



دانشگاه کردستان
دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک

عنوان:

مطالعه ی عددی تاثیر شکل جریان ورودی روی میدان های الکترومغناطیسی و توان
تولید شده در فرآیند گرمای القایی

پژوهشگر:

طیبه نادری مستجیر

اساتید راهنما:

دکتر محمد حسین توکلی
دکتر آرش سروری

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش حالت جامد

مهر ماه 1389

کلیه حقوق مادی و معنوی مرتبط بر نتایج مطالعات،

ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع

این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه کردستان است.

*** تعهد نامه ***

اینجانب طیبه نادری مستجیر دانشجوی کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش حالت جامد دانشگاه کردستان، دانشکده علوم پایه گروه فیزیک تعهد می نمایم که محتوای این پایان نامه نتیجه تلاش و تحقیقات خود بوده و از جایی کپی برداری نشده و به پایان رسانیدن آن نتیجه تلاش و مطالعات مستمر اینجانب و راهنمایی و مشاوره اساتید بوده است.

با تقدیم احترام

طیبه نادری مستجیر

1389/7/14



دانشگاه کردستان
دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش حالت جامد

عنوان:

مطالعه ی عددی تاثیر شکل جریان ورودی روی میدان های الکترومغناطیسی و توان تولید شده در فرآیند گرمای القایی

پژوهشگر:

طیبه نادری مستجیر

در تاریخ / / 13 توسط کمیته تخصصی و هیات داوران زیر مورد بررسی قرار گرفت و با نمره و درجه به تصویب رسید.

امضاء	مرتبۀ علمی	نام و نام خانوادگی	هیات داوران
	استادیار	دکتر آرش سروری	1-استاد راهنمای اول
	استادیار	دکتر محمد حسین توکلی	2-استاد راهنمای دوم
	استادیار	دکتر صفدر حبیبی	3-استاد داور خارجی
	استادیار	دکتر شهریار سلیمی	4-استاد داور داخلی

مهر و امضاء معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده

مهر و امضاء گروه

قدردانی

در این جا لازم میدانم از عزیزانی تقدیر کنم.

پدر و مادر و خواهر و برادر موهبتی ارزشمند از طرف پروردگار هستند هیچ چیز هم وزن با محبت های

آنها نیست در این جا فقط میتوانم از آنها تشکر کنم. همسر موهبتی دیگر از پروردگار است لازم میدانم

از محبت های او و خانواده اش نیز تشکر کنم .

و هم چنین از استاد محترم جناب آقای دکتر محمدحسین توکلی که از راهنمایان و صبوری های ایشان

سپاسگزارم که هم اخلاق و هم علم ایشان قابل ستایش و تحسین می باشد.

چکیده

گرمای القایی، فرآیند گرمادهی یک جسم رسانای الکتریکی (معمولا فلز) به واسطه القای الکترومغناطیسی است. در این فرآیند جریان های گردابی در داخل فلز تولید شده و مقاومت الکتریکی منجر به گرمادهی ژول در آن می شود. یک سیستم گرم کننده القایی شامل یک پیچه است که در آن یک جریان الکتریکی متناوب فرکانس بالا جریان می یابد که انتخاب فرکانس بستگی به اندازه جسم، نوع ماده و جفت شدگی بین پیچه و جسم دارد. از گرمادهی القایی در کاربرد های فراوانی از جمله کوره های گرمایی، سخت شدگی سطح، ذوب، پخت، جوش، لحیم کاری و رشد بلور از فاز مذاب استفاده می شود. به منظور بهینه سازی این فرآیند لازم است پارامتر های مختلف موجود در سیستم بررسی شود که یکی از مهمترین این پارامترها چگالی جریان های القایی در پیچه و قطعه کار است. در سیستم های رشد بلور به روش چکرالسکی، گرمای القا شده در بوته فلزی و گرم کننده جانبی فعال توسط پیچه ایجاد می شود. پارامترهای متفاوتی از جمله شکل سطح مقطع حلقه های پیچه، فاصله بین پیچه و بوته و شکل بوته بر روی توزیع میدان های الکترومغناطیسی، مقدار و ساختار گرمای القا شده و گرادیان دما در سیستم های گرمای القایی تاثیر می گذارد. هدف از انجام این تحقیق، بسط یک مدل ریاضی برای سیستم واقعی گرما- القایی رشد چکرالسکی و سیستم های گرمای القایی دیگر و بررسی تغییرات میدان های الکترومغناطیسی و گرمای القایی ایجاد شده در سیستم برای پیچه با شکل سطح مقطع مستطیل برای شکل های مختلف جریان رانشی در پیچه القایی (سینوسی، مربعی، مثلثی و دندان اره ای) می باشد. بدین منظور با استفاده از یک مدل دو بعدی، توزیع میدان های الکترومغناطیسی و توان تولید شده در نواحی مختلف سیستم گرمای القایی محاسبه و تشریح می گردد.

کلید واژه ها: گرمای القایی، جریان های گردابی، مقاومت الکتریکی، بوته

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول (پیشینه و تاریخچه تحقیق گرمای القایی)
1	1-1 مقدمه
4	2-1 تاریخچه
5	3-1 معرفی
8	4-1 کاربردها
14	5-1 عوامل موثر در توزیع میدان الکترومغناطیسی
17	6-1 مزیت ها
18	7-1 پیچہ
	فصل دوم (بررسی شرایط مرزی معادلات ماکسول)
20	1-2 معادلات ماکسول
20	2-2 شباهت معادلات ماکسول با معادلات دیگر
21	3-2 تاریخچه
21	4-2 مقایسه قوانین حرکت نیوتن و قوانین ماکسول
23	5-2 تشریح معادلات ماکسول
26	6-2 انتخاب متغیرها
27	7-2 پتانسیل ها
30	8-2 روش عناصر متناهی
32	9-2 نرم افزار نرم افزار FlexPDE
	فصل سوم (مدل ریاضی و ابزار محاسبات)
34	1-3 مدل ریاضی
36	2-3 آهنگ تولید انرژی
36	3-3 گرما
37	4-3 چگالی جریان القایی
37	5-3 سری فوریه

فصل چهارم (نتایج، محاسبات و بحث)

49	1-4 محاسبه ی نتایج برای پیکربندی نمونه
49	2-4 شرایط محاسبه
51	3-4 روش عددی
52	4-4 نتایج و بحث
67	5-4 نتیجه گیری
69	6-4 رشد بلور از فاز مذاب به روش چکراالسکی
69	7-4 محاسبه ی نتایج برای پیکربندی نمونه
69	8-4 شرایط محاسبه
71	9-4 روش عددی
72	10-4 نتایج و بحث
84	11-4 نتیجه گیری
85	منابع

فهرست جدول ها

صفحه	عنوان
23	1-2 فرم هویساید معادلات ماکسول
51	1-4 مقادیر رسانندگی الکتریکی
51	2-4 پارامترهای مورد استفاده برای محاسبات
68	3-4 اطلاعات مربوط به گرمای ایجاد شده در سیستم فرض شده در موج سینوسی
68	4-4 اطلاعات مربوط به گرمای ایجاد شده در سیستم فرض شده در موج دندان اره ای
68	5-4 اطلاعات مربوط به گرمای ایجاد شده در سیستم فرض شده در موج مربعی
68	6-4 اطلاعات مربوط به گرمای ایجاد شده در سیستم فرض شده در موج مثلثی
70	7-4 مقادیر رسانندگی الکتریکی در رشد بلور
70	8-4 پارامترهای مورد استفاده برای محاسبات
84	9-4 اطلاعات مربوط به گرمای ایجاد شده در سیستم فرض شده در موج سینوسی
84	10-4 اطلاعات مربوط به گرمای ایجاد شده در سیستم فرض شده در موج دندان اره ای
84	11-4 اطلاعات مربوط به گرمای ایجاد شده در سیستم فرض شده در موج مربعی
84	12-4 اطلاعات مربوط به گرمای ایجاد شده در سیستم فرض شده در موج مثلثی

فهرست شکل ها

صفحه

عنوان

1	1-1 تصویر کلی سیستم گرمای القایی
6	2-1 اجزای سیستم گرمای القایی
9	3-1 نمایی از یک کوره القایی
10	4-1 نمایی از سخت سازی القایی
11	5-1 نمایی از لحیم کاری القایی
12	6-1 نمایی از ذوب القایی
12	7-1 نمایی از سیستم پخت القایی
13	8-1 نمایی از سیستم رشد بلور
13	9-1 نمایی از سیستم اجاق القایی
19	10-1 نمایی از اشکال متفاوت پیچه با سطح مقطع های متفاوت
50	1-4 نمایی از سیستم گرمای القایی فرض شده
52	2-4 شبکه بکار رفته در روش عناصر متناهی در فضایی که محاسبات انجام شده است
53	3-4 نمایش دهنده توزیع C و S در موج سینوسی
54	4-4 نمایش دهنده توزیع C و S در موج دندان اره ای
55	5-4 نمایش دهنده توزیع C و S در موج مربعی
56	6-4 نمایش دهنده توزیع C و S در موج مثلثی
58	7-4 نمایش دهنده توزیع jce
59	8-4 نمایش دهنده توزیع jse
60	9-4 نمایش دهنده توزیع q در قطعه کار
61	10-4 نمایش دهنده توزیع q در پیچه
71	11-4 نمایی کلی از سیستم رشد بلور
72	12-4 نمایی کلی از شبکه بندی سیستم رشد بلور
73	13-4 نمایش دهنده توزیع C, S در موج سینوسی در رشد بلور

- 74 14-4 نمایش دهنده توزیع C, S در موج دندان اره ای در رشد بلور
- 75 15-4 نمایش دهنده توزیع C, S در موج مربعی در رشد بلور
- 76 16-4 نمایش دهنده توزیع C, S در موج مثلثی در رشد بلور
- 78 17-4 نمایش دهنده توزیع C, S در موج مثلثی در رشد بلور
- 79 18-4 نمایش دهنده توزیع q در قطعه کار و گرم کننده ی جانبی در رشد بلور

فهرست نمودارها

صفحه	عنوان
62	1-4 نمایش دهنده توزیع q بر حسب Γ در سطح خارجی قطعه کار
63	2-4 نمایش دهنده توزیع q بر حسب Γ در وسط قطعه کار
64	3-4 نمایش دهنده توزیع C بر حسب Γ در وسط قطعه کار
65	4-4 نمایش دهنده توزیع S بر حسب Γ در وسط قطعه کار
66	5-4 نمایش دهنده توزیع jse بر حسب Γ در وسط قطعه کار
67	6-4 نمایش دهنده توزیع q بر حسب Γ در وسط قطعه کار
80	7-4 نمایش دهنده توزیع q بر حسب Γ در سطح خارجی قطعه کار و گرم کننده ی جانبی در رشد بلور
81	8-4 نمایش دهنده توزیع q بر حسب Γ در قسمت پایینی قطعه کار در رشد بلور
82	9-4 نمایش دهنده توزیع C بر حسب Γ در قسمت پایینی قطعه کار در رشد بلور
83	10-4 نمایش دهنده توزیع S بر حسب Γ در قسمت پایینی قطعه کار در رشد بلور

فصل اول:

گرمای القایی

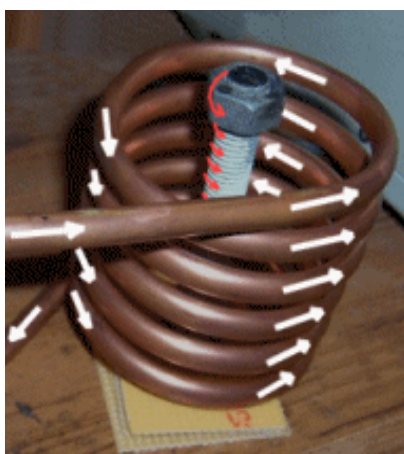
1-1 مقدمه

قطعات فلزی را می توان با روش های متفاوتی گرم کرد که عبارتند از:

- 1- گرم کننده های القایی
- 2- کوره های سوخت گازی
- 3- کوره های بستر مایع
- 4- حمام های نمکی
- 5- گرم کننده های مادون قرمز
- 6- کوره های الکتریکی و سوختی

این بخش مقدمه ای را مبنی بر پاسخگویی کلی به سوالات در مورد گرمای القایی فراهم می کند. [1]

شکل 1-1



شکل 1-1: تصویر کلی سیستم گرمای القایی

در سه دهه اخیر، گرمادهی به وسیله القای میدان الکترومغناطیسی بسیار پرکاربرد شده است. یک دلیل مهم، توانایی ایجاد شدت گرمای بالا در زمان کوتاه و مکان مورد نظر از قطعه کار در این روش است که منجر به زمان گرمادهی کوتاه (قابلیت تولید بالا) و کیفیتی قابل تکرار می شود. به علاوه، این روش دارای بازده انرژی بالایی بوده و برخلاف دیگر روشها که دارای انواع آلودگی های محیطی (مثلاً دود ناشی از سوخت یا آلودگی های سطحی تابشی) هستند، نمی باشد. نخستین کوره القایی که مورد بهره برداری قرار گرفت از شبکه اصلی قدرت تغذیه می شد و هیچ گونه تبدیل فرکانسی صورت نمی گرفت. با توجه به این که افزایش فرکانس تغذیه کوره موجب کاهش ابعاد آن و بالا رفتن توان (تلفات) می شود، برای رسیدن به این هدف، در ابتدا منابع تغذیه موتور ژنراتوری مورد استفاده واقع گردید. هر چند با این منابع می توان فرکانس را تا حدودی بالا برد، ولی محدودیت فرکانس و عدم قابلیت تغییر آن و در نهایت عدم تطبیق سیستم تغذیه با کوره، دو عیب اساسی این سیستم ها به شمار می رفت. با توجه به این معایب، ورود عناصر نیمه هادی به حیطه صنعت، موجب گردید منابع تغذیه استاتیک جایگزین منابع قبلی شوند. در سال 1831 میلادی مایکل فارادی¹ با ارائه این مطلب که اگر از سیم پیچ اولیه ای جریان متغیری عبور کند، در سیم پیچ ثانویه ی مجاورش نیز، جریان القا می شود، تئوری گرمایش القایی را بنا نهاد. علت اصلی این پدیده ی القا، تغییرات شار در مدار بسته ی ثانویه است که از جریان متناوب اولیه ناشی می شود. نزدیک به یکصد سال این اصل در موتورها، ژنراتورها، ترانسفورماتورها، وسایل ارتباط رادیویی و ... بکار گرفته می شد و هر اثر گرمایی در مدارهای مغناطیسی به عنوان یک عنصر نامطلوب شناخته می شد. در راستای مقابله با اثرات حرارتی در مدارهای مغناطیسی و الکتریکی از سوی مهندسين گام های موثری برداشته شد. آنها توانستند با موق نمودن هسته مغناطیسی موتورها و ترانسفورماتورها، جریان فوکو را که عامل تلفات حرارتی بود کمینه نمایند. [2]

¹ Faraday

به دنبال آزمایشات فارادی، قوانین متعددی پیشنهاد شد. قوانین لنز و نیومن² نشان دادند که جریان القا شده با شار القایی مخالفت کرده و به طور مستقیم با فرکانس متناسب می باشد. فوکو³ در سال 1863 در مقاله ای تحت عنوان "القایی جریان در هسته"⁴ که توسط هویساید⁵ منتشر گردید نظریه ای راجع به جریان فوکو ارائه داد و در رابطه با انتقال انرژی از یک پیچه به یک هسته توپیر بحث نمود. علاوه بر افراد فوق، تامسون⁶ نیز در ارائه نظریه گرمایش از طریق القا سهم بسزایی داشت. در اواخر قرن نوزدهم استفاده از تلفات فوکو و هیستریزیس به عنوان منبع گرمایش القایی از طرف مهندسين مطرح شد. هم چنین در اوایل قرن اخیر در کشورهای فرانسه، سوئد و ایتالیا بر اساس استفاده از خازن های جبران کننده ی توان راکتیو، پیشنهاداتی برای کوره های القایی بدون هسته ارائه شد. در این پیشنهادات بیشتر ذوب فلزات در فرکانس های میانی مورد نظر بود. دکتر نورث روپ⁷ ایده کوره با فرکانس میانی را برای موارد صنعتی گسترش داد. در روزهای نخستین، بر اثر نبود امکانات از جمله خازن های با ظرفیت کافی و قابل اطمینان، توسعه و پیشرفت متوقف شد. بعدها در سال 1927 کمپانی کوره های الکتریکی⁸ نخستین کوره ی الکتریکی با فرکانس میانی را در شفیلد انگلستان و به منظور آهنگری و گرمادهی موضعی فلزات جهت اتصال به یکدیگر، نصب کرد. بعد از این، تعداد و اندازه ی این کوره ها رو به افزایش گذاشته است. لازم به ذکر است که مزیت های دیگر کوره های القایی همچون دقت زیاد برای گرم کردن تا عمق مورد نظر و حرارت دادن نواحی سطحی در طی پیشرفت های بعدی (در سال های جنگ جهانی دوم) بیشتر آشکار شد. در گرمایش القایی به دلیل عدم نیاز به منبع خارجی گرم کننده، تلفات گرمایی کمتر شده و تمیزی شرایط کار تامین می گردد. در این روش هم چنین نیازی به تماس فیزیکی قطعه کار و پیچه نبوده و علاوه بر این چگالی توان بالا در مدت زمان گرمایش کم به آسانی قابل دسترس می باشد. [3]

² Neumann

³ Foucault

⁴ The induction of current in cores

⁵ Heaviside

⁶ Thomson

⁷ Northrup

⁸ Electrical furnace

در ابتدا کوره های القایی مستقیماً از شبکه قدرت تغذیه می شدند که به نوبه خود گام موفق‌تری در استفاده از توان الکتریکی جهت عملیات حرارتی بحساب می آمد. از آنجائی که تلفات فوکو و هیستریزیس با فرکانس نسبت مستقیم دارند و این که ابعاد پیچه کوره با بالا رفتن فرکانس کاهش می یابد، مهندسين به فکر تغذیه کوره در فرکانس های بالاتر از فرکانس شبکه قدرت افتادند. اولین قدم در این راه استفاده از فرکانس های دو برابر و سه برابر که از هماهنگ های دوم و سوم بدست می آمدند، بود. این هماهنگ ها بر خلاف طبیعت مخرب خود در این نوع کاربرد، سودمند تشخیص داده شدند. پائین بودن راندمان در استفاده از هماهنگ های فوق موجب گردید طراحان روش دیگری را مورد استفاده قرار دهند. در این مرحله سیستم موتور- ژنراتور توسعه یافت که با استفاده از این سیستم توانستند فرکانس تغذیه را افزایش دهند. در کوره های القایی افزایش فرکانس باعث کاهش عمق نفوذ جریان القایی می گردد، لذا در عملیات حرارتی سطحی که سختکاری سطح فلز، مورد نظر می باشد از کوره های القایی با فرکانس بالا استفاده می شود. با ورود عناصر نیمه هادی مانند ترانزیستورها و موسفت ها به حیطة صنعت محدودیت فرکانس و عدم تغییر آن، در تغذیه کوره ها مرتفع شد .

1-2 تاریخچه

همان طوری که در بخش بالا ذکر شد، به طور کامل تر پایه گرم کردن فلزات به وسیله القا در سال 1831 توسط مایکل فارادی فیزیکدان انگلیسی ابداع شد که در آزمایشگاه خود با دو پیچه که تشکیل شده است از سیم پیچیده شده به دور هسته آهنی، متوجه شد که اگر کلیدی که باتری را به اولین پیچه متصل کند بسته شود یک جریان لحظه ای در گالوانومتر که به صورت سری با پیچه دوم قرار دارد، ایجاد می شود. اگر کلید باز باشد هیچ جریانی در پیچه دوم دیده نمی شود ولی در غیر این صورت جریانی در خلاف جهت جریان اول در پیچه دوم به وجود می آید. فارادی از این موضوع نتیجه گرفت که یک جریان می تواند با تغییر میدان مغناطیسی در پیچه ی دوم القا شود. هنگامی که هیچ

تماس فیزیکی بین دو پیچه وجود ندارد جریان به وجود آمده، از ولتاژ القا شده در پیچه دوم می باشد. قانون القای فارادی بیان می کند که نیروی الکتروموتیو القایی در مدار مستقیماً متناسب با نرخ تغییرات زمانی شار مغناطیسی در حلقه می باشد. [4]

گرمادهی القایی خصوصیات مهمی دارد که آن را در مقایسه با روش های دیگر یکتا می سازد که

عبارتند از:

1. طرح پیچه

2. روش های محاسباتی

3. مراحل مورد نیاز در زمان گرمادهی

گرمادهی القایی مجموعه ی پیچیده ای از امواج الکترومغناطیسی و انتقال دما و پدیده های

مربوط به فلزات می باشد.

متالورژی به عنوان یک هنر از ابتدای موجودیت بشر وجود داشته است ولی به عنوان یک علم تقریباً

جدید می باشد و شروع این علم در سال 1860 از زمانی که تلسکوپ برای مشاهده ی ساختار فلزات

مورد استفاده قرار گرفت، می باشد.

علم متالورژی به دو دسته تقسیم می شود:

1. استخراج فلزات از منابع آنها

2. متالورژی⁹ فیزیکی

سه متغیر مهم در متالورژی فلزی عبارتند از:

1. ترکیب شیمیایی فلز

2. هر رفتار مهم فیزیکی

3. رفتار مهم گرمایی [5]

⁹ metallur

3-1 معرفی

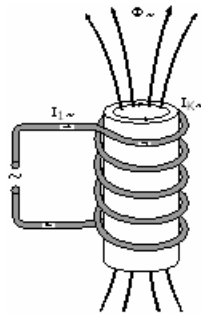
سیستم گرمای القایی دارای سه قسمت مهم است.

1. منبع جریان متناوب

2. پیچه القایی¹⁰

3. قطعه کار¹¹

در اشکال 1-2 این اجزا را می بینیم.



شکل 1-2: اجزای سیستم گرمای القایی

البته متناسب با کاربرد گرمادهی القایی یک سیستم خنک کننده نیز وجود دارد که در صورت داغ شدن پیچه آن را خنک می کند و برای این منظور سیم تو خالی برای پیچه مورد استفاده قرار می گیرد و جریان آب داخل سیم پیچه را خنک می نماید. [6]

سیستم گرمادهی القایی تشکیل شده است از یک قطعه کار که توسط پیچه احاطه شده و یک جریان متناوب که در پیچه وجود دارد. در اثر وجود این جریان و بر طبق قانون آمپر این جریان یک میدان الکترومغناطیسی متناوب با فرکانس مشابه با جریان اولیه در اطراف پیچه ایجاد می کند. قانون آمپر:

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (1-1)$$

نرخ تغییر زمانی میدان مغناطیسی، بنابر قانون فارادی، باعث تولید یک میدان الکتریکی متغیر با فرکانس جریان متناوب اولیه می شود.

¹⁰ Induction coil

¹¹ Work piece

قانون فارادی:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2-1)$$

در اثر تغییرات میدان الکتریکی و به طبیعت از آن میدان مغناطیسی (تغییر شار مغناطیسی) یک جریان در قطعه کار القا می شود که برابر است با:

$$J = S E \quad (3-1)$$

که در آن S رسانندگی الکتریکی آن محیط با واحد $(\Omega.m)^{-1}$ است. به دلیل شکل پیچیده ی توزیع میدان های مغناطیسی و الکتریکی، چگالی جریان القایی هم شکل پیچیده ای را پیدا می کند. پس به این جریان ها، جریان های گردابی¹² هم گفته می شود. به دلیل وجود اثر خود القایی در پیچه، این جریان ها در پیچه هم القا خواهند شد.

میزان نفوذ میدان الکتریکی در قسمت های مختلف بوته وابسته به عوامل زیر است:

1. رسانندگی الکتریکی آن قسمت

2. فرکانس میدان الکتریکی

3. تراوایی نسبی مغناطیسی محیط

4. شکل سیستم که باعث تغییر توزیع چگالی جریان و توزیع میدان ها می شود.

از لحاظ سیستم قدرت می توان سیستم های القایی را به چهار دسته اساسی تقسیم نمود:

1. سیستم های منبع تغذیه¹³

در این سیستم ها که فرکانس کار آنها بین 50 تا 60 هرتز و 150 تا 540 هرتز می باشد، احتیاجی به تبدیل فرکانس نیست و با توجه به فرکانس کار، عمق نفوذ جریان زیاد بوده و حدود 10 تا 100 میلیمتر می باشد. هم چنین مقدار توان لازم تا حدود چندین صد مگاوات نیز می رسد. [7]

¹² Eddy currents

¹³ Supply Systems