



تحلیل تانسور تنش-انرژی و پایداری فیزیک کلاسیک و کوانتومی: مفاهیم و کاربردها

نوید مسرت^{۱*}

۱- استاد گروه فیزیک، دانشکده‌ی تعلیم و تربیه، دانشگاه جوزجان، شبرغان، افغانستان. ایمیل: nawidpirooz@gmail.com

* نویسنده مسئول

چکیده

تحلیل تانسور تنش-انرژی و پایداری فیزیک کلاسیک و کوانتومی نقشی حیاتی در درک ارتباط انرژی، تکانه، و ساختار فضا-زمان ایفا می‌کند. این تانسور به‌عنوان یکی از ابزارهای اساسی در نظریه‌های میدان کلاسیک و کوانتومی شناخته می‌شود و کاربردهای وسیعی در مدل‌سازی سیستم‌های فیزیکی مختلف دارد. هدف از این مطالعه، ارائه یک مروری جامع بر تحلیل تانسور تنش-انرژی و پایداری فیزیک کلاسیک و کوانتومی است. در این پژوهش، مقالات معتبر از پایگاه‌های داده مختلف شامل Google Scholar، Scopus و علم نت بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ جستجو و بررسی شد. تعداد ۶۰۰ مقاله اولیه بررسی شده که پس از اعمال معیارهای ورود و خروج، ۱۰ مقاله برای مطالعه نهایی انتخاب شد. معیارهای انتخاب شامل ارتباط مستقیم با تانسور تنش-انرژی و پایداری فیزیک کلاسیک و کوانتومی، و تمرکز بر اصلاحات کوانتومی و تأثیرات گرانشی در مدل‌های کیهان‌شناسی بودند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که تانسور تنش-انرژی در مدل‌سازی دقیق‌تری از فضا-زمان و گرانش موثر است. همچنین، اصلاحات کوانتومی به بهبود شبیه‌سازی‌های گرانشی و تحلیل‌های کیهان‌شناسی کمک می‌کنند. این یافته‌ها می‌توانند در پیشبرد تحقیقات و مدل‌های پیچیده‌تر در فیزیک نظری و کوانتومی مفید باشند.

کلمات کلیدی: تانسور تنش-انرژی، پایداری، اصلاحات کوانتومی، فیزیک کلاسیک، فیزیک کوانتومی

Analysis of Stress-Energy Tensor and Conservation in Classical and Quantum Physics: Concepts and Applications

Nawid Musarat^{1,*}

1- Lecturer in Physics department, Education Faculty, Jawzjan University, Sheberghan, Afghanistan. Email: nawidpirooz@gmail.com.

* Corresponding Author

Abstract

The analysis of the stress-energy tensor and conservation in classical and quantum physics plays a vital role in understanding the relationship between energy, momentum, and the structure of spacetime. This tensor is recognized as one of the fundamental tools in classical and quantum field theories, with wide applications in modeling various physical systems. The aim of this study is to provide a comprehensive review of the stress-energy tensor and conservation in both classical and quantum contexts. In this research, articles from reputable databases such as Google Scholar, Scopus, and ScienceNet were searched and reviewed from 2021 to 2025. A total of 600 initial papers were reviewed, and after applying inclusion and exclusion criteria, 10 papers were selected for the final study. The selection criteria included direct relevance to the stress-energy tensor and conservation in classical and quantum physics, with a focus on quantum corrections and gravitational effects in cosmological models. The results of this study indicate that the stress-energy tensor contributes to a more accurate modeling of spacetime and gravity. Furthermore, quantum corrections assist in enhancing gravitational simulations and cosmological analyses. These findings can aid in advancing research and more complex models in theoretical and quantum physics.

Keywords: Stress-Energy Tensor, Conservation, Quantum Corrections, Classical Physics, Quantum Physics

۱- مقدمه

ایفا می‌کند (روان، ۱۴۰۰). در فیزیک کلاسیک، این تانسور با استفاده از معادلات پایداری برای تحلیل ارتباط میان انرژی و تکانه در فضا-زمان به‌طور مستقیم به‌کار می‌رود (Saffer, ۲۰۱۸). معادلاتی که در این زمینه وجود دارند، می‌توانند ویژگی‌های اساسی فضا-زمان و تعاملات مختلف فیزیکی را توضیح دهند و برای فهم چگونگی رفتار سیستم‌های فیزیکی تحت شرایط مختلف کمک شایانی به‌عمل آورند (Lodman, ۲۰۲۰). اما با پیشرفت علم و ورود به دنیای فیزیک کوانتومی، این تانسور با پیچیدگی‌های جدیدی روبه‌رو می‌شود

تحلیل تانسور تنش-انرژی و پایداری فیزیک کلاسیک و کوانتومی به‌عنوان یکی از مفاهیم بنیادین و پیچیده در فیزیک نظری و ریاضی، اهمیت بسیاری در درک ارتباطات میان انرژی، تکانه و ساختار فضا-زمان در مقیاس‌های مختلف دارد (Yargic, ۲۰۲۰). تانسور تنش-انرژی نه تنها به‌عنوان یک ابزار ریاضیاتی برای توصیف این روابط به‌کار می‌رود، بلکه در نظریه‌های مختلف فیزیکی، از جمله نظریه میدان کلاسیک و میدان کوانتومی، نقش حیاتی

(۲۰۲۰، Matyjasek). تغییرات ناشی از اثرات کوانتومی نظیر انومالی‌ها، تغییرات در ویژگی‌های فضا-زمان و اصلاحات نسبیتی، چالش‌های جدیدی را ایجاد کرده است. این پیچیدگی‌ها نشان‌دهنده اهمیت بیشتر تانسور تنش-انرژی در بررسی پدیده‌های فیزیکی در مقیاس‌های کوانتومی است که در آن‌ها اثرات کوانتومی باید در نظر گرفته شوند (Adrian, ۲۰۱۸). از این‌رو، درک دقیق این تانسور در زمینه‌های مختلف فیزیکی، از جمله در نظریه‌های کلاسیک و کوانتومی، برای پیشرفت درک علمی و توسعه نظریه‌های فیزیکی ضروری است (هالیدی، ۱۴۰۳). چالش‌های موجود در تحلیل تانسور تنش-انرژی به‌ویژه زمانی که به فیزیک کوانتومی و نسبیتی پرداخته می‌شود، متنوع و پیچیده هستند. یکی از مشکلات اصلی، تفاوت‌های اساسی در رفتار این تانسور در نظریه‌های کلاسیک و کوانتومی است (Pitelli, ۲۰۱۹). در فیزیک کلاسیک، تانسور تنش-انرژی به‌طور مستقیم از معادلات حرکت میدان‌ها به‌دست می‌آید و ساختار ساده‌تری دارد، اما در فیزیک کوانتومی، تغییرات به‌وجود آمده در نتیجه اثرات کوانتومی نظیر انومالی‌ها و اصلاحات فراتر از مدل‌های کلاسیک می‌رود (لنجانی، ۱۳۹۵). همچنین، مفاهیم مرتبط با حفظ پایستگی و قوانین محافظتی در فیزیک کوانتومی با مسائل جدی همچون تجزیه‌ناپذیری تانسور تنش و اصلاحات نهایی همراه است. از طرف دیگر، در فضا-زمان‌های خمیده و ناپایدار، مشکلاتی همچون انحرافات و واگرایی‌های تانسور تنش-انرژی در مدل‌های مختلف فیزیکی چالش‌های قابل توجهی را به‌وجود می‌آورد. علاوه بر این، بررسی دقیق تأثیرات تانسور تنش-انرژی در سیاه‌چاله‌ها، فضا‌های زمان کشیده و جهان‌های در حال انبساط، نیازمند رویکردهای محاسباتی پیچیده‌ای است که باید با دقت بررسی شود (Adamo, ۲۰۲۰). هدف این مقاله مروری، بررسی جامع و دقیق تانسور تنش-انرژی و پایستگی در فیزیک کلاسیک و کوانتومی است. این تحقیق به بررسی مفاهیم پایه‌ای، تئوری‌های موجود و چالش‌های مختلف این حوزه می‌پردازد. مقالات مختلف در این زمینه مورد تحلیل و مرور قرار خواهند گرفت تا تفاوت‌ها و شباهت‌های تانسور تنش-انرژی در فیزیک کلاسیک و کوانتومی روشن شود. علاوه بر این، این پژوهش به چالش‌های موجود در درک و کاربرد تانسور تنش-انرژی در شرایط مختلف فضا-زمان پرداخته و تلاش دارد که چشم‌اندازهای جدیدی برای تحقیقات آینده در این زمینه ارائه دهد. به‌طور خاص، در این پژوهش به انومالی‌های کوانتومی، اثرات اصلاحات نسبیتی و کوانتومی، و تأثیر این تانسورها در ساختارهایی مانند سیاه‌چاله‌ها و جهان‌های در حال انبساط پرداخته خواهد شد. مطالعات مختلفی در زمینه تانسور تنش-انرژی و پایستگی در فیزیک کلاسیک و کوانتومی انجام شده است که در این مقاله مروری گردآوری شده‌اند. به عنوان مثال، سوانسون^۱ (۲۰۲۲) در کتاب خود به تئوری میدان کلاسیک و تانسور تنش-انرژی پرداخته و مفاهیم ریاضی و فیزیکی آن را به‌طور جامع ارائه داده است. کاستری^۲ و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهش خود به بررسی انومالی‌های رد شدن خطا و قوانین پایستگی در تانسور تنش-انرژی برای یک میدان اسکالر خود-تعامل پرداخته‌اند. همچنین، ماهر^۳ و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای به بررسی اصلاحات کوانتومی تانسور تنش-انرژی در قلمرو نسبیتی پرداخته و اثرات آن را بر ساختار فضا-زمان بررسی کرده‌اند. آخمدف^۴ و همکاران (۲۰۲۴) در مقاله خود به اثرات اصلاحات کوانتومی در تانسور تنش-انرژی در جهان‌های در حال انبساط پرداخته‌اند. نیاردی^۵ و همکاران (۲۰۲۱) نیز به تحلیل بخش‌های واگرا در

تانسور تنش-انرژی در نظریه مکسول در فضا-زمان خمیده پرداخته‌اند. بریزیو^۶ و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه خود به بررسی تغییرات تانسور تنش-انرژی در فضا-زمان‌های مختلف و ارتباط آن با نظریه‌های گرانشی پرداخته‌اند. پرچه^۷ و همکاران (۲۰۲۵) نیز مدل آشکارساز Unruh-DeWitt را بررسی کرده و تانسور تنش-انرژی مرتبط با آن را تحلیل کرده‌اند. گویی^۸ (۲۰۲۳) به طور خاص به تحلیل تانسور تنش-انرژی در فیزیک کوانتومی خود-تعامل پرداخته و تأثیر انومالی‌های کوانتومی را بررسی کرده است. همچنین، معین مقدس (۲۰۲۲) در مقاله‌ای به تحلیل معادلات پایستگی تکانه-انرژی در شارهای نسبیتی و غیر نسبیتی پرداخته و ارتباط آنها را بررسی کرده است. در نهایت، نژادکهنوجی و قاسم‌نژاد (۲۰۲۴) به بررسی مولفه‌های تانسور تنش در قرص‌های پیش‌سیاره‌ای پرداخته‌اند و تأثیر آن بر انتقال تکانه زاویه‌ای در این ساختارها را تحلیل کرده‌اند. تمامی این مطالعات به‌طور گسترده‌ای در این مقاله مروری مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۲. روش‌شناسی

در بخش روش‌شناسی این مقاله مروری، به‌طور جامع فرآیند جمع‌آوری، انتخاب و تحلیل مقالات علمی مرتبط با تانسور تنش-انرژی و پایستگی در فیزیک کلاسیک و کوانتومی توضیح داده شده است. این بخش روند انتخاب منابع علمی، معیارهای معتبرسازی آن‌ها و دلایل حذف برخی مقالات را به‌طور شفاف توضیح داده شده است. همچنین، جزئیات بیشتری درباره معیارهای انتخاب، پایگاه‌های داده‌ای مورد استفاده، و فرآیند ارزیابی کیفیت منابع شرح داده خواهد شد.

۱.۲. منابع داده‌ای

برای جمع‌آوری مقالات علمی و منابع معتبر، از جستجو در پایگاه‌های داده معتبر و علمی استفاده شد. جستجو با استفاده از کلیدواژه‌های مختلف انجام گرفت که شامل عبارت‌های زیر بود: Stress-Energy Tensor، Conservation Law in Classical and Quantum Physics، Energy-Momentum Tensor، Quantum and Classical Field Theory، Quantum Field Theory and Stress-Energy، این جستجوها در چند پایگاه داده علمی شامل Google Scholar، PubMed، Scopus، Web of Science و علم نت انجام شد. مقالات بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ مورد بررسی قرار گرفتند. جستجوی اولیه منجر به شناسایی حدود ۶۰۰ مقاله در این زمینه شد که به‌طور گسترده به تانسور تنش-انرژی در فیزیک کلاسیک و کوانتومی پرداخته بودند. پس از آن، فرآیند غربالگری مقالات بر اساس معیارهای دقیق‌تری انجام شد.

۲.۲. معیارهای انتخاب و حذف مقالات

در فرآیند انتخاب مقالات برای این پژوهش مروری، مقالاتی که به‌طور مستقیم به تحلیل تانسور تنش-انرژی و پایستگی در زمینه‌های فیزیک کلاسیک و کوانتومی پرداخته بودند، به‌عنوان مقالات واجد شرایط انتخاب شدند. این مقالات شامل انواع مختلفی از مطالعات نظری و تجربی می‌شد که به‌طور جامع مفاهیم تانسور تنش-انرژی و پایستگی را در هر دو زمینه کلاسیک و کوانتومی مورد بررسی قرار داده بودند. علاوه بر این، مقالات مرتبط با اصلاحات

⁵ Niardi

⁶ Brizio

⁷ Perche

⁸ Goi

¹ Swanson

² Costeri

³ Maher

⁴ Akhmedov

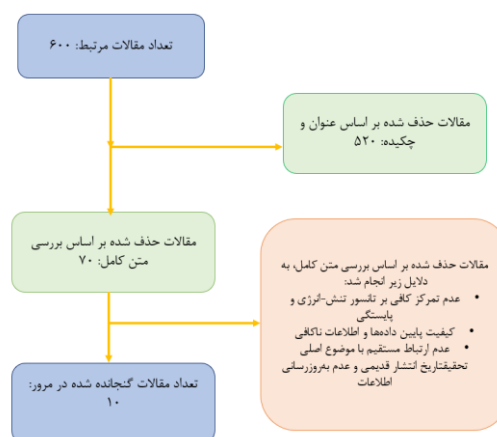
(۲۰۲۴) به بررسی انومالی‌های رد شدن خطا و قوانین پایستگی در تانسور تنش-انرژی برای میدان اسکالر خود-تعامل در فضا-زمان‌های جهانی و هایپربولیک می‌پردازد. این مطالعه با استفاده از روش‌های ریاضی پیشرفته و تکنیک‌های تحلیل داده‌های کوانتومی، به دنبال شبیه‌سازی اثرات کوانتومی و تئوری میدان کوانتومی در این زمینه است. ویژگی اصلی این تحقیق استفاده از روش‌های الجبرای کوانتومی در تحلیل تانسور تنش-انرژی است که موجب می‌شود تا تانسور تنش-انرژی در مقیاس‌های مختلف به‌طور دقیق‌تر و بدون انحرافات که در مدل‌های کلاسیک مشاهده می‌شود، تعریف شود. از مزایای دیگر این تحقیق می‌توان به آزمون و توسعه روش‌های ریاضی جدید برای مدل‌سازی تانسور تنش-انرژی در چارچوب کوانتومی اشاره کرد که نشان‌دهنده ظرفیت‌های جدید در تحلیل و محاسبات فیزیکی در این زمینه است.

ماهر و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای به بررسی تانسور تنش-انرژی در زمینه نسبیتی، به مطالعه اصلاحات کوانتومی و تأثیر آن‌ها بر مدل‌های فیزیکی و تانسورهای تنش-انرژی پرداخته‌اند. ویژگی کلیدی این پژوهش استفاده از جبر هیزنبری غیرقابل تعویض است که اساس آن بر اصل عدم قطعیت عمومی استوار است. این مطالعه به‌شدت به‌دنبال تجزیه و تحلیل تأثیرات کوانتومی در قلمرو نسبیتی است و پیشنهادهایی برای بهبود مدل‌های موجود ارائه می‌دهد. در این تحقیق، نویسندگان به‌ویژه به استفاده از فرمول‌های گرانش کوانتومی و پدیده‌های به هم پیوسته در فضا-زمان‌های منحنی توجه داشته‌اند که توانسته است دیدگاه جدیدی نسبت به اثرات نسبیتی در تانسور تنش-انرژی ارائه دهد. این پژوهش در زمینه تلفیق اصول مکانیک کوانتومی و نسبیت عمومی قدم‌های مهمی برداشته است. آخمدف و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی به تحلیل تأثیرات اصلاحات کوانتومی در تانسور تنش-انرژی در زمینه فضا-زمان‌های در حال انبساط می‌پردازد. در این تحقیق، نویسندگان از مدل‌های شبیه‌سازی کوانتومی برای بررسی تأثیرات این اصلاحات در فضا-زمان‌های در حال انبساط دائمی استفاده کرده‌اند. یکی از ویژگی‌های برجسته این تحقیق، استفاده از تکنیک‌های پیشرفته محاسباتی برای بررسی تغییرات مداوم در مقیاس‌های کوانتومی و گرانشی است. همچنین، این پژوهش به رشد سبکی و تغییرات در کسر دمای محیط پرداخته که در واقع در مدل‌های مختلف گرانش و کوانتوم بسیار مهم است. این پژوهش برای درک بهتر رفتار فیزیک کوانتومی در فضای زمان‌های در حال انبساط و آثار آن در تانسور تنش-انرژی بسیار کاربردی است.

در مطالعه نیاردی و همکاران (۲۰۲۱)، بخش‌های واگرا در تانسور تنش-انرژی برای نظریه مکسول در فضا-زمان‌های خمیده به‌طور سیستماتیک بررسی شده است. ویژگی اصلی این مطالعه، استفاده از توسعه فاکتوریه فاکر-اشوینگر-دوویت و روش‌های تقسیم نقطه برای تحلیل و تنظیم بخش‌های واگرا در تانسور تنش-انرژی است. این مقاله به‌طور خاص به تنظیم هم‌زمان شرایط خمیدگی فضا-زمان و تأثیر آن‌ها بر کوانتوم‌سازی تانسور تنش-انرژی پرداخته و کاربردهای گسترده‌ای در فیزیک پلاسما و گرانش ارائه می‌دهد. از نکات برجسته این تحقیق، بررسی دقیق تأثیرات پدیده‌های واگرا در فضا-زمان‌های غیرمنحنی است که به تحلیل مسائل پیچیده گرانشی کمک می‌کند. مقاله بریزو و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی تغییرات در تانسور تنش-انرژی در ابعاد مختلف فضا-زمان پرداخته و ارتباط آن‌ها با جریان‌های ریکی و سیاه‌چاله‌ها را تحلیل می‌کند. این پژوهش به‌ویژه به تحلیل اثر تغییرات هندسی فضا-زمان و چگونگی تأثیر آن‌ها بر ساختار سیاه‌چاله‌ها پرداخته است. یکی از ویژگی‌های اصلی این مطالعه، توسعه مدل‌های گرانشی غیرخطی و بررسی مکانیک آماری

کوانتومی، تأثیرات فیزیک نسبیتی و تحلیل‌های مبتنی بر انومالی‌ها نیز انتخاب شدند. مقالاتی که در آن‌ها مدل‌های فیزیکی در فضا-زمان‌های خمیده و اصلاحات مربوط به آن‌ها مورد توجه قرار گرفته بود، نیز به‌عنوان منابع معتبر در نظر گرفته شدند. از مجموع ۶۰۰ مقاله جستجو شده در پایگاه‌های علمی مختلف، در نهایت ۱۰ مقاله با توجه به معیارهای دقیق و تخصصی انتخاب شدند. این مقالات شامل پژوهش‌های جدید و به‌روز در زمینه تحلیل تانسور تنش-انرژی و پایستگی در فیزیک کلاسیک و کوانتومی بودند که تمام جنبه‌های مختلف این موضوع را پوشش می‌دادند. در مقابل، برخی مقالات از فرآیند انتخاب حذف شدند. دلایل حذف این مقالات عبارت بودند از: عدم تمرکز کافی بر تانسور تنش-انرژی و پایستگی، به‌طوری که تحلیل جامع و مستقیم از این مفاهیم در آن‌ها ارائه نشده بود؛ وجود داده‌های ناکافی یا کیفیت پایین علمی در مقالات؛ عدم ارتباط با موضوع اصلی تحقیق، به‌ویژه مقالاتی که به موضوعات حاشیه‌ای یا غیرمرتبط پرداخته بودند؛ و مقالاتی که به‌طور عمده قدیمی بودند و نتایج آن‌ها با پیشرفت‌های اخیر در این حوزه هماهنگ نبود.

شکل ۱ فرآیند انتخاب مقالات برای مقاله مروری را نشان می‌دهد. ابتدا از میان ۶۰۰ مقاله مرتبط جستجو شده، مقالاتی که بر اساس عنوان و چکیده اولیه مرتبط نبودند حذف شدند. این مقالات به تعداد ۵۲۰ مقاله رسیدند. سپس از میان ۸۰ مقاله باقی‌مانده، بررسی متن کامل انجام شد که در نهایت ۷۰ مقاله به دلیل عدم ارتباط کافی با موضوع اصلی، کیفیت پایین داده‌ها و اطلاعات ناکافی حذف شدند. در نتیجه، ۱۰ مقاله به‌طور نهایی برای گنجاندن در مرور انتخاب شدند.



شکل ۱: فلوچارت فرآیند انتخاب مقالات

۳. نتایج و بحث

۱.۳. ویژگی‌های پژوهش‌ها

کتاب سوانسون (۲۰۲۲) به بررسی جامع تئوری میدان کلاسیک و تانسور تنش-انرژی در چارچوب نظریه‌های کلاسیک و بدون در نظر گرفتن پیچیدگی‌های کوانتومی می‌پردازد. این کتاب ویژگی‌های اصلی تئوری میدان کلاسیک را با تأکید بر رابطه میان سیستم‌های مختصاتی مختلف و تانسور تنش-انرژی به‌طور ساده و قابل فهم معرفی می‌کند. در این اثر، نویسنده به‌طور عمیق به تشریح اصول ریاضی و فیزیکی تئوری میدان پرداخته و از مفاهیم ابتدایی هندسه تفاضلی برای توضیح روابط استفاده می‌کند. یکی از ویژگی‌های مهم این کتاب، تمرکز بر مثال‌های کاربردی است که به درک بهتر مطالب کمک می‌کند. در کنار توضیحات نظری، مجموعه‌ای از مسائل و تمرینات همراه با پاسخ‌ها برای تقویت درک مفاهیم ارائه شده است. مطالعه کاستری و همکاران

است که به‌طور عمیق به دینامیک‌های فضا-زمانی می‌پردازد. این مقاله ارتباط میان گرانش و مکانیک کوانتومی در زمینه سیاه‌چاله‌ها را بررسی میکند. پرچه و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه ای مدل تانسور تنش-انرژی برای آشکارساز Unruh-DeWitt را معرفی می‌کنند. این مدل به‌طور خاص به بررسی تانسور تنش-انرژی برای یک سیستم کوانتومی محدود پرداخته و اثرات تعاملات محلی را مورد بررسی قرار می‌دهد. ویژگی این مطالعه استفاده از گرانش و میدان‌های کوانتومی است که در کنار یکدیگر به تجزیه و تحلیل دقیق ویژگی‌های آشکارساز کوانتومی می‌پردازد. این مقاله به‌ویژه برای مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های کوانتومی مناسب است. گویی (۲۰۲۳) به تحلیل انومالی‌های کوانتومی در تانسور تنش-انرژی یک میدان اسکالر خود-تعامل می‌پردازد. این تحقیق با استفاده از رویکرد pAQFT (تئوری میدان کوانتومی آلجبرایی)، ساختارهای پیچیده را بررسی کرده و به‌ویژه بر مفاهیم ریاضی و مدل‌سازی‌های عددی تمرکز دارد. ویژگی این تحقیق استفاده از ابزارهای پیشرفته پورتوبی و ماتریس S برای تجزیه و تحلیل دقیق و به‌دست آوردن روابط کاربردی در تانسور تنش-انرژی است.

معین مقدس (۱۴۰۱) در پژوهشی به تحلیل معادلات پایستگی تکانه-انرژی در شارهای نسبیتی و غیرنسبیتی پرداخته است. این مطالعه به‌ویژه به بررسی سازوکارهای انتقال انرژی و تکانه در سیستم‌های فیزیکی مختلف پرداخته و به تحلیل رفتار این سیستم‌ها در فضا-زمان‌های تخت و خمیده می‌پردازد. از ویژگی‌های این مقاله، استفاده از مدل‌های عددی برای پیش‌بینی نتایج در شرایط مختلف است که باعث می‌شود این تحقیق کاربردهای زیادی در بررسی‌های پیچیده گرانشی و فیزیکی داشته باشد. نژادکهنوجی و قاسم‌نژاد (۱۴۰۳) به بررسی مولفه‌های $\varphi\theta$ تانسور تنش در قرص‌های پیش‌سیاره‌ای پرداخته و تاثیر آن‌ها بر انتقال تکانه زاویه‌ای در این ساختارها را تحلیل کرده‌اند. این تحقیق با استفاده از مدل‌های هیدرودینامیکی و تحلیل خودمشابهی در مختصات کروی، اثرات مختلف تانسور تنش را بر ویژگی‌های فیزیکی قرص‌های پیش‌سیاره‌ای بررسی می‌کند. ویژگی این مقاله، استفاده از مدل‌های عددی و شبیه‌سازی‌های دقیق برای تحلیل ساختارهای پیچیده گرانشی است.

۲.۳. رویه ارزیابی

در این بخش، به تشریح فرآیند ارزیابی کیفیت پژوهش‌های گنجانده شده در این مطالعه پرداخته می‌شود. فرآیند انتخاب و ارزیابی شامل چندین مرحله کلیدی است که در آن‌ها از ابزارها و چک‌لیست‌های معتبر برای شناسایی و ارزیابی کیفیت استفاده شده است. پژوهش سوانسون (۲۰۲۲) با استفاده از رویکردی جامع و بدون پیچیدگی‌های کوانتومی، به تفسیر مفاهیم تئوری میدان کلاسیک پرداخته است. در ارزیابی این تحقیق، توجه ویژه‌ای به دقت و صحت مفاهیم ریاضی و فیزیکی شده است. کیفیت داده‌ها از نظر قابلیت استفاده در زمینه‌های مختلف تئوری میدان، به‌ویژه در آموزش و تحقیق، بررسی شد. این پژوهش به دلیل ترکیب دقیق مفاهیم و تمرینات عملی و همچنین روش‌های آموزشی مناسب، برای استفاده در آموزش و پژوهش معتبر شناخته شد. پژوهش کاستری و همکاران (۲۰۲۴) به تحلیل انومالی‌های خطا و قوانین پایستگی در تانسور تنش-انرژی پرداخته است. این تحقیق از ابزارهای آلجبرای کوانتومی برای تحلیل دقیق استفاده کرده است و ارزیابی آن بر اساس استفاده صحیح از مفاهیم پیچیده ریاضی انجام شد. کیفیت داده‌ها در این تحقیق از نظر ارتباط با تئوری‌های کوانتومی و قدرت مدل‌سازی آن‌ها در زمینه‌های فیزیکی مختلف ارزیابی شد. از ویژگی‌های ارزیابی این تحقیق، دقت در مدل‌سازی ریاضی و روش‌های تحلیلی بوده که نتایج قابل اتکایی به‌دست داده

است. تحقیق ماهر و همکاران (۲۰۲۵) که به بررسی اصلاحات کوانتومی در تانسور تنش-انرژی در قلمرو نسبیتی پرداخته، در ارزیابی کیفیت آن، استفاده از جبر هیزنبرگ غیرقابل تعویض و تئوری‌های کوانتومی دقیق مورد توجه قرار گرفت. در این پژوهش، دقت مدل‌سازی فضا-زمان و تحلیل آثار اصلاحات کوانتومی در محیط‌های نسبیتی بررسی شد. داده‌های این تحقیق به دلیل استفاده از مدل‌های پیچیده کوانتومی و دقت در اجرای محاسبات و مدل‌ها، دارای کیفیت بالایی شناخته شد. پژوهش آخمدف و همکاران (۲۰۲۴) به تأثیرات اصلاحات کوانتومی در تانسور تنش-انرژی در فضا-زمان‌های در حال انبساط پرداخته است. در ارزیابی این تحقیق، کیفیت داده‌ها از نظر دقت مدل‌سازی فضا-زمان‌های انبساطی و استفاده از تکنیک‌های پیشرفته در شبیه‌سازی‌های کوانتومی مورد توجه قرار گرفت. این تحقیق به دلیل دقت در مدل‌سازی و استفاده از روش‌های علمی معتبر برای بررسی اثرات اصلاحات کوانتومی بر گرانش، در سطح بالایی ارزیابی شد. تحقیق نیاردی و همکاران (۲۰۲۱) به تحلیل بخش‌های واگرا در تانسور تنش-انرژی در نظریه مکسول پرداخته است. ارزیابی این پژوهش شامل تحلیل استفاده از روش‌های فنی پیچیده مانند توسعه فاکتوریه فاکر-اشوینگر-دوویت بود. دقت داده‌ها در این تحقیق از نظر تحلیل دقیق بخش‌های واگرا و تطابق نتایج آن با مدل‌های گرانشی و کوانتومی ارزیابی شد. داده‌ها و روش‌های استفاده‌شده در این تحقیق در سطح بالایی از دقت قرار داشت. پژوهش بریزو و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی تغییرات در تانسور تنش-انرژی و ارتباط آن با جریان‌های ریکی و سیاه‌چاله‌ها پرداخته است. ارزیابی این تحقیق بر مبنای دقت در استفاده از روش‌های ریاضی پیشرفته و تحلیل اثرات گرانشی در فضا-زمان‌های پیچیده انجام شد. کیفیت داده‌ها و مدل‌های استفاده‌شده در این تحقیق بر اساس قابلیت آن‌ها در شبیه‌سازی‌های پیچیده گرانشی و بررسی دقیق ساختار سیاه‌چاله‌ها سنجیده شد. پژوهش پرچه و همکاران (۲۰۲۵) به تحلیل تانسور تنش-انرژی در آشکارساز Unruh-DeWitt پرداخته است. ارزیابی این تحقیق بر اساس دقت مدل‌سازی تانسور تنش-انرژی در سیستم‌های کوانتومی و استفاده از مدل‌های لگرانژی کواریانت انجام شد. کیفیت داده‌ها در این تحقیق به دلیل استفاده از روش‌های پیچیده و اعتبار مدل‌های تحلیل‌شده، در سطح بالایی قرار دارد. تحقیق گویی (۲۰۲۳) به بررسی انومالی‌های کوانتومی در تانسور تنش-انرژی در تئوری میدان کوانتومی آلجبرایی پرداخته است. ارزیابی این تحقیق از نظر دقت در استفاده از روش‌های پیشرفته پورتوبی و ماتریس S انجام شد. کیفیت داده‌ها و تحلیل‌ها در این تحقیق از نظر دقت مدل‌سازی و ارتباط آن با تئوری‌های کلاسیک و کوانتومی مورد تأکید قرار گرفت. پژوهش معین مقدس (۱۴۰۱) به تحلیل معادلات پایستگی تکانه-انرژی در شارهای نسبیتی و غیرنسبیتی پرداخته است. ارزیابی این تحقیق بر اساس مدل‌های عددنگاری و تحلیلی صورت گرفت. این تحقیق به دلیل ارائه معادلات دقیق و کاربردی در شرایط مختلف فضا-زمان‌های تخت و خمیده، دارای اعتبار علمی بالایی است. پژوهش نژادکهنوجی و قاسم‌نژاد (۱۴۰۳) به بررسی مولفه‌های تانسور تنش در قرص‌های پیش‌سیاره‌ای پرداخته‌اند. ارزیابی این تحقیق از نظر دقت در مدل‌سازی هیدرودینامیکی و شبیه‌سازی‌های عددی برای تحلیل انتقال تکانه زاویه‌ای در قرص‌های پیش‌سیاره‌ای صورت گرفت. کیفیت داده‌ها در این تحقیق به‌ویژه در تحلیل دقیق پدیده‌های گرانشی و اثرات آن‌ها در سیستم‌های فیزیکی پیچیده ارزیابی شد.

۳.۳. یافته‌های اصلی

در جدول ۱، مشخصات تمامی مقالات مرور شده در این تحقیق به‌طور کامل و جامع آورده شده است. برای گردآوری این مقالات، ابتدا بیش از ۶۰۰

مقاله در زمینه تانسور تنش-انرژی و پایداری در فیزیک کلاسیک و کوانتومی جستجو شد. پس از انجام فرآیند غربالگری اولیه، ۱۰ مقاله نهایی بر اساس معیارهای مشخص شده انتخاب گردید. این مقالات با استفاده از پایگاه‌های داده مختلف و با بررسی عنوان، چکیده و سپس متن کامل مقالات، وارد تحلیل شدند. در ادامه، به تحلیل و بررسی نتایج هر پژوهش خواهیم پرداخت.

مطابق با جدول ۱، فاکتور مؤثر به عواملی اشاره دارد که تأثیرات اساسی بر طراحی و تحلیل نتایج هر تحقیق در زمینه تانسور تنش-انرژی دارند. این فاکتورها می‌توانند شامل روش‌های ریاضی و محاسباتی خاص، زمینه‌های فیزیکی مرتبط، و تکنیک‌های شبیه‌سازی یا تجربی به‌کاررفته باشند که به‌طور مستقیم بر دقت و اعتبار نتایج تأثیر می‌گذارند. به‌عنوان مثال، در پژوهش کاستری و همکاران (۲۰۲۴)، فاکتور مؤثر استفاده از الگوریتم‌های کوانتومی بوده است که اصلاحات اساسی در تانسور تنش-انرژی را ایجاد کرده و موجب ظهور انومالی‌های جدید در پایداری و محافظت از انرژی در مدل‌های کوانتومی گردیده است. همچنین، در تحقیق ماهر و همکاران (۲۰۲۵)، فاکتور مؤثر استفاده از جبر هیزنبرگ غیرقابل تعویض بوده که تأثیرات اصلاحات کوانتومی را بر گرانش نسبیتی مورد بررسی قرار داده و تغییرات قابل‌توجهی در نتایج معادلات فیزیکی ایجاد کرده است. در پژوهش نژادکهنوجی و قاسم‌نژاد (۱۴۰۳)، فاکتور مؤثر مدل‌سازی هیدرودینامیکی و شبیه‌سازی‌های عددی است که به تحلیل تأثیر تانسور تنش بر انتقال تکانه زاویه‌ای در قرص‌های پیش‌سیاره‌ای پرداخته و به درک بهتری از فرآیندهای فیزیکی در تشکیل سیارات کمک کرده است. همچنین، برخی پژوهش‌ها بر اساس مدل‌های خاص فیزیکی مانند گرانش و فضا-زمان‌های در حال انبساط انجام شده‌اند که فاکتور مؤثر آن‌ها به تحلیل اصلاحات کوانتومی در چنین فضا-زمان‌هایی اختصاص داشته است، مانند تحقیق آخمدف و همکاران (۲۰۲۴). به‌طور کلی، فاکتور مؤثر در هر یک از این تحقیقات به تعیین مسیر پژوهش، انتخاب ابزارهای تحلیلی و مدل‌های استفاده‌شده، و بهبود دقت نتایج نهایی کمک کرده و در نهایت تأثیرات فیزیکی خاصی را بر فرایندهای مدل‌سازی و تحلیل در زمینه تانسور تنش-انرژی می‌گذارد.

یافته‌ها و نتایج هر یک از مقالات بررسی‌شده در جدول ۱ نشان‌دهنده تأثیرات عمده‌ای بر درک و توسعه تانسور تنش-انرژی در زمینه‌های مختلف فیزیکی است. این یافته‌ها شامل تحلیل‌های جدید و اصلاحات قابل‌توجه در مدل‌ها و تئوری‌های موجود در فیزیک کلاسیک و کوانتومی است. برای مثال، در پژوهش "تانسور تنش-انرژی کوانتومی در قلمرو نسبیتی" توسط ماهر و همکاران (۲۰۲۵) مشخص شد که اصلاحات کوانتومی در تانسور تنش-انرژی تأثیرات قابل‌توجهی بر گرانش نسبیتی دارد و موجب تغییرات در نتایج حاصل از معادلات فیزیکی می‌شود. همچنین، در پژوهش "قانون پایداری و انومالی رد شدن برای تانسور تنش-انرژی" توسط کاستری و همکاران (۲۰۲۴) یافته‌ها نشان داد که با استفاده از الگوریتم‌های کوانتومی، اصلاحات قابل‌توجهی در تانسور تنش-انرژی ایجاد می‌شود که منجر به ظهور انومالی‌های جدید در پایداری و محافظت از انرژی در مدل‌های کوانتومی می‌گردد. در مقاله "مطالعه مولفه $\varphi\theta$ تانسور تنش در قرص‌های پیش‌سیاره‌ای" نیز نتایج نشان داد که تانسور تنش در قرص‌های پیش‌سیاره‌ای تأثیر زیادی بر انتقال تکانه زاویه‌ای در این ساختارها دارد. همچنین، یافته‌ها نشان داد که مولفه عمودی تانسور تنش موجب افزایش شدت باد در نواحی خاص شده و به تشکیل سیارات در این ساختارها کمک می‌کند.

جدول ۱: ویژگی‌های مطالعات شناسایی شده

ردیف	نویسنده (سال)	عنوان پژوهش	فاکتور مؤثر	یافته‌ها
۱	سولسون (۲۰۲۲)	تئوری میدان کلاسیک و تانسور تنش-انرژی	مفاهیم ریاضی و فیزیکی تئوری میدان کلاسیک	نتایج نشان داد که تانسور تنش-انرژی در نظریه‌های کلاسیک برای تحلیل ارتباط بین انرژی و تکانه در فضا-زمان بسیار مفید است. این کتاب کاربردهای عملی تانسور در مدل‌سازی سیستم‌های مختلف فیزیکی، مانند میدان‌های الکترومغناطیسی و گرانشی، را به‌طور جامع توضیح می‌دهد.
۲	کاستری و همکاران (۲۰۲۴)	قانون پایداری و انومالی رد شدن برای تانسور تنش-انرژی	استفاده از الجبرهای کوانتومی	یافته‌ها نشان داد که با استفاده از الجبرهای کوانتومی، اصلاحات قابل‌توجهی در تانسور تنش-انرژی ایجاد می‌شود که منجر به ظهور انومالی‌های جدید در پایداری و محافظت از انرژی در مدل‌های کوانتومی می‌گردد. این تحقیق نشان می‌دهد که این اصلاحات می‌تواند در شبیه‌سازی دقیق‌تر شرایط کوانتومی مفید باشد.
۳	ماهر و همکاران (۲۰۲۵)	تانسور تنش-انرژی کوانتومی در قلمرو نسبیتی	استفاده از جبر هیزنبرگ غیرقابل تعویض	این تحقیق نشان داد که اصلاحات کوانتومی در تانسور تنش-انرژی تأثیرات قابل‌توجهی بر گرانش نسبیتی دارد و موجب تغییرات در نتایج حاصل از معادلات فیزیکی می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که در قلمرو نسبیتی، می‌توان با استفاده از تانسور تنش-انرژی اصلاح‌شده، مدل‌های دقیق‌تری از فضا-زمان و گرانش را ایجاد کرد.
۴	آخمدف و همکاران (۲۰۲۴)	ارتباط اصلاحات کوانتومی با تانسور تنش-انرژی در جهان‌های در حال انبساط ابدی	تحلیل اصلاحات کوانتومی در فضای‌زمان‌های انبساطی	نتایج این تحقیق نشان داد که اصلاحات کوانتومی در فضای‌زمان‌های در حال انبساط تأثیرات بزرگی بر ویژگی‌های تانسور تنش-انرژی دارند و موجب تغییرات قابل‌توجهی در شبیه‌سازی‌های گرانش و انبساط می‌شوند. این تغییرات باعث بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و تحلیل‌های گرانشی در مدل‌های کیهان‌شناسی می‌گردد.
۵	نیرادی و همکاران (۲۰۲۱)	بخش واگرا تانسور تنش-انرژی برای نظریه مکتول در فضا-زمان خمیده	استفاده از روش‌های فنی مانند توسعه فاکتوریه فاگر-لشونگر-دوویت، می‌تواند به‌طور مؤثری شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی و گرانشی در فضا-زمان‌های پیچیده کاربرد دارد.	نتایج نشان داد که بخش‌های واگرا تانسور تنش-انرژی در فضا-زمان‌های خمیده، به‌ویژه با استفاده از روش‌های پیچیده فنی مانند توسعه فاکتوریه فاگر-لشونگر-دوویت، می‌تواند به‌طور مؤثری شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی و گرانشی در فضا-زمان‌های پیچیده کاربرد دارد.
۶	بریزو و همکاران (۲۰۲۴)	تغییرات تانسور تنش-انرژی، جریان‌های ریکی و سیاهچاله‌ها	مدل‌سازی گرانشی و تحلیل سیاهچاله‌ها	نتایج این تحقیق نشان داد که تغییرات تانسور تنش-انرژی به‌طور مستقیم بر رفتار گرانش و سیاهچاله‌ها تأثیر دارد. این مطالعه به شبیه‌سازی جریان‌های ریکی در فضا-زمان‌های خمیده پرداخته و ارتباط پیچیده میان تانسور تنش-انرژی و سیاهچاله‌ها را آشکار ساخت.
۷	برچه و همکاران (۲۰۲۵)	تانسور تنش-انرژی پک اشکاراز Unruh-DeWitt	مدل‌سازی تانسور تنش-انرژی در سیستم‌های کوانتومی	این تحقیق نشان داد که تانسور تنش-انرژی در سیستم‌های اشکاراز Unruh-DeWitt می‌تواند تأثیرات فیزیکی مهمی در سیستم‌های کوانتومی ایجاد کند. به‌ویژه این تحقیق تأثیرات محلی و جهانی این اشکاراز را بر سیستم‌های پیچیده کوانتومی مورد بررسی قرار داده است.
۸	گوبی (۲۰۲۳)	تحلیل تانسور تنش-انرژی یک میدان اسکالر خود-تعامل در رویکرد pAQFT	استفاده از pAQFT برای مدل‌سازی تانسور تنش-انرژی	این تحقیق نشان داد که استفاده از رویکرد pAQFT در مدل‌سازی تانسور تنش-انرژی موجب شفافیت بیشتر در تحلیل انومالی‌های کوانتومی می‌شود. این مدل قادر است که انومالی‌های کوانتومی را به‌طور دقیق‌تر تحلیل کرده و نتایج به‌دست‌آمده به‌طور گسترده‌ای در مدل‌های پیچیده فیزیکی مفید باشد.

اصلاحاتی در تانسور تنش-انرژی ایجاد می‌شود که منجر به ظهور انومالی‌هایی در پایداری انرژی می‌شود. ماهر و همکاران (۲۰۲۵) نیز به تأثیر اصلاحات کوانتومی بر گرانش نسبیتی پرداخته و نشان دادند که این اصلاحات می‌تواند مدل‌های دقیق‌تری از فضا-زمان و گرانش را ایجاد کند. به‌طور کلی، این نتایج نشان می‌دهند که تانسور تنش-انرژی در هر دو زمینه کلاسیک و کوانتومی نقشی اساسی در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده فیزیکی دارد و استفاده از آن در هر دو زمینه گرانش و کیهان‌شناسی مفید است. در نهایت، نتایج نشان می‌دهد که تانسور تنش-انرژی به‌عنوان یکی از مفاهیم اساسی در فیزیک کلاسیک و کوانتومی، به‌ویژه در مدل‌سازی‌های گرانشی و کیهان‌شناسی، اهمیت زیادی دارد. این ابزار ریاضی به‌ویژه در تحلیل و درک پیچیدگی‌های سیستم‌های کوانتومی و بررسی تأثیرات اصلاحات کوانتومی بسیار مفید است. همچنین، این تحقیق بر اهمیت اصلاحات کوانتومی در تانسور تنش-انرژی تأکید دارد و نشان می‌دهد که این اصلاحات می‌تواند به ایجاد مدل‌های دقیق‌تر در تحلیل فضا-زمان‌های خمیده و ناپایدار کمک کند.

پیشنهادهای پژوهشی برای آینده

- بررسی و مدل‌سازی دقیق‌تر تأثیرات تانسور تنش-انرژی در فضا-زمان‌های خمیده و ناپایدار با استفاده از رویکردهای جدید ریاضی و فیزیکی.
- توسعه مدل‌های اصلاح‌شده تانسور تنش-انرژی در شرایط کوانتومی برای تحلیل بهتر انومالی‌ها و تأثیرات اصلاحات در نظریه‌های گرانشی.
- تحقیق در زمینه تعاملات میان تانسور تنش-انرژی و سیاهچاله‌ها برای درک بهتر رفتار گرانشی در شرایط شدید.
- بررسی پیوند میان تانسور تنش-انرژی و میدان‌های کوانتومی برای ایجاد مدل‌های دقیق‌تر در نظریه‌های پیشرفته مانند نظریه ریسمان و گرانش کوانتومی.

مراجع

- خدیجه روان، علی اصغر بیانی. ۱۴۰۰. تحلیل محتوای کتاب‌های درسی فیزیک رشته ی ریاضی بیستمین کنفرانس فیزیک از لحاظ توجه به مولفه های الگوی مصرف (پهنه‌انرژی) آموزش فیزیک ایران و دهمین کنفرانس فیزیک و آزمایشگاه
- دیوید هالیدی، رابرت رسنیک، یل واکر، محمدرضا خوش‌بین‌خوش‌نظر. ۱۴۰۳. مبانی فیزیک: فیزیک عمومی ۳ (شاره‌ها، حرارت و ترمودینامیک، امواج، نور هندسی و نور موجی) فیزیک نیاز دانش عمومی ۴ (فیزیک جدید و مکانیک کوانتومی، فیزیک اتمی، فیزیک
- محبوبه معین مقدس*. ۱۴۰۱. معادلات پایداری تانگانه-انرژی در شاره نسبیتی و غیر نسبیتی 1. 31-41. پژوهش فیزیک/ایران. دارای سه ساز و کار انتقال انرژی و تانگانه
- مهدی زمانی لنگانی، حمید اکبری فرد. ۱۳۹۵. بررسی و تعیین تانسور وضعیت تانسور تنش در چهارمین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری. زمینی
- تانسور تنش در قرص های پیش ϕ مهدی نژادکهنوجی، مریم قاسم نژاد*. ۱۴۰۳. مطالعه مولفه 1. 9-19. پژوهش فیزیک/ایران. سیاره ای
- Adamo, T., & Ilderton, A. (2020). Classical and quantum double copy of back-reaction. *Journal of High Energy Physics*, 2020(9), 1-34.
- Adrian, D. R., & Navarro-Salas, J. (2018). Adiabatic regularization for spin 1/2 fields and the renormalized stress-energy tensor. In *The Fourteenth Marcel Grossmann Meeting On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics, and Relativistic Field Theories: Proceedings of the MG14 Meeting on General Relativity*,

مقایسه نتایج این پژوهش‌ها به‌طور چشم‌گیری نکات مشترک و تفاوت‌های موجود در تحلیل‌ها و یافته‌های هر یک را آشکار می‌سازد. به عنوان مثال، در تحقیق ماهر و همکاران (۲۰۲۵) و آخمدف و همکاران (۲۰۲۴)، هر دو به تحلیل اصلاحات کوانتومی در تانسور تنش-انرژی پرداخته‌اند، اما در حالی که ماهر و همکاران بیشتر بر تأثیر این اصلاحات بر گرانش نسبیتی تمرکز کرده‌اند، آخمدف و همکاران تأثیرات آن را در فضای‌زمان‌های در حال انبساط بررسی کرده‌اند. این تفاوت نشان‌دهنده حوزه‌های کاربردی مختلف و نتایج متفاوت در زمینه‌های مختلف فیزیکی است. در مقایسه با مطالعه پرچه و همکاران (۲۰۲۵) که به تحلیل تانسور تنش-انرژی در سیستم‌های آشکار ساز Unruh-DeWitt پرداخته است، این تحقیق به بررسی اثرات محلی و جهانی آشکار ساز بر سیستم‌های پیچیده کوانتومی پرداخته، که تفاوت فاحشی با مطالعات گرانشی دارد. پژوهش‌های دیگر مانند تحقیق نیاردی و همکاران (۲۰۲۱) که به تحلیل بخش‌های واگرا در تانسور تنش-انرژی در فضا-زمان‌های خمیده پرداخته است، نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های فنی پیچیده همچون توسعه فاکتوریه فاکر-اشوینگر-دوویت می‌تواند به شبیه‌سازی مؤثر تر بخش‌های واگرا کمک کند. در نهایت، مقایسه این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که تانسور تنش-انرژی در هر یک از مدل‌های مختلف فیزیکی تأثیرات مختلفی دارد و به تحلیل و مدل‌سازی سیستم‌های گوناگون فیزیکی کمک می‌کند. برخی از پژوهش‌ها بیشتر بر جنبه‌های نظری و ریاضی تکیه دارند، در حالی که برخی دیگر به‌طور عملی اثرات این تانسورها را در سیستم‌های فیزیکی مختلف بررسی می‌کنند.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

تحلیل تانسور تنش-انرژی و پایداری در فیزیک کلاسیک و کوانتومی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مفهوم در نظریه‌های میدان کلاسیک و کوانتومی به‌عنوان ابزاری برای بررسی ارتباط بین انرژی، تانگانه و فضا-زمان شناخته می‌شود. در فیزیک کلاسیک، تانسور تنش-انرژی به‌طور عمده برای مدل‌سازی رفتار میدان‌های گرانشی و الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. اما با ورود به دنیای فیزیک کوانتومی، پیچیدگی‌های جدیدی در کاربرد و مفهوم این تانسور ظهور می‌کند که به فهم دقیق‌تر سیستم‌های کوانتومی و بررسی انومالی‌ها و اصلاحات کوانتومی کمک می‌کند. هدف این مقاله مروری، بررسی و تحلیل جامع تانسور تنش-انرژی در فیزیک کلاسیک و کوانتومی و تحلیل نتایج تحقیقاتی است که در این حوزه انجام شده است. در این تحقیق، برای جمع‌آوری مقالات علمی از پایگاه‌های معتبر همچون Google Scholar، Scopus، و PubMed استفاده شد. جستجوی مقالات بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ انجام گرفت و از میان ۶۰۰ مقاله موجود، ۱۰ مقاله منتخب برای این مطالعه مرور شدند. مقالات بر اساس معیارهای مرتبط بودن با موضوع، کیفیت داده‌ها، و ارتباط مستقیم با تحلیل‌های تانسور تنش-انرژی انتخاب شدند. معیارهای ورود شامل پژوهش‌هایی بودند که به‌طور مستقیم به بررسی تانسور تنش-انرژی در فیزیک کلاسیک و کوانتومی پرداخته بودند. مقالات حذف‌شده عمدتاً شامل آن‌هایی بودند که داده‌های ناکافی یا بی‌ربط داشتند یا نتایج جامع و مفیدی ارائه نمی‌دادند. یافته‌ها نشان داد که تانسور تنش-انرژی در فیزیک کلاسیک به‌عنوان ابزاری حیاتی برای تحلیل انرژی و تانگانه در فضا-زمان شناخته می‌شود. سوانسون (۲۰۲۲) در کتاب خود، کاربردهای تانسور تنش-انرژی در مدل‌سازی سیستم‌های مختلف فیزیکی مانند میدان‌های الکترومغناطیسی و گرانشی را به‌طور جامع توضیح داده است. همچنین، کاستری و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که با استفاده از الجبرهای کوانتومی،

- Matyjasek, J. (2020). Stress-energy of the quantized fields in the spacetime of the Damour-Solodukhin wormhole. *Physical Review D*, 102(2), 024082.
- Niardi, R., Esposito, G., & Tramontano, F. (2021). Divergent part of the stress-energy tensor for Maxwell's theory in curved spacetime: a systematic derivation. *The European Physical Journal Plus*, 136(5), 473.
- Perche, T. R., Pitelli, J. P. M., & Vanzella, D. A. (2025). Stress-energy tensor of an Unruh-DeWitt detector. *Physical Review D*, 111(4), 045004.
- Pitelli, J. P. M., Barroso, V. S., & Mosna, R. A. (2019). Boundary conditions and renormalized stress-energy tensor on a Poincaré patch of AdS 2. *Physical Review D*, 99(12), 125008.
- Saffer, A., Yunes, N., & Yagi, K. (2018). The gravitational wave stress-energy (pseudo)-tensor in modified gravity. *Classical and Quantum Gravity*, 35(5), 055011.
- Swanson, M. S. (2022). *Classical Field Theory and the Stress-Energy Tensor*. IOP Publishing.
- Yargic, Y., Sberna, L., & Kempf, A. (2020). Which part of the stress-energy tensor gravitates?. *Physical Review D*, 101(4), 043513.
- University of Rome "La Sapienza", Italy, 12-18 July 2015 (pp. 2816-2821).
- Akhmedov, E. T., Anokhin, A. V., & Kazarnovskii, K. A. (2024). Relevance of quantum corrections to the matter stress-energy tensor in eternally expanding universes. *Physical Review D*, 109(8), 085012.
- Brizio, N., Morone, T., & Tateo, R. (2024). Stress-energy tensor deformations, Ricci flows and black holes. *arXiv preprint arXiv:2408.06031*.
- Costeri, B., Dappiaggi, C., & Goi, M. (2024). Conservation Law and Trace Anomaly for the Stress Energy Tensor of a Self-Interacting Scalar Field. *arXiv preprint arXiv:2411.07109*.
- GOI, M. (2023). Analisi del Tensore Energia-Impulso di una Teoria Auto-Interagente in pAQFT On the Stress-Energy Tensor of a Self-Interacting Quantum Scalar Field in the pAQFT approach.
- Lodman, J. J. (2020). *Energy Non-Conservation in Quantum Mechanics* (Doctoral dissertation, California Institute of Technology).
- Maher, M., Tawfik, A. N., Tarabia, F. S., & Farouk, F. T. (2025). Quantum-induced Stress-Energy Tensor in the Relativistic Regime. *Egyptian Journal of Physics*, 53(1), 1-12.