

جامعة قاصدي مرباح ورقلة
كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء



رقم الترتيب:.....

رقم التسلسلي:.....

مذكرة

ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

فرع: فيزياء

تخصص: فيزياء الإشعاعات

من إعداد الطالبتين: ريغي خلود - كزونة فاطمة الزهراء

بعنوان:

إنجاز كاشف للعيوب باستخدام التيارات الدوامة

نوقشت بتاريخ:

2021/06/ 17

أمام أعضاء لجنة المناقشة المكونة من:

رئيساً	جامعة ورقلة	أستاذ محاضر (ب)	بلة زكية
ممتحناً	جامعة ورقلة	أستاذ محاضر (ب)	عبابسة حكيمية
مشرفاً	جامعة ورقلة	أستاذ محاضر (ب)	لمقدم سومية

الموسم الجامعي: 202/2020

الإهداء

أهدي هذا العمل إلى:

أمي الغالية و أبي الغالي أطال الله عمرهما، إخوتي وأخوي أنار الله دروبهم وحقق مبتغاهم، وإلى

صويحباتي، بدون أن أنسى ذكر مرافقي و مؤنس وحدتي Anime Slayer.

خلود

الإهداء

أهدي ثمرة جهدي هذا إلى من لو جاز السجود لغير الله لسجدت لها وتحملت متاعبي الى التي
لو أفنيت العمر خدمة لها ما وفيت قدرها أُمي الغالية.

إلى من فطرني المولى على حبه والاحسان إليه. إلى من ساهم في تربيّتي وسعى جاهدا من أجل
أن يكون في أعلى وأفضل المراتب إلى الذي كان وراء كل خطوة خطوتها في طريق العلم، ابي الحبيب
الغالي رعاه الله.

إلى من تذوقت وإياهم العيش حلوا ومرّا.....اخوتي واخواتي.

الى نور الحب بنات اختي غفران وأفنان.

إلى كل من كان لهم أثر في حياتي وإلى كل من أحبهم من قلبي ونسيم قلبي.

فاطمة

تشكرات

الحمد لله رب العالمين و الصلاة والسلام على أشرف المرسلين محمد وعلى آله وصحبه ومن اهتدى بهداه إلى يوم الدين أما بعد فإذا كان لابد من نكر أهل الشكر فالأولى أن نشكر الله تعالى فالحمد لله أولاً و آخرأ وظاهراً وباطناً كما يحب ربنا و يرضى (اللهم لك الحمد حتى ترضى و لك الحمد إذا رضيت ولك الحمد بعد الرضا). نشكر الله تعالى ونحمده على أن وفقنا وأعاننا في إنجاز هذا العمل.

ومن باب قوله صلى الله عليه وسلم: "من لا يشكر الناس لا يشكر الله"، وبهذا فإننا نتوجه بخالص شكرنا وتقديرنا إلى الأستاذة الفاضلة المشرفة على المذكرة لمقدم **سومية** أستاذ محاضر بجامعة قاصدي مرياح ورقلة، و التي لم تبخل علينا بوقتها الثمين و بتوجيهاتها ونصائحها القيمة التي كانت عوناً لنا في إتمام هذا البحث فدعأؤنا لها بالخير و العافية.

كما نتقدم بالشكر الأستاذة **بله زكية** أستاذ محاضر بجامعة قاصدي مرياح ورقلة لقبولها ترأس لجنة المناقشة و الأستاذة **عبابسة حكيمة** أستاذ محاضر بجامعة قاصدي مرياح ورقلة لقبولها مناقشة المذكرة.

كلمة شكر إلى أعضاء فريق البحث بمخبر الإشعاع والبلازما و فيزياء السطوح LRPPS بقسم الفيزياء كلية الرياضيات و علوم المادة جامعة قاصدي مرياح ورقلة و على رأسهم مدير المخبر الأستاذ **خلفاوي فتحي** أستاذ تعليم عال بجامعة قاصدي مرياح ورقلة.

كما لا يفوتنا شكر السيد **حوتي محمد** مسؤول مخابر الفيزياء بجامعة قاصدي مرياح ورقلة على مساعداته وتسهيلاته من أجل اقتناء التجهيز الخاص بالجانب التطبيقي و الأستاذ **لمنور فؤاد** بمكتبة إيليا بورقلة الذي لم يدخر جهداً في المساعدة على الحصول على بعض الأدوات.

فجزيل الشكر و الامتنان إلى كل من ساعدنا من قريب أو من بعيد على انجاز هذا العمل المتواضع و في تذليل ما واجهناه من صعوبات.

الفهرس

contents

i	الإهداء
iii	تشكرات
iv	الفهرس
vi	قائمة الأشكال و الجداول
ix	قائمة الاختصارات
1	المقدمة العامة
الفصل الأول: عموميات حول الاختبارات اللاإتلافية	
3	1.1. الاختبارات اللاإتلافية
3	2.1. استخدامات الاختبارات اللاإتلافية
4	3.1. طرق الاختبارات اللاإتلافية
4	1.3.1. طريقة الفحص البصري
5	2.3.1. طريقة السوائل النافذة
6	3.3.1. طريقة الجسيمات الممغنطة
8	4.3.1. طريقة التصوير الإشعاعي
8	5.3.1. طريقة الموجات فوق الصوتية
9	6.3.1. طريقة التيارات الدوامة
10	4.1. فوائد تطبيق طرق الاختبارات اللاإتلافية
الفصل الثاني: الاختبار باستخدام التيارات الدوامة	
12	1.1. تاريخ الاختبار بالتيارات الدوامة
12	2.1. المبدأ الأساسي للاختبار بالتيارات الدوامة
14	3.1. الوصف الفيزيائي للاختبار بالتيارات الدوامة
15	4.1. استخدامات التيارات الدوامة
16	5.1. الأثر السطحي- عمق اختراق التيارات الدوامة
18	6.1. العوامل المؤثرة على إشارة التيارات الدوامة
20	7.1. مستشعرات الاختبار بالتيارات الدوامة

20	.....1.7.ii تصنيف المستشعرات من حيث الوظيفة
21	.....2.7.ii تصنيف المستشعرات من حيث الموقع
22	.....3.7.ii تصنيف المستشعرات من حيث وضع التشغيل
23	.....8.ii تقنيات التيارات الدوامة
23	.....1.8.ii تقنية إثارة التيارات الدوامة أحادية التردد
24	.....2.8.ii تقنية إثارة التيارات الدوامة متعددة التردد
25	.....3.8.ii تقنية التيارات الدوامة النبضية
25	.....9.ii أنواع العيوب
26	.....10.ii مميزات وحدود الاختبار بالتيارات الدوامة
الفصل الثالث: التطبيقات والنتائج.	
28	.....1.iii دراسة عمق اختراق التيارات الدوامة
30	.....2.iii دراسة تأثير عمق الإختراق على كثافة التيارات الدوامة
35	.....3.iii دراسة تأثير التردد على ممانعة الملف
40	.....4.iii دراسة تأثير التردد على الكشف عن العيوب
45	.....الخلاصة العامة والآفاق
47	.....المراجع

قائمة الأشكال و الجداول

قائمة الأشكال:

الفصل الأول	
5	الشكل 1.1: منظر داخلي.
6	الشكل 2.1: خطوات الاختبار بالسوائل النافذة.
7	الشكل 3.1: مبدأ الاختبار بالجسيمات الممغنطة.
8	الشكل 4.1: مبدأ الاختبار بالتصوير الاشعاعي.
9	الشكل 5.1: مبدأ الاختبار بالأمواج فوق الصوتية.
10	الشكل 6.1: مبدأ الاختبار بالتيارات الدوامة.
الفصل الثاني	
13	الشكل 1.11: مبدأ توليد التيارات الدوامة.
15	الشكل 2.11: الوصف الرياضي للاختبار بالتيارات الدوامة.
17	الشكل 3.11: عمق اختراق التيارات الدوامة.
21	الشكل 4.11: تمثيل مستشعر مزدوج الوظيفة والمستشعر منفصل الوظائف.
22	الشكل 5.11: تمثيل مستشعر التطويق و المستشعر السطحي و المستشعر الداخلي.

الفصل الثالث

29	الشكل III.1: منحى يمثل عمق الاختراق للحديد بدلالة التردد.
29	الشكل III.2: منحى يمثل عمق الاختراق للحديد والنحاس والألمنيوم بدلالة التردد.
30	الشكل III.3: منحى يمثل كثافة التيارات الدوامة للحديد بدلالة العمق.
31	الشكل III.4: كثافة التيارات الدوامة للألمنيوم بدلالة العمق.
31	الشكل III.5: كثافة التيارات الدوامة للنحاس بدلالة العمق.
33	الشكل III.6: تمثيل كثافة الاختراق للنحاس والحديد و الألمنيوم في حالة العمق $z=1$ mm من أجل تردد $f=10\text{Hz}$
33	الشكل III.7: تمثيل كثافة الاختراق للنحاس والحديد و الألمنيوم في حالة العمق $z=1$ mm من أجل تردد $f=500\text{Hz}$
34	الشكل III.8: صورة توضح القضبان المعدنية المختلفة المستعملة في التجارب.
35	الشكل III.9: صورة توضح الملفات الكهربائية المستعملة في التجارب.
36	الشكل III.10: التركيب التجريبي لتجربة دراسة تأثير التردد على ممانعة الملف.
37	الشكل III.11: تغيرات التوتر الكهربائي بدلالة التردد بالنسبة للملف 1.
37	الشكل III.12: تغيرات شدة التيار الكهربائي بدلالة التردد بالنسبة للملف 1.
39	الشكل III.13: منحى يمثل تغيرات ممانعة الملف 1 بدلالة التردد.
40	الشكل III.14: التركيب التجريبي لتجربة تأثير التردد على الكشف عن العيوب.
42	شكل III.15: منحى يبين تغيرات الممانعة بدلالة التردد للوضعيات المختلفة للنواة داخل الملف 3.
44	شكل III.16: منحى يبين تغيرات الممانعة بدلالة التردد للوضعيات المختلفة للنواة داخل الملف 4.

قائمة الجداول

28	جدول 1.111: تمثيل الناقلية الكهربائية و النفاذية المغناطيسية للحديد و الألمنيوم و النحاس.
32	جدول 2.111: نسبة كثافة الاختراق للألمنيوم و النحاس والحديد من أجل العمق $z=1\text{mm}$
41	جدول 3.111: حساب ممانعة الملف لترددات مختلفة و وضعيات مختلفة للنواة بالنسبة للملف 3.
43	الجدول 4.111: جدول يبين حساب ممانعة الملف لترددات مختلفة و وضعيات مختلفة للنواة بالنسبة للملف 4.

قائمة الاختصارات

EMF	Electric Motive Force	القوة المحركة الكهربائية
IACS	International Annealed Copper Standard	معيار النحاس الملمدن الدولي
NDT	Non-Destructive Testing	الاختبارات اللاإتلافية
EC-NDT	Eddy Current Non-Destructive Testing	الاختبار اللاإتلافي بالتيارات الدوامة
PEC	Pulsed Eddy Current	التيار الدوامي النبضي

مقدمة عامة

بما أن الجودة أصبحت ضرورة حيوية من أجل سلامة الأشخاص والمنشآت في قطاعات التعدين والصناعة والطيران، استدعت الضرورة إلى اكتساب طرق وتقنيات جديدة مهمتها دراسة المواد المنتجة أو الموضوعة ضمن الاستثمار. تسمى هذه التقنيات بالاختبارات اللاإتلافية حيث يتم تقييم وفحص الأجزاء المعرضة للتآكل جراء الإجهادات الميكانيكية بشكل دوري دون الحاجة لإتلافها للبحث عن أي عيوب قد يكون لها مستقبلاً عواقب وخيمة على الوظيفة التي تؤديها. وبالاعتماد على طبيعة المادة وخواصها الفيزيائية يتم اختيار التقنية المناسبة للفحص. ومن أشهر هذه التقنيات وأكثرها استخداماً في مجال الصناعة نجد طريقة الفحص البصري، السوائل النافذة، الجسيمات الممغنطة، التصوير الإشعاعي، الموجات فوق الصوتية بالإضافة إلى التيارات الدوامة التي تشغل مكاناً مميزاً بين هذه التقنيات والتي ستكون الموضوع الأساسي في عملنا هذا من أجل الكشف عن العيوب باستخدام هذه الأخيرة.

تحتوي هذه المذكرة على ثلاث فصول:

الفصل الأول بعنوان "عموميات حول الاختبارات اللاإتلافية" والذي يتمحور حول الاختبارات

اللاإتلافية وبعض مجالات استخدامها وفوائدها، بالإضافة إلى تقديم شرح موجز عن أهم طرقها.

الفصل الثاني بعنوان "الفحص باستخدام التيارات الدوامة" سنتطرق من خلاله إلى التركيز أكثر

على طريقة الاختبار بالتيارات الدوامة.

الفصل الثالث والذي سيتضمن العمل التطبيقي حيث سنقوم بإجراء تركيب تجريبي من أجل

الكشف عن العيوب ومناقشة النتائج المتحصل عليها.

في ختام المذكرة نعرض خلاصة نوجز فيها أهم النتائج التي تحصلنا عليها مع تقديم بعض الآفاق

المستقبلية لمواصلة البحث في هذا الموضوع.

الفصل الأول:

عموميات حول الاختبارات اللاتلافية

1.1 الاختبارات اللاإتلافية:

إن التعريف العام للاختبارات اللاإتلافية يشمل أي فحص أو تقييم يجرى على المواد والمنتجات الصناعية، بغرض تحديد وجود أو عدم وجود عيوب أو انقطاعات يمكنها أن تعيق أو تمنع استخدام القطعة أو المنتج، شرط ألا يحدث ذلك الاختبار أي تغيير بتلك المواد أو المنتجات الصناعية.

كما يمكن الاستعانة بالاختبارات اللاإتلافية لقياس و معرفة أية خواص أخرى للقطعة المختبرة، مثل الحجم والأبعاد والشكل وتركيبه المادة، بما في ذلك محتوى السبيكة والصلادة (القساوة) وحجم البلورات وغير ذلك [1].

2.1 استخدامات الاختبارات اللاإتلافية:

أدى التنامي الكبير لمتطلبات الأمان وعدم بلوغ المنتجات الصناعية مرتبة الكمال إلى ضرورة تطبيق طرق الاختبارات اللاإتلافية للتأكد من نوع المواد الداخلة في الإنتاج وجودة التصنيع وسلامة المنتج قبل الاستثمار. حيث تستعمل هذه الطرق بكثرة في المجالات الصناعية ونذكر على سبيل المثال المجالات التالية :

- **صناعة المعادن:** حيث يتم فحص المصبوبات المعدنية بالطرق ومنتجات التصفيح والمنتجات المسحوبة كالصفائح والأنابيب وغير ذلك بهدف ضبط جودة المنتجات وبالتالي ضمان جودتها.
- **النقل:** كاختبار أجزاء الطائرات وأجزاء المركبات الفضائية قبل إطلاقها وبعد عودتها واختبار عجلات وخطوط السكك الحديدية الخاصة بالقطارات السريعة.
- **بناء السفن و تشكيل المعادن:** كاختبار الصفائح الفولاذية ولحاماتها واختبار المواد الداخلة في تصنيعها واختبار الأدوات المعدنية وأجزاء الآلات أثناء مراحل تصنيعها المختلفة [1].

3.1 طرق الاختبارات اللاإتلافية:

هناك العديد من طرق الاختبارات اللاإتلافية تستند في مفهومها على مبادئ فيزيائية مختلفة للكشف عن بنية المادة وتواجد الانقطاعات الداخلية أو السطحية فيها والتي لا يمكن الكشف عنها بالعين المجردة. تمتاز كل طريقة من طرائق الاختبارات اللاإتلافية بمزايا خاصة بها. ويعتمد في اختيار الطريقة الأكثر ملائمة لاختبار منتج ما على خبرة القائم على الاختبار ومعرفته الجيدة بمزايا الطرائق المذكورة وبالعيوب التي يمكن أن تتواجد في المادة أو القطعة المراد اختبارها [1].

من طرائق الاختبارات اللاإتلافية ستة طرائق واسعة الانتشار والتطبيق وهي :

- طريقة الفحص البصري
- طريقة السوائل النافذة
- طريقة الجسيمات الممغنطة
- طريقة التصوير الإشعاعي
- طريقة الموجات فوق الصوتية
- طريقة التيارات الدوامة

سنعرض لهذه الطرق باختصار في العناصر الآتية.

1.3.1 طريقة الفحص البصري:

تعد طريقة الاختبار البصري من أسهل طرق الاختبارات اللاإتلافية تطبيقاً وتعتبر هذه الطريقة متممة لطرائق الاختبارات الأخرى. ويتم تطبيقها قبل أي طريقة اختبار آخر في الكشف عن العديد من العيوب في الملحومات والمصبوبات والمكونات المعالجة حرارياً. يتم الاختبار باستخدام العين المجردة أو باستخدام أدوات قياس بسيطة أو باستخدام إحدى مساعدات الرؤيا مثلًا المنظار الداخلي المبين في

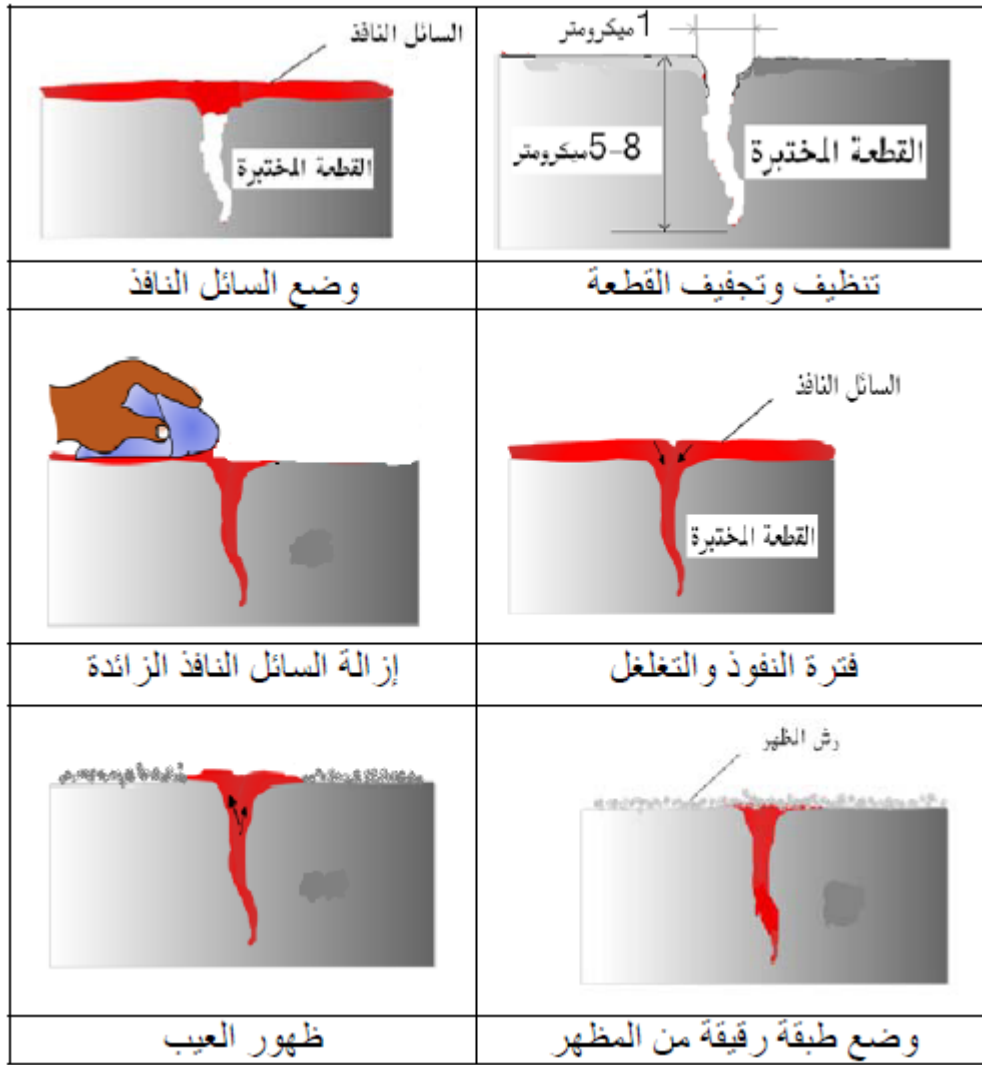
الشكل 1.1 [1].



شكل 1.1 : منظار داخلي [1].

2.3.I طريقة السوائل النافذة:

تستخدم طريقة الاختبار بالسوائل النافذة في الكشف عن التشققات والكسور المفتوحة على السطح والتي لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة قد تكون من رتبة الميكرومتر. تقوم هذه الطريقة على تنظيف سطح المادة المراد اختبارها بشكل جيد وذلك بإتباع طريقة التنظيف المناسبة تمهيدا لوضع السائل، ذي مقدرة النفاذ العالية، على سطحها حيث يترك لفترة زمنية كافية تدعى بفترة النفاذ أو التغلغل يتم بعدها إزالة طبقة السائل من على سطح المادة وذلك باستخدام المادة المزيلة المناسبة (remover) ثم توضع طبقة رقيقة من المظهر (developer) الذي يخرج السائل المتغلغل في الشقوق إلى السطح مشيرا بذلك إلى موضع وجود هذه الشقوق كما هو موضح في الشكل 2.1 [1].

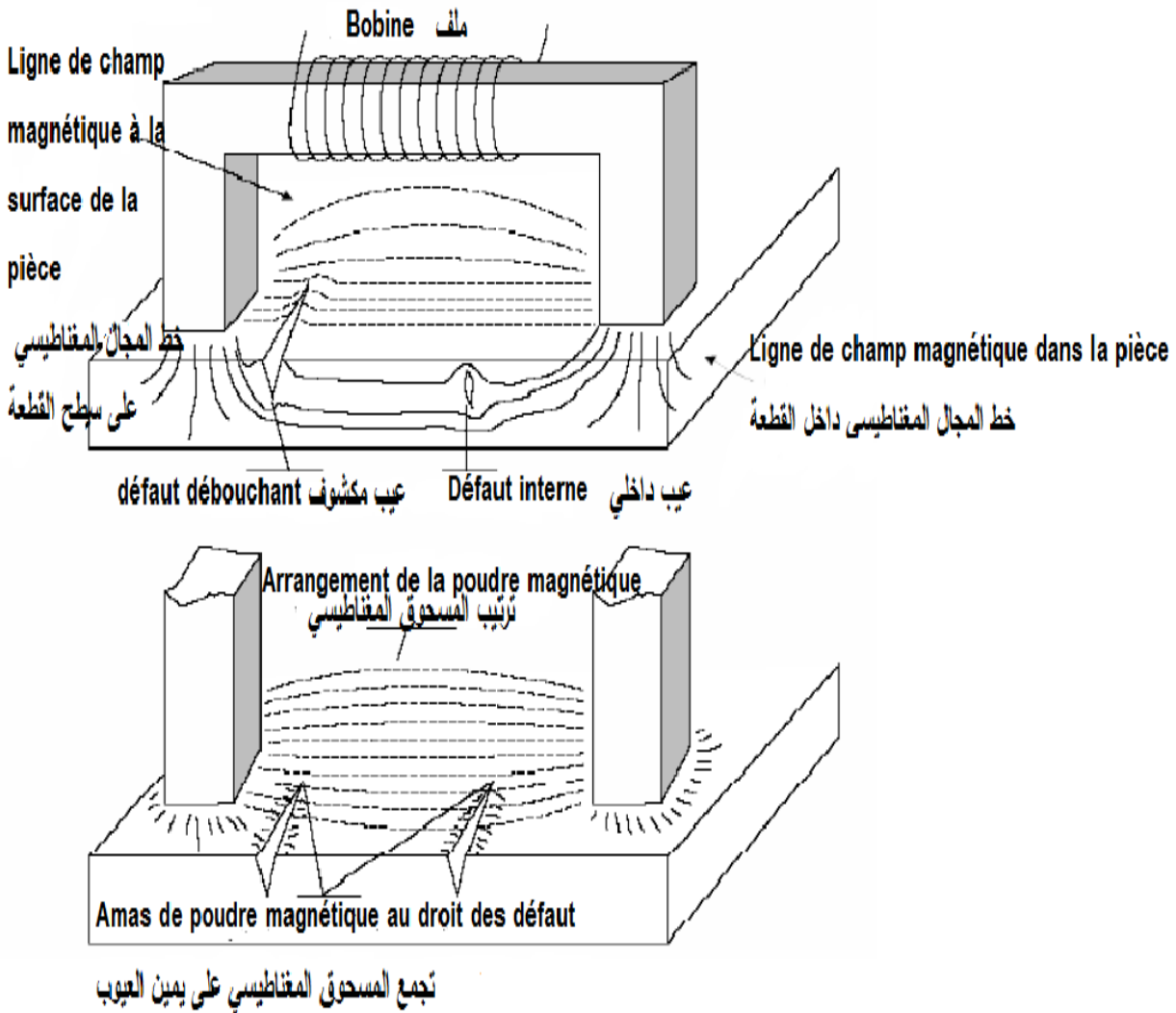


شكل 2.1 : خطوات الاختبار بالسوائل النافذة [1].

3.3.1 طريقة الجسيمات الممغنطة:

تعد هذه الطريقة واحدة من الطرائق المستخدمة في الكشف عن التشققات والعيوب المتواجدة على سطوح المواد الحديدية المغناطيسية أو الواقعة على بعد (2-6) ميليمتر تحت السطح، كاختبار قطع الآلات أثناء الصناعة وفي أثناء الصيانة واختبار اللحامات والمحاور. تقوم هذه الطريقة على وضع طبقة رقيقة من برادة أكسيد الحديد على سطح القطعة المراد اختبارها ويتم في نفس الوقت تطبيق حقل

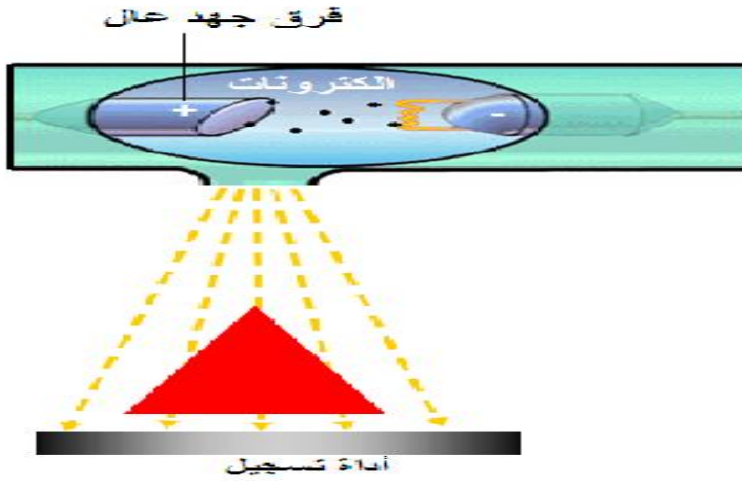
مغناطيسي ذو شدة كافية وباتجاه مناسب عليها. تنحرف خطوط الحقل المغناطيسي عن مسارها الطبيعي داخل القطعة في أماكن تواجد التشققات أو الشوائب ذات الطبيعة اللامغناطيسية أو أماكن تواجد الفراغات الهوائية. مما يؤدي إلى ظهور حقل مغناطيسي متسرب ونشوء مغناط موضعية قادرة على جذب برادة الحديد نحوها كما هو مبين في **الشكل 3.1** و يمكن معرفة أماكن وأشكال العيوب من خلال تفحص البرادة الحديدية المتجمعة [1].



شكل 3.1: الاختبار بالجسيمات الممغنطة [2].

4.3.1 طريقة التصوير الإشعاعي:

تقوم طريقة التصوير الإشعاعي على تسليط حزم من أشعة غاما (Gamma ray) على المادة المراد اختبارها والمتواجدة بين منبع الأشعة وفلم التصوير **الشكل 4.1**. يتحسس الفلم وفقاً لشدة الإشعاعات النافذة من الأجزاء المختلفة للمادة مما يؤدي إلى تشكل صورة توضح التفاوت في نفوذية الأشعة ضمن المادة المصورة على شكل كثافة متفاوتة عليها مما يسمح بتمييز المكونات المختلفة لهذه المادة وتحديد العيوب الطارئة على مكوناتها [1].

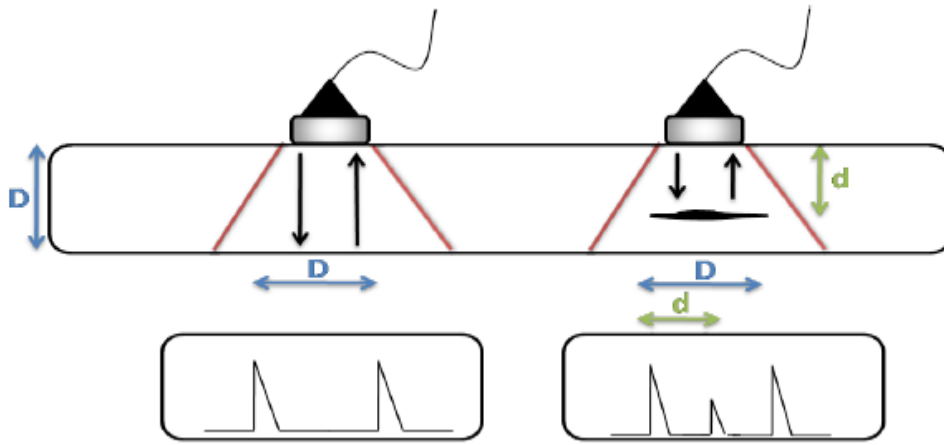


شكل 4.1: الاختبار بالتصوير الإشعاعي [1].

5.3.1 طريقة الموجات فوق الصوتية :

الأمواج فوق الصوتية هي الأمواج الصوتية ذات الترددات الأعلى من الترددات التي يمكن لأذن الإنسان أن تسمعها أو تتحسس لها. ويمكن استخدام هذه الأمواج في فحص واختبار البنية الداخلية للمواد والكشف عن وجود العيوب فيها خلال مراحل صناعتها المختلفة. كما يمكن استخدام هذه الأمواج في فحص المواد والأجزاء الخاضعة للاجهادات أو التآكل في المنشآت الصناعية أثناء الخدمة.

تقوم هذه الطريقة على تطبيق نبضات فوق صوتية ذات تردد واقع ما بين 0.1-25 ميغاهرتز (MHz) في المادة المراد اختبارها وذلك بواسطة مسبار مرسل ومستقبل ناقل للطاقة (transducer) موضوع على تمام مباشر مع المادة المراد اختبارها ويتم الحصول على جميع المعلومات المتعلقة بالبنية الداخلية للمادة بواسطة دراسة شكل وموضع وطاقة الأمواج الصوتية المرتدة عن مختلف أجزائها مثل ما هو مبين في الشكل 5.1 [1].

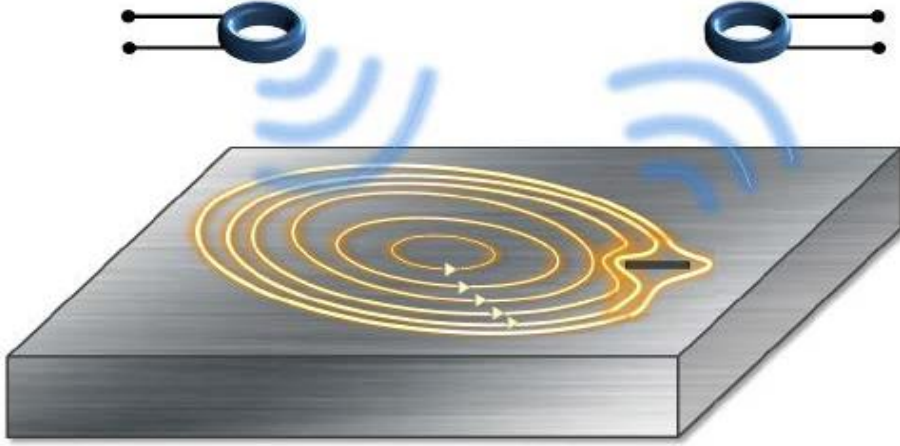


شكل 5.1 : الاختبار بالأمواج فوق الصوتية [3].

6.3.1 طريقة التيارات الدوامة:

تعد طريقة الاختبار بالتيارات الدوامة من الطرائق الناجعة في اختبار جميع المواد الناقلة للتيار والكشف عن وجود العيوب فيها من تشققات وفراغات وعدم تماثل في البنية الكيميائية أو في الخواص الفيزيائية. تقوم هذه الطريقة على وضع ملف مغذى بتيار متناوب بالقرب من سطح المادة الناقلة المراد اختبارها مما يؤدي إلى تولد تيارات دوامة فيها نتيجة لفعل التحريض الكهرومغناطيسي كما هو مبين في الشكل 6.1. ترتبط شدة التيارات الدوامة المتحصلة بمقدار شدة التيار الكهربائي المار في الملف المحرض

وبقيمة تردد هذا التيار وبالنقلية الكهربائية للمادة المختبرة وبنفاذيتها المغناطيسية وبشكل سطحها والعيوب المتواجدة فيها.



شكل 6.1: الاختبار بالتيارات الدوامة [4].

4.1 فوائد تطبيق طرق الاختبارات اللاإتلافية:

- يمتلك تطبيق طرق الاختبارات اللاإتلافية فوائد مهمة وعديدة نذكر منها مايلي:
- تحقيق الاستخدام الأمثل للمواد وإنقاص الهدر الناتج عن التلف الصناعي مما يسمح بزيادة الإنتاج وتخفيض عمليات إعادة التصنيع وخفض كلفة وحدة المنتج.
- يؤدي تطبيق طرق الاختبارات اللاإتلافية بشكل دوري على الآلات ومعدات المنشآت الصناعية إلى كشف مواضع تركيز الإجهادات الميكانيكية وأماكن التآكل.
- يعتبر هذا التطبيق وسيلة ناجعة في انقاص معدل وقوع الحوادث المؤلمة كحوادث تحطم الطائرات والمركبات الفضائية وحوادث التسرب الإشعاعي في المفاعلات النووية.

- تمكن هذه الاختبارات من التأكد من مطابقة المواد المصنعة لمعايير الأمان والجودة وذلك بتحري وجود أي نوع من الاختلافات في بنيتها الكيميائية أو في خواصها الفيزيائية أو في أبعادها الهندسية.
- تمكن من دراسة الخلل في المادة والتعرف عليها [1].

الفصل الثاني:

الاختبار باستخدام التيارات الدوامة

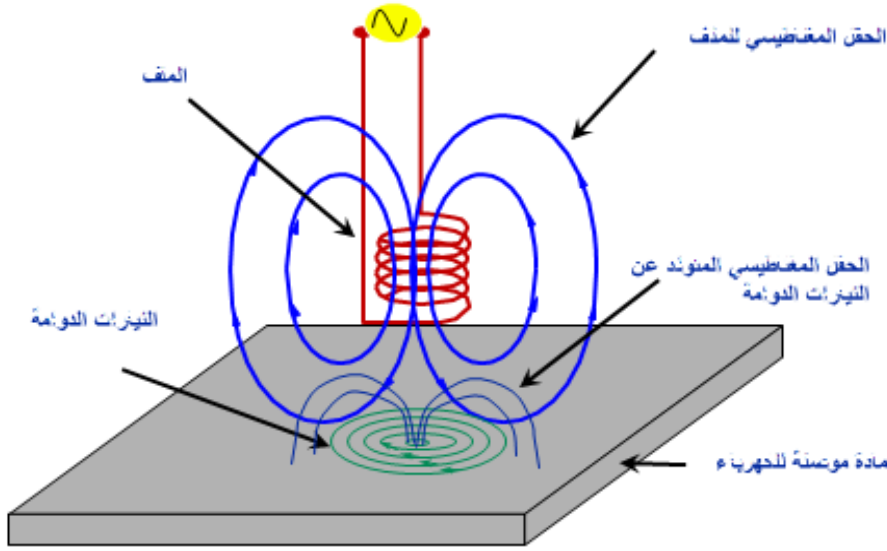
1.1 تاريخ الاختبار بالتيارات الدوامة:

وضعت مبادئ الاختبار باستخدام التيارات الدوامة عندما اكتشف مايكل فاراداي *M. Faraday* الحث الكهرومغناطيسي عام 1831. ومايكل فاراداي هو عالم فيزيائي و كيميائي ولد بإنجلترا و له اكتشافات عديدة منها الحث الكهرومغناطيسي و الدارات الكهرومغناطيسية و التأثير المغناطيسي البصري وظواهر أخرى. و في عام 1879 لاحظ عالم آخر يدعى هيويز *Hyous* حدوث تغير في خواص ملف لاسم معدنين لهما ناقلية كهربائية و نفاذية مغناطيسية مختلفة، ومع ذلك لم يتم استخدام تلك التأثيرات بشكل عملي في اختبار المواد إلا بعد الحرب العالمية الثانية.

زاد الاهتمام بهذه الظواهر وتطبيقاتها في الخمسينيات و الستينيات من القرن الماضي حيث تم إجراء العديد من الأبحاث خاصة في مجالي صناعة الطائرات و الصناعات النووية، ولكن الآن أصبح الاختبار باستخدام التيارات الدوامة تقنية شائعة وذات استخدامات متعددة [1].

2.1 المبدأ الأساسي للاختبار بالتيارات الدوامة:

يعتمد الاختبار باستخدام التيارات الدوامة بالأساس على توليد تيارات دوامة في الجزء المختبر باستخدام ظاهرة الحث المتبادل بين ناقلين (أحد أشكال الحث الكهرومغناطيسي) والتي في مجملها تنص على أنه عند مرور تيار متردد بناقل كهربائي (سلك نحاسي) فإن مجالاً مغناطيسياً يتولد داخل وحول الناقل كما هو موضح في الشكل 1.1. هذا المجال المغناطيسي يتسع كلما اقترب التيار المتردد من الحد الأقصى ويضعف باقتراب التيار المتردد من الصفر، وإذا اقترب ناقل كهربائي آخر من ذلك المجال المغناطيسي المتغير فإن تياراً مستحثاً سيتولد في هذا الموصل.



شكل 1.11: مبدأ توليد التيارات الدوامة [1].

وفي الاختبار يستخدم مجس وهو عبارة عن ملف كهربائي يمر خلاله تيار متردد، ويمثل المجس الدارة الأولى بالشكل السابق والدارة الثانية تشير إلى الجزء المختبر. عندما يمر التيار المتردد في ملف المجس يتولد مجال مغناطيسي داخل وحول الملف وعندما يقرب المجس من مادة ناقلة مثل الألمنيوم يقوم المجال المغناطيسي الناتج عن المجس بتكوين تيار مستحث في المادة الناقلة. يسير هذا التيار في حلقات مغلقة عمودية على اتجاه المجال المغناطيسي ومن هنا جاء اسم تيارات دوامي. هذه التيارات الدوامة تنتج مجالاً مغناطيسياً يتفاعل مع المجال المغناطيسي المتكون في الدارة الأولى (الملف/المجس)، وبقياس التغيرات الحادثة في المقاومة الكهربائية والممانعة الحثية للملف يمكن تكوين (استنتاج) معلومات عن المادة المختبرة مثل الناقلية الكهربائية و النفاذية المغناطيسية لهذه المادة من ناحية احتوائها على شقوق أو عيوب.

في حالة أن المادة المختبرة كانت ذات مغناطيسية حديدية فإن الفيض المغناطيسي يكون أكثر قوة وأكثر تركيزاً على الرغم من ممانعة تأثيرات التيار الدوامي له وبالتالي تزيد المقاومة الحثية،

وبالرغم من ذلك فإن زيادة الممانعة الحثية يجعل عملية فحص هذه المواد (المواد ذات المغناطيسية الحديدية العالية) أسهل من غيرها [1].

3. II الوصف الفيزيائي للاختبار بالتيارات الدوامة:

الظواهر التي تحدث في اختبار التيارات الدوامة تحكمها معادلات ماكسويل. في كل نقاط الفضاء. إذ أن إمداد ملف الالتقاط بواسطة تيار متغير يخلق مجال إثارة متغير بموجب قانون ماكسويل أمبير. أي جزء موصل في هذا المجال سيكون مقراً للتيارات المستحثة التي تسمى التيارات الدوامة (قانون ماكسويل فراداي وقانون أوم).

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1. II) \quad \text{قانون ماكسويل - فراداي}$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (2. II) \quad \text{قانون ماكسويل - غوص (المغناطيسية)}$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (3. II) \quad \text{قانون ماكسويل - غوص (الكهرباء)}$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4. II) \quad \text{قانون ماكسويل - أمبير}$$

حيث :

$$\vec{E} : \text{الحقل الكهربائي (V/m)}.$$

$$\vec{B} : \text{مجال الحث المغناطيسي (T)}.$$

$$\vec{D} : \text{مجال الحث الكهربائي (C/m}^2\text{)}.$$

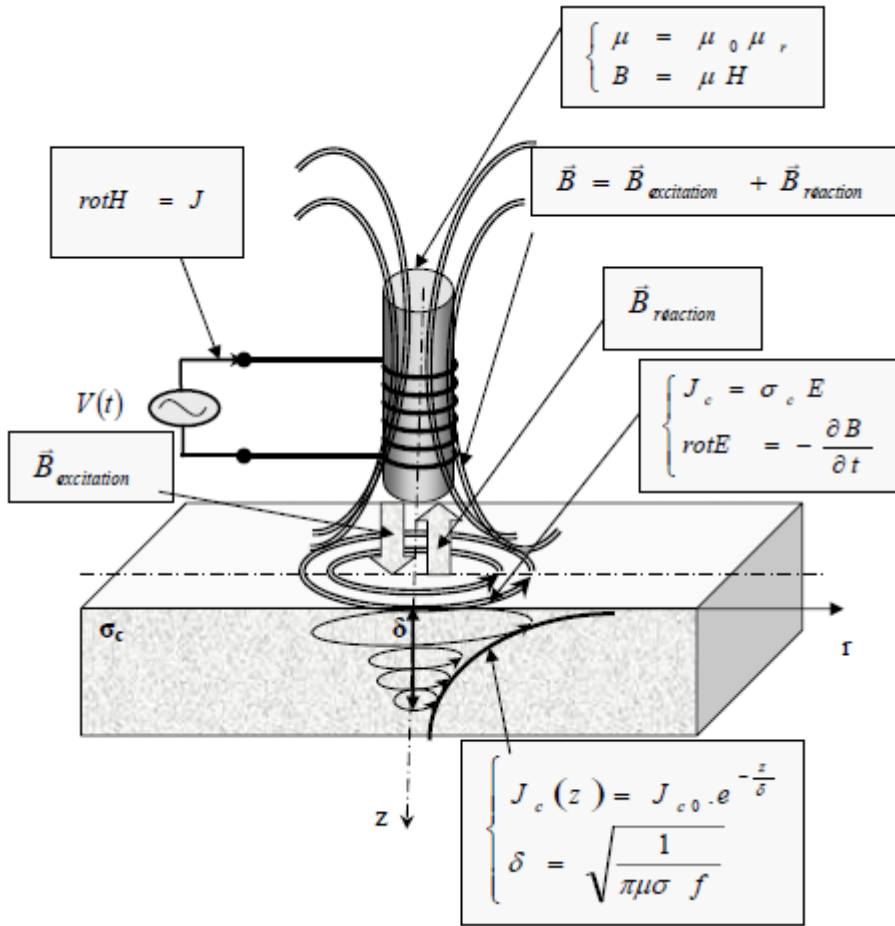
$$\vec{H} : \text{الحقل المغناطيسي (A/m)}.$$

$$\vec{J} : \text{كثافة التيار المستحث (A/m}^2\text{)}.$$

ρ : كثافة الشحنة الحجمية (C/m^3).

وبموجب قانون لينز فإن هذه التيارات و بدورها تعيد إنتاج مجال مغناطيسي يعاكس المجال الذي أدى إلى ظهورها. سيقوم الحقل الناتج (الإثارة و التفاعل) بعد ذلك بتعديل التيار في المصدر وبالتالي مقاومة المستشعر. بالإضافة إلى ذلك، التيارات الدوامة تبدأ بالانخفاض بشكل متسارع إبتداءً من السطح.

يلخص الشكل 2.11 مبدأ الاختبار بالتيارات الدوامة [5].



شكل 2.11: رسم تخطيطي لاختبار التيارات الدوامة [5].

4.11 استخدامات التيارات الدوامة:

تعتبر طريقة الاختبار بالتيارات الدوامة واسعة الاستخدام وذلك لتنوع تطبيقاتها ونذكر منها:

- قياس الكسور.
- قياس ثخانة المادة.
- قياس ثخانة الطلاء.
- الكشف عن العيوب السطحية.
- عيوب ما تحت السطح في الوصلات للحامية.
- الكشف عن وجود المواد العازلة كالثغرات الهوائية.
- وقياس ثخانتها الثغرات.
- التعرف على خواص المواد.
- فصل السبائك المختلفة عن بعضها.
- قياس الناقلية ل: - تحديد نوع المادة.
- تحديد التلف الحراري.
- تحديد عمق الحالة.
- مراقبة المعالجة الحرارية [1] [6].

5.11 الأثر السطحي - عمق اختراق التيارات الدوامة (Skin effect):

تتطور التيارات الدوامة بشكل أساسي على سطح الجزء المراد فحصه. تتخفف كثافتها بسرعة داخل الهدف (الأثر السطحي). هذه الظاهرة من أصل كهرومغناطيسي تظهر في جميع المواد الموصلة التي يمر بها تيار كهربائي متناوب أو تخضع لمجال كهرومغناطيسي يتغير بمرور الوقت. في حالة الاختبارات غير المتلفة، تبدأ التيارات المستحثة في المادة في الانخفاض بشكل متسارع من السطح

الشكل 3.11. المقدار المميز لهذه الظاهرة هو العمق القياسي للاختراق المعطى بواسطة [2]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad (5.11)$$

حيث:

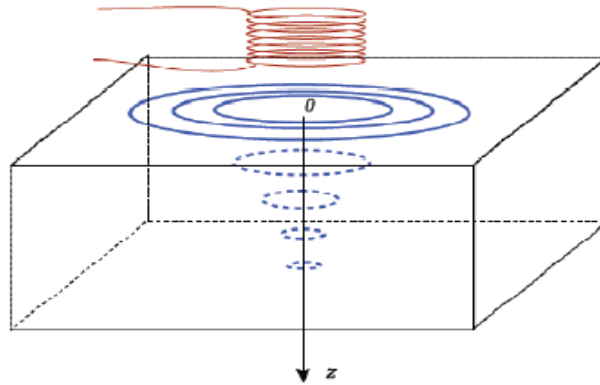
f : تردد الطاقة بالهرتز [Hz].

μ_r : النفاذية المغناطيسية النسبية للمادة.

μ_0 : النفاذية المغناطيسية للفراغ [H/m].

σ : الناقلية الكهربائية [S/m].

δ : العمق القياسي للاختراق [m].



شكل 3.11: عمق اختراق التيارات الدوامة [7].

وبالتالي فإن العمق القياسي للاختراق يتناسب عكسياً مع تواتر المجال و الخصائص الفيزيائية

للمواد. إذا اعتبرنا هدفاً مستويًا شبه لانهائي مثار بمجال مغناطيسي خارجي ومتوازي مع مستوى الهدف،

يخضع معامل كثافة التيار للعلاقة التالية:

$$J(z) = J_0 e^{-z/\delta} \quad (6.11)$$

z : العمق المعتبر داخل الهدف بالمتر [m].

$J(z)$: معامل كثافة التيار كدالة للعمق $[m^2/A]$.

J_0 : كثافة التيار عند السطح $[m^2/A]$.

δ : العمق القياسي للاختراق بالمتر $[m]$ [2].

6.11 العوامل المؤثرة على إشارة التيارات الدوامة:

تتضمن الإشارة الواردة من مستشعر التيارات الدوامة مجموعة من الاستجابات من العيوب وهندسة العينة و رفع المستشعر. لذلك، قد يكون من الصعب فصل تأثير واحد. من المحتمل إجراء تقييم كافي للعيوب أو أي خصائص سطحية أخرى عند فهم العوامل الأخرى. وفيما يلي شرح العوامل الأولية التي تؤثر على استجابة المستشعر:

• التردد Frequency:

تتأثر استجابة التيارات الدوامة الحالية بشدة بالتردد المختار للتحقيق. يجب أن يتم اختيار هذا العامل بشكل مناسب من قبل المشغل، بناءً على عينة اكتشاف الشقوق مثل الترددات المنخفضة للتوصيف الحجمي و الترددات الأعلى للتوصيف السطحي. اقترح العديد من العاملين في هذا المجال مثل Ditchburn نطاقاً (10MHz-100Hz) كترددات فحص قياسية في اختبار التيارات الدوامة. ومع ذلك فقد تميز عدد قليل منهم مثل Owston بتردد عالٍ عن (25 MHz) للطلاء المعدني الرقيق واكتشاف عيوب السطح، عند فحص المواد المغناطيسية، يتم إجراء اختبارات منخفضة التردد للاختراق عينة الاختبار و التعويض عن نفاذيتها [8].

• الناقلية الكهربائية لمادة الاختبار **Electric Conductivity of material**:

تعتمد الناقلية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية لأجسام الاختبار للمادة على البنية الدقيقة، على سبيل المثال، المعالجة الحرارية. سيؤدي التوصيل الأكبر لمادة مثل النحاس و الألمنيوم إلى زيادة تدفق التيارات الدوامة وبالتالي مقاومة ملف المستشعر. نشير إلى أنه في المواد ذات الموصلية الكبيرة، تنتج العيوب أو الشقوق إشارة عالية.

ومع ذلك فإن عمق الاختراق للمواد عالية التوصيل عند تردد ثابت يكون أقل مما هو عليه في المواد منخفضة التوصيل مثل الفولاذ المقاوم للصدأ والفولاذ. يمكن قياس موصلية المواد المختلفة باستخدام معيار النحاس المملدن الدولي (IACT) [8].

• النفاذية المغناطيسية **Magnetic permeability**:

تتأثر إشارات اختبار التيارات الدوامة بشكل كبير بالمواد المغناطيسية بسبب الزيادة في التدفق الناتج عن النفاذية النسبية الكبيرة لمواد معينة مثل الفولاذ المقاوم للصدأ أو الفولاذ الكربوني. تعمل نفاذية المادة على تغيير اقتران الملف بالعينة الموصلة وبالتالي تؤثر على تفاعل الملف. النفاذية لها تأثير كبير على الاختبار بالتيارات الدوامة مقارنةً بالناقلية الكهربائية [8].

• الرفع **Lift-off**:

يتأثر الاختبار بالتيارات الدوامة بشدة بمقدار الرفع والذي يمكن تعريفه على أنه مسافة الفصل بين سطح ملف الإثارة و سطح المادة الموصلة. تغير هذه المسافة الحث المتبادل للدوائر مع زيادة الرفع؛ يستحث اتساع للتيار الدوامي emf مع انخفاض الملف الثانوي، مما قد يؤدي إلى سوء تفسير الإشارات على أنها عيوب عند رفع كبير، لن يتم تحفيز أي emf يمكن اكتشافه في الملف الثانوي

بسبب العينة المختارة. هذا التأثير يبرز بشكل خاص عند استخدام الإثارات الجيبية، التي تقعد الحساسية بعد 5 ملم. على الرغم من أنه ليس مطلوباً أن يكون لدينا قوة رفع صفرية، فمن الضروري محاولة الحفاظ على قوة رفع ثابتة، لأن الاختلاف فيه يؤثر بشكل كبير على الإشارة المستقبلية [8].

7.11 مستشعرات الاختبار بالتيارات الدوامة:

في العادة يتم تصنيف مستشعرات الفحص بالتيارات الدوامة حسب وظيفتها أو موقعها بالنسبة لمادة الاختبار أو حسب وضع التشغيل.

1.8.11 تصنيف المستشعرات من حيث الوظيفة:

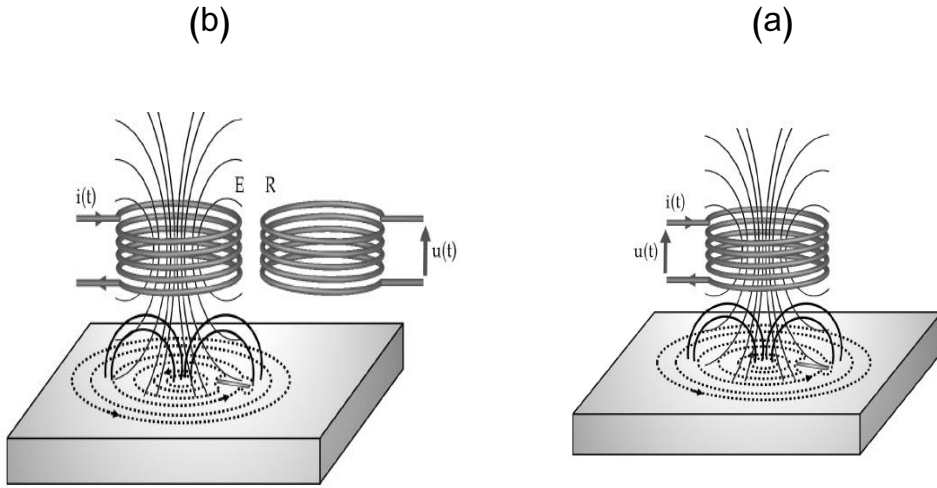
تنقسم مستشعرات الفحص بالتيارات الدوامة من حيث الوظيفة إلى قسمين: مستشعر مزدوج الوظيفة ومستشعر بوظائف منفصلة.

- مستشعر مزدوج الوظيفة:

يوفر هذا المستشعر وظيفتين (الإنشاء/الاستقبال) بنفس الملف كما هو موضح في **شكل 4.11(a)**.

- مستشعر بوظائف منفصلة:

هو جهاز استشعار يتم فيه توفير وظائف الإنشاء و الاستقبال بواسطة لفات منفصلة. غالباً ما يهدف إلى اكتشاف العيوب الكبيرة أو العميقة، يعتمد مبدأ المجال المغناطيسي الذي يمر عبر المادة ويتم التقاطه بواسطة ملف القياس الذي يعيد صورة المادة. ملف الإنشاء أكبر من ملف الاستقبال، كما هو موضح في **شكل 4.11(b)**.



شكل 4.11 : تمثيل مستشعر مزدوج الوظيفة والمستشعر منفصل الوظائف [9].

2.7.11 تصنيف المستشعرات من حيث الموقع:

اعتماداً على موضع المستشعر بالنسبة للمادة المراد اختبارها، هناك ثلاثة أنواع من المستشعرات:

- مستشعر التطويق:

تحيط هذه الأجهزة بالعينة المراد فحصها. تهدف هذه المستشعرات إلى التحكم في المواد ذات

الأشكال الأسطوانية مثل الأنابيب أو القضبان أو حتى الأسلاك. يكون القطر الداخلي لجهاز الاستشعار

أكبر قليلاً من القطر الخارجي للمادة المراد فحصها شكل 5.11 (a).

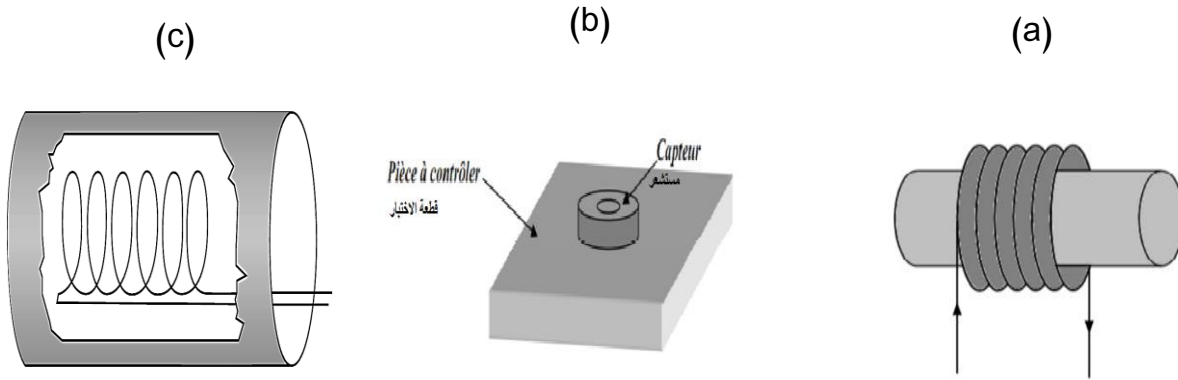
- المستشعر السطحي:

تتيح مستشعرات السطح أو المجسات السطحية فحص الأسطح المستوية أو الأشكال المعقدة الأخرى.

وتعد أكثر أجهزة الاستشعار شيوعاً في السوق شكل 5.11 (b) [7].

• المستشعر الداخلي:

تسمح المستشعرات الداخلية التي تسمى المسابير بالتحكم الداخلي في الأنابيب. لهذا نميز بوضوح بين المجسات الدوارة التي تتطلب حركة حلزونية من أجل مسح كامل للسطح الداخلي للأنبوب المستخدم. بالإضافة إلى مجسات المصفوفة التي يتكون الجزء النشط من المستشعر فيها من عدة عناصر مرتبة شعاعياً وموزعة بالتساوي حول محور المسبار مما يتطلب حركة انتقالية **شكل 5.11 (c) [2]**.



شكل 5.11: تمثيل مستشعر التطويق [7]، المستشعر السطحي [7] والمستشعر الداخلي [2].

3.7.11 تصنيف المستشعرات من حيث وضع التشغيل:

تنقسم المستشعرات حسب الوصل الكهربائي للملف إلى مستشعرات الوضع المطلق ومستشعرات

الوضع التفاضلي.

• مستشعرات الوضع المطلق:

تستعمل مستشعرات الوضع المطلق في القياس المباشر دون اللجوء إلى المقارنة مع جسم

مرجعي أو عياري أثناء عملية القياس. تطبق في قياسات الناقلية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية والأبعاد

والقساوة. تستعمل أيضا في اكتشاف العيوب الطويلة ويمكنها أيضا إعطاء معلومات عن المنتج المختبر مثل الصلادة، والإجهادات الداخلية إن وجدت.

• مستشعرات الوضع التفاضلي:

تتكون هذه المستشعرات من ملفين للمقارنة بين قياسين متزامنين في منطقتين متجاورتين، حيث يتم لف الملفات المستقبلية في اتجاه معاكس لبعضها وبذلك يكون الجهد الناتج عن المسبار التفاضلي معدوم في حالة عدم وجود عيب، وفي حالة وجود عيب فإنه يختل التوازن بين الملفين وتظهر إشارتين للجهد. يعتبر غير حساس لتغيرات درجة الحرارة، يستعمل في اكتشاف الشقوق و تغيرات الأبعاد[1].

8.11 تقنيات التيارات الدوامة:

لتحقيق الإثارة لأجهزة استشعار التيارات الدوامة، هناك ثلاثة أنواع أساسية لتقنيات الإثارة: إثارة أحادية التردد، إثارة متعددة التردد بالإضافة إلى إثارة التيارات الدوامة النبضية.

1.8.11 تقنية إثارة التيارات الدوامة أحادية التردد:

يستخدم فحص التيار الدوامي الأساسي ترددا واحداً. حالياً لا يزال هذا هو الأسلوب الأكثر استخداماً في الاختبار غير الإتلافي بالتيارات الدوامة، خاصة للكشف عن الشقوق السطحية و القريبة من السطح. يكون التيار المطبق في المستشعر بشكل عام ولكن ليس دائماً جيبياً، وقد يتراوح التردد من بضعة مئات من الهرتز إلى بضعة ميغا هرتز.

يتم تحديد التردد بناءً على مادة الاختبار وعمق العيب المراد اكتشافه للحصول على أفضل استجابة. يجب على المستشعر إحداث أكبر كثافة تيار دوامة بالقرب من العيب، لذلك ومن أجل الكشف

الحساس للسطح، كلما كان العيب أعمق، يجب أن يكون تردد الإثارة أقل. تعتمد كثافة التيار المستحث على تردد الإثارة، الناقلية الكهربائية والنفذية المغناطيسية للمادة، هندسة الهيكل وأبعاد ملف الإثارة [10].

يتكون نظام التيار الدوامي احادي التردد عادةً من مذبذب، أو ملف إثارة، أو ملف إشارة واحد أو أكثر، دوائر معالجة الإشارة. يمكن تنفيذ جهاز الإثارة والاستشعار إما في ملف واحد أو ملفات منفصلة ويتم تكييف تصميم الملف ليناسب التطبيق [10].

2.9.ii تقنية التيارات الدوامة متعددة التردد:

تقتصر فعالية الاختبار غير الإتلافي بالتيارات الدوامة التقليدي أحادي التردد على تحديد شرط أو شرطين اختبار فقط، من أجل التمكن من الحصول على مزيد من المعلومات حول طبيعة العيوب والقضاء على الإشارات غير المرغوب فيها، تم إعداد واستخدام تقنيات الترددات المتعددة. يمكن أيضاً استخدامها لتحليل العيوب ذات الأشكال المعقدة بمزيد من التفصيل ويمكنها تحديد العيوب في وجود تباين في التوصيل، النفذية، و رفع الملف lift-off المحتمل عن طريق طرح إشارة خصائص هذا التباين. التطبيق الرئيسي لتقنيات الترددات المتعددة هو في فحص الأنابيب الداخلية للمبدل الحراري ومولد البخار. يمكن تطبيق تردد الإثارة المختلفة إما في وقت واحد أو بالتتابع. إذا تم تطبيقها بالتتابع، يجب إعطاء النظام وقتاً كافياً للسماح له بالوصول إلى الحالة الثابتة قبل تطبيق إثارة التردد التالية. بالطبع، ينتج عن الإثارة المتزامنة وقت اختبار أقصر، لكن الطاقة المتاحة عند كل تردد أقل من تلك المتوفرة في الإختبار المتسلسل، لذلك قد يكون ذلك في مثال مثل اختبار المواد القابلة للمغنطة غير المشبعة حيث تكون طاقة الإدخال حرجة، قد تكون التقنية المتسلسلة ضرورية [10].

3.8.11 تقنية التيارات الدوامة النبضية:

التيار الدوامي النبضي (PEC) هو تقنية ناشئة في EC-NDT. تكنولوجيا التيار النبضي لديها القدرة على تحديد عدد كبير من المعلومات مثل حجم العيب والموقع و رفع الملف lift-off أثناء الفحص، تم أيضا تطوير نظام التيار الدوامي النبضي و الذي كان قادرا على إجراء قياس السماكة على مسافات رفع كبيرة جداً (تصل إلى 100 ملم) لقياس التآكل تحت العزل. تظهر تقنية التيار الدوامي النبضي أيضاً أداءً واعداً في اختبار المواد ذات الناقلية العالية، مثل النحاس، حيث تفشل تقنيات التردد الواحد بشكل عام. يسمح هذا النهج أيضاً باكتشاف العيوب بالقرب من السطح وعلى العمق، في نفس الوقت دون الحاجة إلى تغيير المسبار وتردد التشغيل [10].

9.11 أنواع العيوب:

يُعرف العيب في منتج ما على أنه وجود اختلال في الخصائص الفيزيائية أو البنية الكيميائية لهذا المنتج، مما يؤثر على أدائه، ومن حيث الموقع فإن العيوب تنقسم إلى قسمين رئيسيين: عيوب سطحية وعيوب داخلية.

✓ أولاً: العيوب السطحية:

يمكن للمراقب الوصول إلى هذه العيوب مباشرة ولكن ليس دائماً بالعين المجردة، ولهذا يمكن

تصنيفها إلى نوعين مختلفين:

- الفئة الأولى تتوافق مع عيوب النقطة، فهي الأكثر ضرراً من الناحية التكنولوجية، فهي عبارة

عن شقوق وحفر، قادرة عموماً على التسبب في كسر القطعة بمرور الزمن. عن طريق بدء

تشققات الإعياء على سبيل المثال. في الأجزاء المعدنية، غالباً ما يكون سمك هذه الشقوق صغيراً (بضعة ميكرومتر μm)، ويمكن أن تكون ضارة بمجرد أن يتجاوز عمقها بضعة أعشار من المليمتر. و يتم استعمال الطرق غير المدمرة الحساسة للكشف عنها.

- الفئة الثانية تتوافق مع عيوب المظهر، أي النطاقات التي يجذب فيها التباين في المعلومات الهندسية أو الفيزيائية العين (مثل الخشونة، السماكة الزائدة و البقع المختلفة) ويجعل المنتج غير قابل للاستخدام. في هذه الحالة يُعتبر الفحص البصري كافياً.

✓ ثانياً: العيوب الداخلية:

تكون الاختلافات في الطبيعة، و الشكل، والأبعاد متنوعة، وموضعية تقع في حجم الجسم المراد اختباره. في الصناعات المعدنية، قد تؤثر هذه الشقوق الداخلية و الشوائب على صحة المسبوكات، المطروقات و الملحومات. وفي حالات أخرى يكون الأمر مجرد وجود جسم غريب داخل حاوية أو منتج معبأ. هنا يتم استبعاد الفحص البصري بشكل عام. وبالتالي نلجأ إلى استخدام واحدة أو أكثر من العمليات الرئيسية للاختبارات اللاإتلافية كالتصوير الإشعاعي، الفحص بالموجات فوق الصوتية أو حتى الأساليب الأكثر ملاءمة لحالات معينة مثل الانبعاث الصوتي، والتصوير بالأشعة تحت الحمراء [11].

10.11 مميزات وحدود الاختبار بالتيارات الدوامة:

أولاً: المميزات:

تتمثل مميزات الاختبار بالتيارات الدوامة في النقاط التالية:

- حساسة للكسور الصغيرة و العيوب الأخرى؛

- تحدد العيوب السطحية وقرب السطحية؛

- التجهيزات قابلة للحمل؛
- لا يحتاج مسبار الاختبار تماس مع الأجزاء؛
- يعطي الفحص نتائج آنية.

ثانياً: الحدود:

للاختبار بالتيارات الدوامة معيقات وحدود تتمثل في:

- يمكن فحص المواد الناقلة للكهرباء فقط؛
- يجب وصول المستشعر لسطح الاختبار؛
- تتطلب مهارة و تدريب أكثر من باقي الطرق؛
- لا يمكن تحديد عيوب التصفح والتي تتموضع موازية للغات المستشعر ولاتجاه مسحه [6].

الفصل الثالث:

التطبيقات و النتائج

1.iii دراسة عمق اختراق التيارات الدوامة:

يمثل الجدول 1.iii بعض خصائص كل من النحاس و الألمنيوم و الحديد عند درجة حرارة

300K. نذكر أن النفاذية المغناطيسية للفراغ $\mu_0 = 1 \text{ H/m}$.

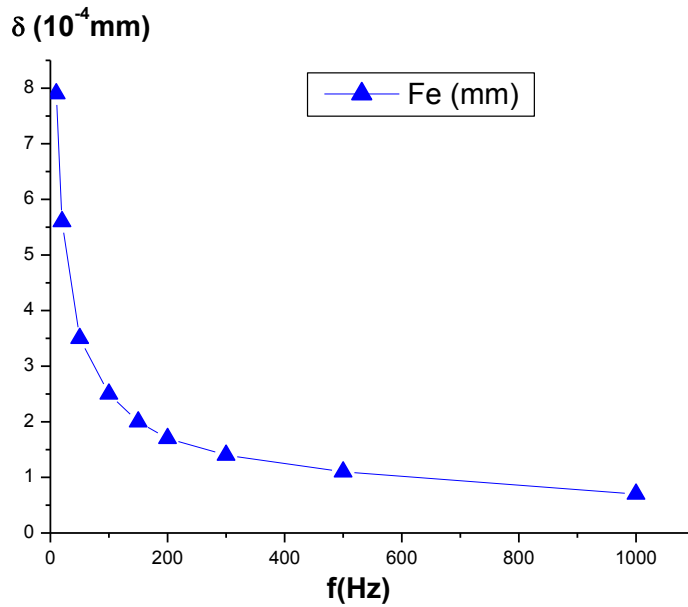
جدول 1.iii: الناقلية الكهربائية [12] والنفاذية المغناطيسية [13] للحديد والألمنيوم والنحاس.

النحاس	الألمنيوم	الحديد	
57.59	36.59	10.02	الناقلية الكهربائية σ [S/m]
6.4×10^{-6}	2.2×10^{-5}	5000	النفاذية النسبية

باستعمال العلاقة (5.ii) يمكن حساب عمق الإختراق للحديد بدلالة التواتر. المنحنى المتحصل

عليه مبين في الشكل 1.iii نلاحظ أن المنحنى يتناقص بزيادة التردد. هذا التناقص يكون سريعا من أجل

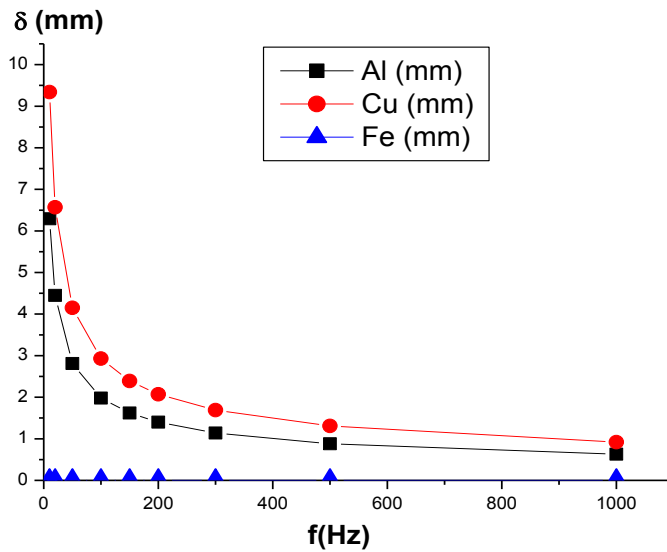
الترددات الأقل من 200 Hz تقريبا ويكون بطيئا من أجل الترددات الأكبر من 200 Hz.



شكل 1.111: منحنى يمثل عمق الإختراق للحديد بدلالة التردد.

من أجل المقارنة بين مختلف المعادن المذكورة في الجدول 1.111 نمثل عمق الإختراق لكل من

الحديد والألمنيوم والنحاس بدلالة التردد في الشكل 2.111.

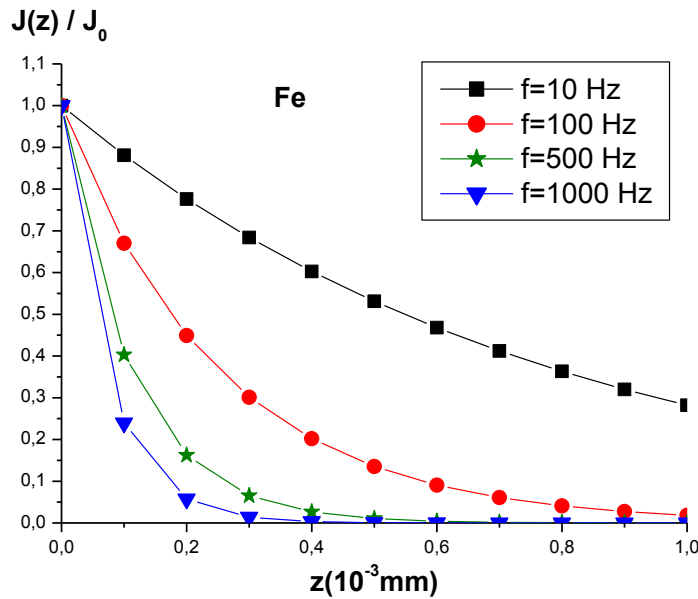


شكل 2.111: منحنى يمثل عمق الإختراق للحديد والألمنيوم والنحاس بدلالة التردد.

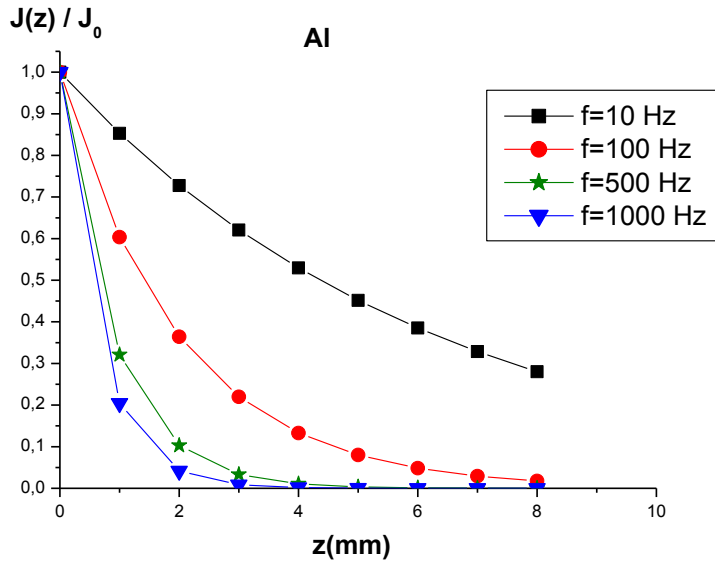
من خلال الشكل 2.111 عند المقارنة بين المنحنيات وعند استعمال سلم رسم مناسب نلاحظ أن قيمة عمق الإختراق عند النحاس والألمنيوم أكبر من عمق الإختراق عند الحديد. وهذا الاختلاف راجع إلى نفاذية وناقلية كل معدن. حيث نجد أن النحاس يمتلك أكبر ناقلية وأصغر نفاذية.

2.111 دراسة تأثير عمق الإختراق على كثافة التيارات الدوامة:

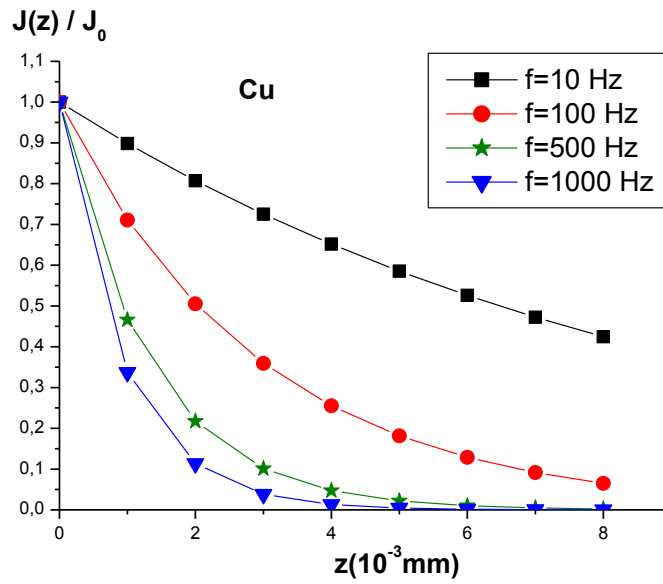
باستعمال العلاقة (6.11) يمكن حساب نسبة كثافة التيارات الدوامة وتأثير بعض العوامل عليها. نسبة كثافة التيار حالة الحديد والألمنيوم والنحاس من أجل بعض قيم للترددات بدلالة العمق z ممثلة في الأشكال الشكل 3.111، الشكل 4.111 و الشكل 5.111 على الترتيب.



شكل 3.111: منحنى يمثل كثافة التيارات الدوامة للحديد بدلالة العمق



شكل 4.111: كثافة التيارات الدوامة للألمنيوم بدلالة العمق.

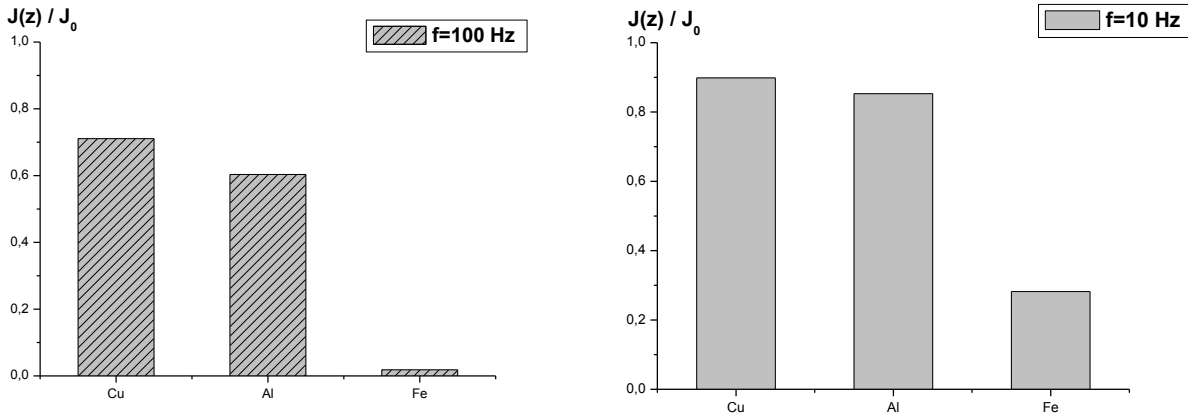


شكل 5.111: كثافة التيارات الدوامة النحاس بدلالة العمق.

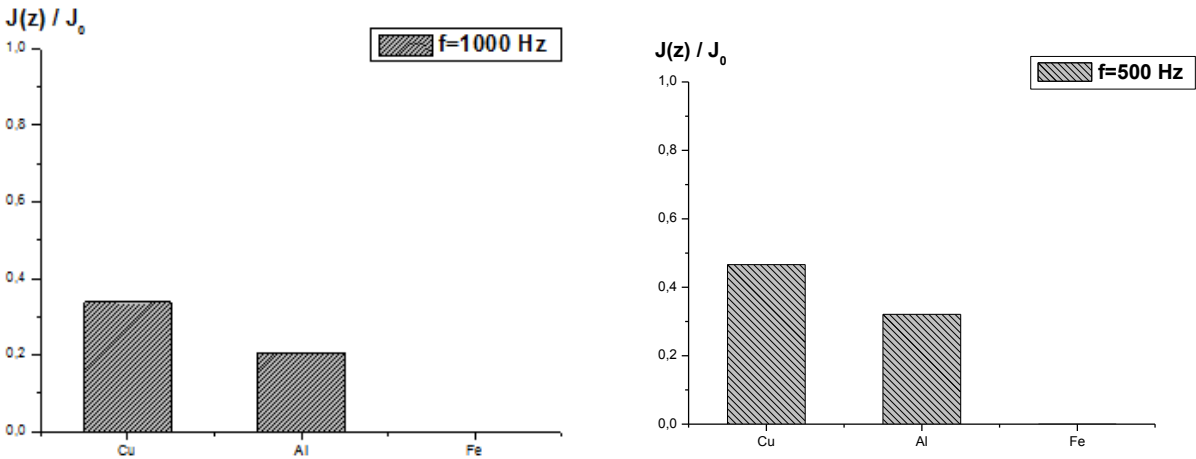
نلاحظ من خلال الأشكال **الشكل 3.iii**، **الشكل 4.iii** و**الشكل 5.iii** التي تمثل نسبة كثافة التيارات الدوامة بدلالة التردد والعمق للحديد والألمنيوم والنحاس أن المنحنيات تتبع نفس الشكل العام. نلاحظ كذلك أنه كلما زاد العمق نقصت نسبة الكثافة. كما أن هذا التناقص يكون سريعا من أجل الترددات الكبيرة. من أجل المقارنة بين المعادن السابقة قارنا نسبة كثافة الإختراق لكل من الألمنيوم والنحاس والحديد حالة التردد $f = 1000\text{Hz}$ من أجل العمق $z = 1\text{ mm}$ الممثلة في **الجدول 2.iii** على شكل أعمدة في الشكلين **الشكل 6.iii**، **الشكل 7.iii**.

جدول 2.iii: نسبة كثافة الاختراق للألمنيوم والنحاس والحديد من أجل العمق $z = 1\text{ mm}$

	Fe	Al	Cu
10 Hz	0,28201	0,85301	0,89847
100 Hz	0,01832	0,60348	0,71085
500 Hz	1,12686E-4	0,32098	0,4661
1000 Hz	6,24875E-7	0,20448	0,33724



شكل 6.iii: كثافة الاختراق للنحاس والحديد و الألمنيوم حالة $z=1 \text{ mm}$ من أجل التردد $f=100\text{Hz}$ و $f=10\text{Hz}$



شكل 7.iii: تمثيل كثافة الاختراق للنحاس والحديد والألمنيوم في حالة العمق $z=1 \text{ mm}$ من أجل التردد $f=1000\text{Hz}$ و $f=500\text{Hz}$

نلاحظ من خلال الشكلين **الشكل 6.iii** و **الشكل 7.iii** أن كثافة الاختراق للنحاس والألمنيوم أكبر من تلك الموجودة في الحديد في جميع الأشكال على الرغم من اختلاف الترددات. ونلاحظ كذلك أن الإخلاف يكون واضحا كلما زاد التواتر.

الأدوات المستعملة في التجارب :

تتألف الأدوات والتجهيزات المستعملة في هذا العمل بشكل أساسي من:

- مصدر للتيار المتردد ذو تواترات المنخفضة GBF؛

- أجهزة أمبير متر؛

- أجهزة فولطمتر؛

- جهاز غالفانومتر؛

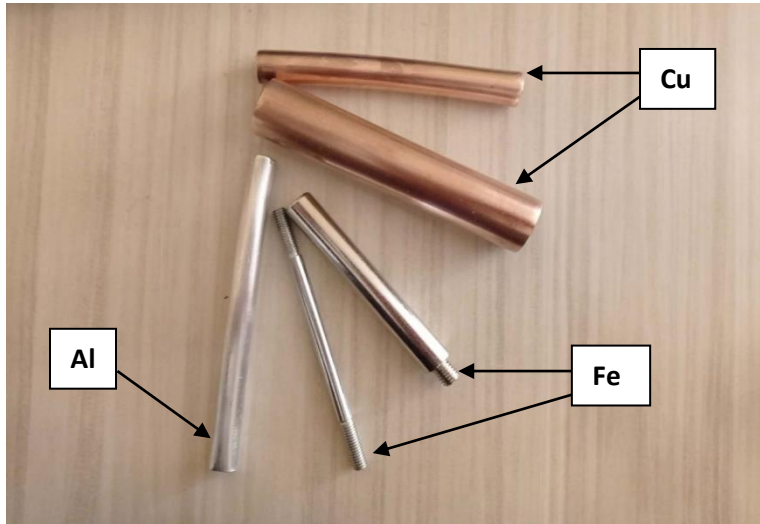
- معدلة؛

- قضبان معدنية مختلفة الطبيعة (الشكل 8.iii)؛

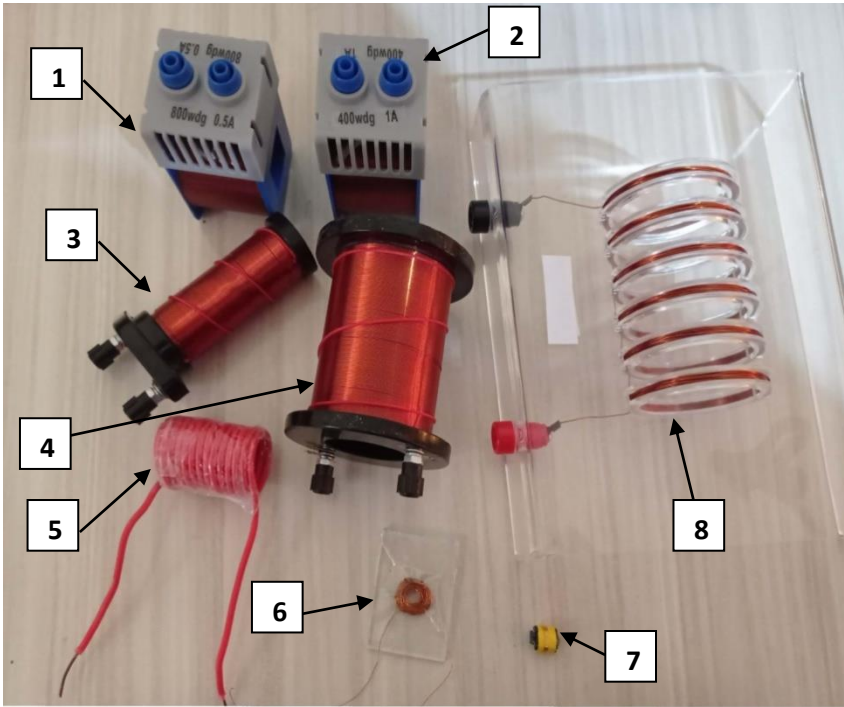
- أسلاك نحاسية ملمعة لللف؛

- ملفات كهربائية مختلفة (الشكل 9.iii)؛

- أسلاك للتوصيل.



شكل 8.iii: صورة توضح القضبان المعدنية المختلفة المستعملة في التجارب.



شكل 9. III: صورة توضح الملفات الكهربائية المستعملة في التجارب.

3. III دراسة تأثير التردد على ممانعة الملف:

في هذه التجربة تم تحقيق تركيب تجريبي لدارة متسلسلة تتكون من جهاز مولد للترددات، الملف الكهربائي رقم 1، جهاز فولطمتر لقياس التوتر بين طرفي الملف وجهاز أمبير متر لقياس شدة التيار الكهربائي المار بالملف كما هو مبين بالشكل 10. III.



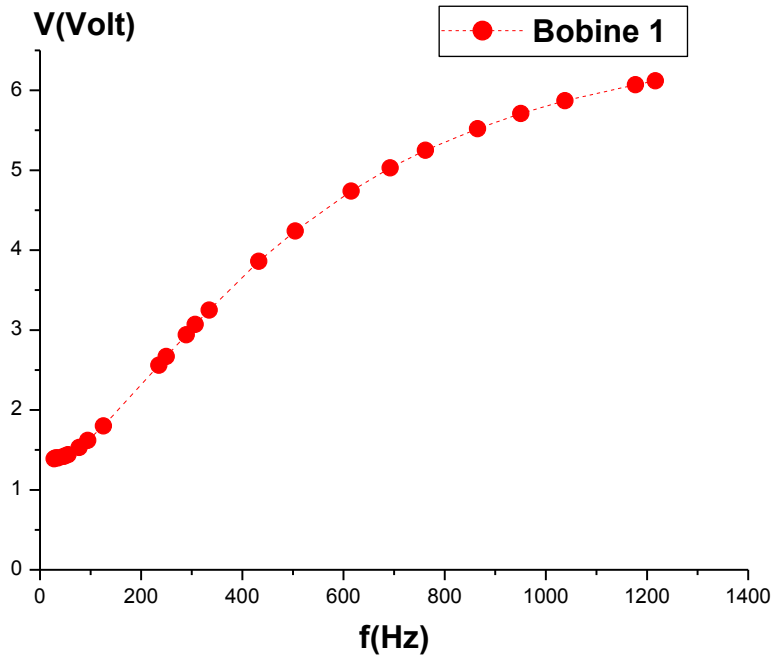
شكل 10.11: التركيب التجريبي لتجربة دراسة تأثير التردد على ممانعة الملف.

غيرنا في كل مرة قيمة التردد وقمنا بقياس كل من شدة التيار المار بالدائرة والتوتر بين طرفي الملف

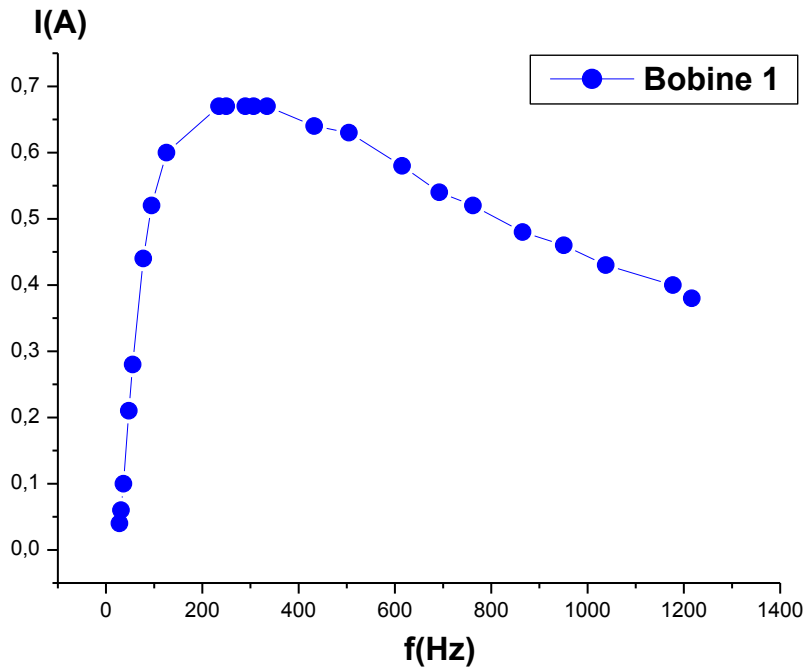
الكهربائي.

المنحنى الممثل لتغيرات التوتر بين طرفي الملف بدلالة التردد ممثل في الشكل 11.11 والمنحنى

الممثل لتغيرات شدة التيار المار بالملف بدلالة التردد ممثل الشكل 12.11.



شكل 11.11: تغيرات التوتر الكهربائي بدلالة التردد بالنسبة للملف 1.



شكل 12.11: تغيرات شدة التيار الكهربائي بدلالة التردد بالنسبة للملف 1.

الملاحظات:

نلاحظ من خلال الشكل 11.iii أن التوتر بين طرفي الملف يتزايد بزيادة التردد. هذه الزيادة تكون بطيئة نوعاً ما من أجل الترددات الأقل من 200 Hz وسريعة من أجل الترددات الأكبر من 200 Hz.

في الشكل 12.iii الممثل لتغيرات شدة التيار الكهربائي بدلالة التردد، نلاحظ وجود ارتفاع محسوس في شدة التيار عند الترددات الأقل من 200Hz إلا أنه يبقى ثابت إبتداءً من 200Hz إلى غاية الوصول إلى 300Hz تقريباً حتى يبدأ بالانخفاض تدريجياً بعدها.

تعطى ممانعة الملف بالعلاقات التالية:

$$Z = R + jL\omega \quad (1.iii)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} \quad (2.iii)$$

$$Z = V/I \quad (3.iii)$$

حيث:

L : ذاتية الملف

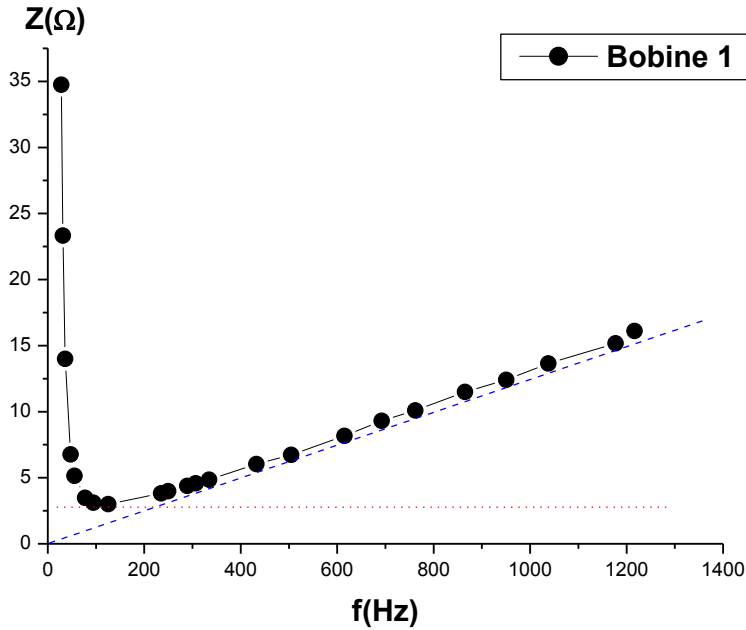
R : المقاومة الكهربائية.

V التوتر

I شدة التيار

يمثل الشكل 13.iii تغيرات ممانعة الملف Z بدلالة التردد، حيث تم الحصول على قيمة الممانعة

اعتماداً على العلاقة (3.iii).



شكل 13.11: منحنى يمثل تغيرات ممانعة الملف 1 بدلالة التردد.

الملاحظات:

- نلاحظ أن شدة التيار القصوى موجودة عندما أقل قيمة للممانعة في حدود 200 Hz.
- نلاحظ أن قيمة الممانعة تكون عند أقصى قيمة في بداية المنحنى عند الترددات المنخفضة لتبدأ بالتراجع بعدها لتأخذ قيمة شبه ثابتة مساوية لقيمة المقاومة عند الترددات القريبة من 200Hz، لتعود وتبدأ بالتزايد بانتظام بعد هذه القيمة.
- قيمة الممانعة تساوي قيمة المقاومة من أجل الترددات المقاربة لـ 200 Hz
- قيمة المقاومة لا تتغير.

4.111 دراسة تأثير التردد على الكشف عن العيوب:

بعد تحقيق التركيب التجريبي المبين في الشكل 14.111 وذلك باستعمال ملف ونواة الحديدية في

وضعايات مختلفة. اخترنا ثلاث حالات:

– الحالة الأولى : ملف بدون نواة.

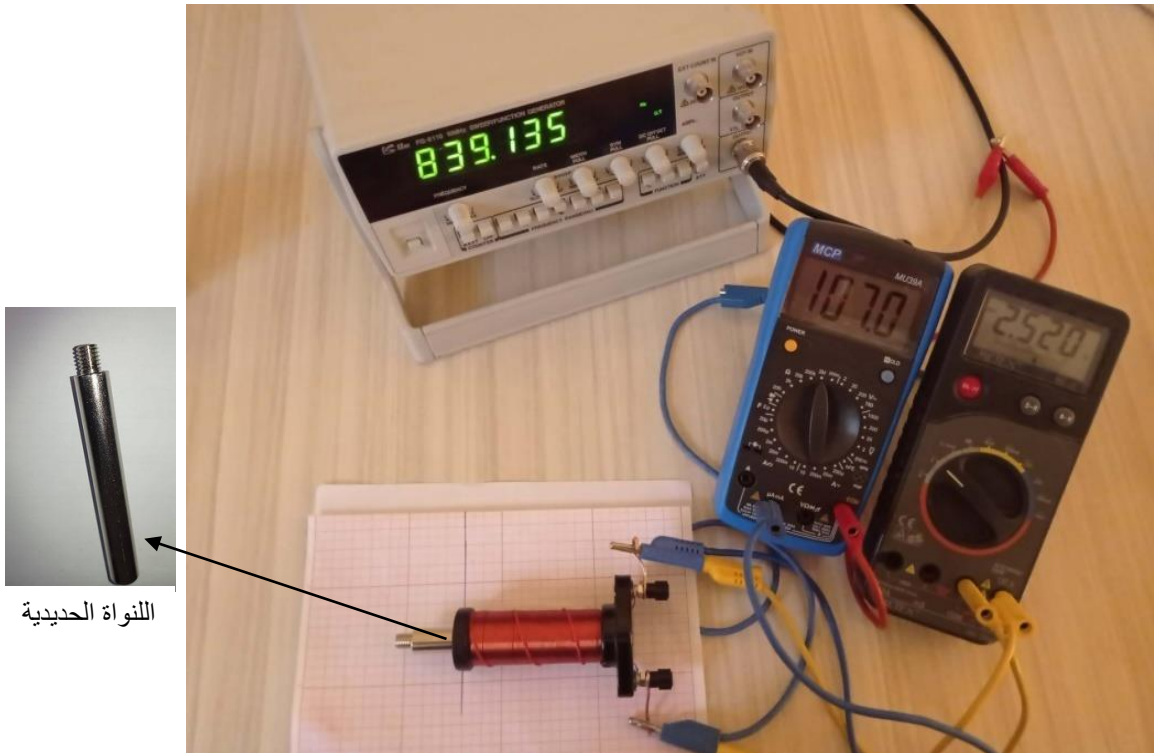
– الحالة الثانية : ملف بنواة ليس بها عيب.

– الحالة الثالثة : ملف بنواة بها عيب.

نشير إلى أن العيب المعتبر هو اللولبة الموجودة في طرف واحد من النواة الحديدية بالإضافة إلى

أن ادخال النواة يتم في كل مرة بنفس البعد ويتم التأكد من ذلك باستعمال ورق مليمترى كما هو موضح

بالصورة في الشكل 14.111.



الشكل 14.111: التركيب التجريبي لتجربة تأثير التردد على الكشف عن العيوب.

أولاً: استعمال الملف رقم 3:

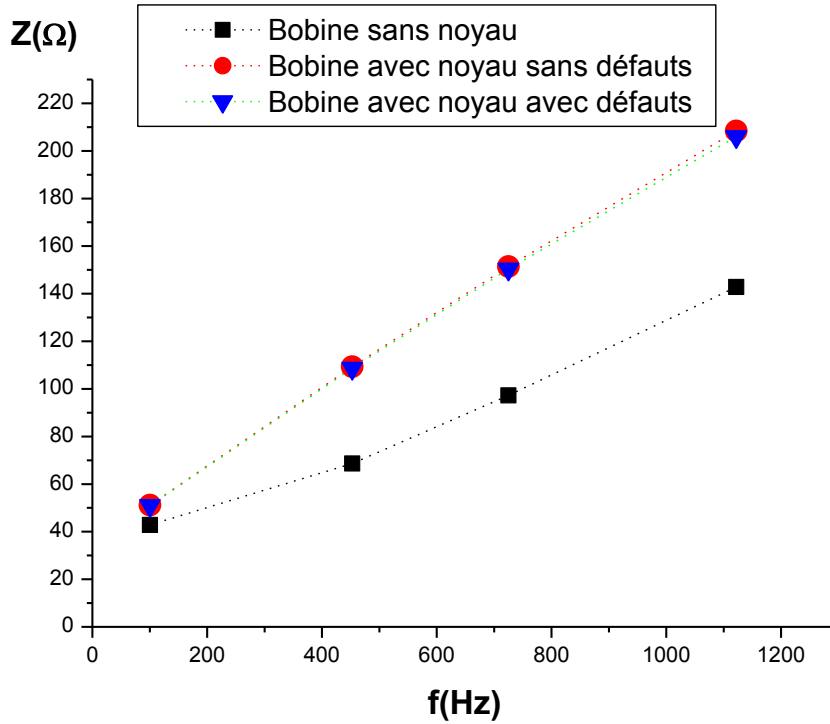
باستعمال الملف رقم 3 وضبط قيم مختلفة من قيم التردد، نقوم بقياس كل من شدة التيار المار بالملف والتردد بين طرفيها. النتائج المتحصل عليها مبينة في **الجدول 3.iii**. حسبنا ممانعة الملف في كل حالة.

المنحنى المبين في **الشكل 15.iii** يبين تغيرات الممانعة بدلالة التردد وذلك من أجل وضعيات

مختلفة للنواة داخل الملف 3.

جدول 3.iii: حساب ممانعة الملف لترددات مختلفة و وضعيات مختلفة للنواة بالنسبة للملف 3.

التواتر f(Hz)		الملف بدون نواة	الملف بنواة بدون عيب	الملف بنواة بوجود عيب
100.31 Hz	I(mA)	75.4	70.8	70.8
	V(Volt)	3.23	3.62	3.61
	Z(Ω)	42.838	51.130	50.989
452.78 Hz	I(mA)	65.1	48.4	48.6
	V(Volt)	4.47	5.29	5.28
	Z(Ω)	68.663	109.297	108.642
725.00 Hz	I(mA)	54.8	38.5	38.7
	V(Volt)	5.33	5.83	5.82
	Z(Ω)	97.263	151.428	150.387
1122.02 Hz	I(mA)	42.3	29.8	30.1
	V(Volt)	6.04	6.21	6.21
	Z(Ω)	142.789	208.389	205.980



شكل 15.iii: منحنى يبين تغيرات الممانعة بدلالة التردد للوضعيات المختلفة للنواة داخل الملف 3.

نلاحظ أن الممانعات تتزايد كلما زاد التردد لكنها تختلف في القيمة. إذ أن ممانعة الملف بدون نواة (به فجوة هوائية) أصغر من ممانعة الملف بوجود النواة. وكذلك المنحنى الخاص بالملف الذي به نواة بها عيب مقارب تقريباً مع المنحنى الخاص بالملف الذي به نواة ليس بها عيب. وهذا راجع ربما لقيم الترددات المستعملة.

ثانياً: استعمال الملف رقم 4:

طبقتنا نفس الخطوات السابقة على الملف رقم 4 والنتائج المتحصل عليها مبينة في الجدول 4.iii.

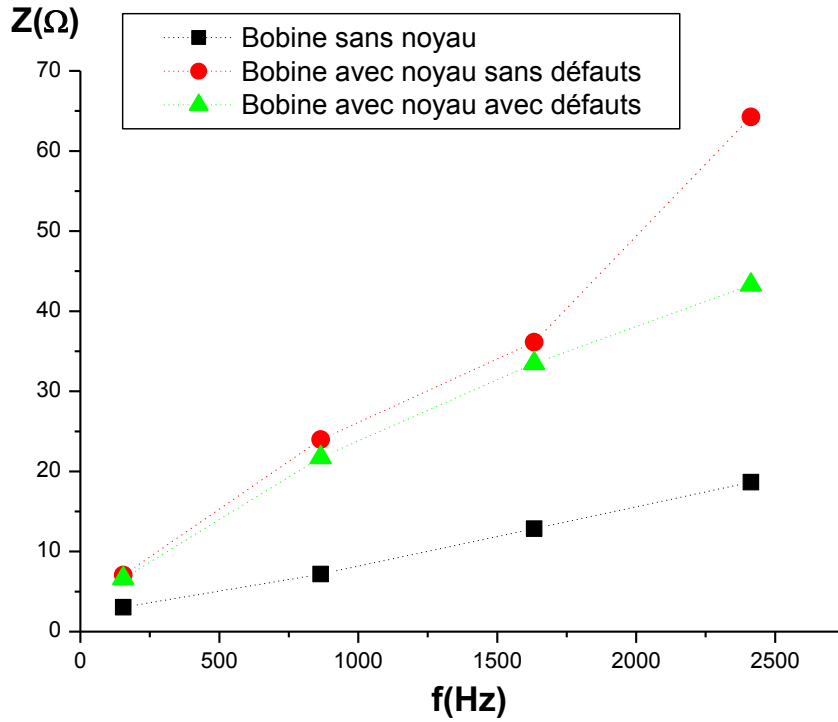
ولكن مع الزيادة في قيم التردد.

جدول 4.111: حساب ممانعة الملف لترددات مختلفة و وضعيات مختلفة للنواة بالنسبة للملف 4.

التواتر f(Hz)		الملف بدون نواة	الملف بنواة بدون عيب	الملف بنواة بوجود عيب
154.40 Hz	I(mA)	131.2	125.6	126.6
	V(Volt)	0.40 V	0.90	0.84
	Z(Ω)	3.049	7.066	6.635
864.54 Hz	I(mA)	130.7	105.5	108.5
	V(Volt)	0.94	2.53	2.36
	Z(Ω)	7.192	23.981	21.751
1633.22 Hz	I(mA)	127.7	91.6	94.4
	V(Volt)	1.64	3.31	3.16
	Z(Ω)	12.842	36.135	33.474
2413.27 Hz	I(mA)	122.8	81.3	84.1
	V(Volt)	2.29	3.76	3.64
	Z(Ω)	18.648	64.248	43.282

قمنا بتمثيل تغيرات ممانعة الملف رقم 4 بدلالة التردد من أجل وضعيات مختلفة للنواة. المنحنى

مبين في الشكل 16.111 يبين تغيرات الممانعة بدلالة التواتر لوضعيات مختلفة للنواة داخل الملف.



شكل 16.iii: منحنى يبين تغيرات الممانعة بدلالة التواتر للوضعيات المختلفة للنواة داخل الملف 4.

نلاحظ أن قيم الممانعات تترىد بزيادة التردد كما لاحظنا في الشكل 15.iii لكنها تختلف في القيم وذلك حسب وضعية النواة. إذ أن ممانعة الملف بدون نواة (به فجوة هوائية) أصغر من ممانعة الملف بوجود النواة. ويمكن تفسير هذا إلى أن النواة أدت إلى زيادة في الحث داخل الملف الذي يؤدي إلى زيادة ذاتية الملف أي زيادة الممانعة وهذا حسب العلاقة 2.iii.

كما تجدر الإشارة إلى أنه من أجل الترددات الأكبر من 1500 Hz يصبح الفرق واضح بين ممانعة الملف بنواة بدون عيب وممانعة الملف بنواة بها العيب. نستنتج أن العيب المتواجد في هذه الحالة أدى إلى تناقص قيمة الممانعة.

الخلاصة العامة و الآفاق

تعد تقنية الاختبارات اللاإتلافية فرعاً من علم المواد يشمل تطبيق طرائق وتقنيات يمكنها الكشف عن العيوب الموجودة في كل جزء من أجزاء المنتجات الصناعية، وتحديد طبيعة هذه العيوب وأسباب نشوئها خلال جميع مراحل العملية الانتاجية، وأثناء مرحلة الخدمة تمهيداً لإيجاد الحلول المناسبة لإزالتها أو لتفاديها دون إحداث أي تشويه أو تغيير في خصائص تلك الأجزاء.

بغض النظر عن المصطلح المستخدم فإنها تتعلق باستخدام الطرق الفيزيائية لتقييم سلامة المواد بدون التأثير على وظائفها أو استمراريتها بالخدمة.

في هذا العمل تمت دراسة وإنجاز كاشف للعيوب في الأسطح المعدنية يعتمد على التيارات الدوامة، بناءً على ذلك تم تقسيم هذه المذكرة إلى ثلاثة فصول كانت كالآتي:

الفصل الأول واحتوى على أهم المعلومات والمفاهيم التي توضح تقنية الاختبارات اللاإتلافية، حيث تطرقنا إلى تعريف التقنية وأهم مجالاتها وفوائدها وذكر أهم طرقها.

الفصل الثاني تم فيه وصف الظاهرة المدروسة وهي الاختبار بالتيارات الدوامة، حيث تعرفنا على مبدأ الاختبار بالتيارات الدوامة كما تناولنا معلومات مهمة أخرى، وكان ختام الفصل بأنواع العيوب وأهم مميزات وحدود الاختبار بالتيارات الدوامة.

الفصل الثالث و قدما فيه النتائج المحصل عليها بعد معالجة نموذج الكشف عن العيوب بالتيارات

الدوامة. حيث قمنا بحساب عمق اختراق التيارات الدوامة لمعدن الحديد، الألمنيوم والنحاس، كما قمنا بإجراء تجارب حول تأثير التردد على ممانعة الملف وكذلك تأثيره على الكشف عن العيوب، كما تم دراسة تأثير عمق الاختراق على كثافة التيارات الدوامة، ومن بين النتائج المحصل عليها:

- يتناقص عمق الاختراق بزيادة التردد.
 - التناقص يكون سريعاً من أجل الترددات الأقل ويكون بطيئاً من أجل الترددات الأكبر.
 - تتناقص كثافة التيارات الدوامة كلما زاد العمق.
 - تكون كثافة الاختراق للنحاس والألمنيوم كبيرة بالمقارنة مع الحديد في جميع المنحنيات بالرغم من تغيير التردد، كما يمون الاختلاف واضحاً أكثر كلما زاد التردد.
 - تتزايد قيم الممانعة بتزايد التردد لمنها تختلف باختلاف وضعية النواة.
- وبحوصلة هذه النتائج نكون قد توصلنا إلى الهدف المرجو من هذا العمل وهو التوصل إلى الكشف عن العيوب ودراسة تأثير اختلاف المعادن على الكشف عن العيوب.
- بعد إتمام الدراسة فإننا نسجل التطلعات الآتية لتكون مجال بحث في المستقبل من أجل تحسين هذه الدراسة:

- تعميم الدراسة على جميع المعادن الناقلة؛
- تحسين النموذج الأولي للكشف عن العيوب دون الحاجة إلى قوالب عيارية؛
- العمل على تحسين نفوذ المستشعر بحيث يمكن الكشف عن العيوب بدون الحاجة لوصول المستشعر لسطح الاختبار.

قائمة المراجع

- [1] أ.د/حسن إبراهيم شعبان ، أ.د/ جمال محمد عاشور الدرويش البرنامج العملي والنظري في الاختبارات اللاإتلافية- الهيئة العربية للطاقة الذرية- 2014.
- [2] M N.Khalifa, KH.Abbas,“Mesure de l'épaisseur de revêtement des matériaux de construction aéronautique par courants de foucault”Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [3] M.KHebbab ,“ Contribution à la l'étude du CND par courants de foucault de matériaux hétérogènes faiblement conducteurs à base d'éléments finis ” Tése de Doctorat, Université de Constantine, 2016 .
- [4] N.Benhadda,“Modélisation et etude pour la réalisation d'un capteur à courants de faucault en mode différentiel pour le contrôle non destructif(CND) ” Thèse de Doctorat, Université de Hadj Lakhdar Batna, 2015.
- [5] T.Bouchala,“ Modélisation semi-analytique des courants de foucault.- Application au contrôle non destructif par des capteurs à noyau de Ferrite” Mémoire de Magister, Université de Hadj Lakhdar Batna, 2008.
- [6] ياسر علوش، مدخل إلى طريقة الاختبار بالتيارات الدوامة، (هيئة الطاقة الذرية- دائرة الاختبارات لا الإتلافية- ص.ب.6091)
- [7] F.Bouali,“Utilisation d'une méthode semi-analytique pour l'étude du contrôle non destructif en régime pulsé” Mémoire de Magister ; Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2010.

-
- [8] B.Delabre, "Développement de capteurs flexibles à courants de foucault: application à la caractérisation des propriétés électromagnétiques des matériaux et à la détection de défauts par imagerie statique" Thèse de doctorat, Université paris-saclay , 2016 .
- [9] A N.Abdalla,MA.Faraj ,F.Samsuri,D.Rifai,Kh.Ali,Y.Al-douri, " Challenges in improving the performance of eddy current testing : review " Measurement and control,2018 .
- [10] A.Sophian,G Y.Tian,D.Taylor,J .Rudin, " Electromagnetic and eddy current NDT : A review " Insight-Non Destructive Testing and condition monitoring,2011 .
- [11] M.Hamel, "Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par méthode électromagnétiques " Mémoire de Magister ; Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012.
- [12] W.M.Haynes, "CRC Handbook of chemistry and physics", 96th edition, Chief,2016.
- [13] https://www.engineeringtoolbox.com/permeability-d_1923.html

الملخص

يهتم هذا العمل بدراسة تقنية من تقنيات الإختبارات غير الإتلافية ألا وهي الإختبار بالتيارات الدوامة. الهدف من هذه الدراسة التجريبية هو محاولة إنجاز نموذج للكشف عن العيوب في المعادن. ومن أجل تحقيق هذا الهدف قمنا بإجراء تركيب تجريبي تم تطبيقه على عينات من المعادن المختلفة المتمثلة في الحديد والألمنيوم والنحاس و ملفات مختلفة. كما تم إجراء دراسة كمية بين القياسات الكهربائية ومقارنتها ببعضها البعض. أظهرت النتائج أن أي تغيير في أبعاد الجسم سيؤدي حتماً إلى تغيرات في الممانعة وهذا ما يتيح الكشف عن العيوب التي تؤثر على مسارات التيارات الدوامة في الجسم المختبر. يعتبر هذا العمل مساهمة من أجل إنجاز كاشف للعيوب.

الكلمات المفتاحية: الإختبارات غير الإتلافية، التيارات الدوامة، المعادن، الممانعة، كاشف العيوب.

Résumé

Ce travail traite l'étude l'une des techniques de contrôle non destructif, c'est le contrôle par courants de Foucault. Le but de cette étude expérimentale est d'essayer de réaliser un modèle de détection de défauts dans les métaux. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons réalisé une installation expérimentale qui a été appliquée à des échantillons de différents métaux comme le fer, l'aluminium et le cuivre avec de différentes bobines. Une étude quantitative a également été menée entre les mesures électriques en faisant des comparaisons. Les résultats ont montré que toute modification des dimensions du corps entraînera des modifications de l'impédance, ce qui permet la détection de défauts qui affectent les trajets des courants de Foucault dans le métal testé. Ce travail est considéré comme une contribution pour la réalisation d'un détecteur de défauts.

Mots clés : Essais non-destructifs, Courants de Foucault, Métaux, Impédance, Détecteur des défauts.