الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي

كلية العلوم الدقيقة

قسم: الفيزياء

مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

تخصص: فيزياء إشعاع

من إعداد: بلقاسمي هنية - قطرون إسراء

الموضوع

تصنيع مخبري لجهاز التسخين بالحث الكهرومغناطيسي ودراسة بعض خصائصه

نوقشت يوم 2026/06/07

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة:

ميموني مراد	أستاذ محاضر. أ	رئيسا
عبد القادر اللبي	أستاذ محاضر. أ	مناقشا
غوقالي مبروك	أستاذ محاضر. أ	مؤطرا

الموسم الجامعي: 2026/2025

أنجز هذا العمل بمخبر استغلال وتثمين المصادر الطاقوية الصحراوية

"يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ" (المجادلة: 11).

إهـداء

قال تعالى " وأن ليس للإنسان إلا ما سعى "

إلى الله أولا وآخرا

إلى من مرت على حافة اليأس ولم تسقط، إلى التي رأت في النجاح مسؤولية لا متعة فقط، إلى التي وقفت شامخة رغم قساوة الظروف .... إلى نفسي.

اليوم لا أقف هنا كخريجة فقط، بل كإنسانة أثبتت لنفسها أن الإرادة تستطيع أن تتحدى الظروف.

إلى من كان لي الداعم في كل خطوة، إلى سندي الذي لم يخذلني يوما، إلى ملاذي الآمن وكهفي الحصين، من بوجوده استقام دربي.....

إلى والدي العزيز.

إلى التي لولاها لما أكملت الطريق، إلى التي كانت لي النور في عتمة أيامي، وملجئي حين أثقلتني المتاعب، إلى من كان دعاءها سر نجاحي، وحنانها بلسم جراحي....

إلى أمي الحبيبة.

إلى من كانوا لي الحضن الدافىء في لحظات الضعف، والسند الحقيقي في أوقات الشدة، إلى من شاركوني تفاصيل الرحلة وكانوا جزءا من كل لحظة تعب وفرح، إلى من كان وجودهم في حياتي قوة خفية تدفعني للاستمرار، إلى زينة حياتي.....

إخوتي وأخواتي.

إلى من كان وجودهم في حياتي أجمل صدفة، إلى من زرعن في قلبي أملا..... إلى

صديقاتي الغاليات.

شكرا لأنكم كنتم دائما بجانبي، تدعموني بصمت، وتمنحوني الأمل حين يكاد يتلاشى.... بكل حب أهديكم هذا الجهد المتواضع.

إسراء

إهـداء

بعد مسيرة أكاديمية حافلة بالتعب والجهد، ها أنا ذا، أكمل مذكرتي النهائية بكل ما أوتيت من قوة وطاقة.

أهدي هذا النجاح لروح **والدي العزيز** كم تمنيت أن تكون حاضرا لترى هذه اللحظة، **رحمك الله**، راجية أن يكون هذا الإنجاز فخرا لك في عليائك.

ولأمي الغالية، التي لولا صلواتها وصبرها ما بلغت هذه المحطة.

إلى اخوتي، عكازي الذي لا يميل. إلى تلك النسخة مني، التي أخفت حزنها جيدا حتى ظن الجميع أنها بخير، إلى كل من ينتظر لي نجاحا... هذا الحلم لكم.

إلى رفيقة الدرب، التي شاركتني عناء الطريق وفرحة الوصول، فكان هذا الإنجاز ثمرة جهد جمعنا.

هنية

شكر وتقدير

قال رسول الله عليه أفضل الصلاة والتسليم:

"من لم يشكر الناس لم يشكر الله ومن أسدى إليكم معروفا فكافئوه فإن لم تستطيعوا فادعوا له"

عاملين بهذا الحديث واعترافا بالجميل نحمد الله عزّ وجل على أن وفقنا لإتمام هذا العمل

والشكر موصول إلى كل معلم أفادنا بعلمه من أول مراحل الدراسة حتى هذه اللحظة

كما نتقدم بخالص الشكر والامتنان والتقدير إلى الأستاذ **ميموني مراد** على تفضله برئاسة لجنة المناقشة وللأستاذ المشرف **غوقالي مبروك** حفظه الله ورعاه على دعمه وتوجيهاته القيمة ومرافقته لنا طوال إنجاز هذه المذكرة جزاه الله خير الجزاء ووفقه في مسيرته العلمية وأيضا إلى الأستاذ **اللبي عبد القادر** على قبوله مناقشة هذا العمل.

فهرس المحتويات

إهـداء ..... **I**
إهـداء ..... **II**
شكر وتقدير ..... **III**
فهرس المحتويات ..... **IV**
فهرس الأشكال: ..... **IX**
فهرس الجداول: ..... **XI**
قائمة الرموز ..... **XII**
قائمة الاختصارات ..... **XIV**
مقدمة عامة **1**

الفصل الأول: الأسس النظرية للتسخين بالحث الكهرومغناطيسي

1-1 مقدمة: 4
2-1 تاريخ التسخين بالحث 4
1-3 مبادئ الكهرومغناطيسية 4
1-3-1 قانون فاراداي _ لينز 4
1-3-2 التيارات الدوامية وتوليد الحرارة 6
1-4 المواد المغناطيسية وسلوكها 7
1-4-1 أنواع المواد المغناطيسية 7
1-4-1-1 المواد الديامغناطيسية 8
1-4-1-2 المواد البارامغناطيسية 8
1-4-1-3 المواد الفيرومغناطيسية 9
1-4-1-4 المواد الفيريمغناطيسية 9
1-4-1-5 المواد الضد للفيرومغناطيسية 9
1-4-2 حلقة الهستريزيس 10
1-4-2-1 الخسائر الناتجة عن التيارات الدوامية 11
1-4-2-2 الخسائر الناتجة عن حلقة الهستريزيس 12
1-4-3 درجة كوري وتأثيرها على التسخين 13
1-5 مبدأ التسخين بالحث المغناطيسي 13
1-5-1 كيفية تحويل المجال المغناطيسي المتغير إلى حرارة داخل موصل 13
1-5-2 العوامل المؤثرة في فعالية التسخين 14

6-1 الخاتمة..... 16

الفصل الثاني: تصميم الدارة الكهربائية للسخان.

2-1 مقدمة..... 18
2-2 مكونات نظام التسخين بالحث..... 18
2-2-1 مصدر القدرة (High Frequency Generator)..... 18
2-2-2 الوشيعة (Induction Coil) أنواعها وأشكالها..... 18
2-2-2-1 وشيعة حلزونية متعددة اللفات (Multi-turn Helical Coil)..... 19
2-2-2-2 وشيعة ذات لفة واحدة (Single-Trun Coil)..... 19
2-2-2-3 وشيعة حلزونية متعددة المواضع (Multi-position helical inductor) 19
2-2-2-4 وشيعة مسطحة (Pancake Coil)..... 20
2-2-2-5 وشيعة القناة (Channel Coil)..... 20
2-2-2-6 وشيعة قناة منحني (Curved channel inductor)..... 20
2-2-2-7 وشيعة حلزونية مقسمة (Split Helical Coil)..... 21
2-2-2-8 وشيعة الحلقية (Inductor)..... 21
2-2-3 الدارة الرنانة (lc resonant cireuit)..... 22
2-2-3-1 مكونات الدارة الرنانة ومبدأ عملها 22
2-2-3-2 دور الدارة الرنانة في تحسين كفاءة الفرن..... 23
2-2-3-3 تأثير الحمل المعدني على الدارة الرنانة 23
2-2-3-4 آلية توليد الحرارة..... 23
2-2-3-5 الممانعة الكلية للدارة الرنانة..... 24
2-2-3-6 التيار في الدارة الرنانة..... 24
2-2-3-7 معامل الجودة (Quality Factor)..... 25
2-2-3-8 القدرة المنقولة إلى المادة المراد تسخينها..... 25
2-2-3-9 الطاقة المخزنة في عناصر الدارة 26
2-2-3-10 عمق الاختراق وتأثير التردد والمادة..... 26
2-2-4 المبرد ووحدة التحكم الحراري..... 27
2-2-5 المقاومات..... 28
2-2-6 الثنائيات..... 28
2-2-7 المكثفات 28
2-2-8 ترانزستور MOSFET..... 29

2-3 النموذج الحراري..... 30
2-3-1 أنماط انتقال الحرارة..... 30
2-3-1-1 التوصيل الحراري..... 30
2-3-1-2 الحمل الحراري..... 30
2-3-1-3 الإشعاع..... 31
2-3-2 معادلة الحرارة..... 31
2-3-2-1 قانون فوريه 31
2-4 تصميم السخان 31
2-4-1 اختيار تردد العمل..... 31
2-4-2 تحديد قطر الوشيعة وعدد لفاتها 32
2-4-2-1 تحديد قطر الوشيعة..... 32
2-4-2-2 تحديد عدد اللفات..... 32
2-4-3 حساب معامل الحث (Inductance) 33
2-4-4 اختيار مكثفات للحصول على الرنين (Resonance)..... 33
2-4-4-1 تحديد التردد المطلوب 34
2-4-4-2 حساب محاثة الوشيعة..... 34
2-4-4-3 حساب السعة المناسبة..... 34
2-4-4-4 اختيار مكثفات تتحمل الجهد والتيار..... 34
2-4-4-5 الربط التسلسلي أو التفرعي للمكثفات..... 34
2-4-5 مخطط الدارة الكهربائية العملية للسخان 34
2-5 تطبيقات التسخين بالحث الكهرومغناطيسي..... 35
2-5-1 صهر المعادن..... 35
2-5-2 تلحيم الأجزاء المعدنية..... 35
2-5-3 التركيب بالتقلص الحراري..... 36
2-5-4 التسخين قبل التشكيل والطرق..... 36
2-5-5 الصناعة الكيميائية 37
2-5-6 بلازما الحث..... 37
2-5-7 المعالجة الحرارية السطحية..... 37
2-5-8 الطهي بالحث (موقد الطهي)..... 38
2-6 مزايا وعيوب التسخين بالحث الكهرومغناطيسي..... 39

2-6-1 مزايا التسخين بالحث 39
2-6-2 عيوب التسخين بالحث 39
2-7 الخاتمة 41

الفصل الثالث: تصنيع الجهاز ودراسة خصائصه

3-1 مقدمة 43
3-2 بنية النظام 43
3-3 مراحل تصنيع الجهاز 43
3-3-1 المرحلة الأولى: تحضير عناصر الدارة 43
3-3-1-1 وصف مصدر القدرة المستخدم 43
3-3-1-2 الترانزستور MOSFT 44
3-3-1-3 دارة العاكس 45
3-3-1-4 المقاومات 45
3-3-1-5 صمام الثنائي (Diodes) 46
3-3-1-6 المكثفات 46
3-3-1-7 وشيعة العمل 46
3-3-1-8 الدارة الرنانة 47
3-3-1-9 وشيعة الحلقية 47
3-3-1-10 نظام التبريد 49
3-3-2 المرحلة الثانية: تصميم الدارة 49
3-3-3 المرحلة الثالثة: تركيب الدارة 49
3-4 أدوات القياس 51
3-4-1 جهاز متعدد القياسات 51
3-4-2 عداد زمني 52
3-5 التحليل والمناقشة 52
3-5-1 عرض النتائج 52
3-5-2 دراسة خصائص السخان 53
3-5-2-1 التجربة الأولى 53
3-5-2-2 التجربة الثانية 55
3-5-2-3 التجربة الثالثة 57
3-6 الخاتمة 61

خاتمة عامة..... 63
قائمة المراجع 65
ملخص:..... 69

فهرس الأشكال:

الفصل الأول: الأسس النظرية للتسخين بالحث الكهرومغناطيسي

الشكل (1.1): قانون فاراداي. 5

الشكل(2.1): التيارات الدوامية..... 6

الشكل (3.1): التيارات الدوامية..... 7

الشكل (4.1):الديامغناطيسية..... 7

الشكل(5.1): البارامغناطيسية. 8

الشكل(6.1): الفيرومغناطيسية. 9

الشكل(7.1): الفيريمغناطيسية. 9

الشكل(8.1): الضد للفيرومغناطيسية..... 10

الشكل (9.1): منحنى الHysteresis الممثل لتغير الحث المغناطيسيB بدلالة المجال المغناطيسيH المطبق. 11

الشكل (10.1): منحنى ال Hysteresis 13

الفصل الثاني: تصميم الدارة الكهربائية للسخان.

الشكل (1.2): وشيعة حلزونية متعددة اللفات. 19

الشكل (2.2): وشيعة ذات لفة واحدة. 19

الشكل (3.2): وشيعة حلزونية متعددة المواضع..... 20

الشكل (4.2): وشيعة مسطحة. 20

الشكل (5.2): وشيعة القناة. 20

الشكل (6.2): وشيعة قناة منحني..... 21

الشكل (7.2): وشيعة حلزونية مقسمة..... 21

الشكل (8.2): وشيعة الحلقية..... 22

الشكل (9.2): الثنائيات..... 28

الشكل (10.2): المكثفات. 29

الشكل (11.2): ترانستور. 29

الشكل (12.2): مخطط الدارة الكهربائية للسخان. 35

الشكل (13.2): تلحيم الأجزاء المعدنية. 36

الشكل (14.2): وصلة التقلص الحراري. 36

الشكل (15.2): بلازما الحث. 37

الشكل (16.2): المعالجة الحرارية السطحية..... 38
الشكل (17.2): المعالجة الحرارية السطحية..... 38
الشكل (18.2): الطهي بالحث..... 39

الفصل الثالث: تصنيع الجهاز ودراسة خصائصه

الشكل (1.3): مصدر القدرة..... 44
الشكل (2.3): الترانزستور..... 44
الشكل (3.3): المبدد الحراري a والرقاقات العازلة b..... 45
الشكل (4.3): المقاومات..... 46
الشكل (5.3): الصمام الثنائي..... 46
الشكل (6.3): المكثفات..... 46
الشكل (7.3): الوشيعة العمل..... 47
الشكل (8.3): الوشيعة الحلقية..... 48
الشكل (9.3): المروحة العلوية والمروحة الجانبية..... 49
الشكل (10.3): جهاز التسخين من الداخل..... 50
الشكل (11.3): جهاز التسخين بالحث الكهرومغناطيسي..... 51
الشكل (12.3): جهاز متعدد القياس..... 52
الشكل (13.3): صورة من فيديو التجربة تبيّن كيفية تتبع القياسات مع الزمن..... 53
الشكل (14.3): منحنى تغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن لسلك حديدي بقطر 4.1mm..... 54
الشكل (15.3): منحنى تغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن لثلاث أقطار مختلفة..... 55
الشكل (16.3): منحنى تغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن لثلاث معادن مختلفة..... 57

فهرس الجداول:

الجدول (1.1): يوضح تصنيف المواد المغناطيسية مع أمثلة وصيغها الكيميائية. 10
الجدول (2.1): درجات حرارة كوري لبعض المواد المغناطيسية 13
الجدول (1.2): بعض قيم عمق الاختراق معبّر عنها بالـ mm 27

قائمة الرموز

الرمز	المعنى الفيزيائي
E	القوة الدافعة الكهربائية المستحثة [V]
ϕ	التدفق المغناطيسي [Wb]
A	مساحة السطح الذي يمر عبره المجال المغناطيسي[m^2]
θ	الزاوية بين اتجاه المجال والمتجه العمودي على السطح
P	القدرة الحرارية[W]
R	المقاومة الكهربائية[Ω]
I	شدة التيار[A]
χ	الحساسية المغناطيسية
K	ثابت كوري
T	درجة الحرارة [°C]
H	المجال المغناطيسي [A/m]
M	المغنطة
B	الحث المغناطيسي[التسلا]
Bs	الحث عند التشبع
Br	الحث المتبقي
J	كثافة التيار
σ	الموصلية $[\Omega .m]^{-1}$
L	المحاثة [H]
f	التردد الرناني [Hz]
C	سعة المكثف [F]
XL	المفاعلة الحثية
XC	المفاعلة السعوية
ω	التردد الزاوي [Hz]
Z(*ω*)	الممانعة الكلية للدارة [Ω]
ω_0	التردد الزاوي عند الرنين [Hz]

التوتر الكهربائي [V]	**V**
معامل الجودة	Q
القدرة عند الرنين [W]	**Pres**
الطاقة الكهربائية المخزنة في الوشيعة [J]	w_L
الطاقة الكهربائية المخزنة في المكثف	w_c
عمق الاختراق	**δ**
نفاذية الفراغ [H/m]	μ_0
النفاذية المغناطيسية النسبية	μ_r
الموصلية الكهربائية للمعدن	**σ**
التدفق الحراري	∅
معامل انتقال الحرارة بالحمل	**h**
مساحة السطح [m2]	**S**
معامل الناقلية الحرارية للوسط	**λ**
عدد اللفات	**N**
طول الوشيعة[m]	l
مساحة المقطع العرضي للوشيعة [m2]	**AI**

قائمة الاختصارات

الاختصار	المعنى الفيزيائي
AC	Alternating Current تيار متناوب
DC	Direct Current تيار مستمر
ZVS	Zero Voltage Switching التبديل عند الجهد الصفري
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor ترنزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor ترنزستور تأثير المجال شبه الموصل ذو البوابة المعزولة بطبقة أكسيد معدني

مقدمة عامة

مقدمة عامة

يشهد العالم في العقود الأخيرة تطوراً متسارعاً في التقنيات المعتمدة على الظواهر الكهرومغناطيسية، وتطبيقها الواسع في المجالات الصناعية، الطبية، والطاقوية. ويبرز التسخين بالحث المغناطيسي كأحد أهم هذه التقنيات وأكثرها كفاءة؛ نظراً لما يتيحه من مزايا عمليّة وحرارية استثنائية، حيث يمتاز بقدرته على توليد الحرارة ذاتياً داخل المادة دون أي ملامسة مباشرة، مما يضمن كفاءة عالية وتحكماً دقيقاً في عملية التسخين.

وتتجلى تفوق تقنية التسخين بالحث عند مقارنتها بطرق التسخين التقليدية والحديثة الأخرى؛ فبينما يعتمد التسخين بالمقاومة الكهربائية (Resistance Heating) أو اللهب المباشر (Flame Heating) على نقل الحرارة بالتماس أو الإشعاع من مصدر خارجي إلى سطح المادة ثم انتقالها للداخل بالناقلية الحرارية ـــوهو ما يتسبب في ضياع كبير للطاقة وبطء في العمليةـــ فإن الحث المغناطيسي يولد الحرارة مباشرة في عمق المادة المستهدفة وبسرعة فائقة. ومن جهة أخرى، برغم أن التسخين بالليزر (Laser Heating) يوفر دقة وكثافة طاقة عالية جداً، إلا أنه يبقى محدوداً بتكلفته الاقتصادية الباهظة، وتعقيد منظوماته، واقتصار فاعليته على المساحات السطحية الضيقة جداً، في حين يوازن التسخين بالحث بين التكلفة الاقتصادية، والإنتاجية العالية، والتحكم الموضعي الممتاز.

يرتكز مبدأ التسخين بالحث على إنشاء مجال مغناطيسي متناوب، يؤدي بدوره إلى توليد تيارات دوامية (Eddy Currents) داخل المادة الموصلة، فتتحول هذه التيارات الكهربائية إلى طاقة حرارية بفعل الجدوى الحرارية (تأثير جول). وتعتمد فاعلية هذه الظاهرة على عدة عوامل محورية، أبرزها: تردد الإشارة، خصائص المادة المستهدفة، شكل الوشيعة، ومستوى القدرة المزودة. وقد أتاح التحكم في هذه المحددات توسيع نطاق تطبيقات التسخين بالحث ليشمل المعالجة الحرارية للمعادن، الصهر الموضعي، اللحام، والتشكيل الحراري.

وفي إطار الجهود البحثية الرامية إلى تطور أنظمة التسخين بالحث الكهرومغناطيسي وتحسين أدائها، تناولت إحدى الدراسات الحديثة استخدام دارة ZVS بجهد تغذية 12 فولت لإنجاز نظام تسخين منخفض التكلفة، حيث نجح النظام في رفع درجة حرارة عينات فولاذية صغيرة إلى نحو 400 °م خلال أقل من 60 ثانية[1]. كما بينت الدراسة تأثير عوامل مثل شكل العينة ونظام التبريد وجهد التغذية على كفاءة التسخين، وأوصت بتحسين التبريد وزيادة جهد التغذية للحصول على أداء أفضل[1]. وتؤكد هذه النتائج أهمية دراسة العوامل المؤثرة في كفاءة أفران الحث الكهرومغناطيسي، وهو ما تسعى إليه الدراسة الحالية [1].

ونظراً للأهمية التقنية البالغة لهذا المجال، يهدف هذا العمل البحثي إلى دراسة مبادئ وظروف التسخين بالحث المغناطيسي عبر مسارين متكاملين؛ أولهما: تحليل الأسس النظرية الفيزيائية للظاهرة،

وثانيهما: تصميم وبناء نموذج عملي لسخان بالحث الكهرومغناطيسي داخل المختبر ودراسة أدائه التجريبي، ومطابقة النتائج العملية بالتوقعات النظرية المعطاة، مع تحليل العوامل المؤثرة في كفاءة التسخين.

بناءً على هذا التصور، تم تقسيم هذا العمل إلى ثلاثة فصول رئيسية:

في الفصل الأول تم دراسة الأسس النظرية للتسخين بالحث الكهرومغناطيسي.

وفي الفصل الثاني، تم التطرق إلى تصميم الدارة الكهربائية للسخان، مع تقديم وشرح مختلف المكونات المستعملة في إنجازه.

أما الفصل الثالث قمنا بتصنيع الجهاز وإقامة تجارب عليه ودراسة خصائصه.

الفصل الأول: الأسس النظرية للتسخين بالحث الكهرومغناطيسي

1-1 مقدمة:

تعد تقنية الحث الكهرومغناطيسي من الأساليب الشائعة والمتبعة في العديد من العمليات الحرارية، لا سيما في صهر وتسخين المعادن الموصلة للكهرباء. وتتميز هذه التقنية بآلية عمل فريدة تكمن في توليد الحرارة داخل جسم المادة ذاتها، وهو ما يمنحها أفضلية واضحة مقارنة بطرق التسخين التقليدية، حيث تحقق كفاءة حرارية أعلى وسرعة أكبر في الإنجاز [2]، فضلا عن كونها وسيلة صديقة للبيئة نظرا لخلوها من انبعاثات الأبخرة أو الغازات السامة.

2-1 تاريخ التسخين بالحث:

اكتشف الفيزيائي الإنجليزي مايكل فاراداي ظاهرة الحث المغناطيسي سنة 1831. وفي بداية القرن العشرين، بدأ استعمال الحث المغناطيسي في تسخين القطع المعدنية، غير أن تطبيقه كان محدودًا بسبب ضعف الاستطاعات المتاحة في ذلك الوقت. ومع ظهور المولدات الديناميكية سنة 1922، أصبحت تقنية التسخين بالحث أكثر كفاءة، وأظهرت الدراسات إمكانية تسخين مناطق محددة من القطعة المعدنية دون التأثير على باقي أجزائها، وذلك بالتحكم في التردد والاستطاعة، إضافة إلى خصائص المادة مثل المقاومية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية النسبية.

وقد أدى ذلك إلى ظهور تقنية المعالجة السطحية بالحث. وفي ستينيات القرن الماضي، ساهم تطوير المولدات الساكنة المعتمدة على أشباه الموصلات في استخدام استطاعات وترددات أعلى. أما حاليًا، فقد أصبح التسخين بالحث من التقنيات الصناعية المتطورة والمستخدمة في عدة مجالات، مثل السباكة واللحام والتقسية السطحية [3].

3-1مبادئ الكهرومغناطيسية :

1-3-1قانون فاراداي _لينز:

تتحقق ظاهرة الحث الكهرومغناطيسي داخل دارة معينة عند حدوث تعديل في تدفق المجال المغناطيسي الذي يمر عبرها، ويمكن رصد هذا التغير في التدفق ضمن ثلاث حالات أساسية:

- عندما تتحرك الذرات الكهربائية داخل مجال مغناطيسي ثابت.
- عندما يتواجد جسم موصل ثابت في محيط مجال مغناطيسي متغير زمنيا.
- في الحالة الشاملة التي تجمع بين حركة الدارة وتغير المجال المغناطيسي في آن واحد.

نهتم في هذا البحث بالحالة الثانية، أما فيما يخص وجهة التيار المحث فيتم تحديدها وفق قانون لينز، حيث ينص هذا القانون على أن التيار الناشئ يولد مجالا مغناطيسيا يعمل على مقاومة التغير في التدفق الذي كان سببا في ظهوره (انظر شكل a)، وفي حال كانت الدارة مغلقة، يتسبب هذا التغير في نشوء قوة دافعة كهربائية تؤثر بشكل مباشر على حوامل الشحنة ويطلق على هذا التأثير اسم المجال الكهربائي المحث (الشكل b) [2].

يمكن التعبير عن القوة الدافعة الكهربائية المحثة (E) خلال فترة زمنية قصيرة (dt) نتيجة تغير التدفق الكلي (dϕ) عبر الدارة باستخدام قانون فاراداي [2]:

$$E= -\frac{d\phi}{dt} \qquad (1.1)$$

كما ينص هذا القانون على أن القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في دائرة مغلقة، تتناسب طرديا مع المعدل الزمني للتغير في التدفق المغناطيسي المخترق لهذه الدائرة، ويكون اتجاهها معاكس للتغير المسبب لها، وذلك وفقا لقانون لينز [3].

ويعرف التدفق المغناطيسي بالعلاقة:

$$\emptyset = B \cdot A \cdot \cos\theta \qquad (1.2)$$

حيث:

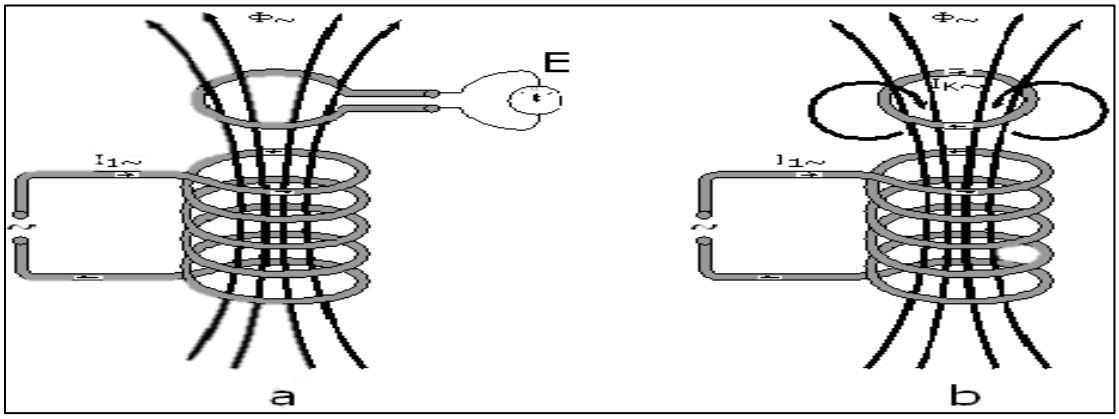
B: الحث المغناطيسي(كثافة التدفق المغناطيسي) (التسلا).

A: مساحة السطح الذي يمر عبره المجال (m^2).

θ: الزاوية بين اتجاه المجال المغناطيسي ومتجه العمود على السطح.

تستند الدراسة الكهرومغناطيسية إلى هذه القاعدة، التي تم اكتشافها تجريبيا للتقلبات التدريجية نسبيا للتدفق المغناطيسي كدالة للزمن. وهي قابلة للتطبيق على أي نظام متغير.

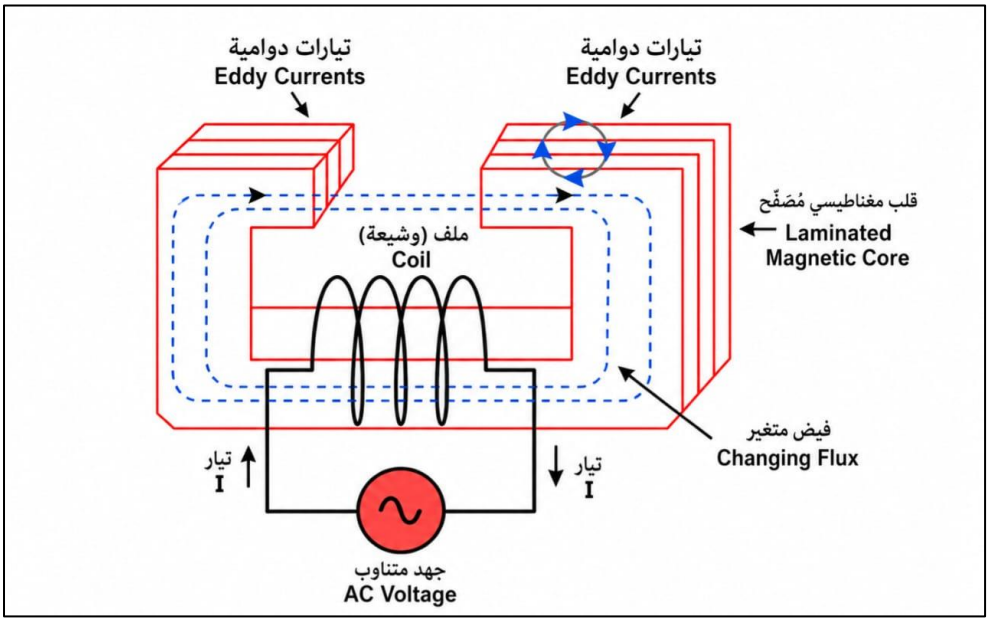
عند وضع حلقة ناقلة في مجال مغناطيسي، يظهر جهد محث عند طرفيها وفقا للمعادلة السابقة، وفي حالة إغلاق هذه الحلقة (قصر الدارة) تفرض القوة الدافعة الكهربائية مرور تيار يدور في اتجاه يعاكس الظاهرة المولدة له [4]، وهو ما يعرف بقانون "فاراداي ـ لينز".



الشكل (1.1): قانون فاراداي [2].

2-3-1 التيارات الدوامية وتوليد الحرارة:

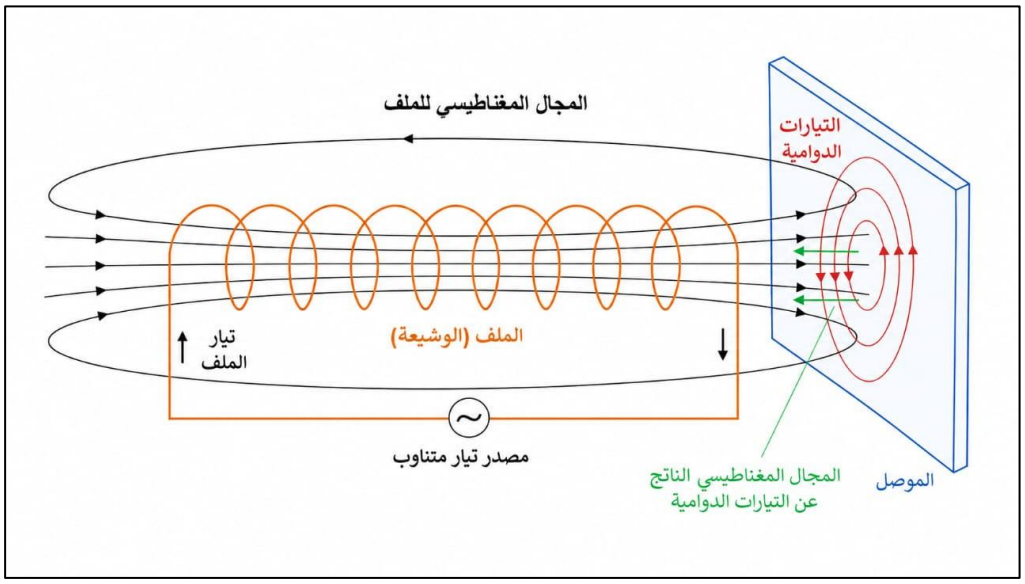
تعد التيارات الدوامية، والتي تعرف أيضا ب "تيارات فوكو " والموضحة في الشكل (2.1) [نسبة إلى العالم الفيزيائي" ليون فوكو" الذي كان سباقا في دراسة الظواهر المغناطيسية والظواهر الكهربائية المرتبطة بها]، شكلا من أشكال التيارات الحثية الناشئة داخل الموصلات. تظهر هذه التيارات عندما يتعرض جسم موصل لمجال مغناطيسي متغير زمنيا [4].



الشكل (2.1): التيارات الدوامية [1].

من الناحية الفيزيائية، يؤدي التغير في التدفق المغناطيسي عبر المادة الموصلة إلى توليد قوة دافعة كهربائية حثية وفقا لقانون فاراداي. وبما أن المادة موصلة، فإن هذه القوة تدفع الإلكترونات للحركة في مسارات دائرية مغلقة تشبه الدوامات داخل المادة كما هي موضحة في الشكل (3.1)، ومن هنا جاءت تسميتها. هذه التيارات لا تقتصر على المسارات السلكية التقليدية، بل تنتشر موضعيا في كتلة المادة، وتتسبب في ضياع جزء من الطاقة على شكل حرارة نتيجة لاصطدام الإلكترونات بذرات المادة (أثر جول) [4].

تشير الأبحاث والدراسات المرجعية إلى أن هذه التيارات تؤدي دورا مزدوجا، فبينما يتم استغلالها بفعالية في تطبيقات التسخين بالتحريض وأجهزة الكبح المغناطيسي لإخماد التذبذبات، إلا أنها تعتبر من المفقودات غير المرغوب فيها في آلات أخرى مثل المحولات والمحركات الكهربائية. وللحد من آثارها السلبية وتقليل الضياعات الحرارية في تلك الأجهزة، يتم اللجوء إلى تقنية "التصفيح "، حيث يتم صنع النوى المغناطيسية من شرائح رقيقة معزولة عن بعضها البعض لقطع مسارات التيارات الدوامية وتقييد انتشارها [4].



الشكل (3.1): التيارات الدوامية [1].

يعدّ مفعول جول المبدأ الفيزيائي المسؤول عن تحويل التيارات الدوامية المستحثة إلى طاقة حرارية داخل الجسم الموصل فعندما يمر تيار كهربائي متردد في ملف الحث، ينشأ تدفق مغناطيسي يخترق المادة، ممّا يولد تيارات دوامية تواجه مقاومة أثناء مرورها، فتتبدد الطاقة على شكل حرارة [2].

يتم التعبير عن هذه القدرة الحرارية المبددة بالمعادلة التالية:

$$P = R.I^2 \qquad (3.1)$$

حيث:

P: القدرة الحرارية الناتجة (w).

R: المقاومة الكهربائية للموصل (Ω).

I: شدة التيار (A).

في تطبيقات التسخين الحثي يتم استغلال هذا المفعول لرفع درجة حرارة القطعة المراد معالجتها مباشرة، حيث تنتشر الحرارة الناتجة لاحقا عبر كامل الجسم بواسطة خاصية التوصيل الحراري [2].

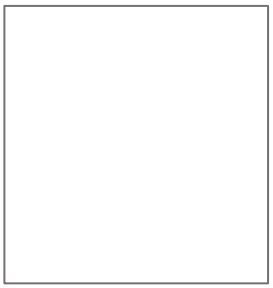
4-1المواد المغناطيسية وسلوكها :

1-4-1أنواع المواد المغناطيسية :

تنقسم المواد المغناطيسية إلى مجموعات تبعا للقيمة المطلقة وإشارة قابلية التمغنط χ [التمغنط هو اكتساب المادة لخاصية مغناطيسية عند تعرضها لمجال مغناطيسي خارجي] لها وهي:

1-4-1-1 المواد الديامغناطيسية:

هي خاصية تظهر في المواد التي تميل إلى الابتعاد عن المجال المغناطيسي، وذلك بسبب حركة الالكترونات داخل الذرات التي تولد تيارات مستحثة عكسية تضعف المجال الخارجي حسب قانون لينز، هذه المواد لا تمتلك عزوما مغناطيسيا دائما، فكل الالكترونات متزاوجة (العزوم المغناطيسية تلغي بعضها البعض)، عند تطبيق مجال مغناطيسي خارجي تتولد مغنطة عكس اتجاه هذا المجال، وتزول مغنطتها بمجرد إزالته، تكون χسالبة وضعيفة جدا (أقل من الواحد) [5].



الشكل (4.1): المواد الديامغناطيسية.

2-1-4-1 المواد البارامغناطيسية:

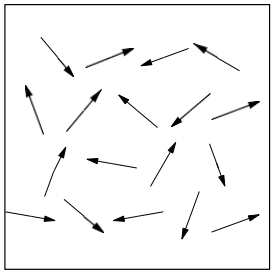
وهي خاصية تظهر في المواد التي تنجذب نحو المجال المغناطيسي وذلك بسبب وجود عزوم مغناطيسية دائمة للذرات بسب الالكترونات غير متزاوجة (الشكل 4.1)، عند تطبيق مجال مغناطيسي خارجي تصطف هذه العزوم في اتجاه المجال، يكون انجذابها ضعيف نحو المجال المغناطيسي الخارجي، وعند زوال المجال تفقد مغناطيسيتها، وتكونχ موجبة وأقل من الواحد أي $(0 < \chi < 1)$ [5] وفق العلاقة:

$$\chi = \frac{K}{T} \qquad (4.1)$$

حيث:

K: ثابت كوري.

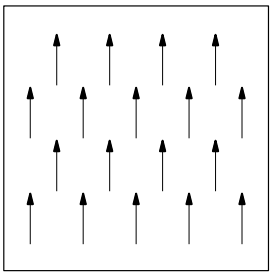
T: درجة الحرارة المطلقة.



الشكل (5.1): البارامغناطيسية[6].

1-4-1-3 المواد الفيرومغناطيسية:

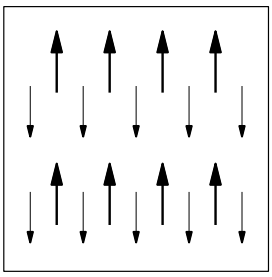
تعد الفيرومغناطيسية من أقوى أنواع المغناطيسية وتظهر في المواد التي تحتوي على عد كبير من الالكترونات الغير متزاوجة مما يمنحها عزوما مغناطيسية قوية، لها مغنطه قوية جدا وذلك بسبب أن العزوم المغناطيسية للإلكترونات مصطفة في اتجاه واحد كما هي موضحة في الشكل (5.1)، ويمكن أن تحتفظ بمغنطتها حتى بعد إزالة المجال الخارجي، تكون χأيضا موجبة، ولكنها أكبر بكثير من χللمواد البارامغناطيسية ($0<<\chi$) [5].



الشكل (6.1): الفيرومغناطيسية[6].

1-4-1-4 المواد الفيريمغناطيسية:

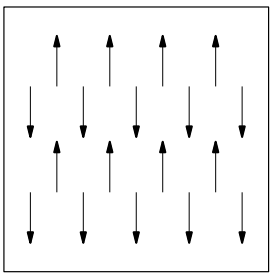
تشبه المواد الفيرومغناطيسية، لكن العزوم المغناطيسية لبعض الذرات تكون في اتجاه معاكس، وقيم غير متساوية كما هي موضحة في الشكل (6.1)، ممّا ينتج عزم مغناطيسي كلي غير صفري، مما يمنح المادة خواص مغنطة صافية [5].



الشكل (7.1): الفيريمغناطيسية[6].

1-4-1-5 المواد الضد للفيرومغناطيسية:

تتميز هذه الخاصية بترتيب العزوم المغناطيسية للذرات بحيث تكون متساوية في المقدار ومتعاكسة في الاتجاه (أنظر الشكل (7.1))، فتكون المحصلة المغناطيسية صفرا، يحدث هذا الترتيب نتيجة تفاعل بين الذرات داخل الشبكة البلورية، ولا تمتلك مغنطة تلقائية [5].



الشكل (8.1): الضد للفيرومغناطيسية[6].

ولغرض تنظيم المعطيات المتعلقة بالمواد المغناطيسية، تم تقديم تصنيفها في الجدول أدناه (جدول 1.1)، والذي يضم أهم الأنواع المدروسة مرفقة بأمثلة ممثلة وصيغها الكيميائية.

الجدول (1.1): يوضح تصنيف المواد المغناطيسية مع أمثلة وصيغها الكيميائية[5].

أنواع المواد	مثال	صيغته الكيميائية
الديامغناطيسية	النحاس	Cu
	الذهب	Au
	الفضة	Ag
البارامغناطيسية	الألمنيوم	Al
	البلاتين	Pt
	الأكسجين	O
الفيرومغناطيسية	الحديد	Fe
	النيكل	Ni
	الكوبلت	Co
الفيريمغناطيسية	المغنتيت	Fe_3O_4
	فريت الحديد-النيكل	$NiFe_2O$
	فريت الحديد-الكوبالت	$CoFe_2O_4$
الضد للفيرومغناطيسية	أكسيد المنغنيز	MnO
	أكسيد النيكل	NiO
	أكسيد الكوبالت	CoO

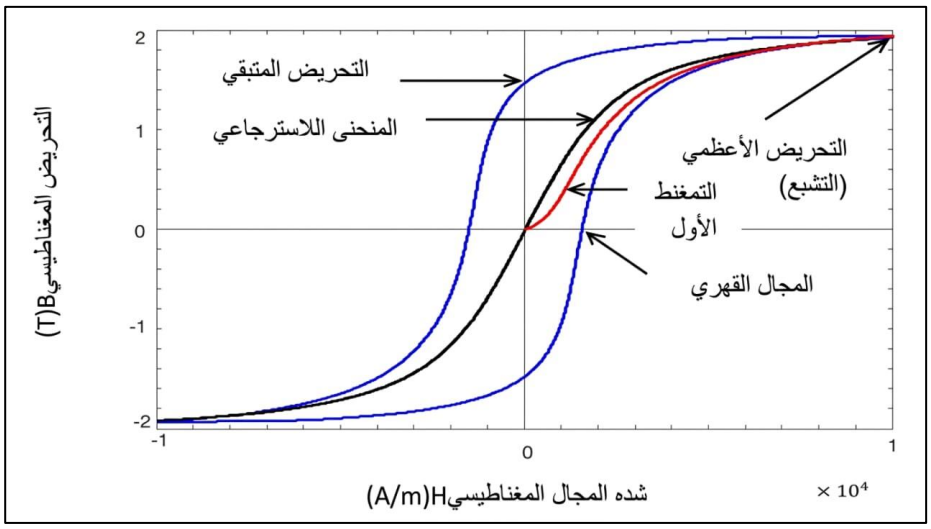
1-4-2 حلقة الهستريزيس:

يشتق مصطلح الهستريزيس من الأصل الإغريقي الذي يعني التأخر أو البقاء، ويشير هنا إلى التأخير الزمني بين المؤثر والاستجابة. وقد توسع المفهوم ليشير إلى الطبيعة غير الأحادية للعلاقة بين المؤثر (المجال المغناطيسيH) والاستجابة (المغنطة M أو مجال الحث المغناطيسي B)، ممّا يجعل وصفها بدالة رياضية أحادية وبسيطة غير ممكن.

تعبر هذه العلاقة، التي تمثل القانون السلوكي العياني للنظام المغناطيسي، بشكل نموذجي عن طريق منحنى مغلق يعرف بدورة الهستريزيس.

تتميز المواد المغناطيسية بعدة مقادير فيزيائية، مثل: المجال المقاوم H، والحث عند التشبع B_s، والحث المتبقي B_r.

يمكن تمثيل السلوك المغناطيسي بعدة صيغ، إما بعرض علاقة المغنطة بالمجال، أو علاقة الحث بالمجال. يتضمن التمثيل الأخير مساهمة الفراغ (الخاصية المغناطيسية للفضاء الحر) بالإضافة إلى استجابة المادة نفسها، وهو التمثيل الأكثر ملاحظة مباشرة في القياسات العملية [7]، كما هو موضح في الشكل (8.1) تجدر الإشارة إلى أن قيم الحث المقاسة عمليا تتأثر بجهد وتردد جهاز القياس، بينما يرتبط المجال المطبق بشدة تيار المغنطة وبالشكل الهندسي للدارة المغناطيسية المستخدمة.



الشكل (9.1): منحنى الهستريزيس الممثل لتغير الحث المغناطيسي B بدلالة المجال المغناطيسي H المطبق[7].

1-2-4-1 الخسائر الناتجة عن التيارات الدوامية:

عند تعرض المواد المغناطيسية لمجال كهرومغناطيسي متناوب تنتج عنه خسائر حرارية في هذه المواد، وذلك نتيجة تفاعل معقد بين الخصائص الكهربائية والمغناطيسية للمادة وتوزيع المجال داخلها.

يوضح تحليل توزيع المجال الكهرومغناطيسي والتيارات الدوامية أن مصدر توليد الحرارة داخل قطعة العمل يرتبط مباشرة بكثافة القدرة المتولدة، والتي تتحدد بدورها بتوزيع المجال والتيارات المستحثة، وهذا يعني أن

الخسائر الحرارية (وخاصة خسائر جول) تكون متجانسة مكانيا، فقد تزداد أو تنخفض عند النهايات والحواف تبعا لظروف التشغيل والتردد وخصائص المادة.

تعد خسائر التيارات الدوامية من أهم مصادر الفقد الحراري، وتنشأ نتيجة تولد تيارات مستحثة داخل المادة بسبب تغير المجال المغناطيسي مع الزمن، ويؤدي تأثير الجلد وتأثير القرب إلى تركيز هذه التيارات في الطبقات السطحية، ممّا يسبب زيادة كبيرة في كثافة القدرة الحرارية وفقدان الطاقة على شكل حرارة داخلية [8].

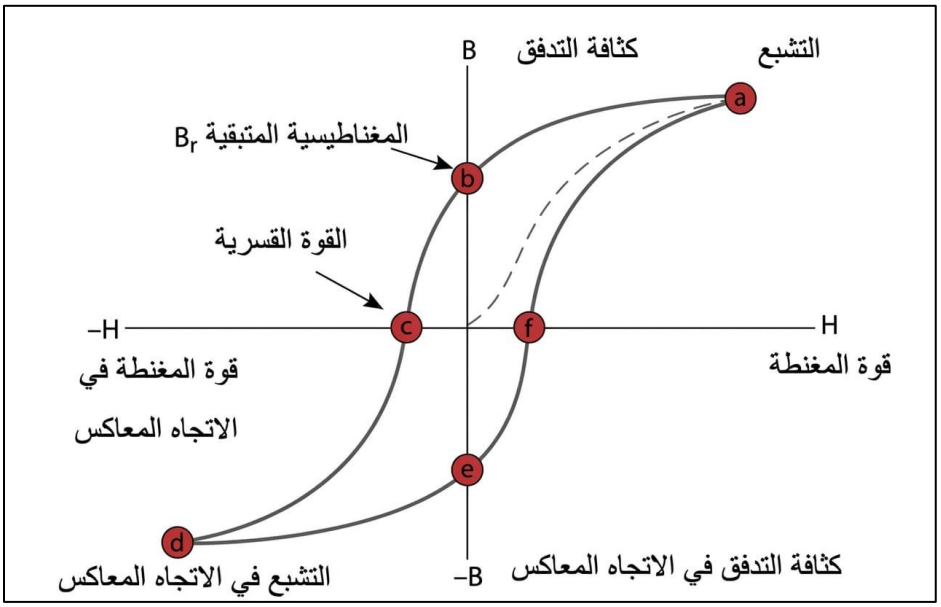
1-4-2-2 الخسائر الناتجة عن حلقة الهستريزيس:

عند تعريض المادة المراد تسخينها إلى تدفق مغناطيسي متغير، تستجيب جزيئاتها المغناطيسية للمجال المطبق وتنتظم في اتجاهه. وعند انقطاع التيار وزوال المجال الخارجي، لا تعود المادة إلى حالة إزالة المغنطة الكاملة، بل يبقى جزء من التدفق المغناطيسي محتجزا داخلها، ويعرف هذا الجزء بالتدفق المتبقي.

هذا السلوك يؤدي إلى فقدان في القدرة داخل المادة الحديدية نفسها، يسمى بفقدان الهسترة (Hysteresis Loss)، وهو المسؤول عن رفع درجة حرارتها بشكل مباشر. ويمكن توضيح ذلك عبر منحنى العلاقة بين كثافة التدفق المغناطيسي(B) وشدة المجال المغناطيسي (H) الموضح في الشكل (9.1).

عند زيادة شدة المجال، تزداد كثافة التدفق تدريجيا حتى تصل المادة إلى حالة التشبع. ثم عند خفض المجال نحو الصفر، لا تنخفض كثافة الفيض إلى الصفر، بل تبقى عند قيمة موجبة تعرف بكثافة التدفق المتبقي. ولإلغاء هذا التدفق، يلزم تطبيق مجال مغناطيسي معاكس بقوة معينة تسمى قوة الإكراه.

تمثل المساحة المحصورة ضمن دورة الهستريزيس الكاملة الطاقة المفقودة في كل دورة مغنطة، وهذه الطاقة تتحول إلى حرارة داخل المادة الحديدية المراد تسخينها. لذلك، عند تصميم دوائر التسخين بالحث الكهرومغناطيسي، يؤخذ تأثير فقدان الهستريزيس بعين الاعتبار، ويعبر عنه في النماذج المكافئة كعنصر يمثل الخسائر الحرارية [9].



الشكل (10.1): منحنى الهستريزيس[9].

1-4-3 درجة كوري وتأثيرها على التسخين:

عند تسخين المواد الفيرومغناطيسية إلى درجات حرارة مرتفعة بما يكفي، فإنها تفقد خصائصها الفيرومغناطيسية، وتتحول إلى مواد بارامغناطيسية، وتعرف درجة الحرارة التي يتم عندها هذا التحول من السلوك الحديدي المغناطيسي إلى السلوك البارامغناطيسي باسم درجة حرارة كوري.

عند بلوغ هذه الدرجة يحدث انخفاض مفاجئ في نفاذية المادة، كما تختفي كل من المغنطة المتبقية والقسرية، أي تصبحان معدومتين. وقد كانت هذه الظاهرة معروفة في المواد الحديدية المغناطيسية قبل أعمال كوري، حيث أشير لأول مرة إلى وجود درجة حرارة انتقالية من طرف "غيلبرت "[10]، الذي يعد أول مؤلف علمي في مجال المغناطيسية.

الجدول (2.1): درجات حرارة كوري لبعض المواد المغناطيسية

المادة	درجة كوري [°C]
نيكل	358
الحديد	770
تيرفينول	380_430
الغادولينيوم	20
فريت الباريوم	450
SmCo5	720
الفريتات الصلبة	400_700
ألنيكو	850
Nd2 Fe14 B	312
الكوبالت	1130

1-5 مبدأ التسخين بالحث المغناطيسي:

1-5-1 كيفية تحويل المجال المغناطيسي المتغير إلى حرارة داخل موصل:

يعتمد مبدأ التسخين بالحث الكهرومغناطيسي بشكل أساسي على قانوني فاراداي و لينز حيث كل جسم ناقل للكهرباء يتم وضعه داخل مجال مغناطيسي متغير (يتولد عن طريق محث أو وشيعة)، تنشأ فيه تيارات كهربائية محثة تعرف بتيارات "فوكو"، وتعمل هذه التيارات على تحويل الطاقة إلى حرارة داخل المادة بفعل مبدأ جول ، حيث أن عند مرور تيار (مستمر أو متناوب) في وشيعة الحث ينتج عنه مجال كهرومغناطيسي يحيط بالوسط المجاور،

يخترق هذا المجال سطح القطعة وصولا إلى عمق محدد، يتأثر هذا الاختراق بتردد المجال الكهرومغناطيسي إضافة إلى الخصائص الفيزيائية للمادة.

عند تغذية الوشيعة بتيار متناوب فإن المجال الكهرومغناطيسي يتذبذب بنفس التردد المقرر، وتتأثر هذه الاهتزازات بنوعية المادة (مغناطيسية أو غير مغناطيسية) هذه التذبذبات السريعة هي المسؤولة عن تحريض تيارات **"فوكو"** داخل الجسم، يخضع هذا المسار إلى قانون لينز الذي يقرر بأن التيارات المحثة تتدفق في اتجاه يعاكس السبب المنتج لها أي أنها تدور في متجه معاكس لتيار الوشيعة، و تتحول المنطقة التي تسلكها هذه التيارات إلى بؤرة لتبديد الحرارة، و التي تنتقل لاحقا من الأجزاء السطحية نحو قلب القطعة عبر ظاهرة الانتشار الحراري [11].

1-5-2 العوامل المؤثرة في فعالية التسخين:

تعتمد كفاءة التسخين بالحث الكهرومغناطيسي على مجموعة من العوامل التي تتحكم في انتقال الطاقة الحرارية إلى العينة، حيث يمكن لهذه العوامل أن تعزز أو تحدّ من فعالية العملية.

التردد: يمثل تردد مصدر التيار المتردد العامل الأكثر حساسية في تحديد مدى تغلغل الحرارة داخل المشغولات المعدنية [12].

- النطاق العالي التردد (يتراوح بين 50 إلى 400kHz): تقتصر التيارات المتولدة على منطقة قريبة من السطح، ممّا يجعل هذا النطاق مناسبا لتطبيقات المعالجة السطحية أو التصلب الموضعي، وكذلك لحام الأجزاء رقيقة الجدران بالنحاس الأصفر [12].
- النطاق المنخفض (بين 1و 20kHz): يسمح المجال المغناطيسي بالاختراق إلى عمق أكبر، فتتوزع الحرارة بانتظام داخل كتلة العمل، وهو ما يستخدم عند الحاجة لتسخين المشغولات الضخمة أو في عمليات الحدادة [12].

تصميم الملف: تلعب الأبعاد الهندسية للملف (القطر، الشكل، عدد اللفات) دورا جوهريا في تحديد كثافة الفيض المغناطيسي وتوجيهه نحو العينة، ممّا يقلل من الضياعات الطاقوية [12].

معامل الاقتران المغناطيسي: المسافة الفاصلة بين الوشيعة والعينة المراد معالجتها، حيث تلعب هذه المسافة دورا أساسيا في كفاءة انتقال الطاقة. إذ أن شدة المجال المغناطيسي تتناقص بسرعة كلما زادت المسافة بين الملف والقطعة [12].

وعليه لتحقيق أفضل أداء وأقصى فعالية في عملية التسخين بالحث، ينبغي تقليل هذه المسافة قدر الإمكان ضمن حدود العملية، ويعد ضعف الاقتران من أبرز العوامل التي تؤدي إلى انخفاض كفاءة النظام، نتيجة تشتت جزء من الطاقة وعدم تركيزها على المنطقة المستهدفة [12].

خصائص المادة المستهدفة:

تعد طبيعة المادة المراد تسخينها عاملا حاسما في تحديد استجابتها للمجال المغناطيسي المستحث، وبالتالي تؤثر بشكل مباشر على كفاءة عملية التسخين بالحث [12].

المقاومة الكهربائية: تميل المواد ذات المقاومة الكهربائية المرتفعة، مثل الفولاذ، إلى التسخين بكفاءة أكبر مقارنة بالمواد ذات المقاومة المنخفضة كالنحاس والألمنيوم، وذلك لأنها تعيق مرور التيارات الدوامية بدرجة أكبر: ممّا يؤدي إلى توليد حرارة أعلى [12].

النفاذية المغناطيسية: المواد التي تمتاز بنفاذية مغناطيسية عالية، مثل الفولاذ الكربوني، قادرة على تركيز خطوط المجال المغناطيسي بشكل أفضل، ممّا يعزز كفاءة التسخين الناتج عن التيارات الدوامية وكذلك ظاهرة الهسترة [12].

قوة النظام: تتناسب القدرة المستحثة طرديا مع شدة التيار المار في الملف، وزيادة الطاقة ترفع كفاءة وسرعة التسخين.

الموصلية:

في التسخين بالحث: تتولد الحرارة بسبب التيارات الدوامية داخل العينة، العبارة الأساسية هي:

$$J = \sigma . E \qquad (5.1)$$

حيث:

J: كثافة التيار

σ : الموصلية $[\Omega .m]^{-1}$

E: المجال الكهربائي المستحث

حيث أن الموصلية الكهربائية تؤثر على كفاءة التسخين بالحث بشكل غير خطي، حيث:

تؤدي زيادتها إلى تعزيز التيارات الدوامية وزيادة القدرة الحرارية. لكن عند القيم العالية جدا، تسبب:

- تأثير الجلد
- الحجب المغناطيسي (ظاهرة تقلل نفاذ المجال المغناطيسي داخل المادة بسبب المجالات المعاكسة التي تولدها التيارات الدوامية).
- مما يقلل من كفاءة التسخين داخل حجم العينة، ويرجع ذلك إلى أن لكل مادة موصلية كهربائية محددة تميز طبيعتها الفيزيائية، وهي التي تحدد مدى استجابتها للمجال المستحث وقدرتها على تمرير التيارات الدوامية.

شكل العينة: يؤثر شكل العينة بشكل مباشر على كفاءة التسخين بالحث الكهرومغناطيسي، حيث يحدد توزيع التيارات الدوامية داخل المادة. فالأشكال البسيطة والمنتظمة تسمح بتوزيع متجانس للتيارات وبالتالي تسخين متوازن وفعّال، في حين تؤدي الأشكال المعقدة التي تحتوي على زوايا حادة أو تجاويف إلى تركّز التيار في بعض المناطق وضعفه في أخرى [4]، ممّا يسبب عدم تجانس في التسخين وانخفاض الكفاءة. كما يؤدي سمك العينة وتوافقها مع شكل الملف دورا مهما، ففي العينات الرقيقة (يكون السمك أقل من عمق الاختراق)، يتغلغل المجال المغناطيسي عبر المادة بالكامل، ممّا يولد تيارات دوامية موزعة بانتظام تؤدي إلى تسخين القطعة بأكملها في آن واحد. في المقابل، في العينات السميكة (يتجاوز السمك عمق الاختراق)، ينحصر توليد الحرارة بفعل

التيارات الدوامية في الطبقة السطحية فقط بفعل تأثير الجلد، بينما يعتمد تسخين قلب المادة على انتقال الحرارة بالتوصيل من السطح إلى المركز، ممّا يجعل توزيع الحرارة داخل المادة يعتمد بشكل أكبر على الزمن والخصائص الحرارية للمعدن بدلا من الحث المباشر.

1-6 الخاتمة:

تناولنا في هذا الفصل المبادئ الأساسية للتسخين بالحث، مع تقديم نظرة عامة موجزة حول أهم خصائصه. وتكمن أبرز ميزة لهذه التقنية في توليد الحرارة مباشرة داخل المادة المراد تسخينها، ممّا يؤدي إلى تقليص زمن الاستجابة بشكل كبير، ويتيح تحقيق كفاءة عالية جدا مع إمكانية التحكم الدقيق في عملية التسخين حسب الحاجة.

وبالتالي، فإن فهم هذه الأسس النظرية يعد ضروريا للتحكم الجيد في هذه التقنية واستعمالها بشكل فعال، وهو ما يمهد لدراسة تطبيقاتها العملية في المراحل القادمة.

الفصل الثاني:

تصميم الدارة الكهربائية للسخان.

2-1 مقدمة:

بعد التطرّق في الفصل الأول إلى الأسس النظرية للتسخين بالحث الكهرومغناطيسي والمبادئ الفيزيائية التي يقوم عليها، يأتي هذا الفصل لعرض الجانب التصميمي والتقني للنظام المستعمل في إنجاز جهاز التسخين بالحث. إذ يُعتبر تصميم الدارة الكهربائية من أهم المراحل التي تحدد كفاءة الجهاز واستقراره، لما له من دور مباشر في ضمان توليد مجال مغناطيسي مناسب وتحقيق انتقال فعّال للطاقة نحو القطعة المراد تسخينها.

ويهدف هذا الفصل إلى تقديم دراسة عامة لمختلف المكوّنات الأساسية التي يتكون منها نظام التسخين بالحث، مع توضيح دور كل عنصر في عمل الجهاز، إضافةً إلى التطرّق إلى الجوانب الحرارية المرتبطة بعملية التسخين وآليات انتقال الحرارة. كما يتناول الفصل المبادئ المعتمدة في تصميم السخان الحثّي واختيار القيم المناسبة للعناصر الكهربائية المختلفة من أجل الوصول إلى أفضل أداء ممكن.

وفي الأخير، يتم عرض أهم تطبيقات التسخين بالحث الكهرومغناطيسي، مع إبراز أبرز مزاياه وعيوبه مقارنةً بطرق التسخين التقليدية، وذلك من أجل إعطاء نظرة شاملة حول هذا النوع من الأنظمة ومدى أهميته في التطبيقات الصناعية والتقنية الحديثة.

2-2 مكونات نظام التسخين بالحث:

2-2-1 مصدر القدرة (High Frequency Generator):

مصدر القدرة هو العنصر الذي يزود الجهاز أو النظام المركب بالطاقة مثل: البطاريات، المولد الكهربائي، الوقود....

يعتمد في أفران الحث المغناطيسي المخصصة لعمليات التسخين على نظام متكامل يحول الكهرباء إلى تيار عالي تردد لتوليد الحرارة داخل المعدن، يتكون عادة من:

مقوم (Rectifier): يحول التيار المتناوب (AC) إلى تيار مستمر (DC).

2-2-2 الوشيعة (Induction Coil) أنواعها وأشكالها:

تعرف الوشيعة (inductour) بأنها عنصر كهربائي سلبي ثنائي الطرفين يستخدم لتخزين الطاقة على شكل مجال مغناطيسي عند مرور التيار الكهربائي عبره، تتكون الوشيعة عادة من سلك موصل ملفوف على هيئة لولبية على محور واحد حول قلب إما هوائيا أو مصنوع من مادة مغناطيسية.

غالبا ما تكون الوشيعة أنبوب نحاسي مجوف يلتف حول العنصر المراد تسخينه، وهو المسؤول عن توليد المجال المغناطيسي [2].

تتميز الوشيعة بخاصية أساسية هي المحاثة (Inductance) ويرمز لها بالرمز L، وتقاس بوحدة الهنري (H) [13].

للوشيعة أنواع عديدة تصنف حسب الشكل الهندسي وهي كالآتي:

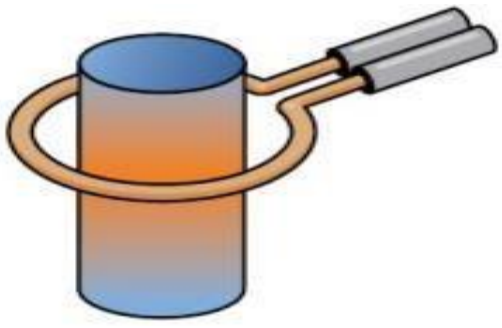
2-2-2-1 وشيعة حلزونية متعددة اللفات (Multi-turn Helical Coil):

الوشيعة الحلزونية (اللولبية) من أكثر الوشائع استعمالًا، ويتكون من عدة لفات تحدد عرض منطقة التسخين. يمكن تسخين القطعة إمّا بتثبيتها داخل الوشيعة للحصول على تسخين موضعي، أو بتمريرها عبره فيما يُعرف بالتسخين بالمسح للحصول على تسخين منتظم، وهي موضحة في الشكل (1.2).

الشكل (1.2): وشيعة حلزونية متعددة اللفات [14].

2-2-2-2 وشيعة ذات لفة واحدة (Single-Trun Coil):

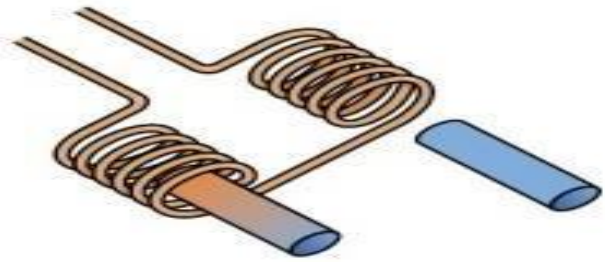
تُستخدم الوشيعة أحادية اللفة لتسخين الأجزاء الصغيرة أو أطراف القطع بدقة، خاصةً في المعالجات الحرارية، وتُثبت قريبًا من القطعة للحصول على تسخين منتظم، وهي موضحة في الشكل (2.2).



الشكل (2.2): وشيعة ذات لفة واحدة [14].

2-2-2-3 وشيعة حلزونية متعددة المواضع (Multi-position helical inductor):

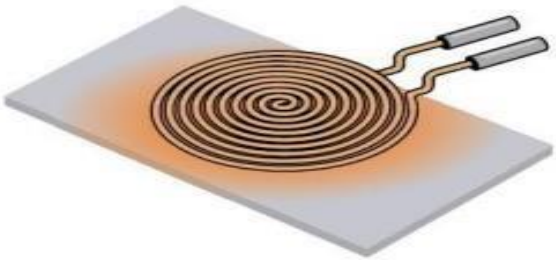
تُستخدم الوشيعة متعددة مواضع التسخين لزيادة الإنتاجية، حيث يمكن تسخين قطعة في موضع بينما يُعاد تجهيز موضع آخر للدورة التالية، ويصل عدد المواضع إلى ثمانية، وهي مبينة في الشكل (3.2).



الشكل (3.2): وشيعة حلزونية متعددة المواضع [14].

4-2-2-2 وشيعة مسطحة (Pancake Coil):

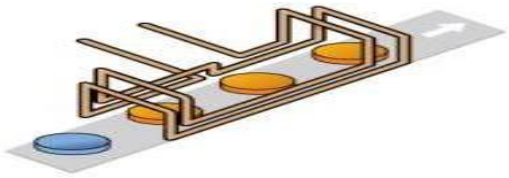
يمكن تصميم الوشيعة لنقل قطعة العمل خطيًا عبر المجال الكهرومغناطيسي، فتسخن أثناء مرورها، سواء بشكل كامل أو في منطقة محددة فقط، كما هي مبينة في الشكل (4.2).



الشكل (4.2): وشيعة مسطحة [14].

5-2-2-2 وشيعة القناة (Channel Coil):

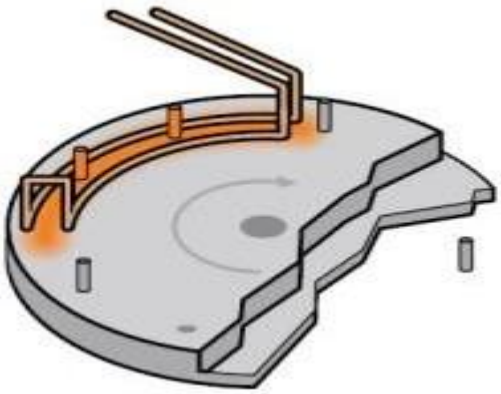
تُصمم الوشيعة القنوية بشكل منحني لتناسب الطاولات الدوارة وتُستخدم ضمن مراحل التجميع متعددة الخطوات، انظر إلى الشكل (5.2).



الشكل (5.2): وشيعة القناة [14].

6-2-2-2 وشيعة قناة منحني (Curved channel inductor):

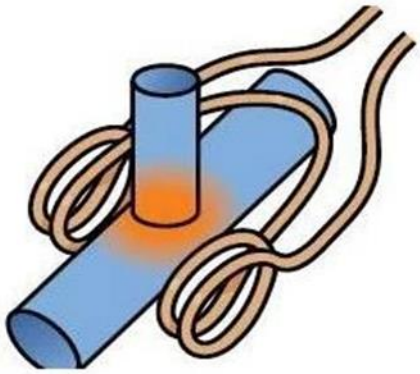
تُستخدم الوشيعة المنحنية لتسخين القطعة من جانب واحد عندما يصعب إحاطتها بالكامل بالملف، انظر الشكل (6.2).



الشكل (6.2): وشيعة قناة منحني [14].

7-2-2-2 وشيعة حلزونية مقسمة (Split Helical Coil):

عند صعوبة الوصول إلى منطقة التسخين بالوشيعة الحلزونية تستخدم الوشيعة الحلزونية المنقسمة أحادية أو متعددة اللفات، كما هي موضحة في الشكل (7.2).



الشكل (7.2): وشيعة حلزونية مقسمة [14].

8-2-2-2 وشيعة الحلقية (Inductor):

الوشيعة الحلقية هي نوع من الوشائع تُلف فيه الأسلاك حول نواة مغناطيسية ذات شكل حلقي، مما يسمح بتركيز المجال المغناطيسي داخل النواة وتقليل تشتته إلى الخارج. تتميز هذه الوشيعة بكفاءة عالية في تخزين الطاقة وتقليل الفواقد الكهرومغناطيسية، كما هي مبينة في الشكل (8.2).

الشكل (8.2): وشيعة الحلقية [15].

3-2-2 الدارة الرنانة (lc resonant cireuit):

تعد الدارة الرنانة العنصر الأساسي في منظومة فرن الحث الكهرومغناطيسي، إذ تمثل الجزء المسؤول عن ضمان نقل الطاقة بكفاءة عالية من مصدر التغذية إلى المعدن المراد تسخينه. ويعتمد مبدأ التسخين بالحث على توليد مجال مغناطيسي متناوب عالي التردد داخل ملف نحاسي (وشيعة العمل)، مما يؤدي إلى استحثاث تيارات دوامية (eddy current) داخل المادة المعدنية الموضوعة ضمن المجال، فتتحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية نتيجة الفواقد الأومية (Joul Losses)، إضافة إلى خسائر الهستريزيس في المواد الفيرومغناطيسية [13].

1-3-2-2 مكونات الدارة الرنانة ومبدأ عملها:

تتكون الدارة الرنانة أساسا من عنصرين تفاعليين [13] هما:

وشيعة العمل (Inductor-L).

المكثف (Capacitor-C).

يتم توصيل هذين العنصرين إما على التوالي (Series Resonant Circuit) أو على التوازي (Parallel Resonant Circuit)، بحيث تعمل الدارة عند تردد محدد يسمى التردد الرناني.

عند التردد الرناني تتحقق العلاقة التالية [13]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (1.2)$$

حيث:

L: تمثل محاثة الوشيعة (بالهينري H).

C: تمثل سعة المكثف (بالفاراد F).

عند هذا التردد تتساوى المفاعلة الحثية X_L مع المفاعلة السعوية X_C في المقدار وتتعاكسان في الإشارة، مما يؤدي إلى إلغائهما المتبادل. ونتيجة لذلك تصبح الممانعة الكلية للدارة في حدها الأدنى (في حالة الرنين التسلسلي)، فيمر تيار أعظمي عبر الوشيعة وهو ما يعد شرطا أساسيا لتحقيق تسخين فعال.

2-2-3-2 دور الدارة الرنانة في تحسين كفاءة الفرن:

يسمح التشغيل عند حالة الرنين بتبادل مستمر للطاقة بين المجال المغناطيسي للملف والمجال الكهربائي للمكثف، حيث تنتقل الطاقة ذهابا وإيابا بين العنصرين دون استهلاك فعلي كبير، باستثناء الفواقد الأومية وفواقد الحمل المعدني [8]، وهذا يؤدي إلى:

- تضخيم التيار داخل الملف دون الحاجة إلى رفع جهد التغذية بشكل كبير.
- تقليل الإجهاد الكهربائي على عناصر القدرة الإلكترونية مثل IGBTأوMOSFET .
- تحسين معامل القدرة للنظام.
- تقليل الفواقد في عناصر التحويل الإلكترونية.

2-2-3-3 تأثير الحمل المعدني على الدارة الرنانة:

عند إدخال المعدن داخل وشيعة العمل، يتغير السلوك المكافئ للدارة، إذ يؤثر الحمل المعدني (المادة المراد تسخينها) على قيمة المحاثة والممانعة المكافئة للنظام. ويعود ذلك إلى التيارات الدوامية المتولدة داخل المعدن، والتي تمثل حملا فعليا للدارة. لذلك يتطلب الأمر ضبط التردد التشغيلي باستمرار للحفاظ على حالة الرنين وضمان استقرار الأداء [8].

عادة تصنع وشيعة فرن الحث من النحاس المجوف للسماح بمرور ماء التبريد داخله، وذلك بسبب التيارات العالية والترددات المرتفعة التي تؤدي إلى ارتفاع كبير في درجة حرارته [8].

2-2-3-4 آلية توليد الحرارة:

عند تشغيل الفرن، يولد التيار المتناوب عالي التردد في وشيعة العمل مجالا مغناطيسيا متغيرا يخترق المعدن، فينشأ داخله تيار دوامي تتناسب شدته مع [8]:

- قيمة التردد.
- شدة المجال المغناطيسي.
- خواص المادة (المقاومية والنفاذية المغناطيسية).

وتنتج الحرارة أساسا عن:

- المقاومة الكهربائية للمعدن (خسائر جول).

- خسائر الهستريزيس في المواد الفيرومغناطيسية.

2-2-3-5 الممانعة الكلية للدارة الرنانة:

هي المقاومة التي يواجهها التيار الكهربائي في دائرة التيار المتناوب. تعطى الممانعة المركبة للدارة الرنانة التسلسلية بالعلاقة [4]:

$$Z(\omega) = j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) + R \qquad (2.2)$$

حيث $\omega = 2\pi f$ هو التردد الزاوي.

$Z(\omega)$: الممانعة الكلية للدارة (Ω).

R: المقاومة المكافئة للدارة (Ω).

عند شرط الرنين:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \qquad (3.2)$$

ω_0: التردد الزاوي عند الرنين (rad/s).

ومنها [13]:

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}2\pi} \quad \Rightarrow \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad (4.2)$$

عند هذا التردد تصبح الممانعة:

$$R = z(\omega_0) \qquad (5.2)$$

أي أن الدارة تتصرف كمقاومة خالصة.

2-2-3-6 التيار في الدارة الرنانة:

شدة التيار الفعال المار في الدارة تعطى بالعلاقة [13]:

$$I(w) = \frac{V}{\sqrt{\left(R^2 + (wL - \frac{1}{wC})^2\right)}} \qquad (6.2)$$

I: شدة التيار الكهربائي (A).

V: التوتر الكهربائي (V).

وعند الرنين [13]:

$$I_{max} = \frac{V}{R} \qquad (7.2)$$

وهو ما يفسر تضخيم التيار داخل وشيعة العمل عند التشغيل الرناني.

2-2-3-7 معامل الجودة (Quality Factor):

يعد معامل الجودة Q مؤشر مهما لحدة الرنين وكفاءة تخزين الطاقة في الدارة، ويعرف كما يلي [13.16]:

$$Q = \sqrt{\frac{L}{C}}\frac{1}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} \qquad (8.2)$$

حيث كلما زادت قيمة Q أصبح الرنين أكثر حدة، وزادت شدة التيار وتحسن مردود التسخين، غير أن القيم المرتفعة جدا ل Q قد تؤدي إلى عدم استقرار التشغيل.

2-2-3-8 القدرة المنقولة إلى المادة المراد تسخينها:

القدرة الفعالة المتبددة في الدارة (وهي التي تتحول إلى حرارة داخل المعدن) تعطى بالعلاقة:

$$P = I^2 R \qquad (9.2)$$

حيث

P: القدرة الكهربائية المتبددة (W).

وبالتعويض عند الرنين :

$$P_{res} = \frac{V^2}{R} \qquad (10.2)$$

P_{res}: القدرة عند الرنين (W).

من هذه العلاقة أن تقليل المقاومة المكافئة وزيادة التيار يؤديان إلى رفع القدرة الحرارية المتولدة داخل الحمل.

2-2-3-9 الطاقة المخزنة في عناصر الدارة:

الطاقة العظمى المخزنة في وشيعة العمل تعطى بالعلاقة[16]:

$$w_L = \frac{1}{2} \cdot L^2 I \qquad (11.2)$$

w_L : الطاقة الكهربائية المخزنة في الوشيعة (J).

والطاقة المخزنة في المكثف تعطى بالعلاقة[16]:

$$w_c = \frac{1}{2} C^2 v \qquad (12.2)$$

w_c: الطاقة الكهربائية المخزنة في المكثف (J).

عند الرنين يحدث تبادل دوري للطاقة بين w_L و w_c ، بينما تمثل الطاقة المتبددة في R الفواقد الحرارية.

2-2-3-10 عمق الاختراق وتأثير التردد والمادة:

يمكن وصف توزيع التيارات المستحثة داخل الجزء المراد تسخينه اعتمادا على مفهوم تأثير الجلد أو ما يعرف بعمق الاختراق، حيث يمثل هذا الأخير المسافة التي تقطعها الموجة الكهرومغناطيسية داخل الموصل قبل أن تضمحل سعتها بمقدار معين. [17]

فعند تعريض مادة موصلة كهربائيا لمجال مغناطيسي متغير، تتناقص كثافة التيارات المستحثة تدريجيا وبصورة أسية باتجاه داخل المادة، أي كلما زاد البعد عن السطح الخارجي للقطعة [18].

يستخدم مصطلح تأثير الجلد للدلالة على هذا التغير في توزيع كثافة التيارات المستحثة، حيث يتميز هذا التأثير بكمية فيزيائية أساسية تسمى عمق الاختراق للمجال المغناطيسي [11].

تمكننا العلاقة النظرية من تقدير الرتبة التقريبية لعمق الاختراق والتي تعطى بالعلاقة التالية [19]:

$$\delta = {1}\Big/{\sqrt{(\mu_0 . \mu_x . f\pi\sigma)}} \qquad (13.2)$$

حيث:

$\mu_o = 4\pi 10^{-7}$: نفاذية الفراغ [H/m].

μ_r: النفاذية المغناطيسية النسبية الخاصة بكل مادة.

σ: الموصلية الكهربائية للمعدن.

f: تردد المصدر.

حيث نجد أن عمق الاختراق يعتمد على f، ينخفض العمق مع زيادة التردد فهما يشكلان علاقة عكسية التردد.

طبيعة المادة:

تلعب الخصائص المغناطيسية والكهربائية للمادة (μ_r،σ) دورا حاسما في تحديد عمق الاختراق، حيث أن الموصلية σ والنفاذية المغناطيسية يشكلان علاقة عكسية مع عمق الاختراق، أي كلما زادت قيمهم كل ما قلّ عمق الاختراق [2].

يلخص الجدول (1.2) رتب مقدار δ لعدة مواد عند ترددات مختلفة:

الجدول (1.2): بعض قيم عمق الاختراق معبّر عنها بالـ mm [17].

التردد (Hz)	الفولاذ (20°C)	الفولاذ (800°C)	النحاس (20°C)	النحاس (800°C)	الألمنيوم (20°C)	الألمنيوم (500°C)	الجرافيت (20_1300°C)
50	3,18	67,2	9,35	19,4	11,9	19,4	201
102	2,25	47,5	6,61	13,4	8,4	13,4	142
103	0,71	14,6	2,09	4,26	2,66	4,26	45
104	0,225	4,75	0,661	1,34	0,84	1,34	14,2
105	0,071	1,46	0,209	0,426	0,266	0,426	4,5
106	0,0225	0,475	0,066	0,134	0,084	0,134	1,42
107	0,007	0,146	0,021	0,043	0,0266	0,043	0,45

2-2-4 المبرد ووحدة التحكم الحراري:

عند مرور التيار الكهربائي في الوشيعة النحاسية ترتفع درجة حرارتها نتيجة المقاومة الأومية والفواقد الطاقوية، لذلك يجب تبريدها لتجنب ارتفاع درجة الحرارة الذي قد يؤدي إلى إتلاف مكونات

الدارة أو التأثير على كفاءة عملها. ومن بين طرق التبريد المستعملة في أنظمة التسخين بالحث التبريد بالمروحة، والذي يعتمد على مبدأ الحمل القسري، حيث يتم دفع الهواء فوق مكونات الدارة لزيادة معدل انتقال الحرارة مقارنة بالحمل الطبيعي.

تعمل المروحة على سحب الهواء البارد من الوسط المحيط وتمريره على العناصر الالكترونية للدارة، فيمتص الهواء جزءًا من الحرارة الناتجة ثم يُطرح إلى الخارج عبر فتحات التهوية. وتزداد فعالية هذا النوع من التبريد بزيادة سرعة تدفق الهواء ومساحة السطح المعرض له.

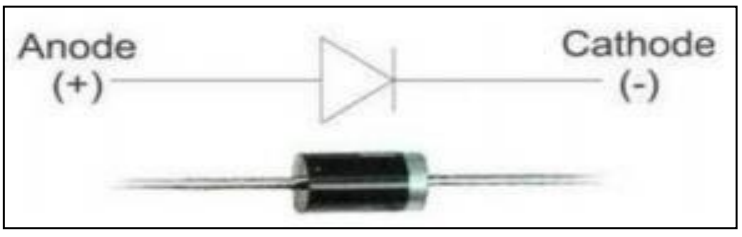
ويساهم التبريد بالمروحة في رفع معامل الحمل الحراري، مما يساعد على خفض درجة حرارة التشغيل وتحسين استقرار الدارة وإطالة العمر التشغيلي للمكونات الإلكترونية.

2-2-5 المقاومات:

تستخدم المقاومات بقيم (Ω470 و10KΩ) من أجل الحد من التيار المسؤول عن شحن بوابات العناصر شبه الموصلة، وذلك لأن زيادة تيار البوابة عن الحد المسموح قد يؤدي إلى تلفها أو التأثير على أدائها [1].

2-2-6 الثنائيات:

تعد ثنائيات الربط المتقاطع من نوع Schottky خيارا مناسبا، شريطة أن يكون تصنيف الجهد متوافقا مع جهد مصدر التغذية مع مراعاة الزيادة الناتجة عن ظاهرة الرنين. يمكن الحصول على هذه الثنائيات من مزودات القدرة التبديلية القديمة، كما أنها متوفرة تجاريا بتصنيفات جهد تفوق 200 فولت [1]، وهذا ما يمثله الشكل (9.2).

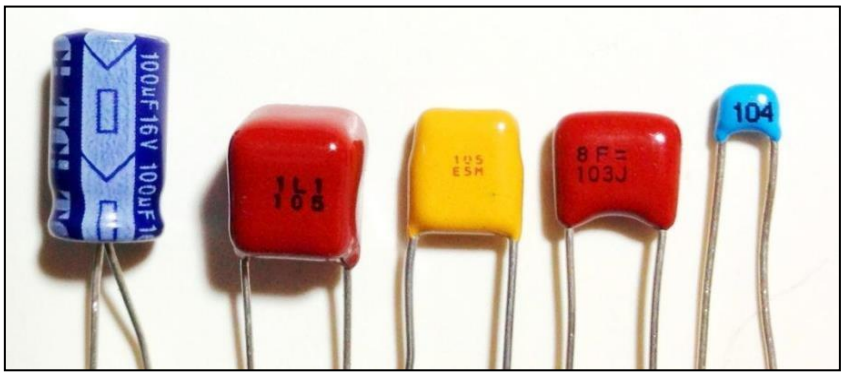


الشكل (9.2): الثنائيات [15].

2-2-7 المكثفات:

العنصر الأساسي في دائرة الرنين هو مكثف ذو جودة عالية قادر على تحمل تيارات متناوبة كبيرة. ولهذا الغرض، يفضل اختيار مكثف Polypropylene معدني من نوع "MKS"، بحيث يكون تصنيف

الجهد الخاص به لا يقل عن أربعة أضعاف جهد مصدر التغذية، لضمان التشغيل الآمن والاستقرار في الأداء [1]، كما هو موضح في الشكل (10.2).

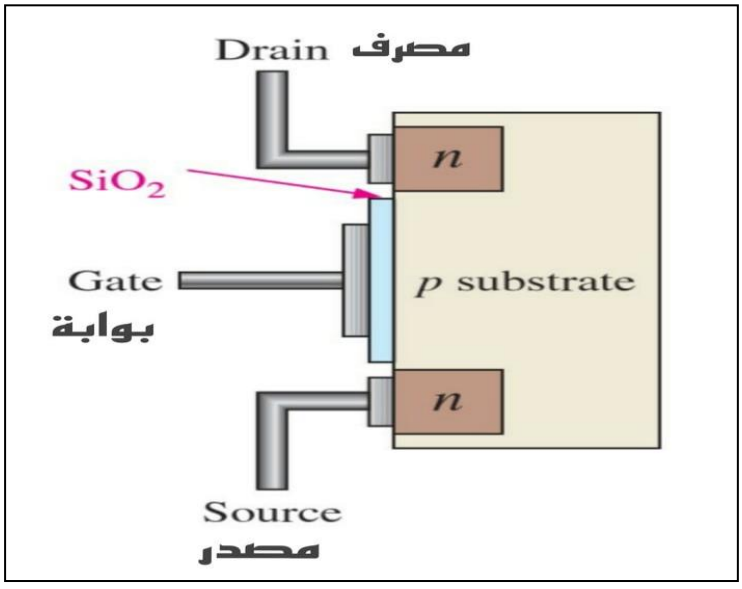


الشكل (10.2): المكثفات [15] .

8-2-2 ترانزستور MOSFET:

يعد ترانزستور تأثير المجال من نوع معدن _أكسيد_ شبه موصل (MOSFET) أحد أكثر أنواع ترانزستورات تأثير المجال شيوعا، ويتم تصنيعه عادة عبر أكسدة السيليكون بطريقة محكمة. يتميز هذا العنصر بوجود بوابة معزولة كهربائيا، حيث يتحكم جهد البوابة في درجة موصلية القناة وبالتالي في قيمة التيار المار داخل الجهاز.

في MOSFET ذي القناة n، تتشكل قناة من النوع n بين المصدر والمصرف، ويتكون العنصر من أربعة أطراف رئيسية هي: البوابة (Gate)، المصرف (Drain)، المصدر (Source)، والركيزة أو الجسم (Substrate)، انظر الشكل (11.2).



الشكل (11.2): ترانستور [15].

تكون الركيزة من النوع p، في حين يطعم كل من المصدر والمصرف تطعيما عاليا من النوع N+. عند تطبيق جهد موجب على البوابة، تتنافر الفجوات الموجودة أسفل طبقة الأكسيد وتتجه نحو داخل الركيزة، بينما تنجذب الإلكترونات لتكوين قناة ناقلة بين المصدر والمصرف. ويعود اسم القناة N إلى أن التيار ينتج عن حركة الإلكترونات سالبة الشحنة.

وعند تطبيق فرق جهد بين المصدر والمصرف، ومع وجود جهد بوابة موجب كاف، تتشكل قناة غنية بالإلكترونات تسمح بمرور التيار. وبما أن حركة الإلكترونات أسرع من حركة الفجوات، فإن MOSFET ذو القناة N يستعمل غالبا أكثر من MOSFET ذي القناة P، مع العلم أن كلا النوعين يعتمد في عمله على جهد البوابة للتحكم في التوصيل[1].

3-2 النموذج الحراري:

1-3-2 أنماط انتقال الحرارة:

هناك ثلاث طرق لانتقال الحرارة، الحمل الحراري، والإشعاع، والتوصيل الحراري.

أكثر طرق انتقال الحرارة شيوعا في التسخين غير المباشر بواسطة التوصيل الكهربائي أو الحث الكهرومغناطيسي هو التوصيل الحراري. [18]

1-1-3-2 التوصيل الحراري:

يعرف التوصيل الحراري بأنه انتقال الحرارة من المناطق ذات درجة الحرارة الأعلى إلى المناطق الأقل حرارة داخل نفس الجسم، أو بين جسمين متلامسين، دون حدوث حركة ملحوظة للمادة.

يظهر هذا النمط أساسا في المواد الصلبة المتجاورة. أمّا في السوائل والغازات، فإن مساهمة التوصيل تكون غالبا ضعيفة مقارنة بآلية الحمل الحراري.

كما يمثل التوصيل الحراري الآلية التي يتم عبرها تبادل الحرارة بين جسمين من خلال جدار فاصل، وهو ما يتجلى بوضوح في عمل المبادلات الحرارية[21,20].

2-1-3-2 الحمل الحراري:

يمكن نقل الطاقة الحرارية بواسطة حركة أو تدفق مائع (سائل أو غاز)، حيث يرتبط انتقال الحرارة بحركة المائع نفسه. ومن ثم فإن الحرارة في الموائع تنتقل أساسا بالحمل الحراري.

وينقسم الحمل الحراري إلى نوعين أساسيين[22]:

حمل حراري قسري

حمل حراري طبيعي

ويعبر عن التدفق الحراري ϕ الذي ينقله مائع بدرجة حرارة من سطح مساحته S ودرجة حرارته T بالعلاقة:

$$\emptyset = hS(T - T^0) \qquad (14.2)$$

حيث يمثل h معامل انتقال الحرارة بالحمل [22].

2-3-1-3 الإشعاع:

يتم انتقال الحرارة بالإشعاع الحراري عبر موجات أو اهتزازات كهرومغناطيسية قادرة على الانتشار دون الحاجة إلى وسط مادي.

ويشير مفهوم الإشعاع إلى عملية انبعاث أو امتصاص الطاقة الكهرومغناطيسية [20.21].

2-3-2 معادلة الحرارة:

تعدّ دراسة انتقال الحرارة ضرورية لفهم كيفية انتشار الحرارة داخل القطعة المعدنية بعد توليدها بواسطة التيارات الدوامية. فبعد تحول الطاقة الكهرومغناطيسية إلى طاقة حرارية داخل المعدن، تنتقل الحرارة من المناطق الأكثر سخونة إلى المناطق الأقل حرارة عبر ظاهرة التوصيل الحراري. ومن هنا تبرز أهمية قانون فوريه، الذي يُستخدم لوصف انتقال الحرارة داخل المادة وتحليل التوزيع الحراري أثناء عملية التسخين بالحث.

2-3-2-1 قانون فوريه:

في الأوساط المعتمة، يكون انتقال الحرارة مقتصرا على آلية التوصيل الحراري.

وينص قانون فوريه على أن متجه كثافة التدفق الحراري ϕ يتناسب طرديا مع تدرج درجة الحرارة T، ويكون اتجاهه معاكسا لاتجاه هذا التدرج [22]:

$$\vec{\phi} = -\lambda \nabla T \qquad (15.2)$$

حيث تمثل λ معامل الناقلية الحرارية للوسط، ويعبر عنها بوحدة($W .m^{-1}.K^{-1}$)[22].

2-4 تصميم السخان:

2-4-1 اختيار تردد العمل:

يتم اختيار تردد العمل في نظام التسخين بالحث اعتماداً على عدة عوامل أهمها نوع المعدن، أبعاد القطعة المراد تسخينها، وعمق التسخين المطلوب. ويؤثر التردد بشكل مباشر على عمق اختراق التيارات الدوامية داخل المعدن وعلى كفاءة التسخين [23].

بشكل عام:

الترددات المرتفعة تؤدي إلى تركّز التيارات الدوامية قرب سطح المعدن نتيجة تأثير الجلد (Skin Effect)، لذلك تُستخدم في التسخين السطحي والمعالجات الحرارية السريعة [23].

الترددات المنخفضة تسمح باختراق أعمق للتيارات داخل القطعة المعدنية، مما يجعلها مناسبة لتسخين القطع السميكة أو للحصول على تسخين حجمي [23].

ويرتبط عمق الاختراق بالتردد بالعلاقة (13.2) المذكورة سابقا، ومن هذه العلاقة نلاحظ أن زيادة التردد تؤدي إلى تقليل عمق الاختراق.

عملياً يتم اختيار التردد وفق ما يلي [23]:

من 50Hz إلى 10KHz~: للقطع الكبيرة والتسخين العميق.

من 10KHz إلى 1000KHz~: للتسخين المتوسط والمعالجات الحرارية.

من 1000KHz إلى MKz~: للتسخين السطحي والقطع الصغيرة جداً.

كما يجب أن يكون تردد التشغيل متوافقاً مع محاثة الوشيعة، سعة المكثفات وتردد الرنين للدارة.

2-4-2 تحديد قطر الوشيعة وعدد لفاتها:

تحديد قطر وشيعة العمل وعدد لفاتها يتم وفق أبعاد القطعة المراد تسخينها، نوع المعدن، عمق التسخين المطلوب، وتردد التشغيل. ويعتمد التصميم أساساً على تحقيق أفضل اقتران كهرومغناطيسي بين الوشيعة والقطعة المعدنية مع تقليل الفواقد [23].

1-2-4-2 تحديد قطر الوشيعة:

يجب أن يكون القطر الداخلي للوشيعة أكبر بقليل من قطر القطعة المراد تسخينها، وذلك للسماح بمرور المجال المغناطيسي بكفاءة مع الحفاظ على مسافة اقتران صغيرة. في التطبيقات العملية، تكون المسافة الهوائية بين الوشيعة والقطعة صغيرة نسبياً من أجل تحسين انتقال الطاقة وتقليل تشتت المجال المغناطيسي. فكلما اقتربت الوشيعة من القطعة ازدادت كثافة التيارات الدوامية وارتفعت سرعة التسخين [23].

2-2-4-2 تحديد عدد اللفات:

يُختار عدد اللفات تبعاً لطول منطقة التسخين والقدرة المطلوبة. فالعدد القليل من اللفات يولد مجالاً مغناطيسياً مركزاً وشدة تيار مرتفعة، مما يناسب التسخين السريع الموضعي. أما زيادة عدد اللفات فتؤدي

إلى زيادة المحاثة وتحسين توزيع المجال المغناطيسي على طول أكبر، لكنها قد ترفع المقاومة والخسائر الكهربائية [23].

2-4-3 حساب معامل الحث (Inductance):

تُعرَّف المحاثة بأنها الخاصية الفيزيائية التي تُبدي من خلالها وشيعة العمل معارضةً لأي تغير في شدة التيار الكهربائي المار فيه. وتعتمد قيمة المحاثة على الأبعاد الهندسية للوشيعة وطبيعة تركيبها، حيث تُشتق العلاقات الرياضية الخاصة بحسابها من النظرية الكهرومغناطيسية، وتُورد عادةً في المراجع المتخصصة في الهندسة الكهربائية. بالنسبة للوشيعة اللولبية، تتحدد المحاثة بعدد اللفات، وطول السلك، ومساحة مقطعه العرضي، بالإضافة إلى نفاذية المادة المكوِّنة للقلب المغناطيسي [13]، وفق العلاقة التالية:

$$L = \frac{N^2 \mu A_I}{l} \qquad (16.2)$$

حيث:

N: هو عدد اللفات.

l : هو طول الوشيعة m.

A_I: هو مساحة مقطعه العرضي.

μ: النفاذية المغناطيسية للقلب.

ومن ثمّ، يمكن زيادة قيمة المحاثة من خلال زيادة عدد اللفات، أو استخدام قلب ذي نفاذية مغناطيسية مرتفعة، أو زيادة مساحة المقطع العرضي، أو تقليل طول السلك.

تتوفر الوشائع الكهربائية تجارياً بقيم وأنواع متعددة، حيث تتراوح قيم المحاثة العملية من عدة ميكروهينري في تطبيقات أنظمة الاتصالات، إلى عشرات الهينري في أنظمة القدرة الكهربائية. وقد تكون هذه الوشائع ثابتة أو متغيرة، كما يمكن أن تُصنع قلوبها من مواد مختلفة مثل الحديد، أو الفولاذ، أو البلاستيك، أو الهواء، تبعاً لطبيعة التطبيق المطلوب. ويُستخدم كذلك مصطلحا الملف والخانق للدلالة على وشيعة العمل الكهربائية في بعض التطبيقات الهندسية [13].

2-4-4 اختيار مكثفات للحصول على الرنين (Resonance):

يتم اختيار المكثفات في دارة التسخين بالحث بهدف تحقيق حالة الرنين الكهربائي مع وشيعة العمل، وذلك لضمان انتقال أعظم قدرة ممكنة وتقليل الفواقد. تعتمد عملية الاختيار أساساً على قيمة محاثة الوشيعة والتردد المطلوب للتشغيل [24].

تتحقق حالة الرنين في دارة LC عندما يتساوى المفاعلان الحثي والسعوي، ويُعطى التردد الرنيني بالعلاقة (1.2)، ومنها يمكن حساب سعة المكثف المطلوبة.

يتم اختيار المكثفات عملياً وفق الخطوات التالية [24]:

2-4-4-1 تحديد التردد المطلوب:

يُختار حسب نوع المعدن وعمق التسخين المطلوب، إذ تُستخدم الترددات المرتفعة للتسخين السطحي، بينما تُستخدم الترددات المنخفضة للتسخين العميق.

2-4-4-2 حساب محاثة الوشيعة:

تُحسب أو تُقاس قيمة محاثة وشيعة العمل.

2-4-4-3 حساب السعة المناسبة:

يتم تعويض قيمة L والتردد f في معادلة الرنين للحصول على قيمة C.

2-4-4-4 اختيار مكثفات تتحمل الجهد والتيار:

في التسخين بالحث تمر تيارات عالية داخل الدارة الرنانة، لذلك تُستخدم عادةً مكثفات خاصة عالية التردد مثل:

- Polypropylene Capacitors
- MMC Capacitors
- Water-cooled Capacitors في الإستطاعات العالية.

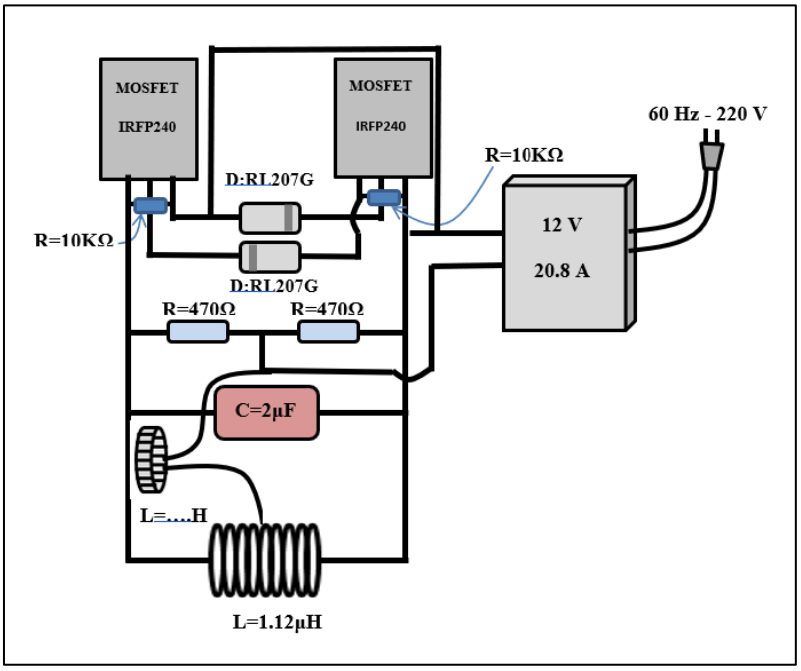
2-4-4-5 الربط التسلسلي أو التفرعي للمكثفات:

للحصول على القيمة المطلوبة بدقة وتحمل جهد أعلى، يمكن ربط عدة مكثفات:

- على التوازي لزيادة السعة.
- على التسلسل لزيادة تحمل الجهد.

2-4-5 مخطط الدارة الكهربائية العملية للسخان:

من أجل إنجاز فرن الحث الكهرومغناطيسي، تم تصميم مخطط كهربائي يوضح كيفية ربط وتركيب مختلف العناصر الإلكترونية المستعملة داخل الدارة. ويُعد هذا المخطط خطوة أساسية لفهم مبدأ عمل النظام وضمان التناسق بين مكوناته، حيث يبين مسار التيار الكهربائي وطريقة توصيل عناصر القدرة والتحكم والحماية للحصول على تشغيل مستقر وفعّال للفرن الحثي. كما يساعد المخطط على تسهيل عملية التركيب العملي والكشف عن الأعطال المحتملة أثناء التشغيل.



الشكل (12.2): مخطط الدارة الكهربائية للسخان.

2-5 تطبيقات التسخين بالحث الكهرومغناطيسي:

لتسخين بالحث الكهرومغناطيسي عدة تطبيقات واستخدامات في كل من البيئات السكنية والتجارية [1]، وتتمثل هذه التطبيقات في:

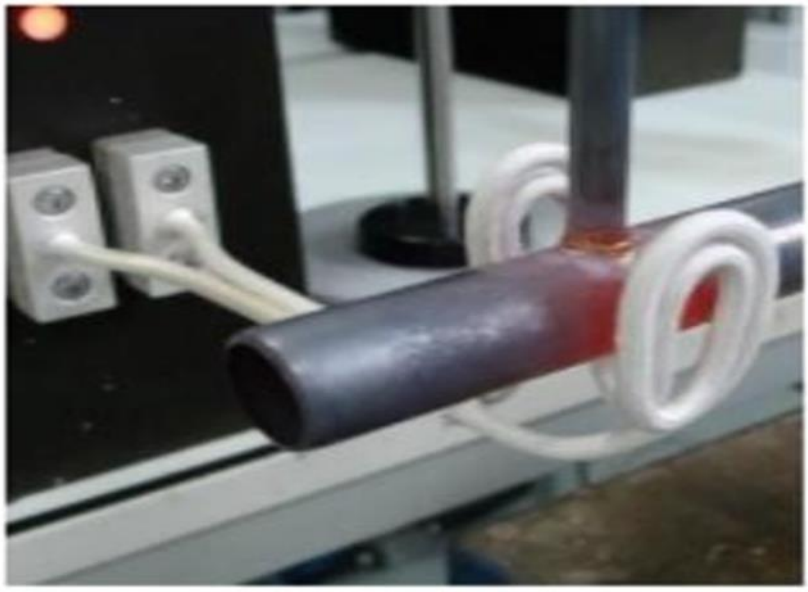
2-5-1 صهر المعادن:

تُستخدم أفران الحث للحفاظ على المعادن المنصهرة عند درجة حرارة ثابتة ولإجراء عمليات الصهر. ومن أشهر أنواعها أفران البوتقة، التي تتكون من وشيعة مبردة بالماء تحيط ببطانة حرارية تحتوي على المادة المراد صهرها. وتُستعمل هذه الأفران في صهر سبائك الألمنيوم والنحاس وإنتاج أنواع خاصة من الفولاذ وحديد الزهر.

أما أفران القناة فتتكون من حوض معدن منصهر متصل بقناة محاطة بدارة مغناطيسية ومحث كهربائي، وتُستخدم في صهر وتخزين السبائك المعدنية وحفظ الفولاذ وحديد الزهر [1].

2-5-2 تلحيم الأجزاء المعدنية:

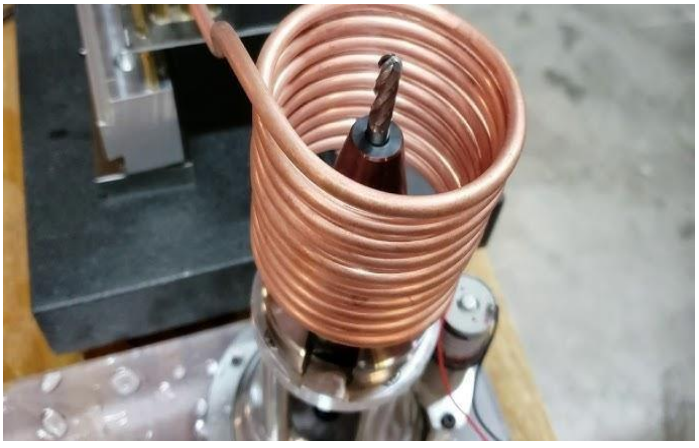
تُعرَّف عملية اللحام بأنها ربط جزأين معدنيين متجاورين من خلال صهر الحواف المتقابلة بينهما. ويتميز اللحام بالحث بعدة مزايا، أهمها إمكانية التسخين الموضعي بدقة، وارتفاع الكفاءة الطاقوية، إضافةً إلى سهولة التحكم في العملية وتنظيمها وإدماجها ضمن الأنظمة الآلية [15]، كما مبين في الشكل (13.2).



الشكل (13.2): تلحيم الأجزاء المعدنية [15].

3-5-2 التركيب بالتقلص الحراري:

يُعتبر التركيب بالتقلص الحراري إحدى طرق التجميع الميكانيكي المستخدمة في التثبيت بالتداخل، حيث تعتمد العملية على تمدد الجزء بفعل التسخين ثم انكماشه موضعيًا بعد التبريد لضمان تثبيت الأجزاء بإحكام، انظر للشكل (14.2).



الشكل (14.2): وصلة التقلص الحراري [15].

4-5-2 التسخين قبل التشكيل والطرق:

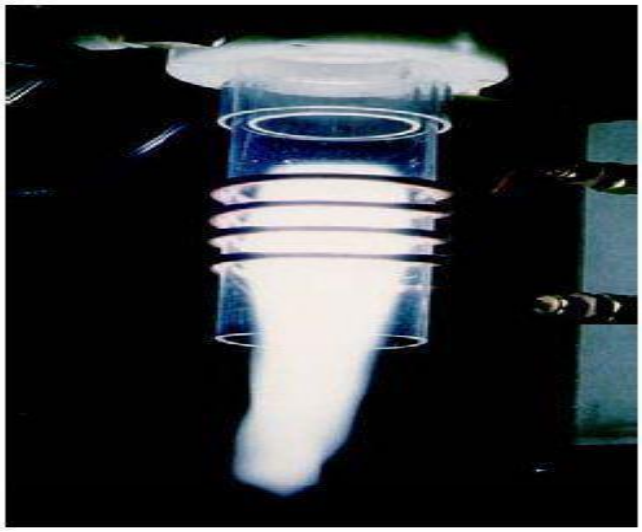
يشهد التسخين بالحث انتشارًا متزايدًا في التطبيقات الصناعية بفضل قدرته على تسخين أجزاء محددة من القطع المعدنية بدقة عالية، مع تقليل خسائر الأكسدة وتحسين الإنتاجية. كما يتميز بسرعة التسخين وكفاءته في استهلاك الطاقة، إضافةً إلى دقته العالية في التحكم بدرجة الحرارة [1].

2-5-5 الصناعة الكيميائية:

يُستخدم التسخين بالحث في تسخين جدران المفاعلات الكيميائية.

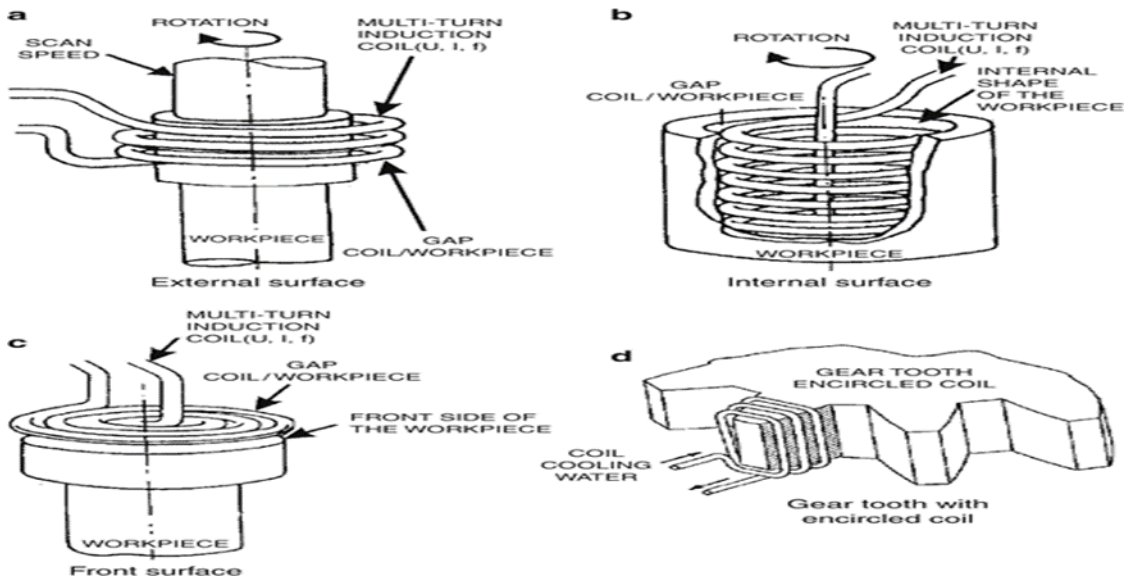
2-5-6 بلازما الحث:

بلازما الحث هي بلازما يتم توليدها باستخدام الحث الكهرومغناطيسي، حيث يُستعمل مجال مغناطيسي متناوب عالي التردد لتأيين الغاز وتحويله إلى بلازما ذات درجة حرارة مرتفعة. انظر لشكل (15.2).



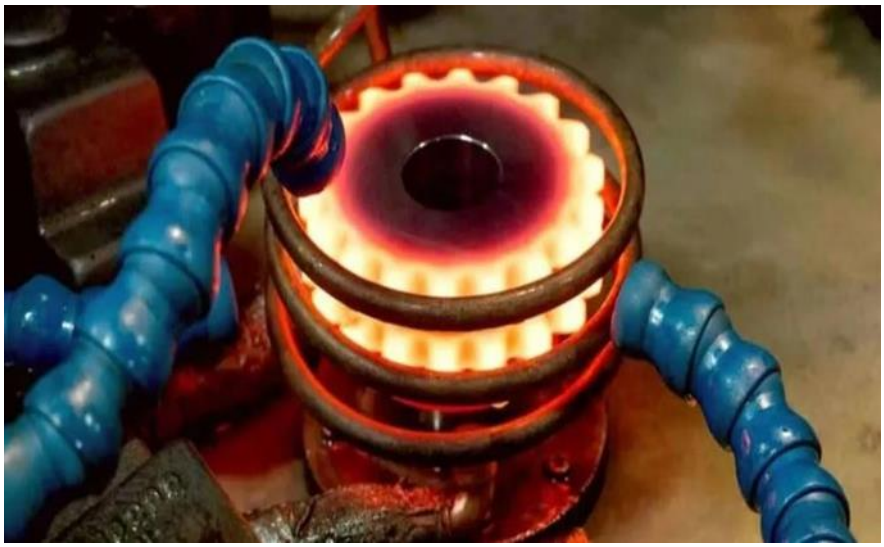
الشكل (15.2): بلازما الحث [15].

2-5-7 المعالجة الحرارية السطحية:



الشكل (16.2): المعالجة الحرارية السطحية [15].

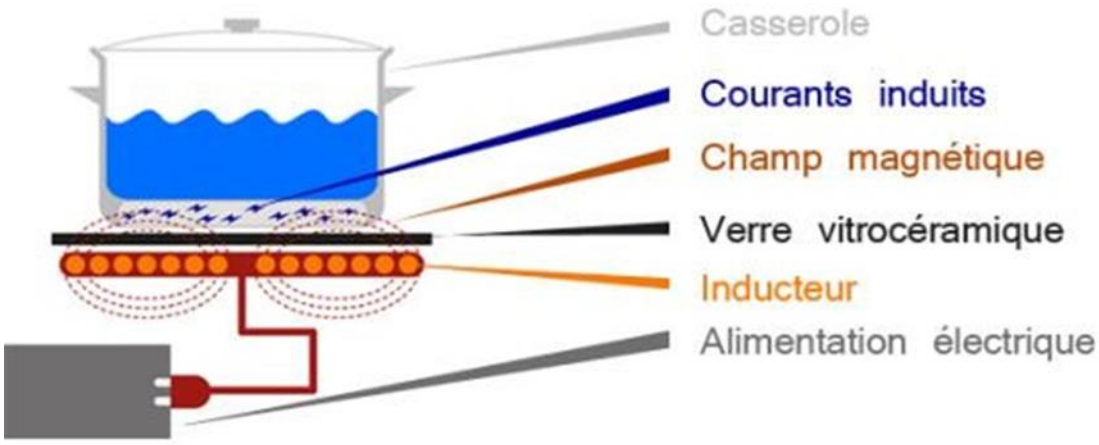
يُستخدم التسخين بالحث للحصول على بنية غير متجانسة، حيث يتم تسخين سطح القطعة فقط مع الحفاظ على خصائص القلب الداخلي، ثم يُتبع ذلك بعملية تبريد بالهواء أو الماء تؤدي إلى تبريد السطح [1]. إليك الشكل الآتي (17.2).



الشكل (17.2): المعالجة الحرارية السطحية [15].

2-5-8 الطهي بالحث (موقد الطهي):

عند وضع مقلاة أو وعاء معدني مصنوع من مادة فيرومغناطيسية فوق سطح الطهي، تتولد داخله تيارات دوامية مستحثه بسبب وجود محث مسطح أسفل الموقد مباشرة. وينتج ذلك عن المجال المغناطيسي المتناوب الذي تولده وشيعة المحث عند ترددات في حدود عدة كيلوهرتز، مما يؤدي إلى تسخين الوعاء مباشرة، هذا ما يوضحه الشكل (18.2).



الشكل (18.2): الطهي بالحث [15].

2-6 مزايا وعيوب التسخين بالحث الكهرومغناطيسي:

2-6-1 مزايا التسخين بالحث:

يتميز التسخين بالحث بعدة مزايا تجعله من التقنيات الحديثة والفعالة في التطبيقات الصناعية، ومن أهمها [25]:

- إمكانية التحكم الدقيق في توزيع الحرارة وتسخين الجزء المطلوب فقط، حيث تنتقل الحرارة داخل الجسم بسرعة أكبر مقارنة بطرق التسخين التقليدية المعتمدة على الحمل الحراري.
- القدرة على تسخين الأجزاء التي يصعب الوصول إليها، مثل القطع المعدنية المدمجة داخل الخشب أو مادة البولي فينيل كلوريد (PVC) أو داخل الفراغات الضيقة.
- توفير بيئة عمل أنظف وأكثر أمانًا، إذ يقل انبعاث الأوساخ والأبخرة مقارنة بوسائل التسخين التقليدية.
- تحقيق مردودية وفعالية طاقوية مرتفعة نتيجة انخفاض ضياع الحرارة وتقليل الانبعاثات الحرارية.

2-6-2 عيوب التسخين بالحث:

رغم مزاياه العديدة، إلا أن التسخين بالحث يتضمن بعض السلبيات، من بينها [25]:

- في حال سوء التحكم في النظام، قد تتعرض أجزاء غير مرغوب فيها للتسخين، لذلك يُلجأ غالبًا إلى أنظمة التبريد بالماء أو العزل الحراري لتفادي هذه المشكلة.
- ارتفاع تكلفة اقتناء وتجهيز الأنظمة ذات الاستطاعات العالية مقارنة ببعض وسائل التسخين الأخرى.

- إمكانية تولد مجالات كهرومغناطيسية قد تؤثر في الأجهزة أو البيئة المحيطة، خاصة عند ضعف العزل أو عدم توفر حماية كافية ضد الترددات العالية.

7-2 الخاتمة:

من خلال هذا الفصل تم التطرّق إلى المبادئ الأساسية الخاصة بتصميم دارة التسخين بالحث الكهرومغناطيسي، مع دراسة أهم العناصر الكهربائية والحرارية المؤثرة في كفاءة عمل النظام واستقراره. كما تم إبراز المعايير المعتمدة في اختيار مكونات الدارة وتحقيق شروط الرنين المناسبة للحصول على أداء جيد وتقليل الفواقد.

وتُشكّل النتائج المتوصل إليها في هذا الفصل قاعدةً أساسية للانتقال إلى الجانب التطبيقي، حيث سيتم في الفصل الموالي عرض مراحل تركيب الجهاز عمليًا، مع تقديم القياسات والتجارب المنجزة وتحليل النتائج المحصل عليها للتحقق من فعالية النظام المصمم.

.

الفصل الثالث: تصنيع الجهاز ودراسة خصائصه

1-3 مقدمة:

يتناول هذا الفصل عرضا شاملا لمختلف مراحل انجاز نظام التسخين بالحث، بدءا من التصميم، مرورا بمرحلة الإنجاز العملي، ووصولا الى الاختبار والتشغيل. وقد تم اعتماد منهجية دقيقة تهدف إلى ضمان جودة الأداء وتحقيق التوافق مع المتطلبات التقنية، كما تجدر الإشارة إلى أن تنفيذ هذا المشروع واجه بعض الصعوبات العملية، لا سيما فيما يتعلق بتوفير المكونات الإلكترونية اللازمة، حيث تم الاعتماد جزئيا على استخراج بعض العناصر من بطاقات إلكترونية لأجهزة أخرى نظرا لعدم توفرها في الأسواق المحلية. وقد تم اختيار هذه المكونات لتتوافق مع متطلبات الدارة وتحقيق الأداء المطلوب.

2-3 بنية النظام:

تمثل بنية النظام الإطار العام الذي يوضح كيفية تنظيم مكوّنات منظومة التسخين بالحث وطبيعة ترابطها فيما بينها. إذ يتكوّن النظام من مجموعة من الوحدات الإلكترونية التي تعمل بشكل متكامل ومتناغم، حيث تؤدي كل وحدة وظيفة محددة ضمن سلسلة تحويل الطاقة. ويهدف هذا التنظيم إلى ضمان انتقال الطاقة بشكل فعّال من مصدرها إلى غاية تحويلها إلى طاقة حرارية داخل القطعة المراد تسخينها. وسيتم فيما يلي تقديم وصف تفصيلي لمختلف مكوّنات النظام وآلية عمل كل منها.

3-3 مراحل تصنيع الجهاز:

1-3-3 المرحلة الأولى: تحضير عناصر الدارة

1-1-3-3 وصف مصدر القدرة المستخدم:

في هذه التجربة استخدمنا مصدر قدرة من نوع مزود طاقة تحويلي (Switching Power Supply)، موديل RC_250W_12L، انظر الشكل (1.3)، فهو يقوم بتحويل الطاقة الكهربائية من تيار متناوب (AC) إلى تيار مستمر (DC) حيث يتكون من:

المدخل (Input): " 180_240 فولط AC، وتردد 50_60 هرتز "

يتمثل المدخل في:

- طور (Phase/Live-L): يمثل الجهد الحي من مصدر التيار المستمر.
- محايد (Neutral-N): يمثل خط الرجوع في الدارة الكهربائية.
- الأرضي (Ground/Earth-PE): يستخدم لأغراض السلامة وحماية من التسربات.

المخرج DC (Output): "12 فولط _أمبير20.8 "

يحتوي على ثلاثة مخارج:

- ثلاثة أطراف موجبة(V+): تمثل القطب الموجب للجهد المستمر.
- ثلاثة أطراف سالبة(V-): تمثل القطب السالب للجهد المستمر.

الشكل (1.3): مصدر القدرة.

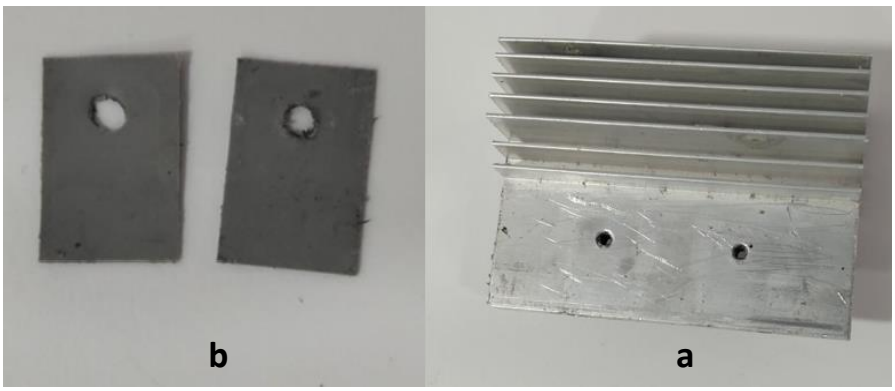
2-1-3-3 الترانزستور MOSFT:

نستخدم ترانزستورات من نوع MOSFT في دارة الحث وذلك من أجل تشكيل دارة العاكس (Inverter)، حيث يعمل الترانزستور كمفتاح الكتروني (Switch)، فعندما يطبق جهد عليه يعمل (ON) فيمر التيار وعند إزالته يتوقف (OFF) فينقطع التيار، ونحصل على تشغيل وإيقاف سريع جدا وهذا ما يولد التيار المتناوب.

في دارات الحث الكهرومغناطيسي، ترانزستور واحد لا يكفي لهذا نستخدم ترانزستورين، فعندما يشتغل الترانزستور الأول يمر التيار في اتجاه معين، وعندما يشتغل الترانزستور الثاني ينعكس اتجاه التيار. تتكرر العملية آلاف المرات في الثانية فيتولد تيار متناوب (AC) عالي تردد.

تم اختيار الترنزستور من نوع" IRFP240" نظرا لخصائصه المتقدمة في التبديل السريع وانخفاض مقاومته الداخلية، ممّا يقلل من الفقد في الطاقة ويرفع من كفاءة عملية الحث الكهرومغناطيسي، وهو موضح في الشكل (2.3). وتكمن أهميته الجوهرية في قدرته على معالجة التيارات العالية مع الحفاظ على استقرار التردد المطلوب لتوليد المجال المغناطيسي المتغير. وللحفاظ على هذا الأداء التقني ومنع الانهيار الحراري، تم تثبيت ترانستور على مبدد حراري موضح في الشكل (a 3.3) مع ادراج رقاقة عازلة الظاهرة في نفس الشكل(b 3.3) بينهما حيث تعمل هذه الرقاقة كحاجز عازل يمنع التلامس الكهربائي بين جسم الترانزستور والمبدد، ممّا يوفر بيئة تشغيل آمنة ومستقرة للمكون الإلكتروني.

الشكل (2.3): الترانزستور.



الشكل (3.3): المبدد الحراري (a)والرقاقات العازلة(b).

3-1-3-3 دارة العاكس:

تتكون دارة العاكس للجهاز المصنع من: مصدر تغذية مستمرRC_250W_12L (DC)، وعناصر تبديل إلكترونية الترانزستورات MOSFET من نوع IRFP240، دارة تحكم لتوليد إشارات التشغيل، إضافة إلى عناصر حماية المقاومات (470Ω و10KΩ) والديودات (من نوع RL207G).

تعتبر القلب النابض لنظام التسخين بالحث، حيث تكمن وظيفتها الأساسية في تحويل التيار المستمر (DC) بعد تصفيته الى تيار متردد (AC) ذو ترددات عالية جدا. وتكمن وظيفتها في توليد مجال مغناطيسي متغير بصفة مستمرة، وهو ما يسمح بنشوء التيارات الدوامية داخل المعدن. ويؤدي التردد الذي يوفره العاكس دورا حاسما في تحديد عمق الاختراق، حيث يتحكم في مدى تغلغل الحرارة داخل المادة او توزعها على السطح.

3-1-3-4 المقاومات:

تؤدي المقاومات الموضحة في الشكل (4.3) دورًا أساسيًا في هذه الدارة، حيث تساهم في التحكم في التيار والجهد وضمان استقرار عمل الترانزستورات. فقد تم استخدام مقاومات بقيمة 10KΩ كيلوأوم بين البوابة (Gate) والمصرف (**Drain**) لكل ترانزستور، وذلك لتوفير تغذية ذاتية (أي إعادة جزء من الإشارة الناتجة إلى مدخل الدارة) تساعد على تحسين عملية التذبذب وتنظيم الإشارة. كما استُخدمت مقاومات بقيمة 470Ω عند المصدر (**Source**) لكل ترانزستور، بهدف الحد من شدة التيار وحماية العناصر الإلكترونية من التلف، إضافة إلى تحسين استقرار الدارة أثناء التشغيل. وبالتالي فإن اختيار هذه القيم وطريقة ربطها كان ضروريًا لضمان أداء فعال وآمن للنظام.

الشكل (4.3): المقاومات.

5-1-3-3 صمام الثنائي (Diodes):

استخدمنا في هذه الدارة صمامين ثنائيين (Diodes) من نوع RL207G (الشكل (5.3))، حيث يسمح كل ديود بمرور التيار في اتجاه واحد فقط ويمنعه في الاتجاه المعاكس، يؤديان دورا أساسيا في حماية الترانزستورات من الجهود العكسية الناتجة عن وشيعة العمل، مما يساهم في استمرارية التذبذب وتحسين كفاءة الدارة.

الشكل (5.3): الصمام الثنائي.

6-1-3-3 المكثفات:

واجهنا صعوبة في ايجاد المكثفات Polyester Film Capacitor، فتم نزع مكثفتين من مصدر تغذية الحاسوب سعة الواحدة 1µF بجهد تحمل 400V و450V كما هما موضحتين في الشكل (6.3) واستخدمناهما لهذه الدارة، تلعب هذه المكثفات دورا أساسيا في تكوين دارة الرنين مع وشيعة العمل، حيث يتم تبادل الطاقة بين المجالين الكهربائي والمغناطيسي، مما يؤدي إلى توليد تيار متناوب عالي التردد، كما تساهم في زيادة شدة التيار وتحسين كفاءة الدارة.

الشكل (6.3): المكثفات.

7-1-3-3 وشيعة العمل:

وشيعة العمل تمت صناعتها يدويا في المخبر، حيث قمنا بلف سلك نحاسي قطره 2mm عشر لفات متساويات بقطر 2.5mm، انظر للشكل (7.3). نوصله مع مكثفات ليشكل دارة الرنين.

تلعب وشيعة العمل دورا أساسيا في توليد مجال مغناطيسي متغير عند مرور تيار متناوب عالي التردد، يؤدي هذا المجال إلى إحداث تيارات دوامية داخل المعدن، مما ينتج عنه تسخين نتيجة الفقد الحراري، وقد تم اختيار النحاس نظرا لموصليته الكهربائية العالية، أما قطر اللفة فتم اختياره ليتوافق مع القطعة المراد تسخينها، كما تم تحديد عدد اللفات وقطر السلك لتحقيق توازن بين شدة المجال المغناطيسي المتناوب وكفاءة الدارة.

الشكل (7.3): وشيعة العمل.

3-3-1-8 الدارة الرنانة:

تم انشاء دارة الرنين (LC) باستخدام وشيعة العمل ومكثفتين، حيث تم توصيل الوشيعة مع المكثفتين على التوازي. وقد تم اعتماد هذا التوصيل الكهربائي بما يتوافق مع متطلبات عمل الدارة الرنينية.

يؤدي التشغيل عند الرنين إلى تحسين كفاءة نقل القدرة مع تقليل فقد التبديل.

يتحدد تردد الرنين وفق المعادلة (1.2).

تتحقق ممانعة دنيا ونقل أمثل للطاقة إلى المادة عندما يتم ضبط تردد العاكس ليطابق تردد الرنين الطبيعي للنظام.

يستخدم تردد التشغيل المطلوب ومحاثة الملف لضبط قيمة السعة بشكل صحيح.

3-3-1-9 وشيعة الحلقية:

تم استخدام وشيعة حلقية مكونة من سلك نحاسي معزول قطره ملفوف على نواة مغناطيسية دائرية من نوع فيرايت بها 28 لفة، موضحة في الشكل (8.3)، تؤدي هذه الوشيعة دورا في التحكم في التردد والتيار داخل الدارة، كما تساهم في تحسين استقرار النظام وحماية عناصر القدرة من التغيرات المفاجئة في التيار، دون ان تشارك بشكل مباشر في عملية التسخين.

الشكل (8.3): الوشيعة الحلقية.

10-1-3-3 نظام التبريد:

لضمان استقرار النظام وتجنب الارتفاع المفرط في درجات حرارة المكونات النشطة، تم دمج نظام تبريد يعتمد على توزيع مدروس لتدفق الهواء؛ حيث تعمل المروحة العلوية **(a)** ذات التدفق العالي على ضخ تيار هوائي بارد مباشرة نحو المكونات الداخلية، بينما تتولى المروحة الجانبية **(b)** مهمة سحب الهواء الساخن وتصريفه إلى الخارج، كما هو موضح في الشكل (9.3).

يهدف هذا الإجراء التقني إلى الحفاظ على درجات حرارة التشغيل ضمن الحدود الآمنة، مما يضمن ثبات الخصائص الكهربائية للترانزستور وبقية عناصر الدارة، ويمنع أي انحراف في الأداء قد ينتج عن الإجهاد الحراري.

الشكل (9.3): المروحة العلوية (a) والمروحة الجانبية (b).

2-3-3 المرحلة الثانية: تصميم الدارة

بعد تحديد المكونات الأساسية للنظام، تأتي مرحلة تصميم الدارة لدمج هذه العناصر في منظومة متكاملة قادرة على تحويل الطاقة بكفاءة عالية، مخطط الدارة موضح في الشكل (12.2).

3-3-3 المرحلة الثالثة: تركيب الدارة

في هذه المرحلة تم تركيب دارة كهربائية لفرن الحث الكهرومغناطيسي باستخدام مجموعة من المكونات الالكترونية، من بينها مزود طاقة وترانزستورات قدرة وصمامات الثنائية ومكثفات ووشيعة، بالإضافة إلى وشيعة العمل التي تمثل العنصر الأساسي في عملية التسخين. تم اختيار هذه المكونات بعناية لتحقيق التوافق بين عناصر الدارة وضمان عملها بكفاءة واستقرار.

في البداية، تم تثبيت ترانزستورين على المبدد الحراري باستخدام براغٍ معدنية، مع وضع رقاقة عازلة بينهما وبين المبدد، وذلك لتفادي انتقال التيار الكهربائي لضمان العزل الكهربائي مع الحفاظ على كفاءة التبريد.

بعد ذلك، تم تلحيم مقاومتين بقيمة $10k\Omega$ للواحدة بين البوابة (G) والمصدر (S) لكل ترانزستور، ثم ربط مصدري الترانزستورين (S) بواسطة سلك كهربائي لتأمين مرجع مشترك بينهما.

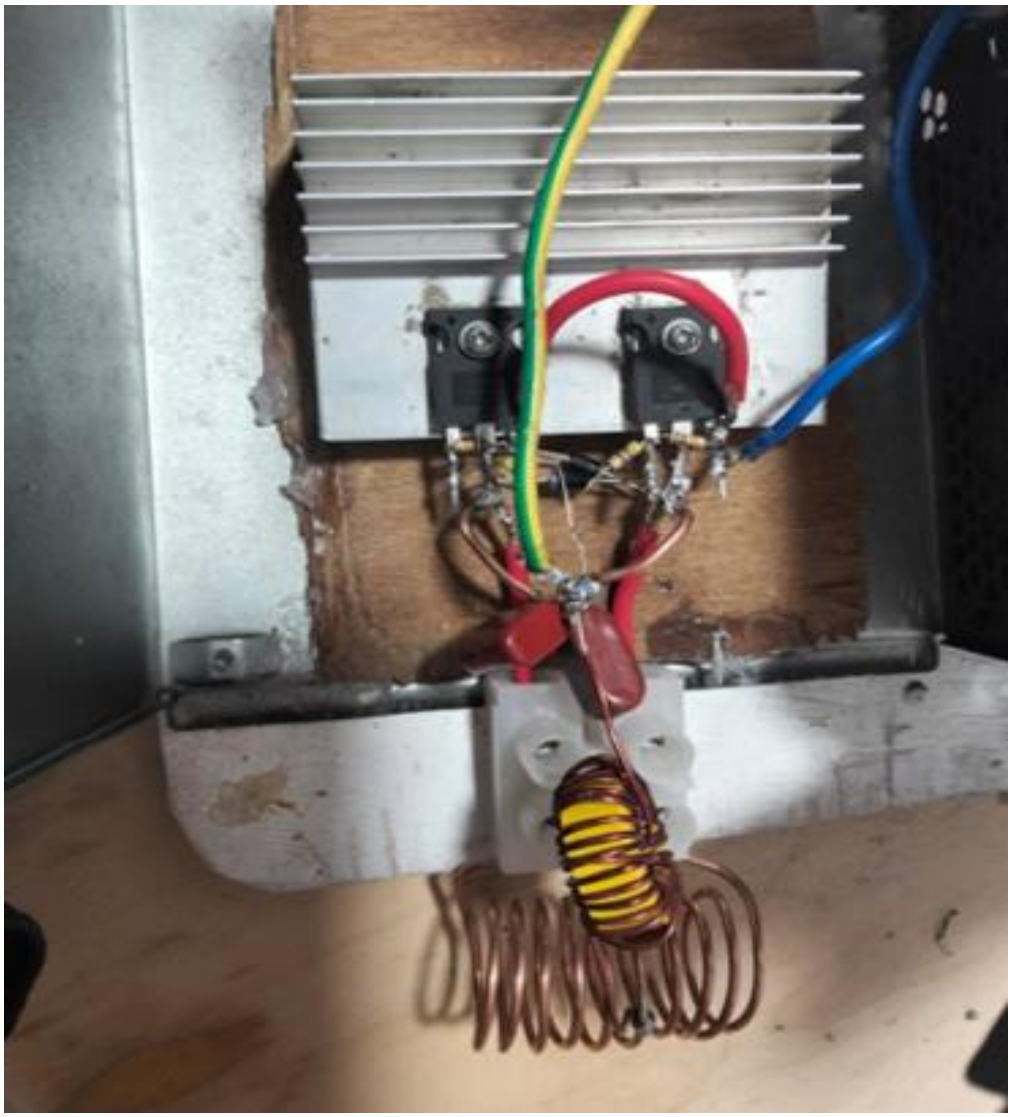
عقب ذلك، تم تركيب صمامين ثنائيين (ديودين) وفق توصيل متعاكس، حيث تم توصيل الصمام الأول بحيث يكون طرفه الكاثودي مرتبطًا بمصرف (D) الترانزستور الثاني، بينما يتصل طرفه الآخر ببوابة (G) الترانزستور

الأول. بالمقابل، تم توصيل الصمام الثاني بطريقة معاكسة، إذ رُبط كاثوده بمصرف الترانزستور الأول، في حين تم توصيل طرفه الآخر ببوابة الترانزستور الثاني، وبذلك تحقق التوصيل العكسي المتبادل بين الصمامين.

لاحقًا، تم ربط مقاومتين بقيمة 470Ω على التوالي، ثم تم توصيل أحد طرفيهما ببوابة الترانزستور الأول والطرف الآخر ببوابة الترانزستور الثاني.

بعد ذلك، تم توصيل مصرفي الترانزستورين (D) بسلكين نحاسيين كلٌ على حد، ثم تم ربط مكثفين على التفرع بين طرفي هذين السلكين. تلا ذلك تثبيت السلكين باستخدام موصل (دومينو)، ومن الجهة الأخرى للموصل تم ربط وشيعة العمل التي تم تصنيعها يدويًا في المخبر.

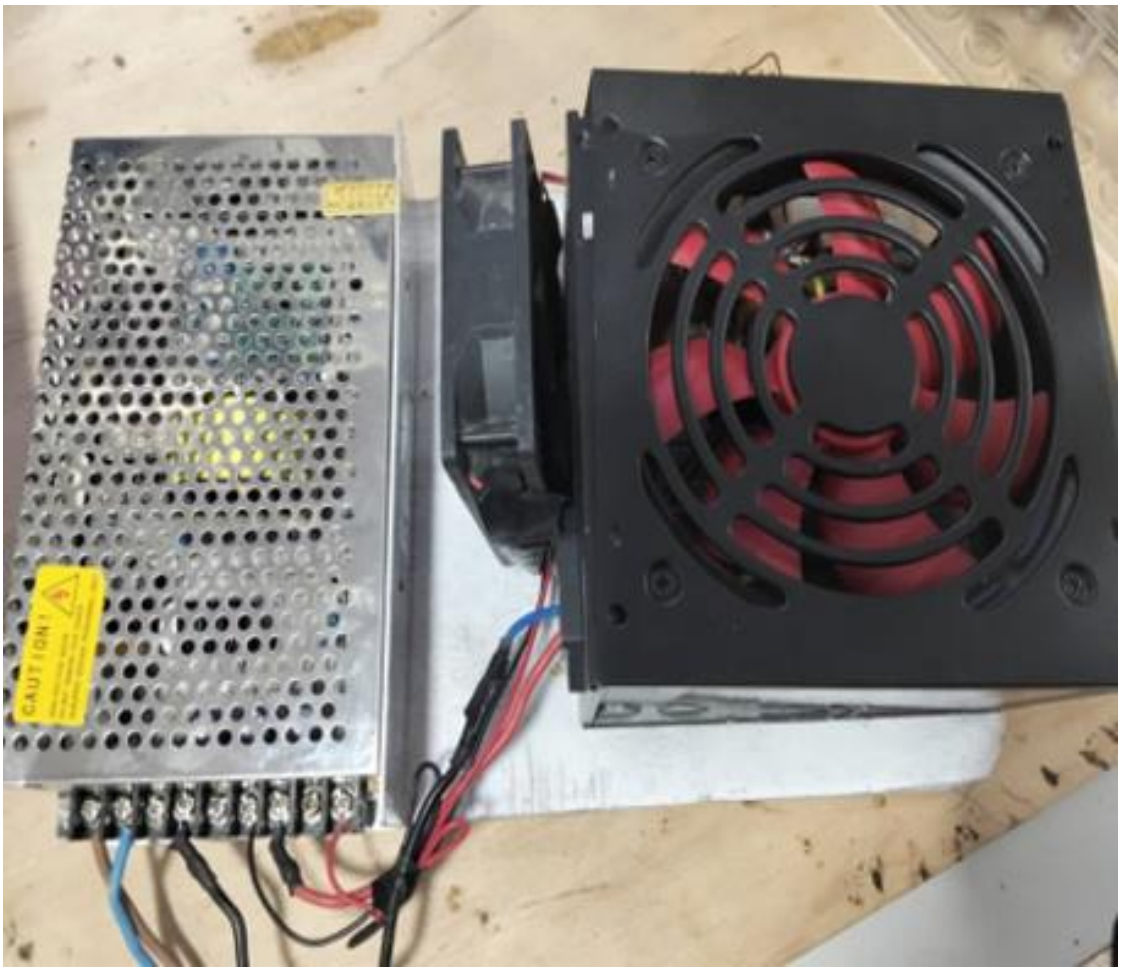
عند اللفة الخامسة من وشيعة العمل (في منتصف الوشيعة)، تم تلحيم وشيعة حلقية، حيث ربط طرفها الآخر بنقطة التقاء المقاومتين، كما تم توصيل سلك إضافي في نفس النقطة لتمرير القطب الموجب لمصدر التغذية. في حين تم توصيل القطب السالب بواسطة سلك إلى مصدر (S) الترانزستور الأول. انظر للشكل (10.3).



الشكل (10.3): جهاز التسخين من الداخل.

في المرحلة النهائية، ثُبتت الدارة الإلكترونية على دعامة خشبية باستخدام مادة السيليكون، ثم تم تثبيتها داخل هيكل وحدة تغذية حاسوب بعد تفريغه من مكوناته الداخلية. يحتوي هذا الهيكل على مروحة علوية تعمل على إدخال الهواء البارد إلى الداخل، وقد تم تعزيز نظام التبريد بإضافة مروحة ثانية موضوعة جانبياً لتسهيل إخراج الهواء الساخن إلى الخارج.

تم تغذية المروحتين بواسطة مصدر بجهد 12V وتيار 3A. كما تم تثبيت مصدر القدرة على الجهة المقابلة من اللوحة، حيث تم توصيل القطب الموجب والسالب وفق القطبية المناسبة. أما طرفا التغذية (الطور والمحايد)، فقد تم ربطهما عبر قاطع كهربائي لضمان إمكانية الربط الآمن مع شبكة الكهرباء المنزلية، كما هو موضح في الشكل (11.3).



الشكل (11.3): جهاز التسخين بالحث الكهرومغناطيسي.

تمت عملية التركيب مع مراعات شروط السلامة الكهربائية وضمان جودة التوصيلات، وذلك للحصول على نظام يعمل بكفاءة واستقرار، يمكن من خلاله دراسة تطبيقات التسخين بالحث الكهرومغناطيسي وتجربته مخبريا.

3-4 أدوات القياس:

3-4-1 جهاز متعدد القياسات:

تم استخدام جهاز متعدد القياسات كما هو مبين في الشكل (12.3) لقياس درجة الحرارة من خلال توصيله بمستشعر حراري، حيث لوحظ أن الجهاز يتميز بسرعة استجابة محدودة نسبيا أثناء تتبع التغيرات الحرارية. كما استخدم الجهاز أيضا لقياس شدة التيار الكهربائي المار في الدارة بدلالة الزمن، مما أتاح متابعة تطور التيار أثناء تشغيل النظام وتحليل سلوكه الكهربائي.

الشكل (12.3): جهاز متعدد القياس.

3-4-2 عداد زمني:

استخدم مؤقت الهاتف لقياس الزمن أثناء التجربة.

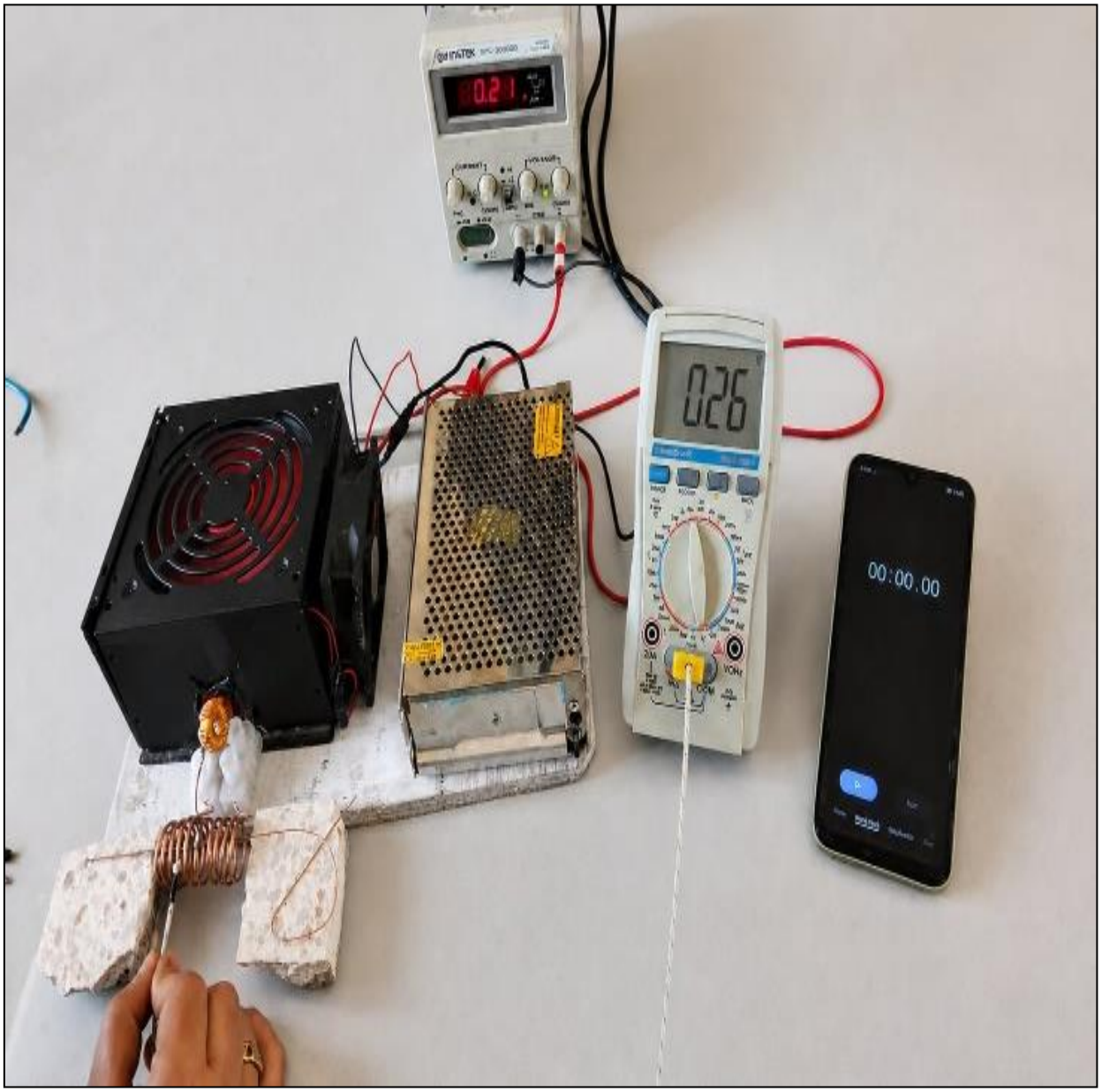
3-5 التحليل والمناقشة:

3-5-1 عرض النتائج:

بعد الانتهاء من جميع مراحل التركيب، تم الحصول على سخان يعمل بتقنية الحث الكهرومغناطيسي، كما هو موضح في الشكل (10.3) و (11.3) الذي يبين المظهر العام للجهاز بعد الإنجاز.

في إطار تقييم أداء دارة التسخين بالحث الكهرومغناطيسي التي تم تركيبها، أُجريت 3 تجارب تطبيقية بهدف دراسة سلوكها الحراري تحت ظروف تشغيل حقيقية، لتقييم أدائها ودراسة خصائصها.

نظرًا للصعوبة التي واجهتنا في تتبّع التغيرات الزمنية بشكل دقيق أثناء إجراء التجربة، تم اعتماد تقنية التصوير بالفيديو كوسيلة مساعدة. حيث أتاح تسجيل التجربة إمكانية الرجوع إليها لاحقًا وتحليل تطور درجة الحرارة بدلالة الزمن بصورة أكثر دقة ووضوحا، مما ساهم في تحسين موثوقية الملاحظات والنتائج المستخلصة، وذلك ما يوضحه الشكل (13.3).

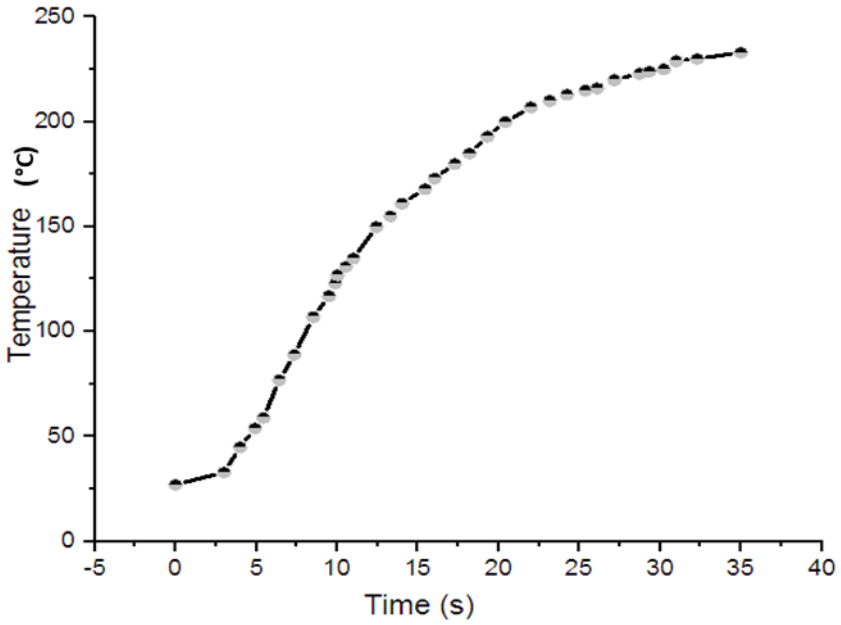


الشكل (13.3): صورة من فيديو التجربة تبيّن كيفية تتبع القياسات مع الزمن.

3-5-2 دراسة خصائص السخان:

3-5-2-1 التجربة الأولى:

تم وضع سلك حديدي بقطر 4.1mm داخل وشيعة التسخين، ثم تشغيل الدارة ومتابعة تغير درجة حرارته مع الزمن وتغير شدة التيار مع الزمن باستخدام وسيلة قياس مناسبة. سمح هذا الإجراء برسم منحنى بياني يمثل تغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن، كما هو موضح في الشكل (14.3).



الشكل (14.3): منحنى تغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن لسلك حديدي بقطر 4.1mm.

تحليل المنحنى:

يمثل المنحنى تغيرات درجة حرارة السلك الحديدي بدلالة الزمن أثناء التسخين بالحث، ويمكن تحليله إلى ثلاث مراحل رئيسية:

المرحلة الأولى (0 ← حوالي 5 ثواني): بداية التسخين البطيء

نلاحظ ارتفاعًا طفيفًا في درجة الحرارة.

المرحلة الثانية (5 ← 15 ثانية): التسخين السريع (المرحلة الانتقالية)

يظهر ارتفاع حاد في درجة الحرارة (من حوالي 30 °C إلى 150 °C تقريبًا).

المرحلة الثالثة (بعد 15 ثانية): التباطؤ والاستقرار الحراري النسبي

نلاحظ أن معدل ارتفاع درجة الحرارة يبدأ في الانخفاض تدريجيًا حتى يصل إلى شبه استقرار قرب (240–230 °C).

التفسير:

يعد الحديد من المواد فيرومغناطيسية، فهو يسلك سلوكًا مميزًا ناتجًا عن تفاعل بنيته المجهرية مع المجال المغناطيسي المتغير. فعند تطبيق هذا المجال، تتعرض العزوم المغناطيسية داخل المادة إلى إعادة اصطفاف مستمرة، حيث تتجه تدريجيًا لتصبح موازية للمجال الخارجي، ويتم ذلك عبر نمو المجالات المغناطيسية الموافقة واتجاه العزوم نحو محور المجال. ونظرًا لكون المجال متغيرًا زمنيًا، فإن هذه العزوم لا تستقر، بل تخضع لحركة دورانية متواصلة، مما يؤدي إلى ظهور ظاهرة الهسترة، والتي تمثل فقدًا طاقويًا يتحول إلى حرارة.

بالتوازي مع ذلك، يؤدي تغير المجال المغناطيسي إلى توليد تيارات دوامية داخل الحديد، تتركز شدتها وفقًا لعمق الاختراق، الذي يُحدد المسافة التي ينفذ فيها المجال داخل المادة. ويعتمد هذا العمق على خصائص الحديد

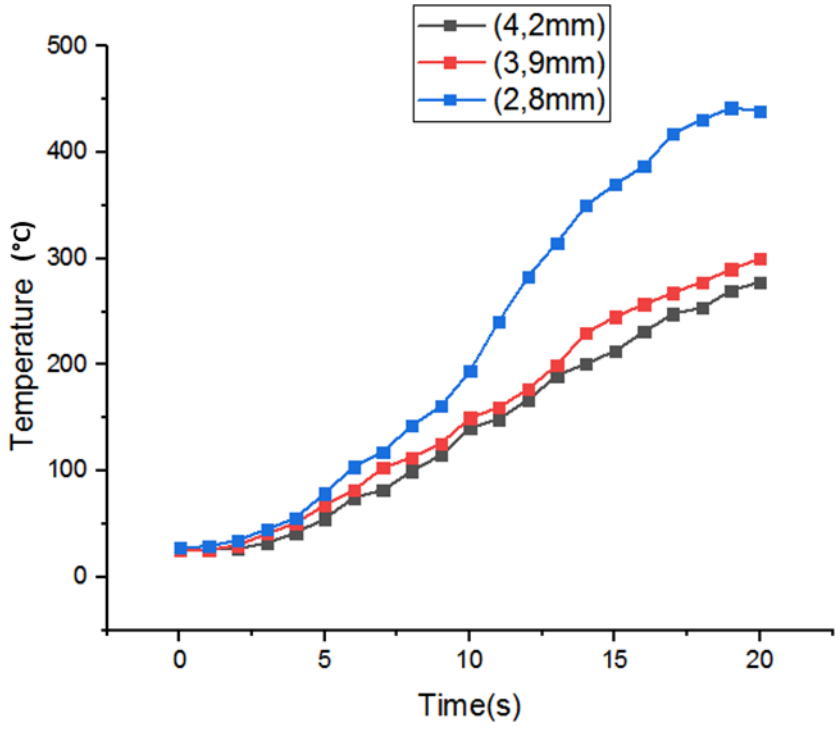
الفيزيائية مثل النفاذية المغناطيسية والناقلية الكهربائية، إضافة إلى تردد المجال المطبق، حيث يؤدي ارتفاع التردد إلى تقليص عمق الاختراق، وبالتالي تركّز التيارات والتسخين في الطبقات السطحية. ونتيجة لذلك، يكون تفاعل العزوم المغناطيسية أقوى بالقرب من السطح وأضعف في العمق.

ينعكس هذا السلوك المزدوج (المتمثل في خسائر الهسترة والتيارات الدوامية) على المنحنى الموضح في الشكل (14.3)، حيث تُسجل زيادة سريعة في درجة الحرارة في المرحلة الأولى نتيجة شدة هذه الظواهر، يليها انخفاض تدريجي في معدل الارتفاع بسبب تزايد الفواقد الحرارية نحو الوسط الخارجي، إلى أن يصل النظام إلى حالة توازن حراري. كما أن انخفاض عمق الاختراق يساهم في تسريع التسخين السطحي، مما يؤثر على شكل المنحنى ويُبرز عدم تجانس التوزيع الحراري داخل المادة.

وعليه، فإن سلوك الحديد تحت تأثير الحث الكهرومغناطيسي يُعد نتيجة مباشرة لتداخل ظواهر إعادة اصطفاف العزوم المغناطيسية، وخسائر الهسترة، والتيارات الدوامية، وعمق الاختراق، حيث تتحكم هذه العوامل مجتمعة في آلية التسخين، وتوزيع الحرارة، والشكل العام للاستجابة الحرارية مع الزمن.

3-5-2-2 التجربة الثانية:

في هذه التجربة تم اختيار ثلاث مسامير حديدة بأقطار مختلفة (2.8mm، 3.9mm، 4.2mm)، وضعت داخل وشيعة التسخين، ثم تشغيل الدارة ومتابعة تغير درجة حرارته مع الزمن باستخدام وسيلة قياس مناسبة. سمح هذا الإجراء برسم منحنى بياني يمثل تغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن، فهو يوضح تأثير قطر العينات على سلوك التسخين، كما موضح في الشكل (15.3).



الشكل (15.3): منحنى تغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن لثلاث أقطار مختلفة.

تحليل المنحنى:

يمثل المنحنى تطور درجة الحرارة بدلالة الزمن لثلاثة أقطار مختلفة (2.8mm، 3.9mm، 4.2mm)، ويمكن تحليله كما يلي:

المرحلة الأولى (0 ← حوالي 4 ثواني):

جميع المنحنيات متقاربة جدًا وتكاد تكون متطابقة.

الزيادة في درجة الحرارة بطيئة ومنتظمة.

الميل صغير ومتشابه بين الحالات الثلاث.

المرحلة الثانية (4 ← 10 ثواني):

تبدأ المنحنيات في التباعد تدريجيًا.

المنحنى الخاص بـ 2.8mm (الأزرق) يظهر زيادة أسرع (ميل أكبر).

يليه منحنى 3.9mm (الأحمر)، ثم 4.2mm (الأسود).

المرحلة الثالثة (10 ← 15 ثانية):

التباعد بين المنحنيات يصبح واضحًا جدًا.

المنحنى الأزرق يشهد ارتفاعًا حادًا (أكبر قيمة للميل).

المنحنيان الأحمر والأسود يواصلان الارتفاع لكن بميل أقل.

المرحلة الرابعة (15 ← 20 ثانية):

تبدأ جميع المنحنيات في التباطؤ (انخفاض الميل).

يظهر تقارب نحو الاستقرار التدريجي.

القيم النهائية التقريبية:

2.8mm ← حوالي 430–440 °C

3.9mm ← حوالي 290–300 °C

4.2mm ← حوالي 260–270 °C

التفسير:

يؤثر تغيّر قطر المادة المراد تسخينها بالحث الكهرومغناطيسي بشكل مباشر على توزيع التيارات الدوامية، وعمق الاختراق، ومعدل ارتفاع درجة الحرارة، وبالتالي على شكل المنحنى الموضح في الشكل (15.3).

فعندما يكون قطر العينة صغيرًا (قطر 2.8mm)، يصبح المجال المغناطيسي قادرًا على اختراق جزء أكبر من حجم المادة مقارنة بقطرها، مما يؤدي إلى توزيع أكثر تجانسًا للتيارات الدوامية داخلها. ونتيجة لذلك، ينتشر التسخين في كامل الحجم تقريبًا، فتكون سرعة ارتفاع درجة الحرارة أكبر نسبيًا بسبب صغر الكتلة الحرارية المطلوب تسخينها.

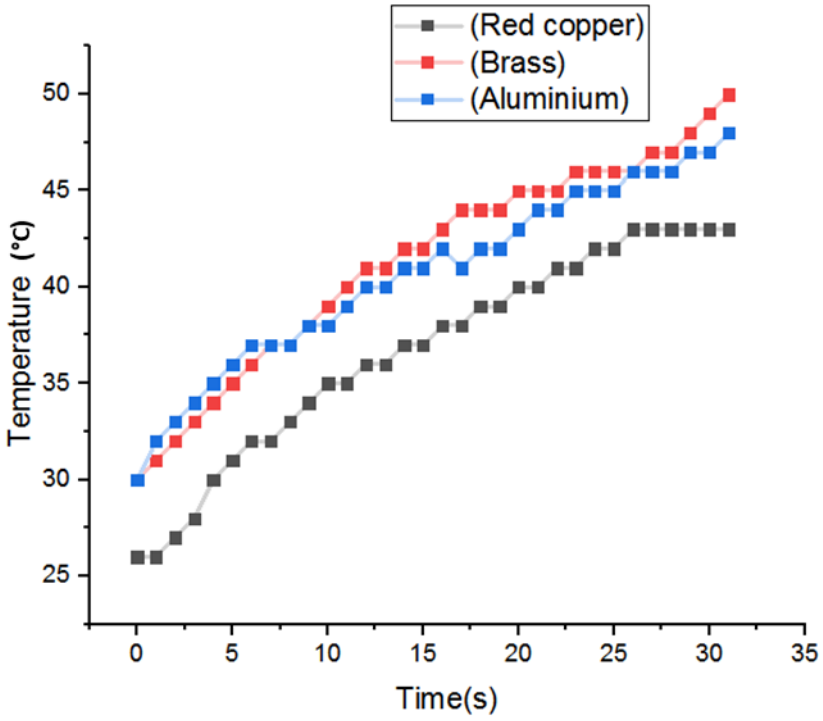
أما عند زيادة القطر (4.2mm; 3.9mm)، فإن التيارات الدوامية تتركز بشكل أكبر في المناطق السطحية نتيجة تأثير عمق الاختراق، بينما يقل تأثير المجال في مركز المادة. وبالتالي يصبح التسخين غير متجانس، حيث ترتفع درجة حرارة السطح بسرعة أكبر من الداخل. كما أن زيادة الحجم تؤدي إلى زيادة السعة الحرارية للعينة، مما يتطلب طاقة أكبر لرفع درجة حرارتها، وبالتالي ينخفض معدل التسخين ويصبح ميل المنحنى الحراري أقل.

إضافةً إلى ذلك، فإن تغير القطر يؤثر على تفاعل العزوم المغناطيسية داخل المادة، إذ تكون عملية إعادة اصطفاف العزوم أكثر فعالية في المناطق التي يصلها المجال المغناطيسي بقوة، أي بالقرب من السطح عندما يكون القطر كبيرًا(4.2mm). لذلك تصبح خسائر الهسترة والتيارات الدوامية موزعة بشكل غير منتظم داخل العينة.

وعليه، يمكن القول إن زيادة قطر المادة تؤدي عمومًا إلى تقليل سرعة التسخين وزيادة عدم تجانس التوزيع الحراري، في حين يسمح القطر الأصغر بتسخين أسرع وأكثر انتظامًا داخل الحجم الكلي للمادة.

3-2-5-3 التجربة الثالثة:

في هذه التجربة تم تثبيت القطر عند 1mm مع تغيير نوع المعدن، حيث تم اختيار ثلاث اسلاك من (النحاس الأحمر، النحاس الأصفر، الالمنيوم)، وضعت هذه الأسلاك داخل وشيعة التسخين، ثم تشغيل الدارة ومتابعة تغير درجة حرارته مع الزمن باستخدام وسيلة قياس مناسبة. سمح هذا الإجراء برسم منحنى بياني يمثل تغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن، أي يوضح تأثير طبيعة العينات على عملية التسخين، كما هو مبين في الشكل (16.3).



الشكل (16.3): منحنى تغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن لثلاث معادن مختلفة.

تحليل المنحنى:

المنحنى يبيّن تغيّر درجة الحرارة بدلالة الزمن لثلاثة معادن مختلفة (النحاس الأحمر، النحاس الأصفر، والألمنيوم) مع تثبيت القطر، ويمكن تحليله بيانيًا كما يلي:

المرحلة الأولى (0 ← حوالي 5 ثواني):

ارتفاع تدريجي في درجة الحرارة لكل المواد.

المنحنيات متقاربة نسبيًا، مع فرق بسيط:

الألمنيوم يبدأ بأعلى قيمة تقريبًا.

النحاس الأحمر هو الأدنى.

الميل متقارب بين المنحنيات (زيادة منتظمة).

المرحلة الثانية (5 ← 15 ثانية):

يبدأ التباعد الواضح بين المنحنيات.

منحنى النحاس الأصفر يظهر ميلًا أكبر (ارتفاع أسرع).

منحنى الألمنيوم يأتي في المرتبة الثانية.

منحنى النحاس الأحمر يبقى الأقل ميلًا.

الفروق في درجات الحرارة تصبح أكثر وضوحًا مع الزمن.

المرحلة الثالثة (15 ← 25 ثانية):

استمرار الارتفاع لكن بميل أقل مقارنة بالمرحلة السابقة.

المنحنيات تحافظ على نفس الترتيب دون تقاطع.

الفرق بين:

النحاس الأصفر والألمنيوم: متوسط

الألمنيوم والنحاس الأحمر: أقل قليلًا

المرحلة النهائية (25 ← 32 ثانية):

يظهر تباطؤ واضح في الارتفاع (انخفاض الميل).

القيم النهائية التقريبية:

النحاس الأصفر ≈ 50°C

الألمنيوم≈ 47–48°C

النحاس الأحمر≈ 43°C

جميع المنحنيات تميل إلى شبه استقرار، لكن عند مستويات مختلفة.

التفسير:

عند وضع سلك النحاس الأحمر والنحاس الأصفر والألمنيوم تحت تأثير الحث الكهرومغناطيسي مع تثبيت القطر عند 1mm، فإن الاختلاف في الاستجابة الحرارية يعود أساسًا إلى اختلاف الناقلية الكهربائية والحرارية لكل معدن، إضافة إلى طبيعة كل مادة المغناطيسية وتأثير عمق الاختراق والتيارات الدوامية المتولدة داخله.

يُعد النحاس الأحمر مادة ديامغناطيسية، لذلك فإن عزومه المغناطيسية تكون ضعيفة جدًا وتميل إلى معاكسة المجال المغناطيسي الخارجي بشكل طفيف، دون أن يحدث لها اصطفاف حقيقي كما في المواد الفيرومغناطيسية. وبالتالي فإن خسائر الهسترة تكون شبه منعدمة. وعند تعريضه للحث الكهرومغناطيسي، تتولد داخله تيارات دوامية قوية نسبيًا بسبب ناقليته الكهربائية المرتفعة، وتتحول هذه الطاقة إلى حرارة بفعل المقاومة الكهربائية الداخلية. كما أن ناقليته الحرارية العالية تسمح بانتشار الحرارة بسرعة داخل العينة، مما يؤدي إلى تسخين متجانس نسبيًا عند القطر الصغير.

أما النحاس الأصفر، وهو سبيكة من النحاس والزنك، فيُعتبر أيضًا مادة غير فيرومغناطيسية وتميل خواصه إلى السلوك الديامغناطيسي الضعيف. لذلك فإن العزوم المغناطيسية داخله لا تُظهر إعادة اصطفاف واضحة تحت تأثير المجال المغناطيسي، وتبقى خسائر الهسترة مهملة تقريبًا. ويتولد التسخين أساسًا بفعل التيارات الدوامية، إلا أن ناقليته الكهربائية أقل من النحاس الأحمر بسبب وجود الزنك، مما يؤدي إلى انخفاض شدة التيارات المتولدة. وفي المقابل، فإن مقاومته الكهربائية الأعلى نسبيًا تساعد على تحويل جزء معتبر من الطاقة إلى حرارة، لذلك يكون التسخين فيه واضحًا رغم انخفاض الناقلية.

أما الألمنيوم، فيُصنف ضمن المواد البارامغناطيسية الضعيفة، حيث يمتلك عزومًا مغناطيسية صغيرة تستجيب للمجال الخارجي بشكل محدود، إذ تميل هذه العزوم إلى الاصطفاف الجزئي مع اتجاه المجال دون تكوين مجالات مغناطيسية مستقرة. لذلك فإن تأثير إعادة اصطفاف العزوم يبقى ضعيفًا جدًا، كما أن خسائر الهسترة تكون شبه معدومة. ويعتمد التسخين فيه بصورة رئيسية على التيارات الدوامية الناتجة عن الحث الكهرومغناطيسي، مع مساهمة ناقليته الحرارية المرتفعة في توزيع الحرارة بسرعة داخل العينة.

وينعكس ذلك مباشرة على شكل المنحنى الحراري، حيث يكون ميل المنحنى في البداية ضعيفًا نسبيًا، ما يدل على بطء ارتفاع درجة الحرارة مع الزمن. كما أن الناقلية الحرارية العالية للنحاس الأحمر والألمنيوم تؤدي إلى انتشار الحرارة بسرعة داخل العينة، مما يقلل من تراكم الحرارة الموضعي ويجعل التسخين أكثر تجانسًا لكنه أبطأ ظاهريًا. أما النحاس الأصفر فتكون عملية انتقال الحرارة داخله أبطأ نسبيًا بسبب ناقليته الحرارية الأقل.

وبما أن قطر العينات صغير (1mm)، فإن المجال المغناطيسي يخترق نسبة كبيرة من حجم المادة، مما يجعل التسخين متقاربًا نسبيًا داخل كامل العينة ويقلل من تأثير الجلد. ومع ذلك، تبقى الاستجابة الحرارية لهذه المعادن أبطأ من الحديد بسبب غياب إعادة اصطفاف العزوم المغناطيسية وخسائر الهسترة، واعتماد التسخين فقط على تأثير التيارات الدوامية.

6-3 الخاتمة:

أظهرت الدراسة التجريبية أن نظام التسخين بالحث الكهرومغناطيسي المعتمد على دارة ZVS بجهد 12V قادر على تحقيق تسخين فعّال للعينات المعدنية رغم بعض الصعوبات العملية التي واجهت التجربة. وقد سمحت النتائج والقياسات المتحصل عليها يفهم أفضل لسلوك التسخين، وكفاءة النظام، إضافة إلى تأثير الخصائص الهندسية والمادية للعينات على الأداء الحراري.

كما بينت التجربة إمكانية الوصول إلى درجات حرارة مرتفعة تفوق 400 °C خلال مدة زمنية قصيرة، ممّا يؤكد فعالية هذا النوع من التسخين في التطبيقات الحرارية المختلفة.

خاتمة عامة

خاتمة عامة

تُوّج هذا العمل بإنجاز وتصميم جهاز التسخين بالحث الكهرومغناطيسي ذي طابع مخبري، حيث تم بذل جهد معتبر في دراسة الدارة الإلكترونية، واختيار المكوّنات المناسبة، وإنجاز التركيب العملي للنظام بهدف الوصول إلى تشغيل مستقر وفعّال يحقق مبدأ التسخين الحثي بصورة واضحة. وقد سمح هذا المشروع بتطبيق المعارف النظرية المتعلقة بالكهرومغناطيسية والإلكترونيات القوية وتحويلها إلى نظام عملي قادر على توليد حرارة مرتفعة في زمن قصير.

أظهرت الدراسة أن التسخين بالحث الكهرومغناطيسي يعتمد أساساً على توليد تيارات دوامية داخل المادة المعدنية بفعل المجال المغناطيسي المتغير، حيث تتحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية نتيجة المقاومة الداخلية للمادة. كما بيّنت النتائج أن طبيعة المادة تؤثر بشكل مباشر على فعالية التسخين، إذ أظهرت المواد الفيرومغناطيسية مثل الحديد استجابة حرارية أكبر مقارنة بالمواد غير الفيرومغناطيسية بسبب مساهمة خسائر الهسترة إضافة إلى تأثير التيارات الدوامية.

أظهرت النتائج أن عمق الاختراق يتأثر بشكل واضح بأقطار العينات المدروسة لا سيما عند الترددات العالية، في حين يسمح القطر الصغير للعينة بنفاذ المجال المغناطيسي بشكل أفضل، مما يحقق تجانساً حرارياً أكبر. وتبيّن أيضاً أن الخصائص الكهربائية والحرارية للمعدن تلعب دوراً أساسياً في تحديد شدة التسخين وسرعة انتشار الحرارة داخل العينة.

وقد أثبت النظام المنجز إمكانية الوصول إلى درجات حرارة مرتفعة خلال زمن قصير، حيث تم تسجيل درجة حرارة تجاوزت 400 °C ووصلت إلى حوالي 418 °C خلال مدة تقارب 17 ثانية باستعمال تردد يقدر بـ 106 كيلوهرتز عند عينة قطرها 2.8mm، وهو ما يؤكد فعالية الجهاز المصمم وقدرته على تحقيق تسخين سريع وفعّال.

وتبرز أهمية هذه النتائج في إمكانية استغلال هذا النظام في عدة تطبيقات صناعية وعملية مثل المعالجة الحرارية، واللحام، والتسخين الموضعي للمعادن، خاصة بفضل بساطة الدارة وانخفاض تكلفتها مقارنة ببعض طرق التسخين التقليدية.

وعلى الرغم من النتائج الإيجابية المحققة، واجهتنا عدة مشاكل وصعوبات تقنية تكمن في صعوبة العثور على بعض العناصر الكهربائية، وأيضا إلى تلف الكثير من العناصر منها المقاومات والترنزستور والمكثفات وهذا بسبب عدم التلاؤم الكهربائي.

وفي المقابل، أظهرت الدراسة أن تحسين أداء النظام مستقبلاً يتطلب تطوير نظام التبريد لمكونات الدارة الإلكترونية، واستعمال مصادر تغذية ذات قدرة أعلى، بالإضافة إلى تحسين دقة القياسات وأنظمة التحكم الحراري للحصول على مردود أفضل واستقرار أكبر أثناء التشغيل المستمر. كما يمكن مستقبلاً توسيع هذا العمل نحو تصميم أجهزة تسخين حثي ذات قدرة أعلى، أو دمج متحكمات رقمية للتحكم الآلي في التردد ودرجة الحرارة، مما يفتح المجال أمام تطبيقات صناعية أكثر تطوراً ودقة.

قائمة المراجع

قائمة المراجع

[1] E. B. Benguessoum, S. Touati, & M.B. Hammia, Design and Construction of a Master's dissertation, University of El Oued, ‹Magnetic Induction Heating System Algeria, 2025.

[2] J. Callebaute & Laborelec‹ Chauffage par induction‹ Leonardo ENERGY Guide - Power Quality, n°7.(2007).

[3] B. Grégory, Effet de la Géométrie sur les Paramètres du Générateur et le Profil de Dureté lors d'une Chauffe par Induction : Expérience et Simulation, Mémoire de Magister, Université DU Québec,Canada, 2010.

[4] ج. ل كوبارار، ج. فورني، ح. لعجوز، الكهرباء و الأمواج، ترجمة: ع . شنوقه، ع. وردان، ر. تدريست، ع. بوجانة، ديوان المطبوعات الجامعية، الجزائر، 1993.

[5] ع. أحمد الشاذلي، فيزياء الجوامد، الجزء الثاني، الدار العربية للنشر والتوزيع، 2003.

[6] N.A. Spaldin, Magnetic Materials :Fundamentals and Applications,2nd Edition ‹ Cambridge :Cambridge University Press‹ 2010.

[7] G. Bertotti, Hysteresis in magnetism, Academic Press ,(1998).

[8] V. Rudnev, D. Loveless & R. L. Cook, Theoretical Background (Handbook of Induction Heating), CRC Press, USA,(2017).

[9] م. جيلاني، المرجع في محولات القوى الكهربائية ، كلية الهندسة، جامعة القاهرة، مصر (2019).

[10] W. Gilbert. De Magnete (Trans. On the magnet)‹ Dover Publications, New York ‹(1958).(Republished edition of the original work published in 1600).

[11] V. Labbé. Modélisation numérique du chauffage par induction : approche éléments finis et calcul parallèle,Mécanique [physics. Med_ph] École nationale supérieure des mines de Paris‹ France ‹(2002).

[12] https://kintekfurnace.com/faqs/what-factors-influence-the-efficiency-of-induction-heating ‹22 April 2026.

[13] C. K. Alexander & M. N. O. Sadiku, Fundamentals of Electric Circuits, McGraw-Hill Education, 6th Edition, 2017.

[14] B. Adnani, Modélisation et Contrôle des Convertisseurs à Résonance: Application au Chauffage par Induction, Mémoire de Magister, de Batna, Algérie ,2010.

[15] M. Bendaoud, M. Hafiane, Modélisation des Phénomènes magnétothermiques dans les dispositifs de limiteur de courant à base de supraconducteur à haute température critique, Université Ouargla, Algérie .

[16] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 4th Edition, 2012.

[17] A. M. Souley Madougou, Contribution à l'étude et à la commande d'un système de chauffage par induction polyphasé , Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Université de Toulouse, France, 2011.

[18] M. Sven Wanser, Simulation des phénomènes de chauffage par induction : Application à la trempe superficielle thèse de doctorat de 1'Ecole Doctorale de Lyon, France, 1995.

[19] B. Ouarlal, Contribution à la Modélisation Analytique du Phénomène de Chauffage par Induction, Mémoire d'Ingénieur, Université de Batna, Algérie, 2008.

[20] V. Ramesh, J. Sri Ranganayakulu, Full Bridge Resonant Inverter For InductionHeating Applications International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), Vol.3, Issue 1, January-February, pp.066-073 (2013).

[21] A. Belfliti, Etude d'un chauffage à induction monophasé- simulation/ SIMULINK-MATLAB et COMSOL, Mémoire de Master, Université de Boumerdes, Algérie, 2019.

[22] T .OukseL, Cours Transfert Thermique, Département de Génie Mécanique, Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, Algérie, 2020-2021.

[23] B. J. Simpson, Induction Heating: Coil and System Design, McGraw-Hill Book Company, Inc. 1st Edition, 1960.

[24] N. Mohan, T. M. Undeland, P. W. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, John Wiley & Sons, 3rd Edition, 2003.

[25] T. Mammeri, Contribution à l'Etude Théorique d'un Four à Induction, Mémoire de Magister, de Batna, Algérie, 2012.

ملخص

ملخص:

يُعدّ التسخين بالحث الكهرومغناطيسي من التقنيات الحديثة المستعملة في تسخين المعادن، حيث يتميز بالسرعة، والنظافة، والمردود الحراري الجيد مقارنة بطرق التسخين التقليدية. تهدف هذه المذكرة إلى تصميم وإنجاز فرن تسخين بالحث الكهرومغناطيسي منخفض القدرة يعمل بجهد تغذية 12 فولط، اعتمادًا على دارة إلكترونية تتضمن عاكسًا لتحويل الجهد المستمر إلى تيار متناوب عالي التردد، مما يسمح بتوليد مجال كهرومغناطيسي قادر على إحداث تيارات دوامية داخل القطع المعدنية وتسخينها بفعل تأثير جول.

تضمن العمل دراسة نظرية لمبادئ الحث الكهرومغناطيسي وآلية التسخين الحثي، إضافة إلى تصميم بعض عناصر النظام واختيار المكونات المناسبة لإنجازه. كما شمل الجانب التطبيقي تصنيع النموذج التجريبي للفرن وإجراء مجموعة من التجارب على عينات معدنية مختلفة لدراسة خصائصها الحرارية عند تعرضها لمجال كهرومغناطيسي عالي التردد.

أظهرت النتائج العملية نجاح النظام في تسخين المواد المعدنية بكفاءة مقبولة، حيث تم الوصول إلى درجة حرارة تجاوزت 400 °C خلال مدة زمنية قدرها 17 ثانية عند تردد تشغيل يساوي 106 كيلوهرتز، مع ملاحظة اختلاف سرعة التسخين حسب طبيعة المادة وخصائصها الفيزيائية والمغناطيسية.

الكلمات المفتاحية: التسخين الحثي، الحث الكهرومغناطيسي، تيارات دوامية، عمق الاختراق، المواد المغناطيسية.

Abstract:

Electromagnetic induction heating is considered one of the modern technologies used for heating metals, as it is characterized by speed, cleanliness, and good thermal efficiency compared with conventional heating methods. This dissertation aims to design and realize a low-power electromagnetic induction heating furnace operating with a 12 V supply voltage, based on an electronic circuit including an inverter that converts direct current into high-frequency alternating current. This allows the generation of an electromagnetic field capable of inducing eddy currents inside metallic pieces and heating them through the Joule effect.

This work included a theoretical study of the principles of electromagnetic induction and the mechanism of induction heating, in addition to designing some of the system components and selecting the appropriate components for its implementation. The practical part also involved the fabrication of an experimental furnace prototype and carrying out several experiments on different metallic samples to study their thermal properties when exposed to a high-frequency electromagnetic field.

The experimental results showed the successful heating of metallic materials with acceptable efficiency, reaching a temperature exceeding 400°C within 17 seconds at an operating frequency of 106 kHz, while observing variations in the heating rate depending on the nature of the material and its physical and magnetic properties.

Keywords: Induction heating, electromagnetic induction, eddy currents, penetration depth, magnetic materials.