مطالعه مواد فوق‌هادی‌ها و پدیده اثر مایسنر (دیامقناطیس).

عوض برومند*[1] عبدالقیوم شاداب*[2]

۱- پوهندوی، فزیک، تعلیم و تربیه، مؤسسه تحصیلات عالی غور، فیروز کوه افغانستان(نویسنده مسئول). abromand22@ghru.edu.af

۲- پوهنمل، فزیک، تعلیم و تربیه، مؤسسه تحصیلات عالی غور، فیروز کوه افغانستان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۱۲ – تاریخ پذیرش:۱۴۰۴/۶/۲۰ – تاریخ نشر: ۱۴۰۴/۱۰/۹

چکیده

امروزه نوارهای فوق‌هادی‌ها در جه حرارت بالا به دلیل خواص برقی فوق‌العاده خود پوتانشیل قابل‌توجه برای ورود به بازارهای جهانی ماشین‌های برقی از خود نشان داده‌اند. در حوزه انجینیری برق و مواد مطرح‌شده‌اند و پوتانشیل قابل‌توجهی برای ورود به بازارهای جهانی، به‌ویژه درزمینه ماشین‌های برقی، از خود نشان می‌دهند. این نوارهای فوق‌هادی که به‌طور گسترده در ساخت سیم‌پیچ‌های فوق‌هادی مورداستفاده قرار می‌گیرند، در شرایط مناسب فاقد مقاومت برقی در برابر عبور جریان برق می‌باشند. نبود مقاومت برقی موجب کاهش تلفات انرژی، افزایش بازده سیستم‌ها و بهبود عملکرد تجهیزات برقی می‌گردد. از این‌رو، شناخت دقیق ویژگی‌ها و رفتار این مواد، هم از جنبه نظری و هم از دیدگاه علمی، از اهمیت اساسی برخوردار است .در این تحقیق، مروری جامع بر پدیده فوق‌هادی انجام‌شده و مفاهیم بنیادی مرتبط با آن تشریح گردیده است. همچنین اثر مایسنر به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین ویژگی‌های فوق‌هادی‌ها موردبررسی قرارگرفته و تفاوت‌های اساسی میان فوق‌هادی‌های نوع اول و نوع دوم تبیین شده است. در ادامه، کاربردهای تخنیکی مواد فوق‌هادی، به‌ویژه در سیستم‌های برقی و ماشین‌های برقی، موردتوجه قرارگرفته و نقش این مواد در توسعه فناوری‌های پیشرفته و بهبود کارایی تجهیزات مدرن برجسته شده است.

کلمات کلیدی: فوق هادی‌ها، اثر مایسنر، مقاومت برقی صفر

استناد: عوض، برومند و شاداب، عبدالقیوم. (۱۴۰۴). مطالعه مواد فوق‌هادی‌ها و پدیده اثر مایسنر (دیامقناطیس). مجله علمی- تحقیقی غور،۲ (۱)، ۲۰۳-۲۱۶.

A Study of Superconducting Materials and the Meissner effect (Diamagnetism) phenomenon.

Awaz Bromand[*1] Abdul Qayyum Shadab[*2]

1- Asst. Prof, Physic, Education, , Ghor Institute of Higher Education, Firozkoh, Afghanistan (Corresponding Author) abromand22@ghru.edu.af

2- Asst. Prof, Physic, Education, , Ghor Institute of Higher Education, Firozkoh, Afghanistan

Received: 3/8/2025 | Accepted: 11/9/2025 | Published: 30/12/2025

ABSTRACT

Nowadays, high-temperature superconducting tapes have attracted considerable attention due to their outstanding electrical properties and have demonstrated significant potential for entry into global markets, particularly in the field of electric machines. These materials have become prominent within the domains of electrical engineering and materials science, owing to their promising performance and wide range of prospective applications. High-temperature superconducting tapes, which are extensively employed in the fabrication of superconducting coils, exhibit zero electrical resistance to the flow of electric current under appropriate operating conditions. The absence of electrical resistance leads to a substantial reduction in energy losses, an increase in system efficiency, and an overall improvement in the performance of electrical equipment. Consequently, a thorough understanding of the characteristics and behavior of these materials, from both theoretical and scientific perspectives, is of fundamental importance. This study provides a comprehensive review of the superconducting phenomenon and systematically examines the fundamental concepts of superconductivity.. Furthermore, the Meissner effect, as one of the most distinctive features of superconductors, is examined in detail, and the essential differences between type-I and type-II superconductors are clarified. Finally, the technical applications of superconducting materials, particularly in electrical systems and electric machines, are highlighted, emphasizing their role in the development of advanced technologies and the enhancement of the efficiency of modern electrical devices

Keywords: Superconductors, Meissner's effect, Zero electrical resistance.

Cite: Bromand. A.,& shadab.A.Q. (2025). A Study of Superconducting Materials and the Meissner effect (Diamagnetism) phenomenon. *Scientific Journal of Ghor University, 2*(1), 204-216.

۱- مقدمه

هدایت برقی[18] خاصیت از مواد است که سبب انتقال انرژی برقی در آن‌ها می‌شود. این خاصیت در مواد مختلف، متفاوت است. طلا، پلاتین و نقره هادی‌های بسیار خوبی هستند درحالی‌که شیشه و پلاستیک به‌طورکلی هادی برق نسبت. معکوس هدایت برقی مقاومت نامیده می‌شود که تغییرات ترمودینامیکی و الکترومغناطیسی روی مقدار آن تأثیر می‌گذارد (پور, ۱۳۹۱).

تولید ارزان انرژی و انتقال آن با حداقل ضایع شدن همیشه موردتوجه بشر بوده‌اند. یکی از بهترین گزینه‌ها برای کم کردن تلفات و هزینه‌های تولید انرژی برقی به‌کارگیری وسایل و تجهیزاتی است که مقاومت برقی کمتری در مقابل عبور جریان برق‌دارند؛ و جود مقاومت در بسیاری از کاربردها مطلوب نیست. چون در حین انتقال انرژی از طریق ماده اتلاف انرژی اتفاق می‌افتند. نکته قابل‌توجه این است که در بعضی از مواد اگر حرارت ماده از یک مقدار خاص تجاوز کند (قربانی, ۱۳۹۰) ، تغییری به لحاظ هدایت برقی در آن صورت می‌گیرد. در چنین حرارتی اگر ماده به یک مسیر بدون مقاومت برقی تبدیل شود به آن فوق هادی[19] می‌گویند. در این حالت مقاومت برقی به‌طور کامل از بین می‌رود. به‌عنوان‌مثال، اگر جریانی یک حلقه فوق هادی جاری شود ممکن است در طول مدت‌زمان صد هزار سال بدون تغییر باقی بماند شاید بتوان یک ماده فوق هادی را به این صورت تعریف کرد: یک فوق هادی عنصری است شامل آلیاژ فلزی یا ترکیبات مواد فلزی که در یک درجه حرارت معین برق را بدون مقاومت عبور دهید (Hott, Kleiner, & Wolf, 2004). شکل ۱ این امر را نشان می‌دهد.

۱-۱- بیان مسئله

فوق هادی‌ها موادی هستند که در درجه حرارت بسیار پایین، مقاومت برقی آن‌ها به صفر می‌رسد و ساحه‌های مقناطیسی را دفع می‌کند (اثر مایسنر). این ویژگی‌ها باعث می‌شود که فوق هادی‌ها در کاربردهای مختلفی مانند تولید ساحه‌های مقناطیسی قوی، انتقال برق بدون اتلاف انرژی و ساخت قطارهای مگلو[20] مورداستفاده قرار گیرند. بنابراین، چالش‌های زیادی در استفاده گسترده از فوق هادی‌ها وجود دارد. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، نیاز به درجه حرارت بسیار پایین برای رسیدن به حالت فوق هدایت است که هزینه‌های زیادی را به همراه دارد.

[18] Conductivity
[19] Superconductor
[20] Maglev

۱-۲- اهداف

نوشتار حاضر در راستای جستجو چیستی «فوق هادی‌ها» به دنبال بیان شیوه‌های گوناگون در مقایسه با مواد هادی‌های برق و نیمه‌هادی‌ها در قالب رشته‌های مطالعاتی شناخته‌شده است.

۱-۳- اهمیت تحقیق

تحقیقات در مورد پدیده فوق هادی‌ها از همان آغاز توجه دانشمندان را به خود جلب کرد و در دهه‌های بعد از کشف مشخصه‌های فوق هادی‌ها در موارد دیگر نیز دیده شد. گام مهم بعدی در فهم فوق هادی‌ها در سال ۱۹۳۳م، توسط والتر مایسنر و رابرت اوختفلد[۲۱] اتفاق افتاد و همچنان فوق‌هادی‌های درجه حرارت پایین امروزه در ساخت آهنرباهای ویژه طیف سنجی‌های رزونانس مقناطیسی هسته استفاده می‌گردد.

۱-۴- پیشنه تحقیق

در سال ۱۹۵۰ م، تیوری لاندائو-گینزبرگ[۲۲] که ترکیبی از تیوری دوم لاندائو با معادله شرودینگر می‌باشد، توسط لاندائو و گینزبرگ مطرح شد، و مطالعه تأثیر مقدار آلایش بالیک اسید بر روی خواص فوق‌هادی MgB_2 توسط کیم و همکارانش. این تیوری دارای توضیح خوبی در باره‌ای مشخصه و خواص فوق هادی‌ها است (پور, ۱۳۹۱). کاری مهم دیگری در فوق هادی‌ها در سال ۱۹۵۰ م، و آن زمانی بود که ماکسول و رینولدز[۲۳]کشف کرد که درجه حرارت بحرانی فوق هادی‌ها به کتله ایزوتوپی جز اصلی عنصر بستگی دارد. این کشف مهم به اثر متقابل الکترون فونون و درنتیجه میکانیزم میکروسکوپی برای فوق هادی‌ها اشاره دارد (قرانی, ۱۳۸۹).

۱-۵- روش تحقیق

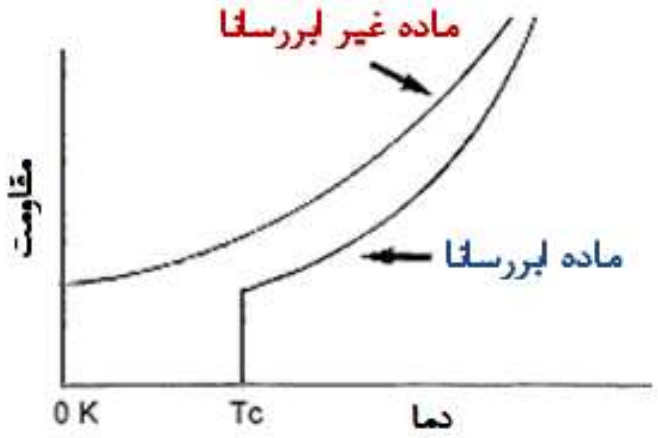
روش انجام تحقیق بستگی به هدف، ماهیت موضوع تحقیق و امکانات اجرای آن دارد. روش جمع‌آوری معلومات و روش احصایوی جهت تجزیه‌وتحلیل معلومات متفاوت است، انتخاب روش تحقیق بر اساس همین عوامل هست. ازآنجایی‌که هدف اصلی این تحقیق، بررسی فوق هادی‌ها و اثر مایسنر هست، روش جمع‌آوری معلومات در این تحقیق به‌صورت مروری و کتابخانه‌ای

[21] Robert Ochsenfeld
[22] Landau-Ginsburg theory
[23] Reynolds

بوده و از منابع معتبر علمی و مقالات علمی استفاده گردیده است. در این تحقیق تلاش گردیده است تا تمام معیارها و موازین قابل‌استفاده درروش کتابخانه‌ای رعایت گردد.

۲-پدیده فوق هادی

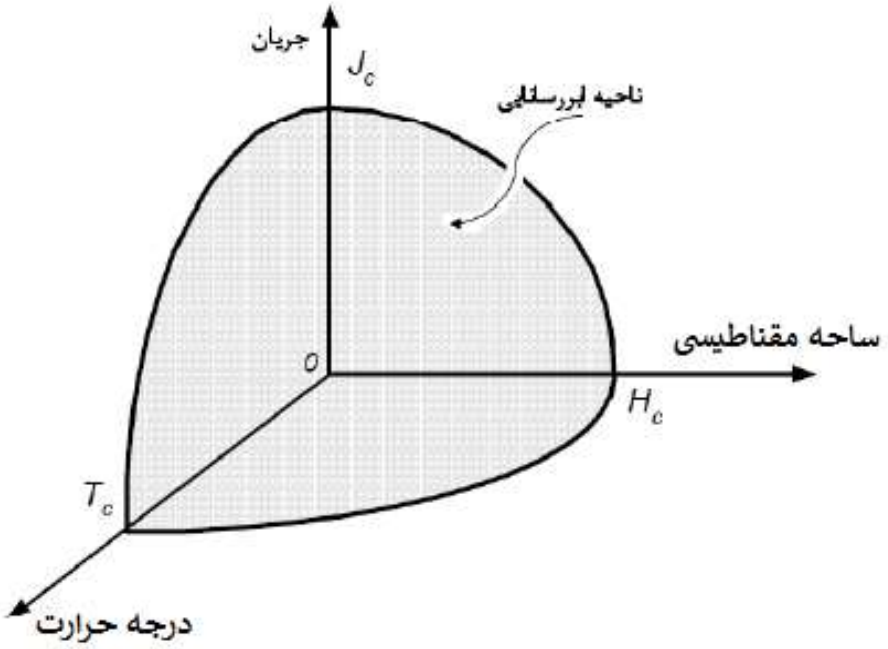
فوق هادی پدیده است که در درجه حرارت بسیار پایین برای برخی از مواد رخداده و در این حالت مقاومت برقی ماده صفر می‌شود و ماده خاصیت دیامقناطیس پیدا می‌کند، که پدیده را می‌توانیم در جیوه به‌خوبی مشاهده کرد، یعنی ساحه مقناطیسی را از درون خود طرد می‌کند. طرد ساحه مقناطیسی تنها تفاوت اصلی فوق هادی‌ها با هادی کامل است؛ زیرا در هادی کامل انتظار می‌رود ساحه مقناطیسی ثابت بماند، درحالی‌که در فوق هادی ساحه مقناطیسی همواره صفر است شکل ۱ یک قطعه فوق هادی را نشان می‌دهد که در اثر طرد ساحه جیوه یک ماده مقناطیس دائم معلق شده است (قرانی, ۱۳۸۹).



شکل۱-تغییر مقاومت با کاهش درجه حرارت در جیوه (پور, ۱۳۹۱).

پدیده فوق هادی برای طیف وسیعی از مواد مانند قلعی و المونیم وجود دارد. همچنین برخی آلیاژها و نیمه‌هادی‌ها نیز فوق هادی می‌شوند ولی فلزاتی مثل طلا و نقره این پدیده را از خود نشان نمی‌دهند. پدیده فوق‌هادی در فلزات فرومقناطیس رخ نمی‌دهد (میرزایی, ۱۳۹۸).

پدیده فوق هادی به سه عامل درجه حرارت بحرانی T_c، ساحه مقناطیسی بحرانی H_c و جریان بحرانی T_c وابسته هست. در صورت تجاوز هر یک از عوامل از مقدار بحرانی خود خاصیت فوق هادی از بین خواهد رفت توجه به این نکته لازم است که مقدار مشخصی برای این عوامل وجود دارد و میزان هر یک به میزان پارامترهای دیگر وابسته است (پور, ۱۳۹۱). شکل ۲ ناحیه فوق هادی مرتبط با این عوامل را نشان می‌دهد (قرار رابطه ذیل می‌توان ساحه مقناطیسی را محاسبه کرد (در اینجا ساحه مقناطیسی اعمال‌شده در ساحه مقناطیسی داخلی مواد دیامقناطیسی، مقناطیس پذیری این مواد $\chi = -1$ بنابراین



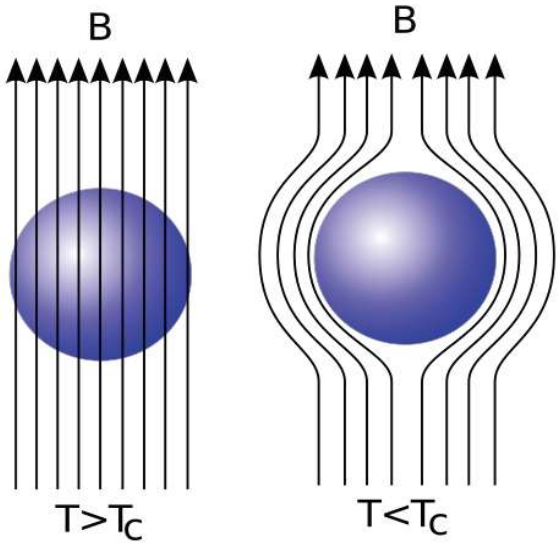
شکل ۲- رابطه عوامل دخیل در پدیده فوق هادی‌ها (Dobrin, 2010)

$$B = H - 4\pi M \qquad 1$$

$$M = -\frac{H}{4\pi} \Longrightarrow B = 0 \qquad 2$$

۳- اثر مایسنر[۲۴]

اثر مایسنر یکی از ویژگی‌های مهم مواد فوق هادی‌ها است. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که یک ماده فوق هادی در درجه حرارت پایینتر از درجه حرارت بحرانی خود قرار گیرد و هرگونه ساحه مقناطیسی را از درون خود دفع کند. این جریان خود به وجود آورنده ساحه‌ای است که جهت آن در خلاف جهت ساحه به وجود آورنده‌اش است. در هادی‌های آیده‌آل جریان بزرگی در هادی القا می‌شود که نتیجه‌اش خنثی کردن ساحه اصلی هست (Gieras, 2008). اثر مایسنر با بحث بالا متفاوت است. فرض کنید فلزی داریم که در وضعیت عادی است و یک ساحه مقناطیسی ثابت به آن اعمال‌شده است. اکنون فلز را سردکنیم تا به درجه حرارت بحرانی برسد در این لحظه شاهد از بین رفتن فوری ساحه خواهیم بود حال‌آنکه از قانون لنز چنین انتظاری نمی‌رود. اثر مایسنر به کمک دو برادر Fritz London و HEINZ London مطرح شد. در شکل ۳ می‌توانیم اثر مایسنر را در فاز فوق هادی‌ها باحالت عادی مقایسه کنیم (میرزایی, ۱۳۹۸).



شکل ۳- هادی کامل در حضور ساحه مقناطیسی (سمت راست)، فوق‌هادی در حضور ساحه مقناطیسی و بروز بدیده مایسنر (سمت چپ) (کاشانی, ۱۳۹۱).

[24] Meissner effect

4- بعضی از خواص مهم فوق‌هادی‌ها

در مورد مهم‌ترین خواص فوق‌هادی‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد

۴,۱- مقاومت صفر در مقابل عبور جریان مستقیم

امروزه صرفه‌جویی در مصرف انرژی، یکی از مهم‌ترین نیازهای کشورهای صنعتی است. هرساله هزینه زیادی صرف تحقیقات در زمینه کشف راه‌های ارزان و با ریسک کمتری می‌شود. برپایه پدیده فوق هادی با نقشی که می‌توان در زمینه صرفه‌جویی در تولید و انتقال انرژی برقی بازی کند، در آینده بشری نقشی اساسی خواهد داشت و به همین دلیل در سال‌های اخیر پژوهشگران زیادی با صرف هزینه‌های زیاد، تحقیقات خود را روی موضوع فوق هادی و کاربردهای آن در علوم مختلف متمرکز ساخته‌اند (Hott, Kleiner, & Wolf, 2004).

۲,۴-توانایی در تولید ساحه‌های مقناطیسی قوی

برای توضیح خصوصیات مقناطیسی فوق هادی، فرض کنید که در غیاب هرگونه ساحه ابتدا مقاومت فوق هادی با سرد شدن از بین برود و سپس ساحه مقناطیسی به آن اعمال شود. به دلیل آنکه کثافت جریان نمی‌تواند در داخل ماده فوق هادی تغییر کند، باید حتی بعد از اعمال ساحه مقناطیسی نیز صفر باقی بماند. درواقع اعمال ساحه مقناطیسی، جریان‌های بدون مقاومتی را القا می‌کند و این جریان‌ها در سطح نمونه طوری گردش می‌کنند که کثافت جریان مقناطیسی ایجادشده توسط آن‌ها در داخل نمونه دقیقاً برابر و در جهت مخالف کثافت جریان ساحه مقناطیسی اعمال‌شده باشد. ازآنجایی‌که این جریان‌ها از بین نمی‌روند. کثافت جریان در داخل نمونه صفر باقی می‌ماند (M. Konig, 2007)

۳,۴-خاصیت تونل زنی[۲۵]

این مشخصه به این معنی است که اگر دو فوق هادی را خیلی به هم نزدیک کنیم، مقدار از جریان یکی به دیگری جاری می‌شود. در دو سر این پیوندگاه یا تونل هیچ ولتاژی وجود ندارد؛ یعنی میزان جریان نشتی به ولتاژ بستگی ندارد ولی میزان این جریان نشتی به ساحه مقناطیسی در مقادیر خیلی کوچک بشدت وابسته است (Belzig, 1999)

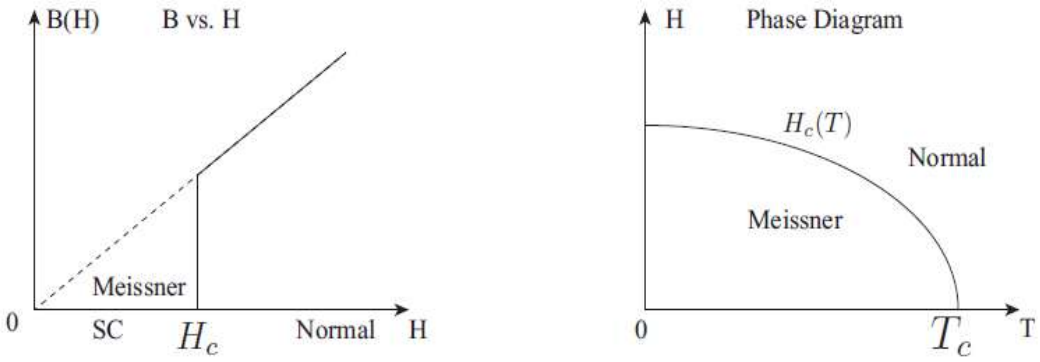
[25] Tunneling phenomenon

۵-انواع فوق‌هادی‌ها

دو نوع فوق‌هادی معمولی با توجه به خاصیت مقناطیسی آن‌ها وجود دارد. با بزرگ شدن ساحه مقناطیسی اعمال‌شده، فوق‌هادیت از بین می‌رود. فوق‌هادی‌ها را می‌توان با توجه به نحوه وقوع این شکست به دو نوع تقسیم کرد.

۵-۱- فوق هادی‌های نوع اول

برای فوق‌هادی‌های نوع I، زمانی که قدرت ساحه اعمال‌شده از مقدار بحرانی H_c بالاتر می‌رود، فوق‌هادی به‌طور ناگهانی از طریق یک انتقال فاز مرتبه اول از بین می‌رود. این نوع فوق‌هادی معمولاً توسط فلزات خالص مانند المونیم، سرب و سیماب نشان داده می‌شود. تنها آلیاژی که تاکنون شناخته‌شده است که فوق‌هادی نوع I را نشان می‌دهد $TaSi_2$ است. ساحه شبکه مقناطیسی داخل و گراف‌های فاز تابعی از ساحه مقناطیسی خارجی در شکل۴ نشان داده‌شده



است.

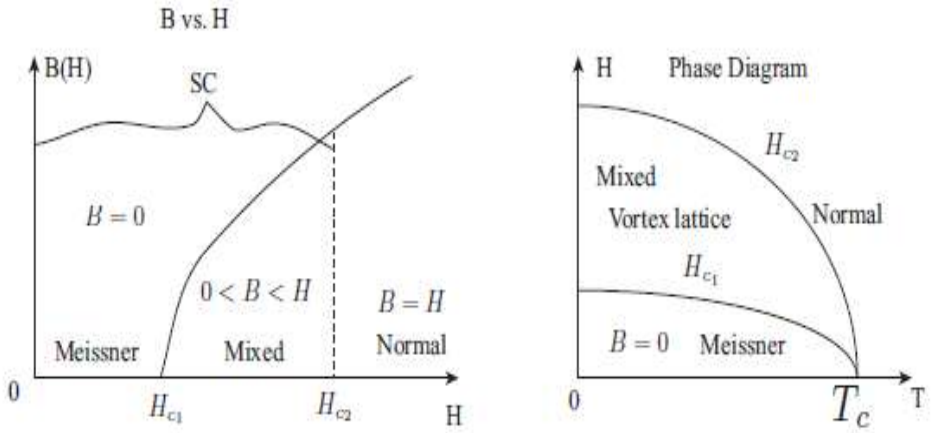
شکل ۴: رابطه B-H و نمودار فاز فوق هادی‌های نوع I (M. Konig, 2007)

۵-۲- فوق هادی‌های نوع دوم

انتقال از حالت SC[۲۶] به حالت عادی برای فوق‌هادی‌های نوع II که دو ساحه مقناطیسی بحرانی را نشان می‌دهند، متفاوت است. اولین ساحه بحرانی کمتر زمانی اتفاق می‌افتد که گرداب‌های فلکس مقناطیسی به ماده نفوذ می‌کنند، اما ماده در خارج از این گرداب‌های

[26]Superconductor

میکروسکوپی فوق‌هادی باقی می‌ماند. وقتی کثافت گرداب بیش‌ازحد بزرگ می‌شود، کل ماده غیر فوق‌هادی می‌شود. این مربوط به دومین ساحه بحرانی بالاتر است. ساحه مقناطیسی خالص داخل و گراف از نیز در شکل ۵ نشان داده‌شده است.



شکل ۵: رابطه B-H و نمودار فاز فوق هادی‌های نوع II. (Belzig, 1999) .

برای این نوع فوق‌هادی، ساحه مقناطیسی خالصی که به درون مواد نفوذ می‌کند، به دلیل مکانیسم هیگز به گردابِ تبدیل می‌شود. در حالت مخلوط، هر گردابی دارای فلکس است.

$$\phi_0 = \frac{hc}{2e} = 2 \times 10^{-7}\ Gaus \times cm^2$$

فلکس کل $n\phi_0$ است.

۶- کاربرد فوق هادی‌ها

فوق هادی‌ها درجه حرارت پایین امروزه همچنان در برخی وسایل طبی بکار می‌روند، به‌هرحال باوجود معرفی فوق هادی‌ها درجه حرارت بالا ورود آن‌ها به بازارهای جهانی نیازمند گذشت زمان می‌باشند. علت در تولید آن بوده دشوار ضمن حفظ کیفیت بالا نهفته است. اگرچه در حال حاضر، بازار فوق هادی‌های درجه حرارت بالا رونق کمی دارد، گمان می‌رود که در خلال سال‌های آینده کاربرد آن‌ها فراگیر و پررونق شود (راشید, ۲۰۱۹).

با پیشرفت‌های ایجادشده درزمینه‌ی فوق‌هادی‌ها کاربرد آن‌ها رو به گسترش است. در سیستم حمل‌ونقل علاوه بر سیستم‌های پیشروندِ برقی، یک نمونه تجاری از به‌کارگیری فوق‌هادی‌ها در تکنالوژی مگلو[۲۷] بود که در دهه ۱۹۹۰ م، در جاپان تحقق یافت. در کنار بهبود تکنالوژی فوق-هادی‌ها، ملاحظات سیاسی و محیطی زیستی نیز به پیشرفت آن‌ها کمک کرده است. کشف متحول کننده فوق‌هادی‌های درجه حرارت بالا در سال ۱۹۸۶ م، منجر به تحول و تولید نوع جدیدی از کابل‌ها در سیستم‌های قدرت شد در ایالات‌متحده، اروپا و چاپان رقابت سختی برای تولید کابل‌های فوق‌هادی در سال‌های اخیر به وجود آمده است. قابلیت هدایت جریان بر در کابل‌های HTS بیشتر از هادی‌های المونیمی و مسی متداول هست. در صورت استفاده از سیم-های فوق هادی به‌جای سیم‌های مسی در ماشین‌های برقی و ترانسفورماتورها امکان کاهش تلفات، حجم، وزن آن‌ها وجود داشته و با افزایش مؤثریت، صرفه‌جویی قابل‌توجهی در انرژی برقی صورت می‌گیرد.

۷- نتیجه‌گیری

تاکنون خصوصیت‌های مفید زیادی در ارتباط با به‌کارگیری فوق‌هادی‌ها در موتورهای برقی گزارش‌شده است. ازآنجاکه در فاز فوق‌هادی‌ها مقاومت برقی در مقابل جریان مستقیم از خود نشان نمی‌دهند ضمن کاهش تلفات مسی موتور باعث افزایش مؤثریت می‌شوند. فوق‌هادی‌ها محدودیت‌های نامطلوبی نیز دارند ازجمله محدودیت‌های فرکانسی فوق‌هادی‌های فعلی که مانع از استفاده اجرایی از فوق‌هادی‌ها در کاربردهای جریان متناوب شده است چراکه فوق‌هادی‌های امروزی در مقابل عبور جریان متناوب مقاومت صفر از خود نشان نمی‌دهند. بلکه در شرایط فعلی عملی‌ترین کاربرد فوق‌هادی در کاربردهای جریان مستقیم می‌باشد، همچنان به نتیجه باید رسید مواد که خاصیت فرومقناطیسی دارند خاصیت فوق هادی از خود نشان نمی‌دهند.

[27] MAGLEV

منابع

پور, ح. ش. (۱۳۹۱). فوق هادییی و آخرین دست آوردها. ایران: مقاله ششمین کنفرانس ملی پیشرفت های فوق هادییی و مغناطیس (۱۰).

راشید, م. (۲۰۱۹). *کتاب درسی فوق هادییی*. Just.edu.bt/t/rashid.

قرانی, ش. ر. (۱۳۸۹). اثر دمای کلوخه¬سازی بر روی خواص فوق هادییی MgB_2 آلاینده به مالیک اسید. کنفرانسی فیزیک ایران ایران: فردوسی مشهد. (ص. ۳).

قربانی, ش. ر. (۱۳۹۰). *مقدمه ای بر مبانی ابررسانایی*. ایران: حکیم سبزواری.

کاشانی, م. (۱۳۹۱). طراحی یک موتر سنکرون چند فاز با سیم¬پیچ میدان فوق هادییی دامای بالا، ایران (ص.۳).

میرزایی, س. ا. (۱۳۹۸). ساخت و کاربردهای زیستی آشکارساز های پیشرفته فوق هادی در محدوده مادون قرمز و تراهرتز، مقاله ششمین کنفرانس ملی پیشرفت¬های فوق هادییی و مغناطیس, (ص. ۲).

M. V .(۲۰۰۹) .*Type 1. 5 Superconductors* .Physical Review Letters.

A., W. M .(۲۰۲۱) .*Solid State Physics; Structure and Properties of Materials* ۳ .ed ،. Narosa.

Belzig, W. (1999). Quasiclassical Green's function approach to mesoscopic superconductivity. *Superlattices and Microstructures* , 11.

Dobrin, I. (2010). The Development of a small power, High temperature superconductor (HTS) Synchronous motor. *Annals of the Univercity of Crovatia, Electrical Engineering series*, 66.

E., C. J .(۲۰۱۱) .*Type-1. 5 superconductivity in multiband systems* .Effects of interband couplings: Physical Review.

Gieras, F. (2008). Advancements in electric machines. *Springer, Dordrecht–Boston–London*, 33.

Hott, R., Kleiner, R., & Wolf, T. (2004). Superconductive material, a topical overview. *Springer, Verlag, Berlin*, 4.

M. Konig, S. W. (2007). X.-L. Qi and S.-C. Zhang. *Science*, 10.

Marsiglio, H. J .(۲۰۱۵) .*Superconducting materials classes: Introduction and overview* .Physica C: Superconductivity and its Applications.

S, S. D .(۲۰۱۴) .*Solid State Physics; From the Material Properties of Solids to Nanotechnologies* .Mercury learning and inforMation.