



نقش شکست ابرتقارن در فیزیک ذرات بنیادی: یک مرور بر مدل ها و روش های تحلیلی

محمد اسماعیل حضرتی^{۱*}

۱- استاد گروه فیزیک، دانشکده ی تعلیم و تربیه، دانشگاه جوزجان، شبرغان، افغانستان. ایمیل: ismail.hazrati01@gmail.com

* نویسنده مسئول

چکیده

ابرتقارن به عنوان یک توسعه مدل استاندارد فیزیک ذرات، تقارنی بین بوزون ها و فرمیون ها معرفی می کند که برای حل مسائلی چون مسئله سلسله مراتب، وحدت نیروها و تبیین ماده تاریک اهمیت دارد. عدم مشاهده ذرات ابرتقارن در آزمایش ها، بررسی مکانیزم های شکست ابرتقارن را ضروری ساخته است. هدف این پژوهش مروری، ارائه تحلیلی سیستماتیک از مکانیزم های شکست ابرتقارن در فیزیک ذرات بنیادی و روش های تحلیلی مرتبط با آن است. در این مطالعه، جستجویی گسترده در پایگاه های داده بین المللی (Science Direct, Google Scholar, Scopus, Web of Science) و داخلی (SID, نورمگز، مگیران و علم نت) انجام شد. از ۶۰۰ مقاله شناسایی شده، پس از اعمال معیارهای ورود (تمرکز بر مکانیزم های شکست ابرتقارن، روش های تحلیلی، انتشار بین سال های ۲۰۲۰-۲۰۲۵) و خروج (عدم تمرکز کافی بر موضوع، فقدان روش های تحلیلی مشخص، نتایج غیرقابل اعتماد)، ۱۰ مقاله برای بررسی نهایی انتخاب شدند. نتایج نشان داد که شکست دینامیکی ابرتقارن از طریق اثر اینستانتون به عنوان مکانیزم زیربنایی برای باز شدن گاف انرژی در فازهای نیمه فلزی توپولوژیکی عمل می کند. شکست ابرتقارن در برین پنهان و انتقال آن به برین قابل مشاهده به پتانسیل اینفلاتونی با جملات القا شده گرانشی منجر می شود که برای کیهان شناسی تورمی اهمیت دارد. همچنین پیامدهای شکست ابرتقارن در قالب ابررسانایی، ابررسانایی دوگانه و ابررسانایی رنگی تحلیل شده و ارتباط بین مدهای ماجورانی بدون جرم و فرمیون های گلدستون مرتبط با ابرتقارن شکسته شده آشکار گردیده است.

کلمات کلیدی: ابرتقارن، شکست تقارن، فیزیک ذرات، مکانیزم های شکست، اینفلاتونی.

The Role of Supersymmetry Breaking in Elementary Particle Physics: A Review of Models and Analytical Methods

Mohammad Ismail Hazrati^{1,*}

1- Lecturer in Physics department, Education Faculty, Jawzjan University, Sheberghan, Afghanistan. Email: ismail.hazrati01@gmail.com

* Corresponding Author

Abstract

between bosons and fermions that is important for solving problems such as the hierarchy problem, unification of forces, and explaining dark matter. The non-observation of supersymmetric particles in experiments has made it necessary to investigate supersymmetry breaking mechanisms. The aim of this review is to provide a systematic analysis of supersymmetry breaking mechanisms in elementary particle physics and their related analytical methods. In this study, an extensive search was conducted in international databases (Web of Science, Scopus, Google Scholar, and Science Direct) and domestic databases (SID, Noormags, Magiran, and Elmnet). From 600 identified articles, after applying inclusion criteria (focus on supersymmetry breaking mechanisms, analytical methods, publication between 2021-2025) and exclusion criteria (insufficient focus on the subject, lack of specific analytical methods, unreliable results), 10 articles were selected for final review. The results showed that dynamical supersymmetry breaking through the instanton effect acts as an underlying mechanism for opening energy gaps in topological semimetallic phases. Supersymmetry breaking in the hidden brane and its transmission to the visible brane leads to an inflaton potential with gravitationally induced terms that are important for inflationary cosmology. Additionally, the consequences of supersymmetry breaking have been analyzed in the form of superconductivity, dual superconductivity, and color superconductivity, and the relationship between massless Majorana modes and Goldstino fermions associated with broken supersymmetry has been revealed.

Keywords: Supersymmetry, Symmetry Breaking, Particle Physics, Breaking Mechanisms, Inflation.

که می تواند بسیاری از مسائل حل نشده در فیزیک ذرات بنیادی را توضیح دهد [۱]. این نظریه با معرفی تقارنی بین بوزون ها و فرمیون ها، پیش بینی می کند که برای هر ذره شناخته شده در مدل استاندارد، یک همتای ابرتقارن وجود دارد [۲]. با این حال، از آنجا که این ذرات ابرتقارن تاکنون در

۱- مقدمه

ابرتقارن (Supersymmetry یا SUSY) به عنوان یکی از مهم ترین گسترش های مدل استاندارد فیزیک ذرات، چارچوبی نظری را فراهم می آورد

توپولوژیکی پرداخته است [۱۳]. دیاماندیس^۲ (۲۰۲۵) اصلاحات ناشی از گرانش به پتانسیل‌های اینفلاتون ناشی از شکست ابرتقارن در یک ابرگرانش پنج‌بعدی را مورد بررسی قرار داده است [۱۴]. داهیا^۳ (۲۰۲۴) مطالعه‌ای در مورد نظریه کوانتومی ابرتقارن ابررسانایی انجام داده است [۱۵]. میورا^۴ (۲۰۲۳) یک مدل فرمیونی شبکه‌ای ابرتقارن معرفی کرده است [۱۶]. کای^۵ (۲۰۲۲) تحقق آزمایشگاهی یک مدل مکانیک کوانتومی ابرتقارن را با استفاده از یک شبیه‌ساز کوانتومی یون به دام افتاده گزارش کرده است [۱۷]. مارا^۶ (۲۰۲۲) مدهای ماجورانی یک‌بعدی و شکست جزئی ابرتقارن در نانوسیم‌ها را مطالعه کرده است [۱۸]. برتولینی^۷ (۲۰۲۱) یک تغییر شکل شکست ابرتقارن از نقطه ثابت ابرهمدیس E1 در پنج بعد را تحلیل کرده است [۱۹]. بائر^۸ (۲۰۲۱) جرم‌های ذرات ابرتقارن و بوزون هیگز را از دیدگاه لندسکیپ بررسی کرده است [۲۰]. بوی^۹ (۲۰۲۱) ارتباطات عمیق بین توپولوژی و تقارن را بررسی کرده است [۲۱]. منصوری (۱۳۹۸) نقش نظریه گروه‌ها در فیزیک ذرات بنیادی و تقارن در فیزیک را بررسی کرده است [۲۲].

۲. روش پژوهش

این پژوهش یک مطالعه مروری نظام‌مند است که با هدف بررسی جامع نقش شکست ابرتقارن در فیزیک ذرات بنیادی انجام شده است. در این پژوهش، مقالات علمی مرتبط با موضوع شکست ابرتقارن، مدل‌های نظری آن و روش‌های تحلیلی مورد استفاده در این حوزه جمع‌آوری و تحلیل شده‌اند. فرآیند جستجو و انتخاب مقالات به صورت سیستماتیک انجام گرفت تا اطمینان حاصل شود که تمامی مطالعات معتبر و مرتبط با موضوع مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مقالات از پایگاه‌های داده معتبر داخلی و خارجی استخراج شدند و پس از غربالگری اولیه بر اساس عنوان و چکیده، متن کامل مقالات منتخب مورد بررسی قرار گرفت. معیارهای ورود و خروج مشخصی برای انتخاب مقالات تعیین شد تا از همگونی و اعتبار داده‌های استخراج شده اطمینان حاصل شود. نهایتاً، داده‌های استخراج شده از مقالات منتخب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و یافته‌های کلیدی در قالب یک مرور جامع ارائه شد.

۱.۲. منابع داده‌ای

در این پژوهش مروری، جستجوی گسترده‌ای در پایگاه‌های داده علمی معتبر بین‌المللی شامل Web of Science، Scopus، Google Scholar و Science Direct انجام شد. همچنین از پایگاه‌های داده داخلی مانند SID، نورمگز، مگیران و علم‌نت نیز استفاده گردید. کلیدواژه‌های مورد استفاده برای جستجو شامل "supersymmetry breaking"، "SUSY breaking"، "spontaneous supersymmetry breaking"، "mechanisms"، "dynamical supersymmetry breaking"، "supersymmetry and"، "particle physics"، "analytical methods in supersymmetry"، "شکست ابرتقارن"، "مکانیزم‌های شکست ابرتقارن"، "ابرتقارن در فیزیک ذرات" و "روش‌های تحلیلی در ابرتقارن" بود. محدوده زمانی جستجو از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ در نظر گرفته شد تا اطمینان حاصل شود که جدیدترین یافته‌ها و

آزمایش‌های فیزیک ذرات مشاهده نشده‌اند، فرض بر این است که ابرتقارن در انرژی‌های بالاتر شکسته می‌شود [۳]. مکانیزم‌های شکست ابرتقارن نقشی حیاتی در تعیین فنومنولوژی مدل‌های ابرتقارن و پیامدهای قابل مشاهده آنها ایفا می‌کنند [۴]. این پژوهش، مروری جامع بر روش‌های تحلیلی و مدل‌های مختلف شکست ابرتقارن و نقش آنها در توسعه درک ما از فیزیک ذرات بنیادی ارائه می‌دهد. اهمیت مطالعه شکست ابرتقارن از چندین جنبه قابل بررسی است. این پدیده می‌تواند پاسخی برای مسئله سلسله‌مراتب (hierarchy problem) فراهم کند که به اختلاف عظیم بین مقیاس الکتروضعیف و مقیاس پلانک اشاره دارد [۵]. مدل‌های ابرتقارن امکان یکپارچه‌سازی نیروهای بنیادی طبیعت را در انرژی‌های بالا فراهم می‌آورند [۶]. همچنین، برخی از کاندیدهای ماده تاریک می‌توانند ذرات ابرتقارن پایدار باشند [۷]. نظریه ابرتقارن به طور طبیعی با نظریه ریسمان، که یکی از کاندیدهای اصلی برای نظریه همه‌چیز است، سازگاری دارد [۸]. افزون بر این، مدل‌های ابرتقارن می‌توانند تصحیحات کوانتومی به جرم هیگز را کنترل کنند [۹]. این موارد، ضرورت بررسی دقیق و عمیق مکانیزم‌های شکست ابرتقارن را نشان می‌دهند. چالش‌های پیش روی فیزیکدانان در مطالعه شکست ابرتقارن متعدد و پیچیده است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، عدم مشاهده ذرات ابرتقارن در آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس مانند برخورددهنده بزرگ هادرونی (LHC) است که منجر به محدودیت‌های شدیدتر بر پارامترهای مدل‌های ابرتقارن شده است [۱۰]. چالش دیگر، مسئله تنظیم دقیق (fine-tuning) است که در برخی از مدل‌های شکست ابرتقارن وجود دارد و با انگیزه اصلی معرفی ابرتقارن برای حل مسئله سلسله‌مراتب در تناقض است. همچنین، تعدد مدل‌های مختلف شکست ابرتقارن و پارامترهای آزاد زیاد در این مدل‌ها، پیش‌بینی‌پذیری نظریه را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، ارتباط بین مکانیزم‌های شکست ابرتقارن و کیهان‌شناسی، به ویژه در زمینه تورم کیهانی و ماده تاریک، نیازمند مطالعات بیشتر است [۱۱]. شکاف تحقیقاتی موجود در زمینه شکست ابرتقارن شامل چندین جنبه است. با وجود پیشرفت‌های نظری قابل توجه، هنوز ارتباط دقیق بین مکانیزم‌های مختلف شکست ابرتقارن و پدیده‌های قابل مشاهده در آزمایش‌ها به طور کامل درک نشده است. همچنین، روش‌های تحلیلی موجود برای محاسبه اثرات شکست ابرتقارن در انرژی‌های پایین، اغلب بر اساس تقریب‌ها و ساده‌سازی‌هایی هستند که محدودیت‌هایی را ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، ارتباط بین شکست ابرتقارن و شکست تقارن الکتروضعیف، به ویژه در چارچوب مدل‌های پدیدارشناختی حداقلی ابرتقارن (MSSM) و گسترش‌های آن، نیازمند بررسی‌های عمیق‌تر است [۱۲]. این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف‌ها، به بررسی جامع روش‌های تحلیلی و مدل‌های مختلف شکست ابرتقارن می‌پردازد و نتایج حاصل از آخرین پیشرفت‌های نظری و تجربی در این زمینه را تحلیل می‌کند. این پژوهش با هدف ارائه مروری جامع بر مکانیزم‌های شکست ابرتقارن و روش‌های تحلیلی مرتبط، به بررسی مدل‌های کلیدی شکست ابرتقارن و پیامدهای فنومنولوژیکی آنها می‌پردازد. همچنین، محدودیت‌های تجربی فعلی و چشم‌انداز آینده برای آزمون این مدل‌ها مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

پژوهش‌هایی در زمینه شکست ابرتقارن و نقش آن در فیزیک ذرات بنیادی انجام شده‌اند که از جمله آنها می‌توان به این موارد اشاره کرد. روی^۱ (۲۰۲۵) به بررسی شکست ابرتقارن القایی توسط اینستانتون در نیمه‌فلزهای

² Diamandis

³ Dahiya

⁴ Miura

⁵ Cai

⁶ Marra

⁷ Bertolini

⁸ Baer

⁹ Boi

¹ Rui

۳. نتایج و بحث

۱.۳. ویژگی‌های پژوهش‌ها

در این بخش ویژگی‌های کلیدی هر یک از مطالعاتی که در مرور گنجانده شده‌اند، به تفصیل بیان می‌شود. این پژوهش‌ها از نظر روش‌های تحلیلی، مدل‌های مورد استفاده، رویکردهای محاسباتی و زمینه‌های کاربردی متنوع هستند. ویژگی‌های منحصر به فرد هر پژوهش، زوایای مختلفی از پدیده‌ی شکست ابرتقارن را روشن می‌سازد و درک جامعی از این حوزه ارائه می‌دهد. در ادامه، ویژگی‌های برجسته هر یک از مطالعات منتخب شرح داده می‌شود.

روی و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی شکست ابرتقارن القایی توسط اینستانتون در نیمه‌فلزهای توپولوژیکی پرداخته‌اند. ویژگی برجسته این پژوهش، پیاده‌سازی سیستماتیک مکانیک کوانتومی ابرتقارن در طیف وسیعی از نیمه‌فلزهای توپولوژیکی است. این مطالعه از رویکرد تحلیلی قدرتمندی بهره می‌برد که در آن شکست تقارن انتقالی (مثلاً توسط میدان مغناطیسی) به طور مؤثری توسط یک پتانسیل ابرتقارن توصیف می‌شود. نوآوری این پژوهش در ارائه معیاری ساده برای تعیین باز شدن گاف انرژی بدون نیاز به محاسبات پیچیده است [۱۳].

دیاماندیس و همکاران (۲۰۲۵) اصلاحات ناشی از گرانش به پتانسیل‌های اینفلتاتون ناشی از شکست ابرتقارن در یک ابرگرانش پنج‌بعدی را مورد بررسی قرار داده‌اند. ویژگی اصلی این پژوهش، ارائه مدلی برای انتقال شکست ابرتقارن از برین پنهان به برین قابل مشاهده از طریق نمودارهای یک حلقه‌ای محدود است. این مطالعه به طور خاص دو کلاس از مدل‌ها را بررسی می‌کند: مدل‌های الهام گرفته از ابرگرانش بدون مقیاس و آلفا-جاذب‌ها. رویکرد نظری این پژوهش، ارتباط بین شکست ابرتقارن و کیهان‌شناسی تورمی را به خوبی تبیین می‌کند [۱۴].

داهیا و همکاران (۲۰۲۴) مطالعه‌ای در مورد نظریه کوانتومی ابرتقارن ابررسانایی انجام داده‌اند. ویژگی مهم این پژوهش، گسترش مفهوم شکست ابرتقارن به حوزه فیزیک ماده چگال است. این مطالعه ویژگی‌های اصلی مکانیک کوانتومی ابرتقارن را به شیوه‌ای مستقیم استخراج کرده و پیامدهای شکست ابرتقارن را در قالب امکان وقوع ابررسانایی، ابررسانایی دوگانه و ابررسانایی رنگی تحلیل می‌کند، که نشان‌دهنده کاربرد بین‌رشته‌ای مفاهیم شکست ابرتقارن است [۱۵].

میورا و توتسوکا (۲۰۲۳) یک مدل فرمیونی شبکه‌ای ابرتقارن معرفی کرده‌اند. ویژگی برجسته این پژوهش، ترکیب جفت‌شدگی فرمیونی و مدل نیکولای برهم‌کنشی در یک چارچوب واحد است. این مطالعه پارامتر کنترلی واحدی را از طریق ضد جابجاگر مولدهای ابرتقارن (ابرار) معرفی می‌کند و نشان می‌دهد که ابرتقارن در هر دو سیستم محدود و نامحدود شکسته می‌شود. رویکرد تحلیلی این پژوهش شامل استفاده از تقریب تک‌مد برای تعیین کران بالایی رابطه پاشندگی فرمیون‌های گلدستون-نامبو است [۱۶].

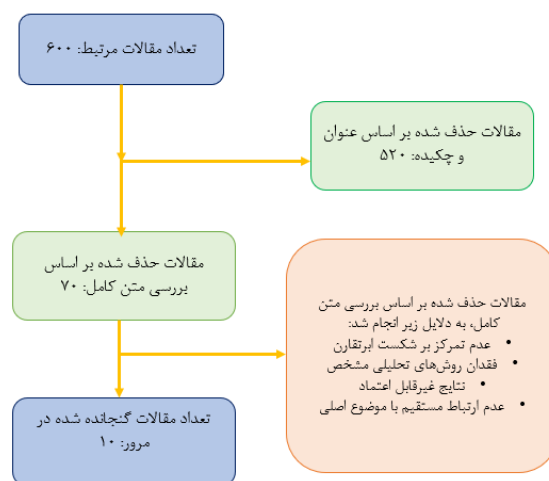
کای و همکاران (۲۰۲۲) تحقق آزمایشگاهی یک مدل مکانیک کوانتومی ابرتقارن را با استفاده از یک شبیه‌ساز کوانتومی یون به دام افتاده گزارش کرده‌اند. ویژگی منحصر به فرد این پژوهش، رویکرد تجربی آن به مطالعه شکست ابرتقارن است که در میان مطالعات منتخب کم‌نظیر است. این مطالعه تباهیدگی انرژی ناشی از ابرتقارن و شکست خودبخودی ابرتقارن را به صورت تجربی نشان می‌دهد. نوآوری این پژوهش در استفاده از توموگرافی حالت کوانتومی جزئی سیستم جفت‌شده اسپین-فونون برای اندازه‌گیری صریح ابرار حالت‌های پایه متباهی است [۱۷].

پیشرفت‌ها در این حوزه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مجموع، اولین جستجو منجر به شناسایی ۶۰۰ مقاله مرتبط با موضوع شد که شامل مقالات پژوهشی اصیل، مقالات مروری، فصل‌های کتاب و مقالات کنفرانسی بود. این منابع داده‌ای، پایه و اساس تحلیل‌های ارائه شده در این مطالعه را تشکیل می‌دهند و تلاش شده است تا با استفاده از منابع متنوع و معتبر، جامعیت و اعتبار یافته‌ها تضمین شود.

۲.۲. معیارهای انتخاب/حذف مقالات

معیارهای دقیقی برای انتخاب و حذف مقالات در این مطالعه مروری تعیین شد تا اطمینان حاصل شود که تنها مقالات با کیفیت بالا و مرتبط با موضوع اصلی در تحلیل نهایی گنجانده شوند. معیارهای انتخاب شامل مقالات منتشر شده در مجلات معتبر علمی با فرآیند داوری همتا، مقالات به زبان انگلیسی یا فارسی، مقالات با تمرکز اصلی بر مکانیزم‌های شکست ابرتقارن و کاربردهای آن در فیزیک ذرات بنیادی، مقالات حاوی روش‌های تحلیلی یا محاسباتی برای بررسی اثرات شکست ابرتقارن، و مقالات منتشر شده بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ بود. همچنین مقالاتی که به بررسی ارتباط بین شکست ابرتقارن و پدیده‌های مشاهده‌پذیر در آزمایش‌های فیزیک ذرات پرداخته بودند، مورد توجه ویژه قرار گرفتند. معیارهای حذف نیز شامل مقالات با کیفیت متدولوژیک پایین، مقالات با تمرکز اصلی بر جنبه‌های غیرمرتبط با شکست ابرتقارن، مقالات تکراری یا نسخه‌های قدیمی‌تر از یک مطالعه، مقالات بدون دسترسی به متن کامل، و مقالات با داده‌های ناکافی یا غیرقابل استناد بود. همچنین، مقالات نظری که فاقد پشتوانه ریاضیاتی قوی یا بدون ارتباط مشخص با مشاهدات تجربی بودند، از مطالعه حذف شدند. مقالاتی که تنها به صورت سطحی به موضوع شکست ابرتقارن پرداخته بودند یا تمرکز اصلی آنها بر سایر جنبه‌های فیزیک ذرات بدون ارتباط مستقیم با شکست ابرتقارن بود نیز از فرآیند بررسی کنار گذاشته شدند.

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.

گرفت تا تصویری جامع از پیشرفت‌های اخیر در این حوزه ترسیم شود. در ادامه، رویه ارزیابی هر یک از پژوهش‌های منتخب شرح داده می‌شود. در پژوهش روی و همکاران (۲۰۲۵) رویه ارزیابی از طریق تحلیل ریاضیاتی اثر اینستانتون بر پتانسیل ابرمتقارن انجام شده است. این ارزیابی شامل بررسی رابطه بین تعداد صفرهای پتانسیل ابرمتقارن و باز شدن گاف انرژی در نیمه‌فلزهای توپولوژیکی بود. صحت این معیار با مقایسه نتایج حاصل از آن با محاسبات دقیق عددی مورد آزمون قرار گرفت. همچنین، پیش‌بینی‌های مدل در مورد اثر میدان مغناطیسی نامتجانس بر گاف انرژی فازهای نیمه‌فلزی دایراک، ویل و خط-گرهی با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شد [۱۳].

در مطالعه دیاماندیس و همکاران (۲۰۲۵) رویه ارزیابی بر پایه محاسبات صریح اصلاحات گرانشی به پتانسیل‌های اینفلاتون ناشی از شکست ابرتقارن استوار بود. این ارزیابی شامل تحلیل نمودارهای یک حلقه‌ای محدود و محاسبه اثرات آنها بر پتانسیل اینفلاتون بود. نتایج حاصل از مدل‌های مختلف (ابگرانش بدون مقیاس و آلفا-جاذب‌ها) با داده‌های کیهان‌شناسی موجود، به ویژه در مورد نسبت تانسور به اسکالر، مقایسه شد تا سازگاری آنها با مشاهدات کنونی بررسی شود [۱۴].

رویه ارزیابی در پژوهش داهیا و همکاران (۲۰۲۴) شامل استخراج ویژگی‌های اصلی مکانیک کوانتومی ابرمتقارن و تحلیل پیامدهای شکست ابرتقارن در زمینه ابرسانایی بود. این ارزیابی از طریق بررسی مدل‌های ریاضیاتی و تحلیل معادلات حاکم بر سیستم‌های ابرسانا انجام شد. امکان‌پذیری ابرسانایی، ابرسانایی دوگانه و ابرسانایی رنگی در چارچوب شکست ابرتقارن با استفاده از معیارهای فیزیکی مشخص مورد سنجش قرار گرفت [۱۵].

در تحقیق میورا و توتسوکا (۲۰۲۳) رویه ارزیابی ترکیبی از روش‌های تحلیلی و عددی برای بررسی شکست ابرتقارن در یک مدل فرمیونی شبکه‌ای بود. ابتدا به صورت تحلیلی، شکست ابرتقارن در سیستم‌های محدود و نامحدود برای مقادیر متناهی پارامتر کنترل اثبات شد. سپس با استفاده از تقریب تک‌مد، کران بالایی برای رابطه پاشندگی فرمیون‌های گلدستون-نامبو تعیین شد. در نهایت، محاسبات عددی برای بررسی عدم وجود تباهیدگی گسترده حالت پایه و باند تخت انرژی صفر برای مقادیر عمومی پارامتر انجام شد [۱۶].

رویه ارزیابی در پژوهش کای و همکاران (۲۰۲۲) بر پایه مشاهدات تجربی مستقیم از یک شبیه‌ساز کوانتومی یون به دام افتاده استوار بود. این ارزیابی شامل اندازه‌گیری تباهیدگی انرژی ناشی از ابرتقارن و شکست خودبخودی ابرتقارن بود. توموگرافی حالت کوانتومی جزئی سیستم جفت‌شده اسپین-فونون برای اندازه‌گیری صریح ابربار حالت‌های پایه متباهی انجام شد و نتایج با پیش‌بینی‌های نظری مقایسه گردید [۱۷].

در مطالعه مارا و همکاران (۲۰۲۲) رویه ارزیابی از طریق تحلیل خواص طیفی و توپولوژیکی مدهای ماجورانا در نانوسیم‌های نزدیکی‌شده صورت گرفت. این ارزیابی شامل بررسی پیش‌بینی‌های مدل در مورد رسانایی صفر-بایاس و امکان پیاده‌سازی "پمپ ماجورانا" با اعمال میدان مغناطیسی چرخان بود. اثر انگشت تجربی شکست جزئی ابرتقارن به صورت گذار از فرورفتگی به قله در رسانایی صفر-بایاس مشخص شد و قابلیت آزمون آزمایشگاهی این پیش‌بینی مورد بررسی قرار گرفت [۱۸].

رویه ارزیابی در پژوهش برتولینی و مینیوسا (۲۰۲۱) شامل ساخت هندسی صریح تغییر شکل با استفاده از تکنیک‌های وب-برین بود. این

مارا و همکاران (۲۰۲۲) مدهای ماجورانای یک‌بعدی و شکست جزئی ابرتقارن در نانوسیم‌ها را مطالعه کرده‌اند. ویژگی کلیدی این پژوهش، معرفی مدهای ماجورانای یک‌بعدی، مخالف جهت و پخشی به عنوان برانگیختگی‌های حجمی یک زنجیره متناوب از مدهای ماجورانای صفر‌بعدی در نانوسیم‌هاست. این سیستم، ابرتقارن مکانیک کوانتومی گسترش‌یافته مرکزی با شکست خودبخودی جزئی ابرتقارن را محقق می‌سازد. رویکرد نوآورانه این پژوهش، ارتباط دادن مدهای ماجورانای بدون جرم با فرمیون‌های گلدستون مرتبط با ابرتقارن شکسته شده خودبخودی است [۱۸].

برتولینی و مینیوسا (۲۰۲۱) یک تغییر شکل شکست ابرتقارن از نقطه ثابت ابرهمدیس E1 در پنج بعد را تحلیل کرده‌اند. ویژگی برجسته این پژوهش، ساختار هندسی صریحی است که با استفاده از تکنیک‌های وب-برین برای تغییر شکل ارائه می‌دهد. این مطالعه نشان می‌دهد که برای جفت‌شدگی گجج به اندازه کافی بزرگ، یک تقارن جهانی به طور خودبخودی شکسته می‌شود و نظریه وارد فاز جدیدی می‌شود که در جفت‌شدگی بی‌نهایت، ناپایداری نشان می‌دهد. نوآوری این پژوهش در پیش‌بینی گذار فاز بین فازهای یانگ-میلز و فاز شکست تقارن است [۱۹].

بانر و همکاران (۲۰۲۱) جرم‌های ذرات ابرمتقارن و بوزون هیگز را از دیدگاه لندسکیپ بررسی کرده‌اند. ویژگی اصلی این پژوهش، مقایسه جامع بین شکست ابرتقارن دینامیکی و خودبخودی است. این مطالعه نشان می‌دهد که شکست ابرتقارن اختلالی در لندسکیپ خلأهای رشته‌ای، ترم‌های نرم بزرگ را به صورت توزیع قانون توانی یا لگاریتمی ترجیح می‌دهد. رویکرد تحلیلی این پژوهش شامل اسکن خلأها برای پیش‌بینی آماری جرم بوزون هیگز سبک است [۲۰].

بوی (۲۰۲۱) ارتباطات عمیق بین توپولوژی و تقارن را بررسی کرده است. ویژگی متمایز این پژوهش، دیدگاه بین‌رشته‌ای آن است که مفاهیم ریاضیاتی توپولوژی را با تقارن و شکست تقارن در فیزیک پیوند می‌دهد. این مطالعه نشان می‌دهد که توپولوژی به حالت‌های کم‌انرژی مربوط است و اطلاعاتی درباره مسیرهای دینامیکی مختلف و الگوهایی که ذرات می‌توانند دنبال کنند ارائه می‌دهد. نوآوری این پژوهش در بررسی دو موضوع اصلی تغییر شکل هندسه کلاسیک توسط هندسه کوانتومی و ارتباط نزدیک بین تقارن آینه‌ای و پدیده تغییر توپولوژیکی است [۲۱].

منصوری و عبداللهی (۱۳۹۸) نقش نظریه گروه‌ها در فیزیک ذرات بنیادی و تقارن در فیزیک را بررسی کرده‌اند. ویژگی اصلی این پژوهش، رویکرد آموزشی آن است که ارتباط میان ریاضیات و فیزیک ذرات را به شیوه‌ای قابل فهم تشریح می‌کند. این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه نظریه گروه‌ها و گروه‌های لی توانسته‌اند ذرات بنیادی را طبقه‌بندی کنند و به مفهوم تقارن در عمیق‌ترین سطح فیزیک ذرات بینجامند. نوآوری این پژوهش در ارائه مفاهیم پیچیده ریاضیاتی به شیوه‌ای ساده و قابل درک برای مخاطبان با سطوح مختلف دانش ریاضی است [۲۲].

۲.۳. رویه ارزیابی

در این پژوهش مروری، رویه‌های ارزیابی متنوعی برای تحلیل و بررسی مقالات منتخب به کار گرفته شد. هدف از این ارزیابی‌ها، بررسی دقیق روش‌های تحلیلی، اعتبار نتایج، و کاربردپذیری یافته‌های هر پژوهش در حوزه شکست ابرتقارن بود. رویه‌های ارزیابی شامل بررسی چارچوب نظری، روش‌های محاسباتی، سازگاری با داده‌های تجربی، و میزان نوآوری در هر پژوهش بود. همچنین، ارتباط هر پژوهش با سایر مطالعات مورد بررسی قرار

رخ می‌دهد و از طریق نمودارهای یک حلقه‌ای محدود به برین قابل مشاهده منتقل می‌شود، که منجر به پتانسیل اینفلاتونی با جملات القا شده گرانشی می‌گردد. این اصلاحات برای کیهان‌شناسی تورمی مهم هستند و می‌توانند پیش‌بینی‌های مدل‌های ابرگرانشی شناخته شده را اگر در این چارچوب جاسازی شوند، تغییر دهند. مطالعه دو کلاس از مدل‌ها (ابرگرانش بدون مقیاس و آلفا-جاذب‌ها) نشان داد که هر دو با مشاهدات کیهان‌شناسی فعلی سازگار هستند، اما در تطبیق مقادیر افزایش‌یافته طیف توان اسکالر با داده‌های کیهان‌شناسی، به ویژه در مورد نسبت تانسور به اسکالر، با چالش‌هایی مواجه هستند [۱۴].

داهیا و همکاران (۲۰۲۴) مطالعه‌ای در مورد نظریه کوانتومی ابرمتقارن ابرسانایی انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های اصلی مکانیک کوانتومی ابرمتقارن می‌تواند به شکل مستقیم استخراج شود و پیامدهای شکست ابرتقارن می‌تواند در قالب امکان وقوع ابرسانایی، ابرسانایی دوگانه و ابرسانایی رنگی تحلیل شود. این مطالعه ارتباط عمیقی بین شکست ابرتقارن و پدیده‌های ابرسانایی در دماهای بالا کشف کرد و نشان داد که چگونه مفاهیم فیزیک ذرات بنیادی می‌تواند به درک بهتر پدیده‌های فیزیک ماده چگال کمک کند [۱۵].

میورا و توتسوکا (۲۰۲۳) یک مدل فرمیونی شبکه‌ای ابرمتقارن معرفی کردند که هم شامل جفت‌شدگی فرمیونی و هم مدل نیکولای برهم‌کنشی است. نتایج این پژوهش نشان داد که این مدل دارای یک پارامتر کنترل واحد است که از طریق ضد جابجاگر مولدهای ابرتقارن (ابرار) معرفی می‌شود، و ابرتقارن در هر دو سیستم محدود و نامحدود تا زمانی که این پارامتر متناهی باشد، شکسته می‌شود. همچنین، با استفاده از تقریب تک‌مد، کران بالایی برای رابطه پاشندگی فرمیون‌های گلدستون-نامبو تعیین شد که بی‌گافی آنها را نشان می‌دهد. محاسبات عددی و تحلیلی نشان داد که تباهیدگی گسترده حالت پایه و باند تخت انرژی صفر مورد انتظار، برای مقادیر عمومی پارامتر کنترل رخ نمی‌دهد [۱۶].

کای و همکاران (۲۰۲۲) تحقق آزمایشگاهی یک مدل مکانیک کوانتومی ابرمتقارن را با استفاده از یک شبیه‌ساز کوانتومی یون به دام افتاده گزارش کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که تباهیدگی انرژی ناشی از ابرتقارن و شکست خودبخودی ابرتقارن می‌تواند به صورت تجربی مشاهده شود. با استفاده از توموگرافی حالت کوانتومی جزئی سیستم جفت‌شده اسپین-فونون، ابرار حالت‌های پایه متباهی، که برهم‌نهی حالت‌های بوزونی و فرمیونی هستند، به طور صریح اندازه‌گیری شد. این مطالعه نشان داد که شبیه‌ساز کوانتومی یون به دام افتاده، بستری اقتصادی اما قدرتمند برای مطالعه فیزیک متنوع در یک سیستم کنترل‌شده است [۱۷].

مارا و همکاران (۲۰۲۲) مدهای ماجورانی یک‌بعدی و شکست جزئی ابرتقارن در نانوسیم‌ها را مطالعه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدهای ماجورانی یک‌بعدی، مخالف‌جهت و پخشی می‌توانند به عنوان برانگیختگی‌های حجمی یک زنجیره متناوب از مدهای ماجورانی صفربعدی در نانوسیم‌های نزدیکی‌شده از طریق میدان‌های متناوب ظاهر شوند. این سیستم، ابرتقارن مکانیک کوانتومی گسترش‌یافته مرکزی با شکست خودبخودی جزئی ابرتقارن را محقق می‌سازد. مدهای ماجورانی بدون جرم، فرمیون‌های گلدستون (گلدستینوها) مرتبط با ابرتقارن شکسته شده خودبخودی هستند. اثر انگشت تجربی آنها یک گذار از فروزنگی به قله در رسانایی صفر-بایاس است که معمولاً برای مدهای ماجورانی همپوشان در فاصله محدود انتظار نمی‌رود [۱۸].

ارزیابی از طریق تحلیل تغییرات تقارن جهانی با افزایش جفت‌شدگی گنج انجام شد و وجود گذار فاز بین فازهای یانگ-میلز و فاز شکست تقارن مورد بررسی قرار گرفت. ناپایداری پیش‌بینی شده در جفت‌شدگی بی‌نهایت نیز با استفاده از تحلیل ساختار پتانسیل ارزیابی شد [۱۹].

در مطالعه بائر و همکاران (۲۰۲۱) رویه ارزیابی بر پایه مقایسه آماری بین پیش‌بینی‌های حاصل از شکست ابرتقارن اختلالی و دینامیکی در لندسکیپ خلأهای رشته‌ای استوار بود. این ارزیابی شامل اسکن خلأها برای پیش‌بینی توزیع آماری جرم بوزون هیگز سبک و جرم ذرات ابرمتقارن بود. نتایج با محدودیت‌های تجربی حاصل از جستجوهای LHC مقایسه شد تا سازگاری سناریوهای مختلف شکست ابرتقارن با داده‌های آزمایشگاهی موجود بررسی شود [۲۰].

رویه ارزیابی در پژوهش بوی (۲۰۲۱) از طریق تحلیل مفهومی ارتباط بین توپولوژی و تقارن در فیزیک انجام شد. این ارزیابی شامل بررسی نظریه هودج فرم‌های هماهنگ برای نشان دادن ارتباط بین حالت‌های انرژی صفر و کوهومولوژی بود. همچنین، تفسیر گره توپولوژیکی به عنوان مداری با خواص پیچیده در فضا-زمان و امکان تعریف کلاس‌های هم‌ارزی یا انواع توپولوژیکی از طریق تغییر شکل‌ها یا جاسازی‌های گره مورد بررسی قرار گرفت [۲۱].

در پژوهش منصوری و عبداللهی (۱۳۹۸) رویه ارزیابی مبتنی بر بررسی تاریخی نقش نظریه گروه‌ها در طبقه‌بندی ذرات بنیادی و تبیین مفهوم تقارن در فیزیک بود. این ارزیابی شامل توضیح کاربردهای گروه‌های لی در سازماندهی ذرات بنیادی و نقش آنها در پیش‌بینی ذرات جدید بود. پیوند بین تقارن‌های طبیعت و ساختارهای ریاضیاتی با تأکید بر قابلیت فهم برای مخاطبان با سطوح مختلف دانش ریاضی مورد بررسی قرار گرفت [۲۲].

۳.۳. یافته‌های اصلی

در این پژوهش مروری، از میان ۶۰۰ مقاله اولیه شناسایی شده در پایگاه‌های داده علمی داخلی و خارجی، پس از بررسی عنوان و چکیده، ۸۰ مقاله برای بررسی متن کامل انتخاب شدند. از این تعداد، ۷۰ مقاله به دلایلی چون عدم تمرکز بر شکست ابرتقارن، فقدان روش‌های تحلیلی مشخص، نتایج غیرقابل اعتماد، و عدم ارتباط مستقیم با موضوع اصلی از مطالعه خارج شدند. نهایتاً، ۱۰ مقاله که معیارهای ورود را داشتند برای بررسی دقیق انتخاب شدند. این مقالات از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ منتشر شده‌اند و طیف متنوعی از رویکردها به مسئله شکست ابرتقارن را پوشش می‌دهند. در ادامه، یافته‌های اصلی هر یک از این پژوهش‌ها ارائه می‌شود.

روی و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی شکست ابرتقارن القایی توسط اینستانتون در نیمه‌فلزهای توپولوژیکی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که شکست دینامیکی ابرتقارن از طریق اثر اینستانتون بر دره‌های پتانسیل ابرمتقارن، به عنوان مکانیزم زیربنایی برای باز شدن گاف انرژی در فازهای نیمه‌فلزی توپولوژیکی عمل می‌کند و بزرگی اثر اینستانتون متناسب با گاف انرژی است. همچنین این مطالعه معیار ساده‌ای برای تعیین باز شدن گاف انرژی ارائه داد: گاف انرژی محدود اگر و تنها اگر پتانسیل ابرمتقارن تعداد زوجی از صفرها داشته باشد. یافته غیرمنتظره این پژوهش این بود که حتی یک میدان مغناطیسی بسیار کوچک می‌تواند به دلیل شکست دینامیکی ابرتقارن، گافی در فازهای نیمه‌فلزی دایراک، ویل و خط-گرهی با پایداری توپولوژیکی باز کند [۱۳].

دیاماندیس و همکاران (۲۰۲۵) اصلاحات ناشی از گرانش به پتانسیل‌های اینفلاتون ناشی از شکست ابرتقارن در یک ابرگرانش پنج‌بعدی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که شکست ابرتقارن در برین پنهان

از فیزیک ذرات بنیادی گرفته تا فیزیک ماده چگال و کیهان‌شناسی را پوشش می‌دهند و روش‌های تحلیلی متنوعی برای بررسی این پدیده ارائه کرده‌اند.

جدول ۱: ویژگی‌های مطالعات شناسایی شده.

ردیف	نویسنده (سال)	عنوان پژوهش	مکانیزم اصلی شکست ابرتقارن	یافته‌ها	رفرنس
1	روی و همکاران (2025)	شکست ابرتقارن القایی توسط اینستانتون در نیمه‌فلزهای توپولوژیکی	اثر اینستانتون بر پتانسیل ابرمتقارن	نتایج نشان داد که شکست دینامیکی ابرتقارن از طریق اثر اینستانتون به عنوان مکانیزم زیربنایی برای باز شدن گاف انرژی در فازهای نیمه‌فلزی توپولوژیکی عمل می‌کند و حتی یک میدان مغناطیسی بسیار کوچک می‌تواند گافی در فازهای با پایداری توپولوژیکی باز کند.	[13]
2	دیاماندیس و همکاران (2025)	جنبه‌های تورم ناشی از شکست ابرتقارن در مدل‌های اوربیفولد	انتقال شکست ابرتقارن از برین پنهان به برین قابل مشاهده	نتایج نشان داد که شکست ابرتقارن در برین پنهان رخ می‌دهد و به برین قابل مشاهده منتقل می‌شود، که منجر به پتانسیل اینفلاتونی با جملات القا شده گرانشی می‌گردد. این اصلاحات برای کیهان‌شناسی تورمی مهم هستند و می‌توانند پیش‌بینی‌های مدل‌های ابرگرانشی را تغییر دهند.	[14]
3	داهیا و همکاران (2024)	ابرسانایی و ابرسانایی رنگی در دمای بالا به دلیل شکست ابرتقارن	پیامدهای شکست ابرتقارن در ابرسانایی	نتایج نشان داد که ویژگی‌های اصلی مکانیک کوانتومی ابرمتقارن می‌تواند به شکل مستقیم استخراج شود و پیامدهای شکست ابرتقارن می‌تواند در قالب امکان وقوع ابرسانایی، ابرسانایی دوگانه و ابرسانایی رنگی تحلیل شود.	[15]

برتولینی و مینیوسا (۲۰۲۱) یک تغییر شکل شکست ابرتقارن از نقطه ثابت ابرهمدیس E1 در پنج بعد را تحلیل کردند که در جفت‌شدگی گیج ضعیف، به یانگ-میلز SU(2) خالص منجر می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که ساختار هندسی صریحی می‌تواند با استفاده از تکنیک‌های وب-برین برای این تغییر شکل ارائه شود. برای جفت‌شدگی گیج به اندازه کافی بزرگ، یک تقارن جهانی به طور خودبخودی شکسته می‌شود و نظریه وارد فاز جدیدی می‌شود که در جفت‌شدگی بی‌نهایت، ناپایداری نشان می‌دهد. فازهای یانگ-میلز و فاز شکست تقارن توسط یک گذار فاز از هم جدا می‌شوند که بسته به ساختار پتانسیل، می‌تواند مرتبه اول یا دوم باشد [۱۹].

بائر و همکاران (۲۰۲۱) جرم‌های ذرات ابرمتقارن و بوزون هیگز را از دیدگاه لندسکیپ بررسی کردند و تفاوت بین شکست ابرتقارن دینامیکی و خودبخودی را تحلیل نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که شکست ابرتقارن اختلالی در لندسکیپ خلأهای رشته‌ای، ترم‌های نرم بزرگ را به صورت توزیع قانون توانی با لگاریتمی ترجیح می‌دهد، اما با وتوی آنتروپیک خلأهای نامناسب یا خلأهایی که منجر به مقدار بیش از حد بزرگ برای مقیاس ضعیف مشتق شده می‌شوند، تعدیل می‌شود. اسکن چنین خلأهایی منجر به پیش‌بینی آماری جرم بوزون هیگز سبک با ذرات ابرمتقارن (به جز احتمالاً هیگزینوهای سبک) معمولاً فراتر از دسترس LHC می‌شود. در مقابل، مدل‌های شکست دینامیکی ابرتقارن منجر به توزیع یکنواخت پارامترهای نرم در مقیاس لگاریتمی می‌شوند که مقادیر کوچک را ترجیح می‌دهد. این مطالعه نشان داد که سناریوی لندسکیپ شکست دینامیکی ابرتقارن با نتایج جستجوهای LHC سازگار نیست [۲۰].

بوی (۲۰۲۱) ارتباطات عمیق بین توپولوژی و تقارن در فیزیک را بررسی کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که توپولوژی و تقارن پیوندهای عمیقی دارند، اما توپولوژی ذاتاً گسترده‌تر و پیچیده‌تر است. در حالی که حضور تقارن در پدیده‌های فیزیکی محدودیت‌های قوی اعمال می‌کند، توپولوژی به حالت‌های کم‌انرژی مربوط است و احتمالاً اطلاعاتی درباره مسیرهای دینامیکی مختلف و الگوهایی که ذرات می‌توانند دنبال کنند، ارائه می‌دهد. این مطالعه دو موضوع را مورد بررسی قرار داد: اول، اینکه هندسه کوانتومی، هندسه کلاسیک را تغییر شکل می‌دهد و این تغییر شکل توپولوژیکی ممکن است اثرات فیزیکی خاص مقیاس فیزیک کوانتومی تولید کند؛ و دوم، اینکه تقارن آینده‌ای و پدیده تغییر توپولوژیکی ارتباط نزدیکی دارند [۲۱].

منصوری و عبداللهی (۱۳۹۸) نقش نظریه گروه‌ها در فیزیک ذرات بنیادی و تقارن در فیزیک را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که ریاضیات و گروه‌های لی نقش کلیدی در طبقه‌بندی ذرات بنیادی و درک تقارن‌های طبیعت ایفا می‌کنند. پس از اکتشافات فراوان در زمینه ذرات بنیادی، نظریه گروه‌ها توانست نظم و ساختار را به این حوزه وارد کند. این نظم‌دهی در نهایت به مفهوم تقارن در عمیق‌ترین سطح ذرات بنیادی انجامید که بعدها به عنوان اصلی راهنما، فیزیکدانان را در پیشرفت‌های بعدی یاری کرد. این مطالعه مفاهیم پیچیده ریاضیاتی را به شیوه‌ای ساده و قابل درک برای مخاطبان با سطوح مختلف دانش ریاضی ارائه داد [۲۲].

بر اساس بررسی‌های انجام شده و تحلیل مقالات منتخب، یافته‌های اصلی پژوهش‌ها در زمینه شکست ابرتقارن و نقش آن در فیزیک ذرات بنیادی به صورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است. این جدول شامل اطلاعات کلیدی مانند نویسندگان، عنوان پژوهش، مکانیزم اصلی شکست ابرتقارن و یافته‌های اصلی هر مطالعه می‌باشد. مرور این یافته‌ها نشان می‌دهد که پژوهش‌های اخیر در زمینه شکست ابرتقارن، طیف گسترده‌ای از کاربردها

4	میورا و توتسوکا (2023)	شکست ابرتقارن در مدل نیکولای تعمیم یافته با جفت شدگی فرمیونی	پارامتر کنترل در ضد جابجاگر مولدهای ابرتقارن	نتایج نشان داد که ابرتقارن سیستم های محدود و نامحدود تا زمانی که پارامتر کنترل متناهی باشد، شکسته می شود. همچنین، فرمیون های گلدستون-نامبو بی گاف هستند و تباهی دگی گسترده حالت پایه مورد انتظار برای مقادیر عمومی پارامتر رخ نمی دهد.	[16]
5	کای و همکاران (2022)	مشاهده ابرتقارن و شکست خودبخودی آن در یک شبیه ساز کوانتومی یون به دام افتاده	مشاهده تجربی تباهی دگی انرژی و شکست ابرتقارن	نتایج نشان داد که تباهی دگی انرژی ناشی از ابرتقارن و شکست خودبخودی آن می تواند به صورت تجربی مشاهده شود. ابربار حالت های پایه متباهی به طور صریح اندازه گیری شد، که تأییدی بر پیش بینی های نظری شکست ابرتقارن است.	[17]
6	مارا و همکاران (2022)	گلدستینوهای ماجورانی یک بعدی و شکست جزئی ابرتقارن در سیم های کوانتومی	ارتباط مدهای ماجورانا با شکست ابرتقارن	نتایج نشان داد که مدهای ماجورانی بدون جرم، فرمیون های گلدستون مرتبط با ابرتقارن شکسته شده هستند. اثر انگشت تجربی آنها یک گذار از فرو رفتگی به قله در رسانایی صفر-بایاس است که می تواند به پروتکل های جدید برای پیاده سازی کیوبیت های توپولوژیکی منجر شود.	[18]
7	برتولینی و مینیوسا (2021)	تغییر شکل های شکست ابرتقارن و گذارهای فاز در پنج بعد	ساختار هندسی تغییر شکل با تکنیک های وب-برین	نتایج نشان داد که برای جفت شدگی گنج به اندازه کافی بزرگ، یک تقارن جهانی به طور خودبخودی شکسته می شود و نظریه وارد فاز جدیدی می شود.	[19]
8	بائر و همکاران (2021)	جرم های ذرات ابرتقارن و بوزون هیگز از لندسکیپ: شکست ابرتقارن دینامیکی در مقابل خودبخودی	تفاوت پیش بینی های شکست ابرتقارن دینامیکی و خودبخودی	نتایج نشان داد که شکست ابرتقارن ترم های نرم بزرگ را ترجیح می دهد که با نتایج LHC سازگار است، در حالی که شکست دینامیکی منجر به توزیع یکنواخت پارامترهای نرم در مقیاس لگاریتمی می شود که با داده های تجربی سازگار نیست.	[20]
9	بوی (2021)	تقارن و شکست تقارن در فیزیک: از هندسه تا توپولوژی	ارتباط بین توپولوژی و تقارن	نتایج نشان داد که هندسه کوانتومی، هندسه کلاسیک را تغییر شکل می دهد و این تغییر شکل توپولوژیکی می تواند اثرات فیزیکی خاص مقیاس کوانتومی تولید کند. همچنین، تقارن آینه ای و پدیده تغییر توپولوژیکی ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند.	[21]
10	منصوری و عبداللهی (1398)	نقش نظریه گروه ها در فیزیک ذرات بنیادی و تقارن در فیزیک	کاربرد گروه های لی در طبقه بندی ذرات بنیادی	نتایج نشان داد که نظریه گروه ها نقش کلیدی در طبقه بندی ذرات بنیادی و درک تقارن های طبیعت ایفا می کند. این نظم دهی در نهایت به مفهوم تقارن در عمیق ترین سطح ذرات بنیادی انجامید که به عنوان راهنما، فیزیکدانان را در پیشرفت های بعدی یاری کرده است.	[22]

۴.۳. مقایسه پژوهش‌ها

بررسی و مقایسه پژوهش‌های منتخب در زمینه شکست ابرتقارن، الگوهای متمایزی را در رویکردهای مختلف به این موضوع آشکار می‌سازد. مکانیزم‌های متنوع شکست ابرتقارن در این مطالعات شامل شکست دینامیکی از طریق اثر اینستانتون در پژوهش روی و همکاران (۲۰۲۵) [۱۳]، شکست خودبخودی در مطالعه تجربی کای و همکاران (۲۰۲۲) [۱۷]، انتقال شکست ابرتقارن بین برین‌ها در پژوهش دیاماندیس و همکاران (۲۰۲۵) [۱۴]، و مقایسه شکست دینامیکی و خودبخودی از دیدگاه لندسکیپ در مطالعه بائر و همکاران (۲۰۲۱) [۲۰] است. علی‌رغم تفاوت در رویکردها و سیستم‌های مورد مطالعه، این پژوهش‌ها به نتایج مشابهی در مورد نقش محوری شکست ابرتقارن در پدیده‌های فیزیکی دست یافته‌اند. داهیا و همکاران (۲۰۲۴) [۱۵] و مارا و همکاران (۲۰۲۲) [۱۸] کاربرد مفاهیم شکست ابرتقارن در فیزیک ماده چگال را بررسی کرده‌اند، با تمرکز بر ارتباط بین شکست ابرتقارن و پدیده‌های ابررسانایی و مدهای ماجورانا. این مطالعات نشان می‌دهند که چگونه مفاهیم نظری فیزیک ذرات بنیادی می‌توانند به تبیین پدیده‌های متنوع ماده چگال کمک کنند و پلی بین حوزه‌های مختلف فیزیک ایجاد نمایند.

روش‌های تحلیلی مورد استفاده در پژوهش‌های بررسی شده طیف وسیعی را شامل می‌شوند، از محاسبات صریح ریاضیاتی در مطالعات روی و همکاران [۱۳] و دیاماندیس و همکاران [۱۴] تا شبیه‌سازی‌های عددی در پژوهش میورا و توتسوکا [۱۶] و مشاهدات تجربی مستقیم در مطالعه کای و همکاران [۱۷]. این تنوع روش‌شناختی، امکان بررسی جامع و چندجانبه پدیده شکست ابرتقارن را فراهم می‌آورد. میورا و توتسوکا [۱۶] و برتولینی و مینیوسا [۱۹] جنبه‌های نظری شکست ابرتقارن در چارچوب‌های متفاوت را بررسی کرده‌اند: یکی با معرفی مدل فرمیونی شبکه‌ای با پارامتر کنترل در ضد جابجاگر مولدهای ابرتقارن، و دیگری با تحلیل تغییر شکل شکست ابرتقارن در یک نظریه پنج‌بعدی با استفاده از تکنیک‌های وب-برین. مقایسه این دو پژوهش بیانگر تنوع روش‌های تحلیلی برای بررسی شکست ابرتقارن در چارچوب‌های نظری مختلف است، که هر کدام بینش‌های منحصر به فردی ارائه می‌دهند.

پژوهش‌های بوی (۲۰۲۱) [۲۱] و منصوری و عبداللهی (۱۳۹۸) [۲۲] جنبه‌های بنیادی‌تر تقارن و شکست تقارن در فیزیک را مورد مطالعه قرار داده‌اند، با تمرکز بر ارتباط بین توپولوژی و تقارن و نقش نظریه گروه‌ها در طبقه‌بندی ذرات بنیادی. این مطالعات نشان می‌دهند که بررسی تقارن و شکست تقارن از دیدگاه‌های مختلف ریاضیاتی می‌تواند به درک عمیق‌تر ساختار بنیادی طبیعت کمک کند. در مجموع، مقایسه پژوهش‌های منتخب حاکی از آن است که مطالعه شکست ابرتقارن یک حوزه بین‌رشته‌ای گسترده است که جنبه‌های مختلف فیزیک را در بر می‌گیرد. گرچه هر یک از این پژوهش‌ها از زاویه‌ای متفاوت به این موضوع پرداخته‌اند، همگی بر اهمیت فهم مکانیزم‌های شکست ابرتقارن برای درک عمیق‌تر پدیده‌های فیزیکی و پیش‌بینی نتایج قابل آزمون تأکید دارند. این مطالعات همچنین نشان می‌دهند که شکست ابرتقارن، علی‌رغم عدم مشاهده مستقیم ذرات ابرتقارن در آزمایش‌های انرژی بالا، همچنان یک چارچوب نظری قدرتمند برای توضیح بسیاری از پدیده‌های فیزیکی در مقیاس‌های مختلف از کیهان‌شناسی تا فیزیک ذرات و ماده چگال است.

۴. نتیجه‌گیری

ابرتقارن یکی از توسعه‌های اساسی مدل استاندارد فیزیک ذرات است که با معرفی تقارنی بین بوزون‌ها و فرمیون‌ها، چارچوبی نظری برای حل مسائل مختلف فیزیک بنیادی ارائه می‌کند. این نظریه می‌تواند پاسخی برای مسئله سلسله‌مراتب فراهم کند، امکان یکپارچه‌سازی نیروهای بنیادی طبیعت را فراهم آورد، کاندیدهایی برای ماده تاریک معرفی کند، و با نظریه ریسمان سازگاری طبیعی داشته باشد. با این حال، عدم مشاهده ذرات ابرتقارن در آزمایش‌های فیزیک ذرات، منجر به این فرض شده است که ابرتقارن در انرژی‌های بالاتر شکسته می‌شود. مکانیزم‌های شکست ابرتقارن نقشی حیاتی در تعیین فنومنولوژی مدل‌های ابرتقارن و پیامدهای قابل مشاهده آنها ایفا می‌کنند. هدف اصلی این پژوهش مروری، ارائه تحلیلی سیستماتیک از مکانیزم‌های شکست ابرتقارن در فیزیک ذرات بنیادی و روش‌های تحلیلی مرتبط با آن بود. در این پژوهش مروری، جستجوی گسترده‌ای در پایگاه‌های داده علمی معتبر بین‌المللی شامل Google Scholar، Scopus، Web of Science، و همچنین پایگاه‌های داده داخلی مانند SID، نورمگز، مگیران و علم‌نت انجام شد. در مجموع، ۶۰۰ مقاله مرتبط با موضوع شناسایی شد که پس از غربالگری اولیه بر اساس عنوان و چکیده، ۱۰ مقاله که معیارهای ورود را داشتند و در محدوده سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ منتشر شده بودند، برای بررسی دقیق انتخاب شدند. نتایج این مطالعه مروری نشان داد که پژوهش‌های اخیر در زمینه شکست ابرتقارن، طیف گسترده‌ای از مکانیزم‌ها و کاربردها را پوشش می‌دهند. مکانیزم‌های مختلف شکست ابرتقارن، از شکست دینامیکی از طریق اثر اینستانتون گرفته تا شکست خودبخودی و شکست جزئی، در حوزه‌های مختلف فیزیک از کیهان‌شناسی تا فیزیک ماده چگال کاربرد دارند. روش‌های تحلیلی متنوعی برای بررسی این مکانیزم‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از محاسبات صریح ریاضیاتی تا شبیه‌سازی‌های عددی و مشاهدات تجربی مستقیم. پژوهش‌های بررسی شده نشان می‌دهند که علی‌رغم عدم مشاهده مستقیم ذرات ابرتقارن در آزمایش‌های انرژی بالا، مطالعه شکست ابرتقارن همچنان یک حوزه پویا و فعال در فیزیک نظری است که می‌تواند بینش‌های ارزشمندی درباره ساختار بنیادی طبیعت ارائه دهد. همچنین، ارتباط بین مفاهیم ابرتقارن در فیزیک ذرات بنیادی و پدیده‌های قابل مشاهده در سیستم‌های ماده چگال، افق‌های جدیدی برای آزمون غیرمستقیم نظریه‌های ابرتقارن گشوده است. برای پژوهش‌های آینده در این زمینه، چندین مسیر پیشنهاد می‌شود. نخست، بررسی دقیق‌تر ارتباط بین مکانیزم‌های مختلف شکست ابرتقارن و داده‌های تجربی حاصل از برخورددهنده‌های هادرونی، به ویژه با افزایش انرژی و حساسیت این آزمایش‌ها در آینده. دوم، توسعه روش‌های محاسباتی کارآمدتر برای بررسی اثرات کوانتومی در شکست ابرتقارن، به ویژه در رژیم‌های جفت‌شدگی قوی. سوم، مطالعه عمیق‌تر ارتباط بین شکست ابرتقارن و پدیده‌های نوظهور در فیزیک ماده چگال، که می‌تواند به شبیه‌سازی‌های کوانتومی قابل کنترل‌تر از نظریه‌های ابرتقارن منجر شود. چهارم، بررسی دقیق‌تر نقش شکست ابرتقارن در کیهان‌شناسی، به ویژه در زمینه تورم کیهانی و ماده تاریک. پنجم، توسعه آزمون‌های جدید و غیرمستقیم برای نظریه‌های ابرتقارن، که می‌تواند شواهدی برای وجود ابرتقارن حتی در غیاب مشاهده مستقیم ذرات ابرتقارن فراهم آورد. این مسیرهای پژوهشی می‌توانند به درک عمیق‌تر نقش شکست ابرتقارن در فیزیک ذرات بنیادی و کاربردهای آن در حوزه‌های مختلف فیزیک کمک کنند.

مراجع

- [۱۳] Rui, W. B., Zhao, Y. X., & Wang, Z. D. (2025). Instanton-Induced Supersymmetry Breaking in Topological Semimetals. *Physical Review Letters*, 134(23), 236602.
- [۱۴] Diamandis, G. A., Kaskavelis, K., Lahanas, A. B., & Pavlopoulos, G. (2025). Aspects of supersymmetry breaking driven inflation in orbifold models. *The European Physical Journal C*, 85(3), 350.
- [۱۵] Dahiya, P., Singh, B., & Mahajan, N. (2024). Superconductivity and color superconductivity at high T_c due to breaking of supersymmetry. *International Journal of Modern Physics A*, 39(02n03), 2450009.
- [۱۶] Miura, U., & Totsuka, K. (2023). Supersymmetry breaking in a generalized Nicolai model with fermion pairing. *arXiv preprint arXiv:2308.03346*.
- [۱۷] Cai, M. L., Wu, Y. K., Mei, Q. X., Zhao, W. D., Jiang, Y., Yao, L., ... & Duan, L. M. (2022). Observation of supersymmetry and its spontaneous breaking in a trapped ion quantum simulator. *Nature Communications*, 13(1), 3412.
- [۱۸] Marra, P., Inotani, D., & Nitta, M. (2022). 1D Majorana Goldstinos and partial supersymmetry breaking in quantum wires. *Communications Physics*, 5(1), 149.
- [۱۹] Bertolini, M., & Mignosa, F. (2021). Supersymmetry breaking deformations and phase transitions in five dimensions. *Journal of High Energy Physics*, 2021(10), 1-23.
- [۲۰] Baer, H., Barger, V., Salam, S., & Serce, H. (2021). Supersymmetric particle and Higgs boson masses from the landscape: Dynamical versus spontaneous supersymmetry breaking. *Physical Review D*, 104(11), 115025.
- [۲۱] Boi, L. (2021). Symmetry and symmetry breaking in physics: From geometry to topology. *Symmetry*, 13(11), 2100.
- [۲۲] سجاد منصوری، فاطمه عبداللہی. ۱۳۹۸. نقش نظریه گروه ها در فیزیک ذرات بنیادی و تقارن در فیزیک مسومین کنفرانس آموزش و کاربرد ریاضیات.
- [۱] Bettini, A. (2024). *Introduction to elementary particle physics* (p. 562). Cambridge University Press.
- [۲] Gasirowicz, S., & Langacker, P. (2022). *Elementary Particles in Physics*.
- [۳] ایمان پور، ع. و حیدریان، ش. (۱۳۹۲). بررسی ناحیه هیگز و شکست ابرتقارن در مدل MSSM. وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه تربیت مدرس - دانشکده علوم پایه.
- [۴] قدسی محمودزاده، ا. و خاوری، ب. (۱۳۹۰). بررسی مدل ابرتقارن و مکانیزمهای شکست خود به خود آن. وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه فردوسی مشهد.
- [۵] Iliopoulos, J., & Tomaras, T. N. (2021). *Elementary particle physics: The standard theory*. Oxford University Press.
- [۶] جعفرپور، م. آقابزرگی، ح. و عرب پور، ز. (۱۴۰۲). معرفی ابر گروه های بنیادی و کاربرد آنها در فیزیک ذرات بنیادی و فیزیک هسته ای. پژوهش های ریاضی صاحب، ۱، ۸۵-۱۰۷.
- [۷] بخشعلی زاده، ح. و طباطبایی فر، ع. (۱۴۰۲). ذرات بنیادی و قوانین فیزیک: سخنرانی های یادبود دیراک در ۱۹۸۶. نگارستان ادب.
- [۸] Diamandis, G. A., Kaskavelis, K., Lahanas, A. B., & Pavlopoulos, G. (2025). Aspects of supersymmetry breaking driven inflation in orbifold models. *The European Physical Journal C*, 85(3), 350.
- [۹] Suganuma, H. (2022). Quantum chromodynamics, quark confinement, and chiral symmetry breaking: A bridge between elementary particle physics and nuclear physics. In *Handbook of Nuclear Physics* (pp. 1-48). Singapore: Springer Nature Singapore.
- [۱۰] Khan, A. (2024). *The Role of Symmetry in Physics: Group Theory Applications in Modern Physics*. *Frontiers in Applied Physics and Mathematics*, 1(1), 57-78.
- [۱۱] بحیرائی، م. (۱۴۰۳). درک جهان هستی: مقدمه ای بر فیزیک هسته ای و ذرات. رویان پژوه.
- [۱۲] Kumar, L. (2021). *Symmetries and Conservation Laws in Elementary Particle*. *International Journal of Engineering, Science and Mathematics*, 10(1), 14-30.