش و کیهان‌شناسی

## مقلدهای سیاه‌چاله

آرمین صادقی حسنوند

استاد راهنما

دکتر فاطمه شجاعی باغینی

شهریور ۱۴۰۴



بسمه تعالی

## تعهدنامه‌ی اصالت اثر

اینجانب آرمین صادقی حسنوند کواهی و تعهد میدهم که مطالب مندرج در این رساله حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستور دمای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده، مطابق مقررات و اصول مرتبط با درج منابع و آخذ ارجاع داده‌ام. این رساله قبلاً برای دریافت هیچ مدرک تحصیلی دیگری ارائه نشده است. ضمن پابندی به رعایت مقررات و اصول اخلاق در پژوهش، میپذیرم که در هر زمانی، خلاف این کواهی اثبات شود، دانشگاه تهران حق دارد مدرک تحصیلی صادر شده را از درجه‌ی اعتبار ساقط نماید. کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تهران است.

نام و نام خانوادگی: آرمین صادقی حسنوند

تاریخ و امضا: ۱۴۰۴/۶/۲۵

**امضا**

لعلکم به

پدر، مادر و خواهر عزیزم

مدل‌های سیاه‌چاله‌ای، با وجود موفقیت‌های چشمگیر، پرسش‌هایی بنیادی در مورد ماهیت فضا-زمان، افق‌ها و تکینگی‌ها مطرح می‌کند. تکینگی‌ها در سیاه‌چاله‌ها ناکارآمدی نظریه را در آن محل نشان می‌دهد و این مشکلی است که باید حل شود. در میان سناریوهای ممکن برای رفع تکینگی، سیاه‌چاله‌های منظم و یا ستارگان فوق‌فشرده‌ی بدون افق مورد توجه قرار گرفته‌اند. دسته‌ی نخست، پاسخ‌هایی هستند که دست‌کم دارای یک افق بیرونی و یک افق درونی‌اند اما فاقد هسته‌ی تکین می‌باشند. دسته‌ی دوم پیکربندی‌های هستند که در آن‌ها هیچ افقی وجود ندارد و سطح ستاره درون کره‌ی فوتونی قرار دارد. این دو دسته، مثال‌های اصلی مقلدهای سیاه‌چاله هستند. اجرام ناتکینی که نمی‌توان الزاماً آن‌ها را در رصد از سیاه‌چاله تشخیص داد، ضمن آنکه چالش‌های مطرح شده در مورد سیاه‌چاله‌ها را ندارد. رصدها برای مشاهده‌ی اجسام پرجرم مانند سیاه‌چاله‌های کلان‌جرم به مشاهده‌ی سایه و امواج گرانشی محدود می‌شوند و پیشرفت‌های اخیر در اخترشناسی امواج گرانشی و تصویربرداری الکترومغناطیسی در مقیاس افق، مسیرهای جدیدی برای آزمودن مدل‌های سیاه‌چاله‌ای و مقلدها گشوده‌اند و بنابراین بررسی این جایگزین‌های سیاه‌چاله را به موضوع روز تبدیل کرده است. در میان این مقلدها، این رساله به دسته‌ی سیاه‌چاله‌های منظم و فرآیند تشکیل آن‌ها از رمبش یک ستاره می‌پردازد. ابتدا فرآیند رمبش به سیاه‌چاله‌های منظم شناخته‌شده‌ی باردین و هیوارد را بررسی می‌کنیم. سپس، این سناریو را به یک خانواده از سیاه‌چاله‌های منظم با هسته‌ی دوسویه تعمیم خواهیم داد که مدل‌های باردین و هیوارد حالات خاصی از آن هستند. همچنین سناریوی رمبش را برای متریک سیاه‌چاله‌ی منظم گرانش اینشتین-گوس-بونه در چهار بعد، را بررسی خواهیم کرد و این پرسش را پاسخ می‌دهیم که آیا این متریک واقعاً منظم است و آیا می‌تواند نقش یک مقلد را بازی کند یا خیر. پس از آن گرانش سطح برای ستاره‌ی در حال رمبش به سیاه‌چاله‌های منظم می‌پردازیم. ما این خانواده از سیاه‌چاله‌های منظم را به ابعاد بالا گسترش خواهیم داد، تانسور انرژی-تکانه‌ی آن را معرفی و کره‌ی فوتون و سایه را محاسبه کرده و با رصد مقایسه خواهیم کرد. در نهایت، ما ترمودینامیک، آنتروپی، ظرفیت گرمایی و پایداری را برای این دسته از سیاه‌چاله‌های منظم را بررسی خواهیم کرد.

**واژگان کلیدی:** سیاه‌چاله‌های منظم، اجسام فوق‌فشرده، تکینگی، گرانش سطح، افق، ترمودینامیک سیاه‌چاله، کره‌ی فوتون، سایه‌ی سیاه‌چاله، گرانش گوس-بونه

## قدردانی

وظیفه خود می‌دانم از زحمات بی‌دریغ استاد راهنمایم، سرکار خانم دکتر فاطمه شجاعی باغینی، صمیمانه قدردانی کنم. بی‌تردید بدون راهنمایی‌های ارزشمند ایشان، انجام این رساله میسر نمی‌شد. از دوستان عزیزم که در دوران دکتری، با حضور دلگرم‌کننده‌شان در این مسیر به من انگیزه دادند، سپاسگزارم. از داوران دفاع دکتری بنده که با نکات و پیشنهادهایشان تز دکتری من را بهبود بخشیدند کمال امتنان را دارم. در پایان، بوسه می‌زنم بر دستان پدر و مادر عزیزم و از خانواده عزیزم به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان، که بهترین پشتیبان من بودند، تشکر می‌کنم.

آرمین صادقی حسنوند

شهریور ۱۴۰۴

# فهرست مطالب

ج	قرارداد ها و نماد گذاری ها
۱	مقدمه
۲	فصل ۱: فصل اول
۳	فصل ۲: فصل دوم
۴	فصل ۳: فصل سوم
۵	فصل ۴: فصل چهارم
۶	مراجع

## قرارداد ها و نماد گذاری ها



## مقدمه

فصل ۱

فصل اول

فصل ۲

فصل دوم

فصل ۳

فصل سوم

فصل ۴

فصل چهارم

## مراجع

## Abstract:

Black hole models, despite their remarkable successes, raise fundamental questions about the nature of spacetime, horizons, and singularities. The presence of singularities inside black holes suggests a theoretical breakdown that must be resolved. Black hole mimickers have been proposed as alternative candidates. Among the possible scenarios for addressing singularities, regular black holes and horizon-less ultra-compact stars have attracted attention. The former possess at least an outer and an inner horizon but lack a singular core. The latter are configurations without horizons and the stellar surface lies within the photon sphere. These two categories are the main examples of black hole mimickers. They are non-singular objects that cannot necessarily be distinguished from black holes through observation. They also avoid the challenges associated with black holes. Observations of massive objects such as supermassive black holes are limited to shadow measurements and gravitational waves. Recent advances in gravitational wave astronomy and horizon-scale electromagnetic imaging have opened new pathways to test these models. These advances have made the study of black holes and their mimicker models, an important topic. This thesis focuses on regular black holes as a class of mimicker models and examines their formation through stellar collapse. We first examine the gravitational collapse leading to well-known Bardeen and Hayward regular black holes. Next, we generalize this scenario to a class of regular black holes with a de Sitter core. The Bardeen and Hayward solutions are two special cases of this class. Then, we study the dynamics of horizons during the collapse. Additionally, we also analyze the collapse scenario for a regular black hole metric in four-dimensional Einstein–Gauss–Bonnet gravity to determine whether this metric is truly regular and whether it can effectively serve as a mimicker. Furthermore, we study the surface gravity of collapsing stars that form regular black holes. We extend this class of regular black holes to higher dimensions, introduce their energy–momentum tensor, analyze their photon spheres and shadows, and compare them with observations. Finally, we explore photon spheres, shadow, thermodynamics, entropy, heat capacity, and stability of this class of regular black holes.

**Keywords:** Regular black holes, Singularity, Ultracompact object, Surface gravity, Horizon, Black hole thermodynamics, Photon sphere, Shadow, Gauss-Bonnet gravity



University of Tehran  
Faculty of Science  
Department of Physics

A Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy in Physics

# Black hole mimickers

By:

**Armin Sadeghi**

Supervisor:

**Prof. Fatimah Shojai Baghini**

Shahrivar-1404