



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

ر. الترتيب:

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

ر. التسلسل:

جامعة قاصدي مرباح ورقلة

كلية الرياضيات و علوم المادة

قسم الفيزياء

مذكرة تخرج تدخل ضمن متطلبات نيل شهادة الماستر أكاديمي في الفيزياء

تخصص: فيزياء الإشعاعات

إعداد الطالبة: مدقن أمال

بعنوان:

مُرْصِدُكَ الْبُغْيَانَاتِ الطُّورِيَّةِ فِي الْبُرُوكِ
مِنْ خِلَالِ قِيَاسَاتِ مُطَيَّافَةِ الْمَمَانِعَةِ

نوقشت يوم: 2019\07\08 أمام لجنة المناقشة المكوّنة من:

الأستاذ	الدرجة	الجامعة	الصفة
بوكراع عمار	أستاذ تعليم عالٍ	ورقلة	رئيساً
بن طويبة عمر	أستاذ محاضر	ورقلة	مناقشاً
شيحي إسماعيل	أستاذ تعليم عالٍ	ورقلة	مقرراً

2019\2018

كلمة شكر

نستهل عملنا بالثناء على الله سبحانه و تعالى على منه و عطائه، و ما أسبغه علينا من نعم ظاهرة و باطنة، فالحمد لله الذي علمنا ما لم نعلم، و له عظيم الشكر أن وفقنا و بلّغنا الوصول إلى هذا المقام.

نتقدم بأسمى عبارات الشكر و التقدير و الاحترام إلى أعضاء لجنة المناقشة:

الأستاذ بوكراع عمار على قبوله ترؤس لجنة المناقشة، و الأستاذ بن طويلة عمر على تشريفه لي بقبول المشاركة في لجنة المناقشة، ما يزيد في تامين هذا العمل و تقويمه.

كما أخص بالشكر و التقدير و الاحترام من كان لنا معلماً و موجهاً، إلى من زرع فينا الأمل و علمنا التفاؤل، إلى من كان لنا أباً قبل أن يكون مشرفاً الأستاذ الدكتور شحي إسماعيل على كل ما منحه لنا من جهد و وقت لإنجاز هذا العمل و إنجاحه.

أتقدم بجزيل الشكر لأعضاء مخبر فيزياء الإشعاع و البلازما و فيزياء السطوح (LRPPS) بجامعة ورقلة، و كل القائمين عليه، لما بذلوه من جهود لإنجاح هذا العمل.

كما أتقدم بأخلص التشكرات لأعضاء مخبر استغلال و تامين المصادر الطبيعية في المناطق الجافة (EVRNZA) بجامعة قاصدي مرياح ورقلة، و كل القائمين عليه من عمال و أساتذة على دعمهم و استقبالهم لنا.

أقدم أبلغ عبارات الشكر لمخبر الدراسات الفيزيائية للمواد (LEPM) بجامعة وهران للعلوم و التكنولوجيا، و كل القائمين عليه على استقبالهم لنا و إتاحتهم لنا استعمال الأجهزة لإجراء القياسات و تقديم التوجيهات.

أتوجه بتشكراتي العميقة لكل أساتذنا الأفاضل بقسم الفيزياء بجامعة قاصدي مرياح ورقلة الذين كانوا شموعا أضاءت لنا الطريق بنور العلم، و أخص بالذكر الأساتذة: رميته نعمان، عاشوري عبد الرحيم، غرياني رشيد على حفاوة استقبالهم لنا و عدم توانيهم في تقديم الإرشادات و التوجيهات، كما لا يفوتني شكر الدكتورة عيادي عائشة على نصائحها و تتبعها و مساندتها لي طيلة فترة البحث.

يتوجب علينا أيضا أن نشكر كل من كان له فضل علينا و من ساندنا و من عبّد لنا الطريق لنصل إلى هذا المقام أساتذتنا و معلمين في كل الأطوار و المجالات.

و لا يفوتني أن أتوجه بالامتنان إلى الزميلين بن الشيخ حاج مبروك و بن الشيخ عادل، و رفيقتي صخر العلمية.

i	كلمة شكر
ii	الفهرس
v	فهرس الأشكال
vii	فهرس الجداول
1	مقدمة عامة
	الفصل الأول: عموميات عن الرمل
3	1- الكتبان الرملية وتوزعها في الجزائر
3	1-1- تعريف الكتبان الرملية
3	1-2- توزع الكتبان الرملية في الجزائر
4	2- تعريف رمل الكتبان
4	3- الخصائص العامة لرمل الكتبان
4	3-1 الخصائص الفيزيائية المظهرية للرمل
4	3-1-1 الخصائص الحبيبة
4	أ) قياس الحبات
5	ب) أشكال الحبات
6	ج) التصنيف الحبيبي للرمل
7	3-2-1 الخصائص الكيميائية لعينة طبيعية من رمل ورقلة
7	أ) تركيبها الذري
8	ب) تركيبها الجزيئي
8	3-3 الناقلية الكهربائية لرمل ورقلة
	الفصل الثاني: مبادئ واساسيات مطيافية الممانعة
9	1- خصائص العزل الكهربائي للمواد
10	1-1 النواقل
10	1-2 إستجابة النواقل للتردد
12	أ) مجال التوصيل
12	ب) مجال النفاذ
12	ج) مجال الاسترخاء
12	1-3 العوازل الكهربائية و خواصها

13	4-1 إستجابة العوازل للتردد
13	1-4-1 الاستقطابية
14	2-4-1 ضياع العزل الكهربائي
14	3-4-1 إسترخاء العوازل
14	أ) آليات الاستقطاب
15	أ-1 الاستقطاب الذري
15	أ-2 الاستقطاب الإلكتروني
15	أ-3 الاستقطاب الدوراني (دوران ثنائيات الأقطاب الدائمة)
15	أ-4 استقطاب الشحنات الفضائية
16	ب) آليات الاسترخاء
17	2- الرمل كعازل مكوّن من عدة مركبات
17	3-مطيافية الممانعة الكهربائية
17	3-1 مفهوم الممانعة
17	3-2 أسس مطيافية الممانعة و قوانينها
17	3-2-1 أسسها:
18	3-2-2 طرق الحث الكهربائي في مطيافية الممانعة
19	3-2-3 قوانينها
20	3-3 إستخدامات مطيافية الممانعة
	الفصل الثالث: الأدوات المستخدمة وجهاز القياس
21	1- تحضير العينات
21	1-1 الجهاز المستعمل في الطحن
21	2-1 العينات
22	2- جهاز قياس الممانعة الكهربائية
22	2-1 التعريف بالجهاز
24	2-2 مبدأ القياس
25	3-2 القياس
25	3-2-1 تهيئة النموذج
25	3-2-2 بدء القياس

	الفصل الرابع: رصد تغيرات الناقلية الكهربائية للرمل
27	1- مناطق الطيف ذات الترددات المميزة
32	2- مراقبة تغير ناقلية عينات الرمل المسخنة عند درجات حرارة مختلفة عند تردد وحيد
34	3- تأثير درجة حرارة تسخين الرمل على الناقلية الكهربائية له
36	4- ملخص تغيرات الناقلية الكهربائية للرمل الطبيعي و المسخن
38	الخلاصة العامة و الآفاق
40	المراجع

فهرس الأشكال

- 1-I خريطة بأهم العروق في الجزائر.....3
- 2-I تصنيف حبيبات الرمل وفقا ل USDA.....5
- 3-I أشكال حبات الرمل.....6
- 4-I النسيج السطحي لحبات الرمل الكوارتزي باستخدام المجهر الإلكتروني.....6
- 5-I درجات تصنيف و فرز الرمل.....7
- 6-I تغيرات المقاومة الكهربائية لرملة كثران ورقلة بدلالة درجة حرارة التسخين.....8
- 1-II ظاهرتا الاستقطاب والتوصيل الناتجتان عن الحث الكهرو مغناطيسي.....9
- 2-II نمذجة لتأثير الحقل الكهربائي على سلوك العوازل الكهربائية.....13
- 3-II آليات الاستقطاب.....15
- 4-II تغير الجزء الحقيقي والتخيلي للسماحية الكهربائية بدلالة التردد.....16
- 5-II مبدأ مطيافية الممانعة الكهربائية.....18
- 1-III جهاز السحق الميكانيكي.....21
- 2-III الفرن الكهربائي المستعمل و الأواني الخزفية.....22
- 3-III حفظ العينات في علب بلاستيكية مغلقة.....22
- 4-III جهاز قياس مطيافية الممانعة الكهربائية.....23
- 5-III الوحدة المركزية لجهاز قياس الممانعة ولواقعه.....23
- 6-III مبدأ إجراء القياس.....24

- 7-III تمثيل سعتي الجهد والتيار المار في العينة و فرق الطور بينهما.....24
- 8-III خلية القياس المستعملة في جهاز قياس مطيافية الممانعة الكهربائية.....25
- 1-IV الناقلية الكهربائية عند الترددات $[10^2-10^7 Hz]$ لكل العينات الطبيعية و المسخنة عند $[100-1200^{\circ}C]$. 28
- 2-IV الناقلية الكهربائية للعينات الطبيعية و المسخنة في مجال الترددات $[10^2-10^4 Hz]$ 29
- 3-IV الناقلية الكهربائية للعينات الطبيعية و المسخنة في مجال الترددات $[10^2-3 \times 10^4 Hz]$ 29
- 4-IV مخطط التحولات الطورية للرمل عند تسخينه في المجال $[200-1200^{\circ}C]$ 31
- 5-IV الاضطراب المميز للناقلية للعينات المسخنة في المجال $[800-1200^{\circ}C]$ عند التردد $[3,6 \times 10^6 Hz]$. . . 32
- 6-IV تغير الناقلية الكهربائية لرمل كثبان ورقلة بدلالة درجة حرارة التسخين عند ترددات محدّدة مختلفة..... 33
- 7-IV الناقلية الكهربائية للعينات الطبيعية و المسخنة في المجال $[200-800^{\circ}C]$ 34
- 8-IV الناقلية الكهربائية للعينات المسخنة في المجال $[800-1000^{\circ}C]$ 35
- 9-IV الناقلية الكهربائية للعينات المسخنة في المجال $[1000-1200^{\circ}C]$ 36

فهرس الجداول

- 1-I تقسيم التربة حسب قياس الحبات.....5
- 1-III نموذج لملفات الإخراج التي ينتجها النظام الحاسوبي المتصل بجهاز قياس الممانعة الكهربائية.....26
- 1-IV ملخص تغيرات الناقلية الكهربائية للرمل الطبيعي و المسخن.....37

مقدمة عامة

لم يقتصر استعمال الرمل قديماً على البناء فقط - كما اشتهر - حيث أشارت أدلة أركيولوجية على أن الرمل استخدم قبيل الميلاد في شحذ و تلميع الحجارة و طلاء الخرز بالزجاج المصنوع من صهر الرمل. لذا فإن الرمل يُعدُّ من أقدم و أهم المواد المتواجدة على سطح الأرض [1].

يمكننا القول أن الرمل عنصرٌ أساسٌ في بناء الحضارة الحديثة، ذلك لتزايد استعماله في مجالات عديدة، ابتداءً من التشييد على المستوى العياني إلى المركبات النانوية على المستوى المجهرى، فهو بذلك جامعٌ لعلوم الهندسة و البيئة و الإلكترونيك و الكيمياء و الفيزياء و غيرها . . ، لأجل ذلك ارتأينا من خلال هذا البحث المساهمة في دراسة و تبيين هذا المورد الطبيعي الذي يميز منطقتنا [1].

أغلب الأبحاث الوطنية التي نصادفها تعالج الرمل من حيث استعماله في البناء و الزراعة و تصفية المياه [2]، كما أُجريت بعضُ الأعمال السابقة على رمل كثنان منطقة ورقلة، و خصَّت بالتحديد رمل منطقة محيرزة بالدراسة، و تطرقت لتشخيص و توصيف بعض الخصائص المجهرية و الجهرية للرمل كخليط طبيعي مكوّن من عدة مركبات، و ذلك باستعمال تقنيات طيفية مختلفة [3,4,5].

من هذا المنطلق و امتداداً لتلك الدراسات، و بغية الاستزادة في اكتشاف خصائص الرمل باستخدام تقنيات أخرى كان تفكيرنا في إعداد هذه المذكرة، و التي نهدف من خلالها إلى:

- التعرف على تقنية مطيافية الممانعة الكهربائية.
- قياس عدة مقادير كهربائية للرمل.
- تحديد تأثير الحرارة على مكونات الرمل.
- رصد التغيرات الطورية للرمل بقياسات كهربائية.
- محاولة ربط تغيرات الخصائص الكهربائية بالتحويلات الطورية للرمل.
- السعي للتعرف على أبرز المكونات المؤثرة في الخصائص الكهربائية للرمل.
- تبيين الرمل كمادة أولية للكوارتز و السيليسيوم.

لكل ذلك فإن هذا العمل جزءٌ من عمل أكبر نسعى من خلاله إلى معرفة الخصائص الكيميائية و الفيزيائية للرمل، و رصد إمكانية استعماله كمادة عازلة كهربائياً أو لتخزين الحرارة، أو لاستخلاص مادة السيليسيوم منه.

يمكننا تلخيص عملنا الحالي في محاولة الإجابة على الأسئلة التالية:

- ✓ ما هي أهم المقادير التي يمكن قياسها من تقنية مطيافية الممانعة الكهربائية؟
- ✓ ما هو تأثير درجة الحرارة على الرمل؟
- ✓ كيف يمكن تحديد أهم المكونات من تغير الناقلية الكهربائية؟

للإجابة على هذه الأسئلة قسّمنا مذكرتنا هذه إلى أربعة فصول، ثم ختمناها بخلاصة عامة، ففي الفصل الأول "عموميات عن الرمل" جمعنا أهم المعلومات عن الرمل، و ذلك بسرّنا لتعريف الرمل و توزيعه في الجزائر، و أبرزنا أهم خصائصه الكيميائية و الفيزيائية عموماً، و الكهربائية خصوصاً.

في الفصل الثاني "مبادئ و أساسيات مطيافية الممانعة" تطرقنا إلى الجانب النظري لهذه التقنية، و تعرّفنا على أساسيات هذه التقنية، مُركّزين على الظواهر الفيزيائية التي تنبني عليها، و القوانين التي تحكمها.

أما الفصل الثالث "الأدوات المستخدمة و جهاز القياس" فقد خصصناه للجانب العملي لهذه الدراسة، حيث تناولنا فيه طريقة تحضير العينات و التعريف بالجهاز المستعمل في القياس و طريقة أخذ القياسات.

عرضنا في الفصل الرابع "رصد تغيرات الناقلية الكهربائية للرمل" نتائج القياس غير المباشر للناقلية الكهربائية للرمل الطبيعي و الرمل المسخن عند درجات حرارة مختلفة، و ذلك استنباطاً من جداول قياس الممانعة الكهربائية، حيث حللناها و ناقشناها.

ختاماً لهذه المذكرة حوصلنا أهم النتائج في خلاصة عامة، و أوردنا فيها آفاقاً مستقبلية.

الفصل الأول

عموميات حول رمل الكشبان

تمهيد:

يُعد الرمل من بين الموارد الطبيعية الهامة التي يمكن استغلالها في مجالات مختلفة. الرمل من المواد الخام التي تقوم عليها بعض الصناعات باستعماله إما بشكله الطبيعي أو بعد معالجته و تهيئته. من أجل تحقيق ذلك يجب أولاً التعرف على مادة الرمل و جمع معلوماتٍ عن وفرتها و منشئها و تركيبها..، كل ذلك للتمكن من تحديد أنواع و طرق دراستها، لذا جعلنا الفصل الأول لهذه المذكرة تحت عنوان "عموميات عن رمل الكثبان".

1- الكثبان الرملية و توزيعها في الجزائر:

1-1 تعريف الكثبان الرملية:

الكثبان جمع كتيب، و هو عبارة عن تجمع من الرمل السائب على سطح الأرض في شكل كومة ذات قمة. تتشكل الكثبان الرملية من تجمعات رسوبية نتيجة عوامل التجوية و التعرية، و هي تفاعل الصخور الصحراوية مع درجات الحرارة العالية و هبوب الرياح المتواصلة، إضافة إلى عامل الأمطار، مما يؤدي إلى تفكك الصخور و تفتتها إلى حبيبات رملية مختلفة الحجم و الشكل [6].

1-2 توزيع الكثبان الرملية في الجزائر:

تُغطّي الكثبان الرملية أكثر من 60% من الصحراء الجزائرية، مُمثّلةً المظهر الجيومورفولوجي السائد لسطحها، التي هي جزء كبير من الصحراء الإفريقية الكبرى، و تنتشر فيها على هيئة عروق في أجزاء متفرقة، أهمها العرق الشرقي الكبير في الجهة الشرقية، و العرق الغربي الكبير ثم عرق الشاش و عرق إيجيدي، الشكل (1-I) [7].



الشكل (1-I) : خريطة بأهم العروق في الجزائر [8]

2- تعريف رمل الكثبان:

الرمل مادة طبيعية غالبا ما يكون مصدرها من الصخور الرسوبية أو النارية المتفتتة، و هو خليط من حبيبات غير متماسكة، تختلف أحجامها و درجات استدارتها، و تتراوح أقطارها عموما بين 0,063 mm و 2 mm على مقياس ونتورث (the Wentworth scale)، و هي مكوّنة كيميائيا من مكوّنات صخور المنشأ نفسها، و التي غالبا ما تكون رمال كثبان جيدة التصنيف؛ أي أنها مُكوّنة من حبيبات ذات أحجام متقاربة جدا [6، 9، 10].

3- الخصائص العامة لرمل الكثبان [9]:

تُقسم الرمال حسب نشأتها إلى ثلاث مجموعات رئيسية: كربوناتيّة، فتاتيّة نارية و قارية، و من حيث بيئة الترسيب إلى ساحلية و صحراوية.

تندرج الرمال الكوارتزيتية تحت مجموعة الرمال القارية، مُشكّلة الجزء الأعظم منها، و هي ناتجة عن تفتت و تجوية الصخور السابقة التكوين، حيث تقوم السوائب المتحركة بحملها و نقلها إلى أحواض الترسيب. تُحدّد خصائصها العامة من النسيج و البنية الخاصة بها، و هي من حيث القوام نوعان: الحبيبات الرملية، و هي صخور مفكّكة غير مترابطة لا تجمع بينها مادة لاحمة، و الأحجار الرملية، و هي صخور مترابطة مُؤلّفة من حبات فتاتيّة تجمع بينها مادة لاحمة.

3-1- الخصائص الفيزيائية المظهرية للرمل:

تتمثل الخصائص الفيزيائية المظهرية للرمل في كل من أبعاد الحبات و أشكالها و معامل انتظامها و مساميتها و نفاذيتها، و سيأتي بيان ذلك في ما يلي:

3-1-1- الخصائص الحيّية:

تتصف الرمال الكوارتزيتية بمجموعة خصائص تختلف باختلاف طبيعة مصادرها الصخرية، و عوامل التجوية الفيزيائية أو الكيميائية و النقل الريحي أو المائي، و الترسيب القاري أو البحري.

أ) قياس الحبات:

يعتمد نظام المكتب الأمريكي لتصنيف التربة على قياس حبيباتها كأساس لتقسيمها إلى مجموعات، و يبيّن الجدول I-1 كيفية تقسيم التربة إلى مجموعات حسب قياس الحبيبات [11].

الجدول 1-I تقسيم التربة حسب قياس الحبات [11]

رقم المجموعة	نوع التربة	قياس الحبيبات (مم)
1	حصى ناعم (fine gravel)	1.00-2.00
2	رمل خشن (coarsz sand)	0.50-1.00
3	رمل (sand)	0.25-0.50
4	رمل ناعم (fine sand)	0.20-0.25
5	رمل ناعم جدا (very fine sand)	0.05-0.10
6	طمي (silt)	0.005-0.05
7	طين (caly)	<0.005

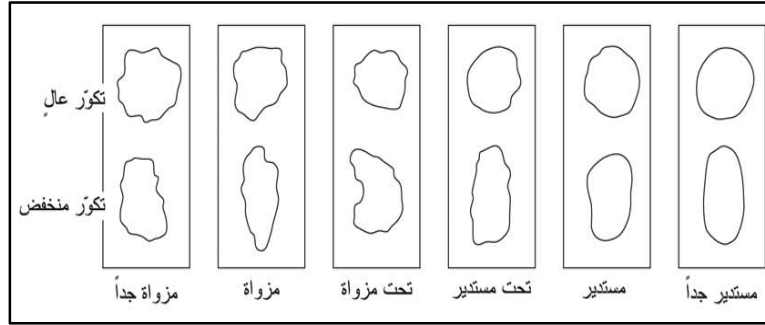
تقع الرمال الكوارتزيتية، بحسب التصانيف العالمية المعمول بها، ضمن عائلة الأرينيت (arinite)، و تَقَسَّم الرمال و الأحجار الرملية تبعاً لأبعادها إلى خمس مجموعات حبيبة، الشكل (2-I)، و يتحدد البعد الحبيبي للرمل باستخدام مجموعة مناخل يوضع بعضها فوق بعض، متدرجة الفتحات من 2 mm و ما دون ذلك، أو من خلال دراسة الشرائح المجهرية بالنسبة للصخور الرملية المتماسكة [4].



الشكل (2-I): تصنيف حبيبات الرمل وفقاً لـ USDA [12]

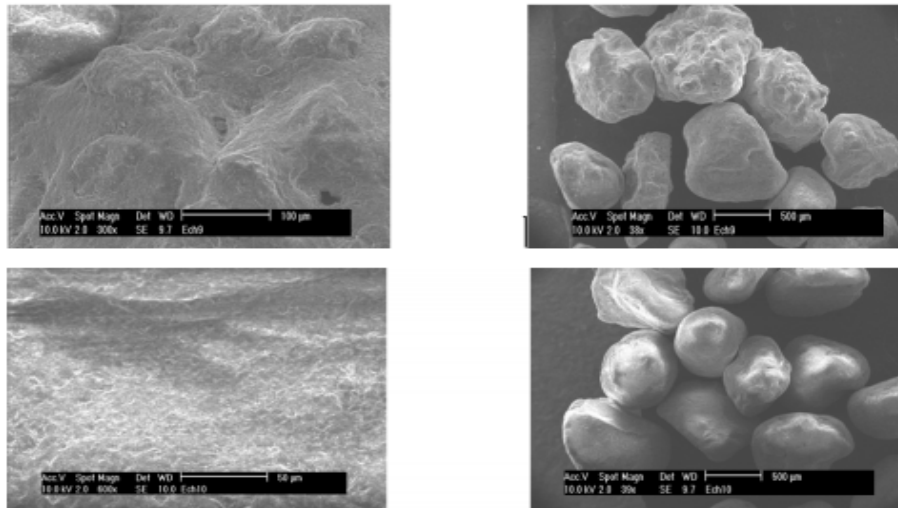
ب) أشكال الحبات:

تأخذ حبيبات الرمل أشكالاً مختلفة، تتحدد بمعرفة درجة تكوُّر الحبات (sphericity) و تَدَوُّرها (roundness)، حيث يعبر التكوُّر عن مدى قرب الحبة من الشكل الكروي تبعاً للنسبة بين المحاور الثلاثة الرئيسة للحبة، فهناك الحبات الكروية و القرصية و الورقية و النصلية و القضيبية، أما التدوُّر فيعبر عن درجة استدارة حواف و زوايا الحبة. و بحسب مقياس التدوُّر المعتمد عالمياً تقسم الحبات إلى حبات مزواة جداً، مزواة، تحت مزواة، تحت مستدير، مستدير، مستدير جداً، الشكل (3-I) [9].



الشكل (3-I): أشكال حبات الرمل [9]

تتميز الحبات الكوارتزية أيضاً بسطوح ملساء أو خشنة تحمل علامات مختلفة من الخطوط و الخدوش و الحفر و التضاريس، الشكل (4-I). و قد تكون هذه السطوح كامدة ذات بريق معتم أو لامعة ذات بريق متألّق. و تعكس الدراسة المفصلة للنسيج السطحي للحبات باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح أصل هذه الحبات و تاريخها [13].

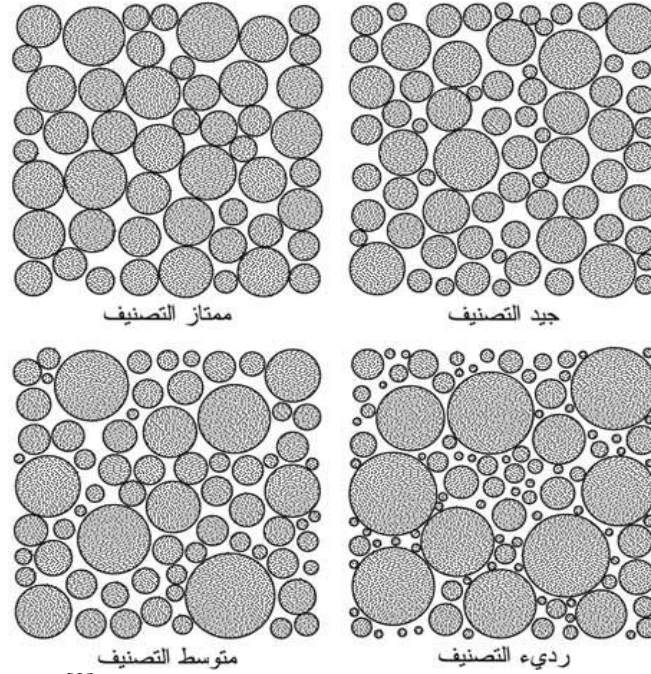


الشكل (4-I): النسيج السطحي لحبات الرمال الكوارتزية باستخدام جهاز المجهر الإلكتروني [13]

ج) التصنيف الحبيبي للرمل:

يقصد به درجة التشابه في أحجام الحبيبات المكونة للرمل. تبدي التجمّعات الرملية درجات مختلفة من التصنيف الحبي؛ إذ يمكن أن تكون جيدة التصنيف (أي تتكون من حبيبات متشابهة القياس)، أو متوسطة (تتوزع فيها مقاسات الحبيبات بين الصغير و المتوسط و الكبير)، أو رديئة (لا تحتوي على قياسات وسطية، أي أنها تتركب من حبيبات كبيرة و صغيرة دون ما هو بينهما)، الشكل (5-I)، و يحدد هذه الخاصة تداخل عوامل النقل و الترسيب. عامة تكون الرمال المتشكلة في المناطق المضطربة جيدة التآكل و التكوّر و التصنيف الحبي، بينما تكون الرمال النهرية أسوأ من حيث الاهتراء و التصنيف نتيجة السرعات المختلفة للتيار المائي. و الأسوأ من الرمال النهرية

الرمال السَّيْلِيَّة، ثم تأتي رمال كِعب سفوح الجبال. أما الرمال البحرية العميقة فتبدي درجة تآكل و تكوُّر عاليين و درجة تصنيف متوسطة [9].



الشكل (I-5): درجات تصنيف و فرز الرمل [9]

3-2- الخصائص الكيميائية للرمل:

تعتمد دراسة الخواص الكيميائية للرمل على دراسة و معرفة تركيبه الكيميائي؛ إذ تتكون رمال الكثبان أساسا من حبيبات الكوارتز (SiO_2) و كربونات الكالسيوم ($CaCO_3$) و الجبس ($2CaSO_4 \cdot 2H_2O$)، و تحتوي على كميات قليلة من الشوائب و المعادن الثقيلة، و نسبة معتبرة من أكسيد الحديد الثلاثي (Fe_2O_3) و نسبة أكبر من أكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) [14، 15].

3-2-1 الخصائص الكيميائية لعينة طبيعية من رمل ورقلة:

أ) تركيبها الذري [16]:

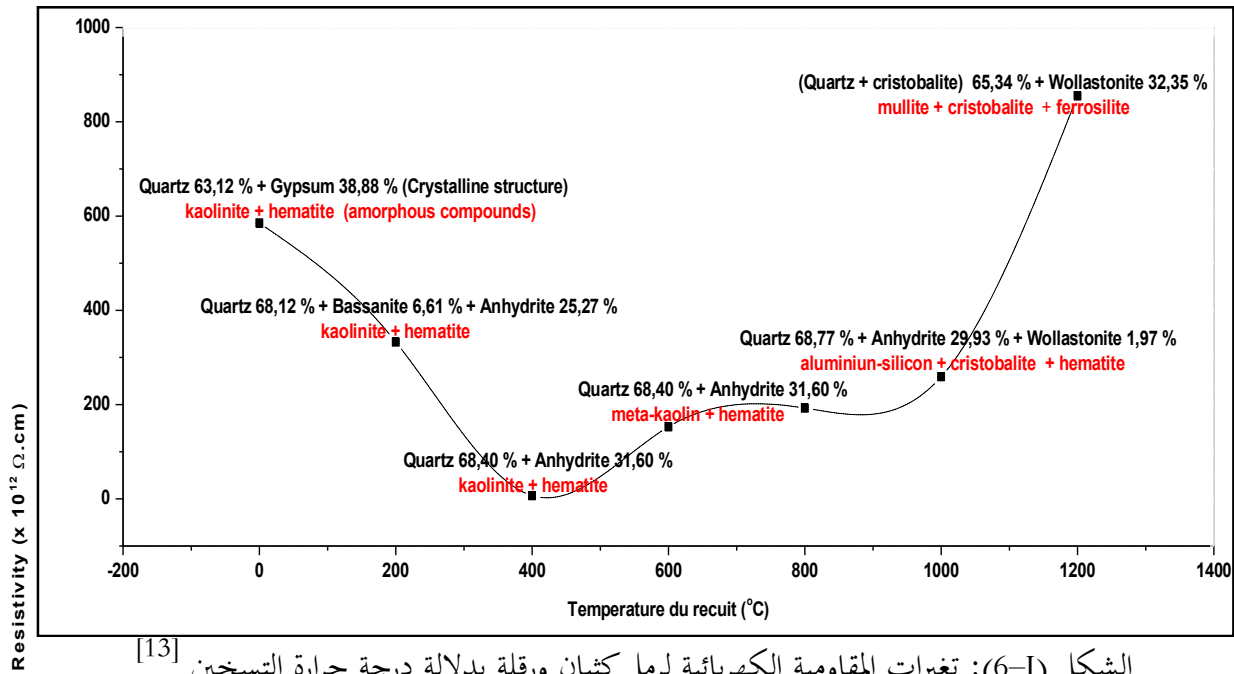
- يتكون الرمل أساسا من الكالسيوم Cu و البوتاسيوم K و الحديد Fe و المنغنيز Mn و السيليسيوم Si و الأكسجين O، كما يحوي العديد من المعادن النادرة و الثمينة، لكنها ذات تركيز ضعيف، و من أهمها:
- المعادن النادرة الخفيفة: المولبيدينوم Mo و الغاليوم Ga و الجيرمانيوم Ge.
 - المعادن الأرضية النادرة: مثل اليوديميوم Nd و النيتانيوم La و الأوروبيوم Eu .
 - المعادن النادرة المشعة: مثل اليورانيوم U و الثوريوم Th .

(ب) تركيبها الجزيئي:

أوضحت دراسة سابقة أن العينة المدروسة في حالتها الطبيعية تتكون من الكوارتز (SiO_2) و الجبس المشبع بالماء ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)، إضافة إلى بعض المركبات المعدنية والعضوية كالهيماتيت والكاولينيت بتراكيز ضعيفة جداً [13].

3-3- الناقلية الكهربائية لرمل ورقلة:

تتمتع العينة المدروسة في حالتها الطبيعية بمقاومية كهربائية عالية للتيار المستمر، تقدر بـ $6 \times 10^{14} \Omega \text{cm}$ [13]. أما العينات المعالجة حرارياً فتتغير ناقليتها تبعاً للأطوار المتواجدة بالعينة، الشكل (6-I).



الشكل (6-I): تغيرات المقاومة الكهربائية لرمل كثبان ورقلة بدلالة درجة حرارة التسخين [13]

الفصل الثاني

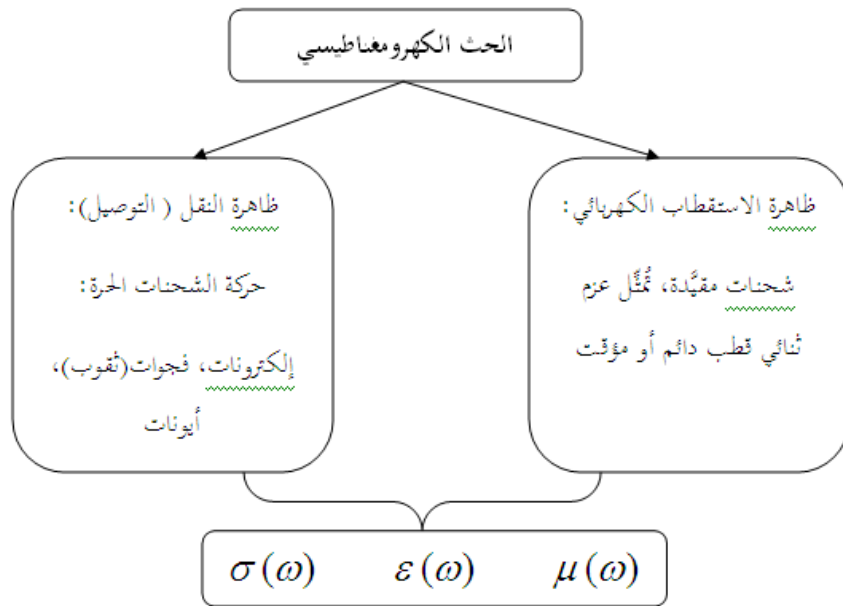
مبادئ و أساسيات مطيافية الممانعة

تمهيد:

المواد المركبة هي مزيج مكوّن من مادتين أو أكثر، لكل منها خصائص مختلفة عن غيرها. تكمن أهمية المواد المركبة في إمكانية الحصول على خصائص أبرز من خصائص مكوناتها.

إن خصائص المواد المركبة لا تتعلق فقط بالخاصية الفيزيائية لمكوناتها، بل أيضا بالبنية المجهرية لهذا المزيج ككل. تُحدد استجابة المواد المتجانسة للحقل الكهربائي المسلط عليها بثلاثة معاملات أساسية، هي السماحية الكهربائية، الناقلية الكهربائية، النفاذية المغناطيسية، مُحدثةً ظاهريّ التوصيل و الاستقطاب، الشكل (II-1).

- التوصيل: و هو متعلّق بحركة الشحنات الحرة تحت تأثير حقل كهربائي.
- الاستقطاب: و هو متعلّق بالشحنات المقيّدة، و التي تمثل عزم ثنائي قطب محرّض أو دائم تحت تأثير حقل كهربائي.



الشكل (II-1): ظاهرتا الاستقطاب و التوصيل الناتجتان عن الحث الكهرومغناطيسي^[17]

1- خصائص العزل الكهربائي للمواد:

يمكن وصف التفاعل بين الحقول الكهرومغناطيسية و المواد الصلبة مجهريا و جهريا حسب الحاجة أو متطلبات الدراسة، مجهريا يمكننا القول أن امتصاص المادة للفوتونات يتولد عنه إنتاج فونون أو زوج إلكترون-فجوة، و بالمقابل فإن معادلات ماكسويل تعتبر تقريبا ماكروسكوبيا، كما توصف فيه المواد الصلبة بثوابت خاصة بها. يمكن الربط بين التقريبين بدراسة الاستجابة الخطية للمواد.

أحد الجوانب الأساسية لتفاعل حقل كهربائي مع مادة صلبة هو حقيقة أن الحقل يحث (يُحرّض) تدفق حاملات الشحنة شبه الحرة، أبسط حالة لهذه العملية هو تيار أوم في المعادن ($\vec{J} = \sigma \vec{E}$). وصف هذه الظاهرة يقودنا إلى الناقلية المميزة للمواد. كما يحدث نوع آخر من التفاعلات بين المواد الصلبة و الحقول المغناطيسية، و ذلك بإحداث إزاحة موضعية في حدود ضيقة للشحنات المحلية، فتتشكل عزوم ثنائيات أقطاب محلية [18].

1-1- النواقل:

النواقل هي المواد التي تحوي عددا كبيرا من ناقلات الشحنة الحرة، وهي في أغلب المواد إلكترونات، حيث عادة ما يكون لكل ذرة إلكترون حر واحد [17].

يخضع انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية لمعادلات ماكسويل التالية [19]:

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1-II)$$

$$div \vec{D} = \rho_l \quad (2-II)$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3-II)$$

$$div \vec{B} = 0 \quad (4-II)$$

حيث: ρ_l كثافة الشحنة الحرة و \vec{J}_l شعاع كثافة التيار الحر، وللاوساط الخطية والمتجانسة ترتبط الأشعة الأربعة بالعلاقتين:

$$\vec{D} = \vec{\epsilon} \vec{E} \quad (5-II)$$

$$\vec{B} = \vec{\mu} \vec{H} \quad (6-II)$$

حيث: $\vec{\epsilon} = \epsilon_0 \epsilon' - i \epsilon_0 \epsilon''$ السماحية الكهربائية المركبة. و $\vec{\mu} = \mu_0 \mu' - i \mu_0 \mu''$ النفاذية المغناطيسية المركبة.

1-2- إستجابة النواقل للتردد [18]:

بتطبيق تحويل فورييه على معادلات ماكسويل و استبدال كثافة التيار بقانون أوم و كذا اعتبار $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon(\omega) \vec{E}$ نحصل على الناقلية الكهربائية المركبة بدلالة التردد.

$$\vec{J} = \vec{J}(t), \vec{E} = \vec{E}(t), \vec{D} = \vec{D}(t)$$

تحويل فورييه: $\omega \leftarrow t$

$$\vec{E}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{E}(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (7-II)$$

$$\vec{D}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{D}(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (8-II)$$

تصبح المعادلة الثانية لماكسويل كالتالي:

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E}(\omega) - i\omega \epsilon_0 \epsilon(\omega) \vec{E}(\omega) \quad (9-II)$$

يعبر الحد الأول عن التوصيل الكهربائي، بينما يعبر الحد الثاني عن ظاهرة التحريض الكهرومغناطيسي. بناءً عليه يمكن كتابة عبارة الناقلية الكهربائية المركبة كالتالي:

$$\vec{\sigma} = \sigma - i\omega \epsilon_0 \vec{\epsilon} = -i\omega \epsilon_0 \vec{\epsilon} \quad (10-II)$$

ترتبط هذه المعادلة بين الناقلية الكهربائية المتعلقة بالتردد و السماحية الكهربائية للمادة. بشكل آخر يمكن كتابة الصيغة العامة للسماحية الكهربائية (ثابت العزل) كما يلي:

$$\vec{\epsilon}(\omega) = \epsilon(\omega) + i\sigma/\epsilon_0 \omega \quad (11-II)$$

في الحقيقة تكون ϵ متعلقة بالتردد و الموضع: $\epsilon = \epsilon(\omega, r)$

و ذلك لأن $\vec{D} = \vec{D}(t, r)$ و $\vec{E} = \vec{E}(t, r)$ ، إلا أن ذلك التغيير الموضعي مهم؛ إذ أن معدل تغيره صغير جداً، كما يتعلق الاستقطاب في نموذج الهزاز التوافقي بإزاحة الشحنات الفعالة على النحو:

$$\ddot{s} + \gamma \dot{s} = \omega_0 s + \frac{e^*}{m} E \quad (12-II)$$

حيث: s تمثل الإزاحة، و γ ثابت التخميد (الذي يحدد فترة حياة الاهتزاز الطبيعية للأمواج)، بينما m هي الكتلة المختزلة للشاردة و ω_0 التردد الرنيني للهزاز التوافقي.

تكتب عبارة الاستقطاب على النحو التالي:

$$P = \frac{N}{V} e^* s + \epsilon_0 \frac{N}{V} \alpha E \quad (13-II)$$

حيث N عدد الجسيمات، و V الحجم المشغول، بينما α الاستقطابية الإلكترونية. عندما نقوم باستخدام تحويل فورييه، و نضع $P = \epsilon_0(\epsilon - 1)E$ لتعريف عبارة السماحية:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\omega_0^2(\epsilon_{st} - \epsilon_\infty)}{\omega_0^2 - \omega^2 - j\omega\gamma} \quad (14-II)$$

تمثل كل من ϵ_∞ و ϵ_{st} قيم السماحية عند تردد اللانهاية (كبير) و الصفر على الترتيب.

إنطلاقاً من قيمة التردد يمكن تحديد ثلاث مجالات لاستجابة النواقل للتردد [21,20]:

أ) مجال التوصيل:

في هذا المجال يكون التردد ($\omega \ll 1/\tau$) من رتبة $3 \times 10^{15} \text{ Hz}$ ، و يمتد حتى المنطقة ما تحت الحمراء البعيدة، و يُسمى مجال تأثير القشرة الكلاسيكي.

في الحالة التي يكون فيها الجزء التخيلي للسماحية كبيراً جداً أمام طويلة الجزء الحقيقي ($\epsilon'' \gg \epsilon'$) و تكون الترددات العليا في مجال التيراهرتز فإن العبارة $\vec{j} = \frac{\sigma}{1-i\omega\tau} \vec{E}$ تتحول إلى قانون أوم.

ب) مجال النفاذ:

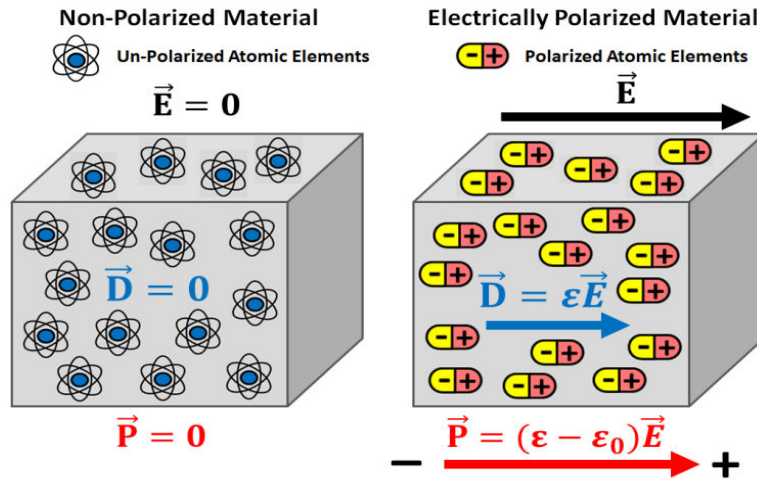
في هذا المجال يكون التردد ($\omega \gg \omega_p$)، حيث يكون تردد التصادم τ^{-1} أقل من تردد الموجة الواردة، و الجزء الحقيقي للسماحية يؤول إلى ϵ_∞ ؛ أي يكون جزؤها التخيلي صغيراً جداً، و بالتالي يسلك الناقل سلوك عازل، و يكون شفافاً للموجة. في هذه الحالة يمكن استخدام المعدن في مجال الأشعة فوق البنفسجية، خاصة لإنتاج العدسات أو المرشحات.

ج) مجال الاسترخاء:

في هذا المجال يكون التردد ($1/\tau \ll \omega < \omega_p$)، و تكون ϵ' سالبة، و يصبح سلوك الناقل مشابهاً لسلوك البلازما بدون ضياع (الاهتزازات أو التذبذبات مهمة). تنعكس الموجة الواردة على المعدن مثل ما تنعكس الموجات الراديوية في الغازات المؤينة عند ترددات أقل من تردد البلازما. تحدث هذه الظاهرة عندما يكون عمق اختراق الموجة أقل بكثير من طولها، هذا التأثير القشري الشاذ يقلل من التوصيل الكهربائي للمادة.

1-3- العوازل الكهربائية و خواصها:

العوازل هي مواد لا تسمح بحركة الشحنة الكهربائية خلالها إلا في حدود ضيقة، أو بتعريف آخر هي مواد تكون فيها الجسيمات المشحونة مشدودة بقوة ببقية مكونات الوسط المادي، و تنحصر استجابة هذه الجسيمات (الإلكترونات و الأيونات) للمجال الكهربائي في قدرتها على الانحراف قليلاً عن مواضعها الأصلية، حيث يطبق المجال الكهربائي المُسلط على مادة عازلة قوةً على كل جسيم مشحون، فتندفع الجسيمات الموجبة باتجاه الحقل الكهربائي، بينما تندفع الجسيمات السالبة بالاتجاه المعاكس، مما يؤدي إلى إزاحة الجزئين الموجب و السالب للجزئية عن موضع الاتزان باتجاهين متعاكسين، الشكل (II-2)، نتيجة لذلك ينشأ عزم ثنائي قطب كهربائي متغير، و بذلك تُصبح المادة العازلة مُستقطبة [22].



الشكل (2-II): نمذجة لتأثير الحقل الكهربائي على سلوك العوازل الكهربائية [23]

4-1-1- استجابة العوازل للتردد [18]:

عند تسليط حقل كهربائي على مادة عازلة خطية متجانسة و متماثلة المناحي، و في غياب الشحنات الناقلة للتيار، يحدث استقطاب للعازل. هذا الاستقطاب يُعطى بشعاع يُعرّف على أنه محصلة العزوم الكهربائية لثنائيات الأقطاب في وحدة الحجم.

$$\vec{P} = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\sum_i \vec{p}_i}{\Delta\tau} \quad (15 - II)$$

حيث: \vec{p}_i عزم ثنائي القطب.

4-1-1- الاستقطابية [18]:

لا تعتمد درجة استقطاب العازل على المجال الكهربائي فحسب، بل على خواص جزيئات الوسط أيضا. و من وجهة النظر المجهرية يمكن تعيين سلوك المادة كليا بواسطة علاقة تُحدّد تجريبيا بين الاستقطاب و شدة المجال الكهربائي العيني $P(t) = P(E)$ ، و هي علاقة موضعية، يتغير فيها P من موضع إلى آخر داخل الوسط المادي تبعاً لتغير E ، فإذا كانت جميع عزوم ثنائيات الأقطاب متعلقة خطيا بالحقل الكهربائي للموجة فإن الاستقطاب يتناسب مع \vec{E} ، بالعلاقة (1-II)، و لمعظم المواد يتلشى الاستقطاب مع زوال تأثير الحقل الكهربائي.

$$\vec{P}(t) = \chi \vec{E}(t) = \epsilon_0 \chi_r \vec{E} \quad (16 - II)$$

حيث تمثل χ و χ_r على الترتيب الاستقطابية المطلقة و الاستقطابية النسبية للوسط.

تدعى الإستقطابية النسبية بالتأثرية الكهربائية أو قابلية التكهرب للوسط، و هي تصف مدى قدرة أو قابلية المادة للاستقطاب استجابةً للحقل الكهربائي.

نعرف أيضا شعاع الإزاحة الكهربائية كما يلي:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 (1 + \chi_r) \vec{E} \quad (17-II)$$

حيث: $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$ الإزاحة الكهربائية في الفراغ أو في عدم وجود استقطاب.

1-4-2- ضياع العزل الكهربائي [23]:

كثافة التيار \vec{J} هي الجمع بين تيار التوصيل و تيار الإزاحة الكهربائية:

$$\vec{J}(t) = \sigma \vec{E}(t) + \frac{\partial \vec{D}(t)}{\partial t} \quad (18-II)$$

حيث σ الناقلية التابعة لتيار التوصيل، و باستعمال تحويل فورييه نحصل على:

$$\vec{J}(\omega) = \sigma \vec{E}(\omega) + j\omega \vec{D}(\omega) = (\sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon'(\omega) + j\omega \epsilon_0 \epsilon''(\omega)) \vec{E}(\omega) \quad (19-II)$$

يكون $\vec{J}(\omega)$ متفقا في الطور مع الحقل $\vec{E}(\omega)$ ، و ذلك لوجود ضياع ناتج عن ظواهر التوصيل و الامتصاص، و يعكس الجزء التخيلي $\epsilon''(\omega)$ للسماحية ظاهرة ضياع العزل.

يمكن التعبير عن ضياع العزل بإهمال التوصيل الكهربائي بالعلاقة التالية:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r} \quad (20-II)$$

ϵ''_r و δ تمثل على الترتيب معامل الضياع و زاوية الضياع. عمليا لا يمكن إهمال الضياع الناتج عن التوصيل، و في هذه الحالة يصبح:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''_r + (\sigma / \omega \epsilon_0)}{\epsilon'_r(\omega)} \quad (21-II)$$

1-4-3- إسترخاء العوازل [17]:

أ) آليات الاستقطاب:

يمكن أن يحدث الاستقطاب \vec{P} على عدة مقاييس، الشكل (3-II)، و هو ناتج عن الاستقطابات التالية:

أ-1 الاستقطاب الإلكتروني:

يحدث بسبب إزاحة و تشوه السحابة الإلكترونية للذرة أو الأيون، مما يؤدي إلى تكوّن عزم ثنائي قطب مُستحث (محرّض). عندما يكون المجال الكهربائي المطبق جيبيًا ذا تردد زاوي ω تتصرف السحابة الإلكترونية مثل الهزاز القسري، و له نبض يقع في مجال الأشعة فوق البنفسجية و المرئية.

أ-2 الاستقطاب الذري:

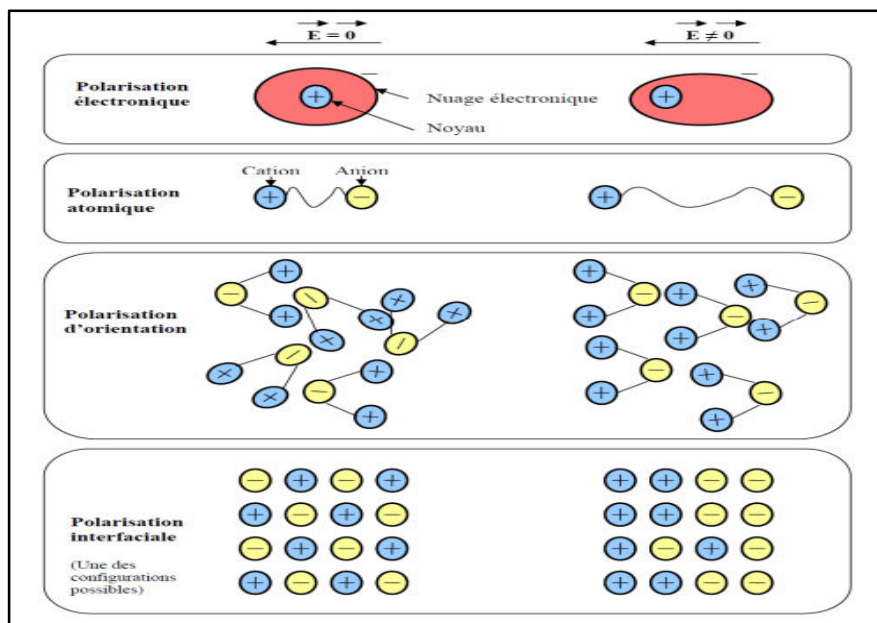
يتعلق هذا الاستقطاب بإزاحة الذرات أو الأيونات عن مواقع توازنها في الوسط الذي تنتمي إليه (جزئي أو شبكة بلورية)، و هو أكثر وضوحًا، لأن للرابطة طابعًا أيونيًا. تتغير المسافة بين الأيونات و يظهر ثنائي قطبٍ مستحثٌ، مما يجعل هذا النوع من الاستقطاب غائبًا في الروابط التساهمية.

أ-3 الاستقطاب الدوراني (دوران ثنائيات الأقطاب الدائمة):

يرتبط هذا النوع من الاستقطابات بالبنية الذرية أو الجزيئية التي لها عزم ثنائي قطب دائم (الجزيئات المستقطبة)، مثل H_2O و HCl و Si_2O ، و يرجع ذلك إلى استجابة ثنائيات الأقطاب الدائمة للحقل المطبق.

أ-4 إستقطاب الشحنات الفضائية:

تتكون المادة غير المتجانسة عمومًا من مناطق لها خواص عازلة و موصلة مختلفة. السطوح البينية بين هذه المناطق هي أماكن تتركز عندها الشحنات و العيوب (الشوائب، الثغرات،...). عند عدم وجود مجال كهربائي تتوزع الشحنات بتجانس في كل المنطقة، و عند وجوده يمكن حدوث تراكم لهذه الشحنات في السطوح البينية، ما يؤدي إلى استقطابها.



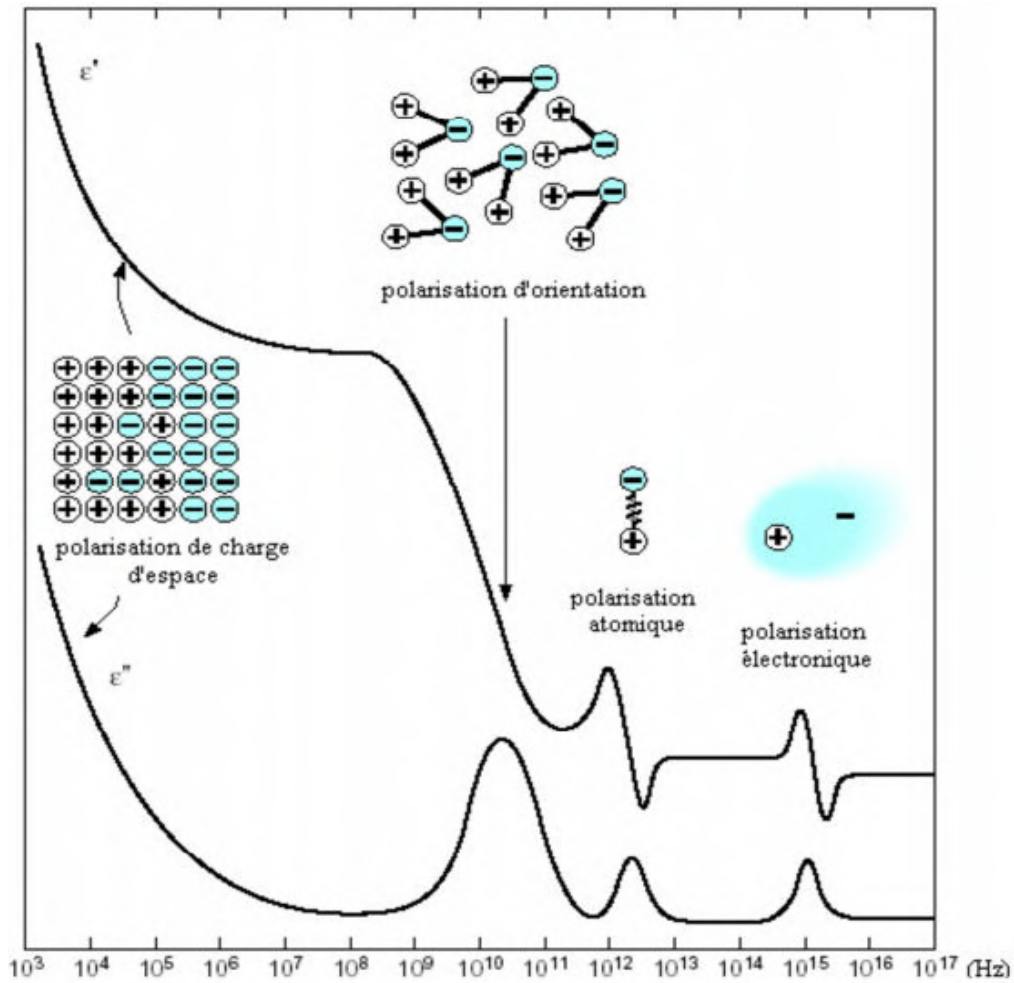
الشكل (3-II): آليات الاستقطاب [17]

يمكن ربط كل آلية من آليات الاستقطاب هذه بزمن ثابت يترجم زمن استجابة ثنائيات الأقطاب إلى محاذة الحقل الكهربائي الخارجي، و بالتالي فإن امتصاص الطاقة المرتبط بآلية استقطاب معينة يختلف - كدالة لتردد المجال الكهربائي المطبق - حول تردد معين محدد لنوع هذا الاستقطاب. يمتص الوسيط الحد الأقصى من الطاقة الكهربائية للإثارة و يعيدها عموماً في شكل حرارة (ضياء بسبب الاحتكاك)، و هو ما يسمى ظاهرة الإسترخاء.

(ب) آليات الاسترخاء:

إن استرخاء العازل تابع للتردد، و هو مرتبط بمساهمة كل جسيمة مكونة للمادة في الاستقطاب، و يُعرّف زمن الإسترخاء τ بأنه التأخر في توازن مختلف الاستقطابات مع الحقل الكهربائي [25].

يمكن مراقبة و اكتشاف الإسترخاء من خلال الجزء الحقيقي و التخيلي للسماحية الكهربائية المركبة المتعلقة بالتردد. يتجلى ذلك في زيادة الجزء التخيلي، مما يترجم خسائر أكبر، و كذلك التخفيض من الجزء الحقيقي، الشكل (4-II).



الشكل (4-II): تغير الجزء الحقيقي و الجزء التخيلي للسماحية الكهربائية بدلالة التردد [17]

2- الرمل كعازل مكوّن من عدة مركبات:

يُصنّف الرمل كهربائياً ضمن المواد العازلة، أمّا من الناحية الكيميائية و الفيزيائية فهو عبارة عن تجمعات حَبِيَّةٍ تضم خليطاً من المعادن و المواد العضوية [13، 26].

3- مطيافية الممانعة الكهربائية:

تندرج مطيافية الممانعة الكهربائية (EIS) ضمن تقنيات تحليل الإشارات الكهربائية، و هي تقنية حديثة و قوية نسبياً لتشخيص العديد من الخصائص الكهربائية (الممانعة الكهربائية، السماحية الكهربائية، معامل الضياع، الناقلية الكهربائية، ...) للمواد و لسطوحها البينية مع أقطاب التوصيل الإلكتروني (مادة-قطب)، و يمكن استخدامها أيضاً لدراسة ديناميكية الشحنات المقيدة و الحرة على مستوى المادة أو السطوح البينية لأي مادة صلبة أو سائلة (أيونية، شبه موصلة، خليط ذي شحنات حرة أيونية و إلكترونية، إضافة إلى العوازل).

لقد أسهمت هذه التقنية بشكل كبير في الأبحاث و تطوير المواد، حيث تُعدُّ طريقةً فحصٍ بسيطةً و غير هدامة [28، 27].

1-3 مفهوم الممانعة:

قُدِّم مفهوم الممانعة الكهربائية لأول مرة من قِبَل Oliver Heaviside عام 1880 على أنها مفهوم أعمُّ من المقاومة الكهربائية؛ ذلك أنها تأخذ بالاعتبار فرق الطور بين إشارتي الدخول (التحريض الكهربائي) و الخروج (الإستجابة).

الممانعة هي إبطاء أو إعاقه المادة لحركة التيار المتناوب المار خلالها، أمّا رياضياً فهي النسبة بين المقدار الذي يصف التحريض المطبق على النظام المدروس و المقدار الذي يحدد استجابة هذا النظام [29، 27].

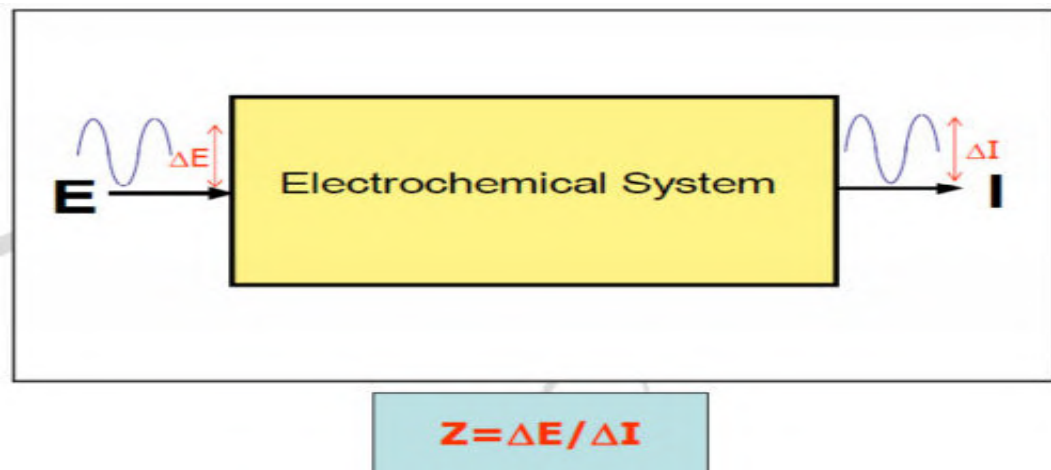
2-3 أسس مطيافية الممانعة و قوانينها:

1-2-3 أسسها:

هذه المطيافية هي أحد فروع القياسات الكهربائية، و هي تبني على إجراء قياسات كهربائية لتقييم السلوك الكهربائي للنظام المدروس (مادة أو مادة-قطب)، و ذلك بتطبيق إشارة كهربائية (جهد أو تيار كهربائي معروف) لإحداث حثّ كهربائي، و من ثمّ مراقبة إشارة الاستجابة (التيار الناتج أو الجهد) لهذا الحث، الشكل (II-5).

إن التحريض الكهربائي لخلية القياس يؤدي إلى إحداث العديد من العمليات المجهرية الأساسية في جميع أنحاءها، فتحدث الاستجابة الكهربائية الكلية، و التي تمثل الممانعة المركبة، حيث يعبر الجزء الحقيقي لها عن المقاومة، أما الجزء التخيلي فيعبر عن المفاعلة (الممانعة السعوية + الممانعة الحثية)، و هي خصائص تعتمد على التردد.

يمكن استنباط المقادير المركبة (السماحية، الناقلية و المقاومة . . . و هي التي تصف خواص العزل أو التوصيل لمادة العينة) من القياس المباشر للممانعة.^[27,30]



الشكل (II-5): مبدأ مطيافية الممانعة الكهربائية^[31]

3-2-2 طرق الحث الكهربائي في مطيافية الممانعة:^[27]

توجد ثلاثة أشكال من إشارات الدخول المستعملة في مطيافية الممانعة لإحداث عملية الحث الكهربائي، إلا أن جهاز قياساتنا يستخدم الطريقة الأكثر شيوعاً، إذ تُقاس الممانعة بدلالة التردد من خلال تطبيق فرق جهد أو تيار أحادي التردد، بعدها يقاس الفرق في الطور و السعة، أو الجزء الحقيقي و التخيلي لتيار الاستجابة الناتج عند ذلك التردد، و ذلك باستخدام دائرة تناظرية أو تحليل فورييه.

هذا و تتوفر أجهزة تجارية لإجراء هذه القياسات تلقائياً في مجال ترددات (1mHz-1MHz). يُمكن ربط هذه الأجهزة بسهولة بالحواسيب الدقيقة المتواجدة بالمخابر. من مزايا هذه الطريقة وفرة أجهزتها و سهولة استعمالها؛ إذ تُتيح للمجرّب أن يُحقق في مجال الترددات نسبة أفضل بين الإشارة و التشويش.

إن الخصائص المتحصل عليها من طيف الممانعة الكهربائية قد تُعزى إلى خصائص السطح البيني (مادة-قطب)، أو إلى خصائص المادة نفسها مثل الناقلية الكهربائية و ثابت العزل الكهربائي و حركة الشحنات و تركيزات التوازن للجسيمات المشحونة.

3-2-3 قوانينها [24, 32]:

تستند مخرجات دراسة مادة باستعمال مطيافية الممانعة الكهربائية على التفاعل بين الحقل الكهربائي الخارجي المسلط على المادة و عزوم ثنائيات الأقطاب و الشحنات الكهربائية في المادة، و كذا مفاهيم التيار المتناوب و سلوكه داخل المادة.

عمليا يتم تطبيق جهد متناوب $V(t) = V_0 \sin(\omega t)$ على النظام (عينة-حامل العينة)، و يكون التيار الناتج المقيس $i(t) = I_0 \sin(\omega t + \theta)$ ، حيث θ هي فرق الطور بين الجهد و التيار، و يكون هذا الفرق معدومًا إذا كانت المادة تسلك سلوك مقاومة بحتة.

العلاقة بين خصائص النظام والاستجابة للجهد الجيبي أو لتيار الإثارة معقدة للغاية في المجال الزمني، لذا يتم تبسيطها باستعمال تحويل فورييه، لنقلها إلى مجال الترددات، بحيث تصبح العلاقة بين الجهد و التيار مشابهة لعلاقة أوم في التيار المستمر.

$$I(\omega) = V(\omega)/Z(\omega) \quad (22-II)$$

حيث $Z(\omega)$ مقدار مركب، و قيمته للمكثفة و الوشيعة تساوي $Z(\omega) = 1/j\omega C$ و $Z(\omega) = j\omega L$ على الترتيب.

تُعرّف القيمة المركبة $Z(\omega)$ بأنها دالة الممانعة، و هي عند تردد معين ممانعة الدارة الكهربائية عند هذا التردد. تُعرّف النسبة بين سعتي الجهد و التيار طولية الممانعة $|Z|$ ، بينما يكمل الفرق في الطور بين الجهد و التيار المعلومة للتمكن من إيجاد الجزء الحقيقي و الجزء التخيلي للممانعة المركبة، و منه تكون العبارة التالية:

$$\tilde{Z}(\omega) = Z'(\omega) - jZ''(\omega) = \frac{V_0}{I_0} [\cos(\theta(\omega)) + j\sin(\theta(\omega))] \quad (23-II)$$

فالممانعة الكهربائية متعلقة بالتردد، لذا فإن مطيافية الممانعة تتركز على قياس الممانعة بدلالة التردد f أو التردد الزاوي ω في مجال واسع من الترددات، بحيث أنه في الوقت الحاضر يمكن قياسها آليا باستخدام أجهزة مطيافية الممانعة، و من خلال تحليل العلاقة بين Z و ω تُستمد المعلومات حول الخواص الكهربائية للنظام الكلي (مادة-قطب)، و ذلك باستخلاص الناقلية المركبة و السماحية المركبة للمواد انطلاقا من قياس الممانعة الكهربائية المركبة:

$$\tilde{Z}(\omega) = Z' - iZ'' = \frac{\tilde{V}(\omega)}{\tilde{I}(\omega)} \quad (24-II)$$

$$\delta = \arctg \left(\frac{Z''}{Z'} \right) \quad (25-II)$$

فرق الطور:

$$\bar{\sigma}(\omega) = \sigma' - i\sigma'' = i\omega\varepsilon_0\bar{\varepsilon} \quad (26-II)$$

الناقلية المركبة:

$$\bar{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \frac{-i}{\omega\bar{Z}(\omega)} \frac{1}{C_0} \quad (27-II)$$

السماحية الكهربائية المركبة:

حيث C_0 هي سعة المكثفة المستوية الحاملة للعينة و هي فارغة.

3-3 إستخدامات مطيافية الممانعة [27, 33].

- تكون النتائج المتحصل عليها من مطيافية الممانعة مرتبطة بالكثير من الخصائص الفيزيائية للمادة و الخصائص العازلية، و كذا بتأثير التركيب على التوصيل الكهربائي للمواد الصلبة. لذا فإن هذه المطيافية مؤهلة للاستعمال في ميادين و دراسات مختلفة، من بينها على سبيل الذكر لا الحصر:
- تشخيص خصائص المواد: دراسة المواد المركبة، الحبيبية . . .
 - في مجال الكهروكيمياء: التآكل، التشتت، البطاريات.
 - تشخيص خصائص العناصر و المركبات الإلكترونية.
 - تقنية مراقبة جودة المواد و المنتجات: منتجات غذائية، صيدلانية . الخ.
 - التصوير الطبي.

الفصل الثالث

الأدوات المستخدمة و جهاز القياس

تمهيد:

سُنولي العناية في هذا الفصل للجانب العملي، و هذا من خلال ذكر مراحل تحضير العينات، و التعريف بالأدوات المستعملة لتحضيرها، و جهاز المطيافية المستخدم في القياس.

1- تحضير العينات:

أُخِذَ الرمل الذي حُضِرَتْ به العينات من منطقة قريبة جدا من مدينة ورقلة، تقع في الجهة الجنوبية الغربية منها، تُدعى "مخيرة"، و الموقع محددٌ تقريبا بالإحداثيات الجغرافية $54^{\circ} 31' N$ و $18^{\circ} 5' E$.

1-1- الجهاز المستعمل في الطحن:

سُحِقَ الرمل أولاً بجهاز طحن ميكانيكي، الشكل (III-1)، يحوي بداخله كريات صغيرة من العقيق (agate)، و هي صنف غير متبلور من أحجار السيليك، تتصادم فيما بينها عند الاهتزازات التي يُحدثها الجهاز، فتتفكك المادة المراد طحنها بين الكريات حالة التصادم مما يؤدي لسحقها. لقد استمرت عملية السحق حوالي رُبْع ساعة، حتى أصبح الرمل ناعما جدا، يُشبه الدقيق اللين في شكله.



الشكل (III-1): جهاز السحق الميكانيكي

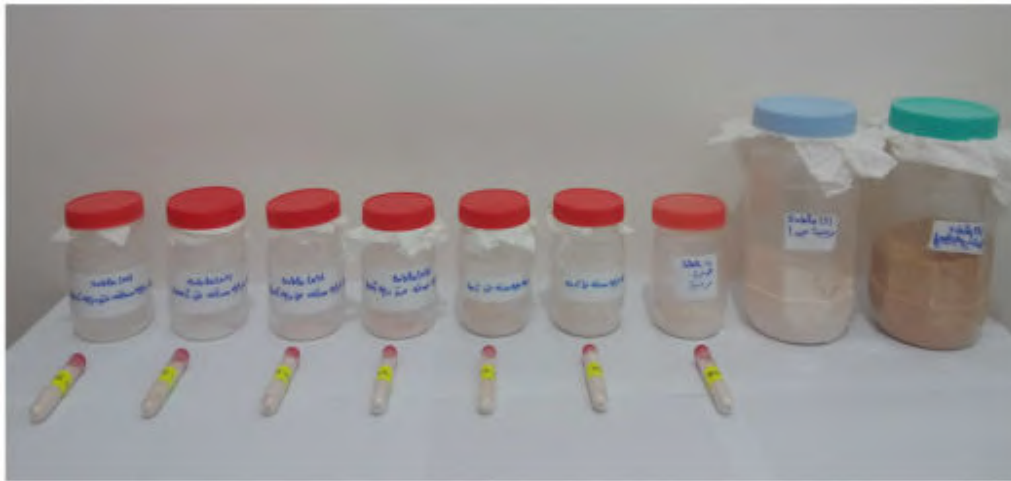
1-2- العينات:

لغرض رصد تأثير الحرارة على تركيب الرمل، باستخدام مطيافية الممانعة الكهربائية أُخِذت سبع عينات متماثلة من الرمل المسحوق، وزن كلُّ واحدة منها 100g. لم تعرض الأولى للحرارة، بينما وُضعت العيناتُ السَّتُّ الباقية في أوانٍ خزفية، وُعْرِضت لدرجات حرارةٍ مختلفة: 200، 400، 600، 800، 1000، $1200^{\circ} C$ لمدة 24 ساعة متواصلة في فرن كهربائي الشكل (III-2)، و ذلك تحت الضغط الجوي العادي، ثم تُركت لتبرّد طبيعياً.

تفادياً للتأثيرات الجانبية الناجمة عن رطوبة الجو حُفِظَت العينات في علبٍ بلاستيكية مغلقة، الشكل (III-3).



الشكل (III-2): الفرن الكهربائي المستعمل و الأواني الخزفية



الشكل (III-3): حفظ العينات في علب بلاستيكية مغلقة

2- جهاز قياس الممانعة الكهربائية:

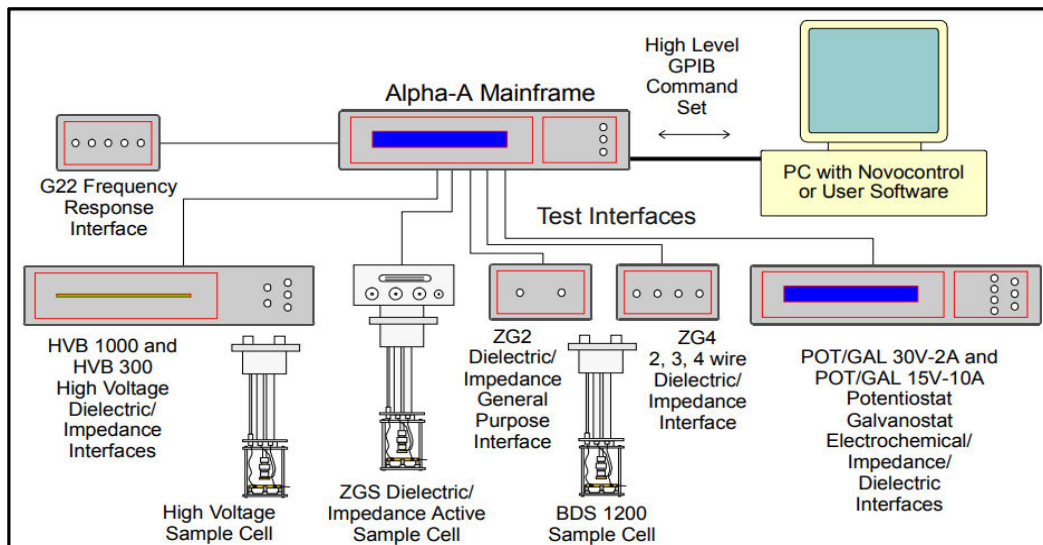
2-1- التعريف بالجهاز:

قمنا في العمل بتسجيل نتائج مطيافية الممانعة الكهربائية باستعمال جهاز تحليل من نوع (Alpha10) في مجال الترددات $[10^{-2}-10^7\text{Hz}]$ ، الشكل (III-4). هذا الجهاز يقوم بتحليل الاستجابات للترددات المختلفة، فيمكن من قياس كل من السماحية المركبة و الناقلية المركبة و الممانعة الكهربائية للمادة دوالاً للتردد و لدرجة الحرارة، في مجال الترددات $[3 \mu\text{Hz}-1\text{MHz}]$ ، و مجال درجات الحرارة $[-160-400^\circ\text{C}]$ ، و هو مُعدُّ خصيصاً لدراسة المواد التي تتميز بممانعة عالية و معامل ضياع منخفض، لكن يمكنه أن يقيس بدقة عالية المواد ذات الناقلية العالية و الممانعة المنخفضة^[32].



الشكل (III-4): جهاز قياس مطيافية الممانعة الكهربائية

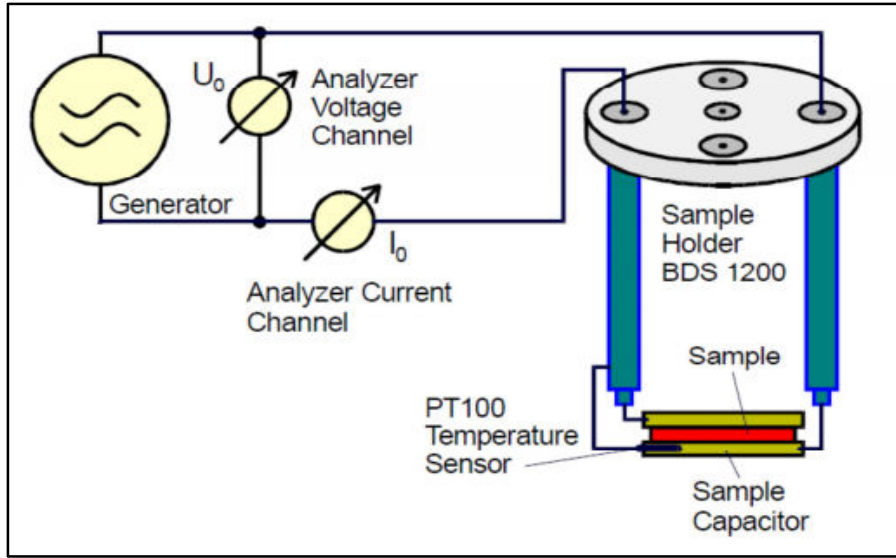
جهاز التحليل هذا يشكل نظام قياس مُكوّن من وحدة قياس أساسية تسمى "وحدة مركزية" Alpha analyzer mainframe، و التي يمكن أن تضاف لها عدة واجهات اختبار، الشكل (III-5) [32].



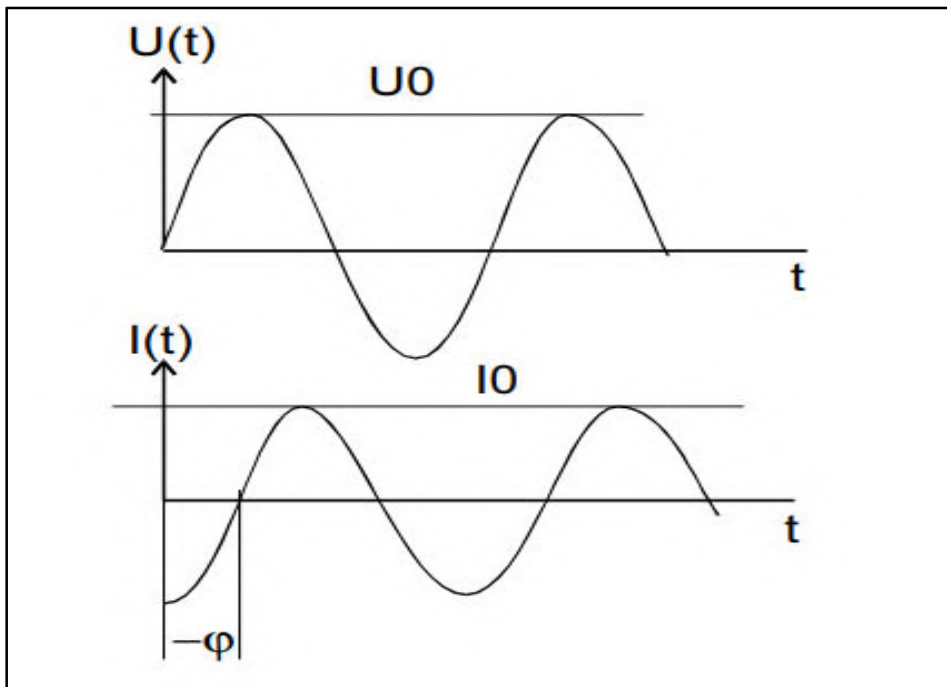
الشكل (III-5): الوحدة المركزية لجهاز قياس الممانعة و لواقعه [34]

2-2- مبدأ القياس: [33]

يُطبَّق فرق جهد U_0 ذو تردد ثابت $\omega/2\pi$ على المكثفة الحاملة للعينة، فينتج تيار I_0 يمر في العينة بالتوتر نفسه، الشكل (6-III)، لكن يحدث فرق في الطور بين الجهد و التيار، يُعبّر عنه بزاوية الطور، الشكل (7-III).



الشكل (6-III): مبدأ إجراء القياس [32]



الشكل (7-III): تمثيل سعتي الجهد و التيار المار في العينة و فرق الطور بينهما [32]

إنَّ أبعاد العينة و خصائصها الكهربائية (السماحية، الناقلية الكهربائية، . . .)، تُحدَّدان زاوية الطور و النسبة بين سعة الجهد و التيار.

2-3-3- القياس:

2-3-3-1- تهيئة النموذج:

للقيام بعملية القياس توضع العينة في حامل العينات، و الذي يوضع بين لبوسين معدنيين يشكلاان مكثفةً اسطوانية الشكل، ثم يتم وضع الكل داخل خلية القياس، الشكل (III-8)^[27].



الشكل (III-8): خلية القياس المستعملة في جهاز قياس مطيافية الممانعة الكهربائية^[25]

للحامل المستعمل الأبعاد التالية:

قطر 39.99 mm . إرتفاع 6.98 mm . سمك الغطاء النحاسي 2 mm .

أما العينة فلها الأبعاد التالية:

قطر 29.31 mm . إرتفاع 4.98 mm .

2-3-3-2 بدء القياس:

يجب أولاً ضبط إعدادات القياس (مجال التردد، درجة الحرارة) بواسطة إحدى البرنامجين WinDETA أو l'Alpha GPIB . بعد ذلك تبدأ عملية قياس الممانعة الكهربائية المركبة، ثم تُستنبط بقية المقادير الفيزيائية (زاوية الطور، الناقلية الكهربائية، السماحية الكهربائية) تلقائياً وفق القوانين التي تربط هذه المقادير ببعضها، ثم تُحفظ نتائج القياس و الحساب على قرص الكمبيوتر، ثم تُحوَّل إلى تنسيق نصي (text) ليسهل استغلالها و معالجتها ببرامج معالجة البيانات^[35]، ك Origin مثلاً. يعطي جهاز القياس جداول على النمط التالي:

الجدول III-1: نموذج ملفات الإخراج التي ينتجها النظام الحاسوبي المتصل بجهاز قياس الممانعة الكهربائية

التردد ω (Hz)	الجزء الحقيقي للممانعة النسبية ϵ_r'	الجزء التخيلي للممانعة النسبية ϵ_r''	الجزء الحقيقي للممانعة σ' (S/cm)	الجزء التخيلي للممانعة σ'' (S/cm)	فرق الطور δ (deg)	الجزء الحقيقي للممانعة Z' (ohms)	الجزء التخيلي للممانعة Z'' (ohms)
1.00E+07	468.99	997.38	0.00555	-0.0026	64.816	10.015	21.299
7.14E+06	627.83	1239	0.00492	-0.00249	63.127	11.288	22.275
5.10E+06	831.43	1541.5	0.00438	-0.00236	61.66	12.701	23.548
3.64E+06	669.93	1963.5	0.00398	-0.00136	71.16	13.96	40.916
2.60E+06	1370.5	2629.6	0.00381	-0.00198	62.473	14.593	28.001
1.86E+06	1767.2	2869.6	0.00297	-0.00183	58.373	18.722	30.4
1.33E+06	2236.3	3592.2	0.00265	-0.00165	58.096	20.938	33.634
...
...
...
0.04685	1.73E+09	4.69E+10	0.00122	-4.52E-05	87.885	45.459	1230.7
0.0239	-2.98E+10	9.50E+10	0.00126	3.96E-04	107.4	43.978	-140.32
0.01	-6.69E+10	1.76E+11	9.79E-04	3.72E-04	110.82	56.764	-149.25

الفصل الرابع

رصد تغيّرات الناقلية الكهربائية للرمال

تمهيد:

رغم أننا أجرينا قياسات عديدة باستخدام مطيافية الممانعة، و هي التي تعطي علاقة مباشرة بين ترددات الحقول الكهربائية و الممانعة الكهربائية بشقيها، الحقيقي و التخيلي، ثم تُستنبط بقية المقادير (الناقلية الكهربائية الحقيقية، الناقلية الكهربائية التخيلية، السماحية الكهربائية الحقيقية، السماحية الكهربائية التخيلية، زاوية الطور) من العلاقات التي تربطها بالممانعة، و التي قدّمناها في الفصل الثاني، إلا أننا سنعتمد على مقدار واحد هو الناقلية الكهربائية الحقيقية لتشخيص التغيرات الحاصلة في تركيب الرمل و خصائصه نتيجة تسخينه عند درجات حرارة مختلفة، تمتد من 200°C حتى 1200°C.

سنسعى في هذا الفصل إلى إبراز مدى تأثير درجة حرارة التسخين على الناقلية الكهربائية للرمل، و كذا إظهار مجالات الترددات التي تحدث عندها أغلب تغيّرات هذه الناقلية، و التي هي بدورها مؤشر واضح على التغيّر الحاصل في تركيب الرمل بسبب تعريضه للحرارة.

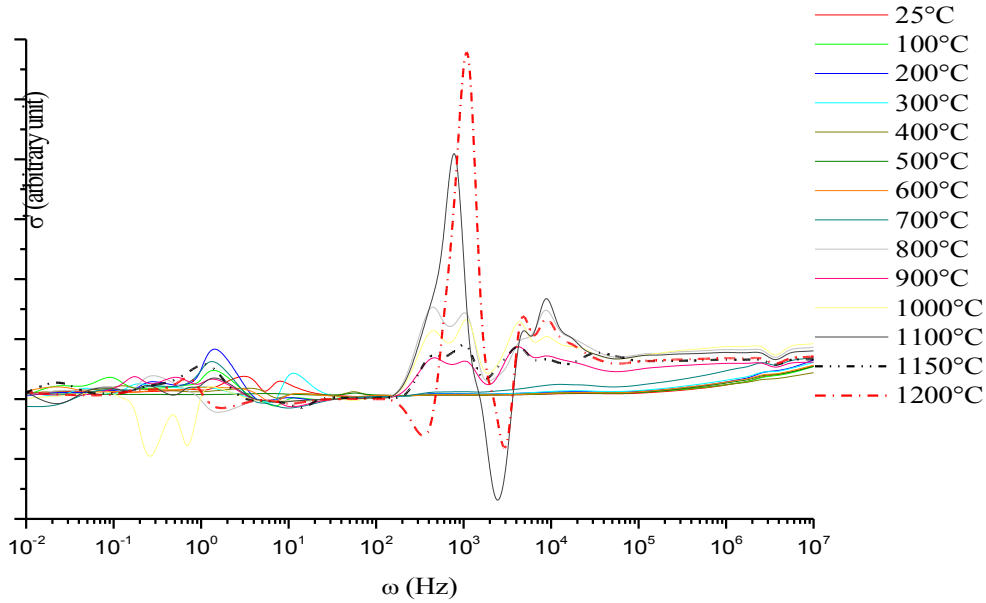
1. مناطق الطيف ذات الترددات المميزة:

عرفنا في الفصل الثاني أن منطقة الترددات $[10^3 - 10^7 \text{ Hz}]$ تميز استقطابات الشحنات الفضائية، و التي هي أساسًا فائض من الإلكترونات أو الأيونات في حجم محدد.

تنشأ الشحنات الفضائية عند الأقطاب الكهربائية و كذا عند الأسطح البينية في الأوساط المتعددة الأطوار، خاصةً عندما يكون لأحد الأطوار مقاومة كهربائية أعلى من المقاومة الكهربائية لطور آخر^[36]، و هو ما يتوافق تمامًا مع طبيعة المادة التي نحن بصدد دراستها، و هي الرمل، فهو مكوّن -كما عرفنا- من العديد من المركبات ذات الخصائص الكهربائية المختلفة (كوارتز، جبس، ألومين، هيماتيت، . . .) لا الذرية، لذا فإن كل مناطق الطيف المميزة ستكون بسبب استقطابات الشحنات الفضائية الحاصلة فيه نتيجة تحريض الحقول الكهربائية الخارجية، و التي تسعى إلى إعادة توزيع الشحنات الفراغية (إلكترونات أو أيونات) في الفضاء و عند الأسطح البينية بين الأطوار المختلفة، و كذا بينها و بين الأقطاب، محققةً بذلك الشروط الحدية التي تخضع لها الحقول الكهربائية، التي هي بدورها مستمدة من معادلات ماكسويل التي تخضع لها كل الظواهر الكهرومغناطيسية.

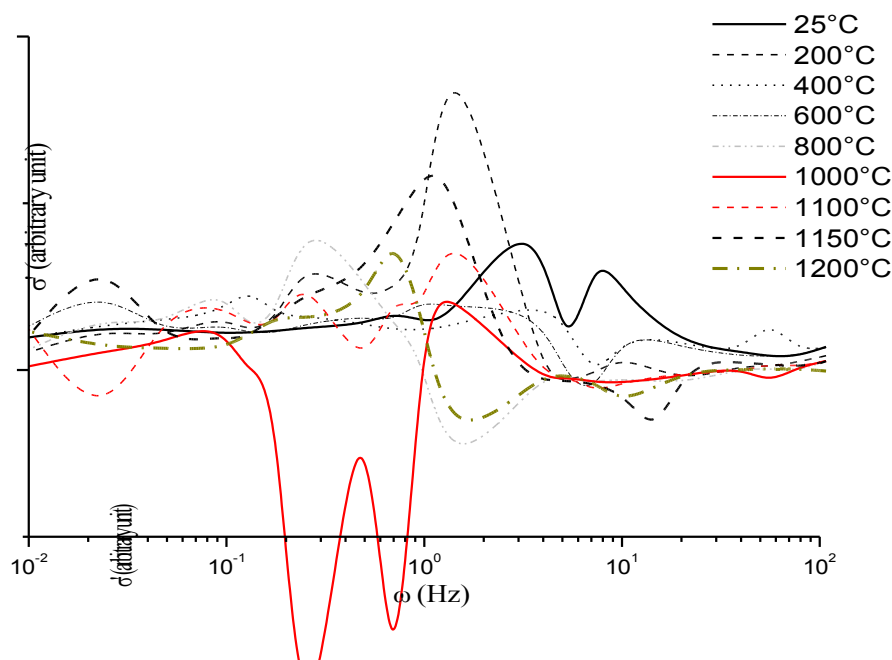
و حيث أن المركبات الموجودة في الرمل جزئيةً فإنه من الممكن أن تحدث به استقطابات أيونية، و هي ذات ترددات $[10^8 - 10^{11} \text{ Hz}]$ ^[13]، لكن من غير الممكن لنا مشاهدتها في هذه الدراسة، حيث جهاز قياساتنا مقتصر على النافذة $[10^{-2} - 10^7 \text{ Hz}]$.

بنظرة شاملة لمنحنى تغيّرات الناقلية الكهربائية مع التردد لكل المجال المقيس $[10^{-2} - 10^7 \text{ Hz}]$ ، (الشكل 1-IV)، سنرى بوضوح أن التغيّرات المهمة للناقلية لكل العينات، الطبيعية و المسخنة، لا توجد إلا في مجال الترددات $[10^{-2} - 3 \times 10^4 \text{ Hz}]$ ، إضافة إلى تغيّر آخر يقع عند نهاية الطيف حول التردد $3,5 \times 10^6 \text{ Hz}$.

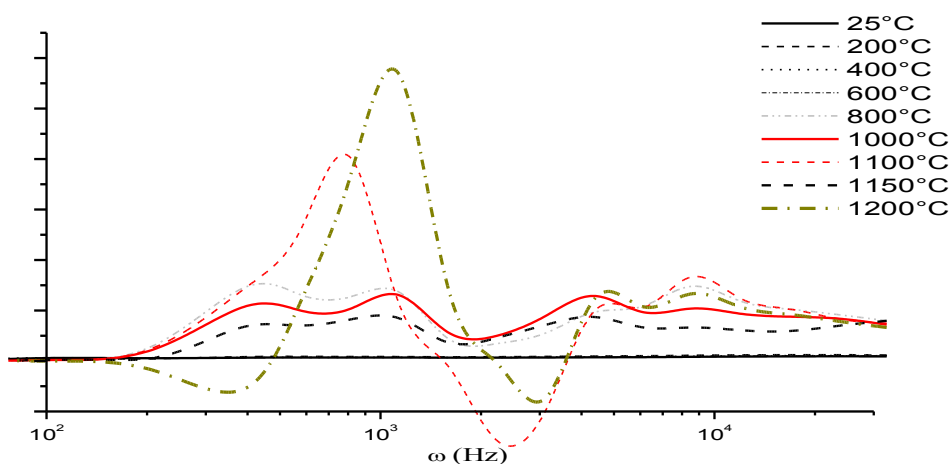


الشكل (1-IV): الناقلية الكهربائية في كل مجال الترددات $[10^{-2} - 10^7 \text{ Hz}]$ لكل العينات الطبيعية و المسخنة في المجال $[100 - 1200^\circ\text{C}]$

زيادةً على ذلك فإنه يمكن تمييز هذا المجال الأخير بمنطقتين: $[10^{-2} - 10^2 \text{ Hz}]$ و $[10^2 - 3 \times 10^4 \text{ Hz}]$ (الشكلان 2-IV و 3-IV)، ففي كلتا هاتين المنطقتين يتغيّر سلوك الناقلية الكهربائية لكل عينة بدلالة التردد، كما يتغيّر من عينة إلى أخرى، ممّا يدلّ دلالةً واضحةً على أن هاتين المنطقتين هما مجال الترددات المميّزة لمكوّنات الرمل، سواءً الطبيعية أو المسخّنة عند درجات حرارة مختلفة، و من جهة أخرى فإن هذين المجالين من الترددات هما اللذان يتأثران بدرجة تسخين الرمل.



الشكل (IV-2): الناقلية الكهربائية للعينات الطبيعية و المسخنة في مجال الترددات $[10^{-2} - 10^2 \text{ Hz}]$

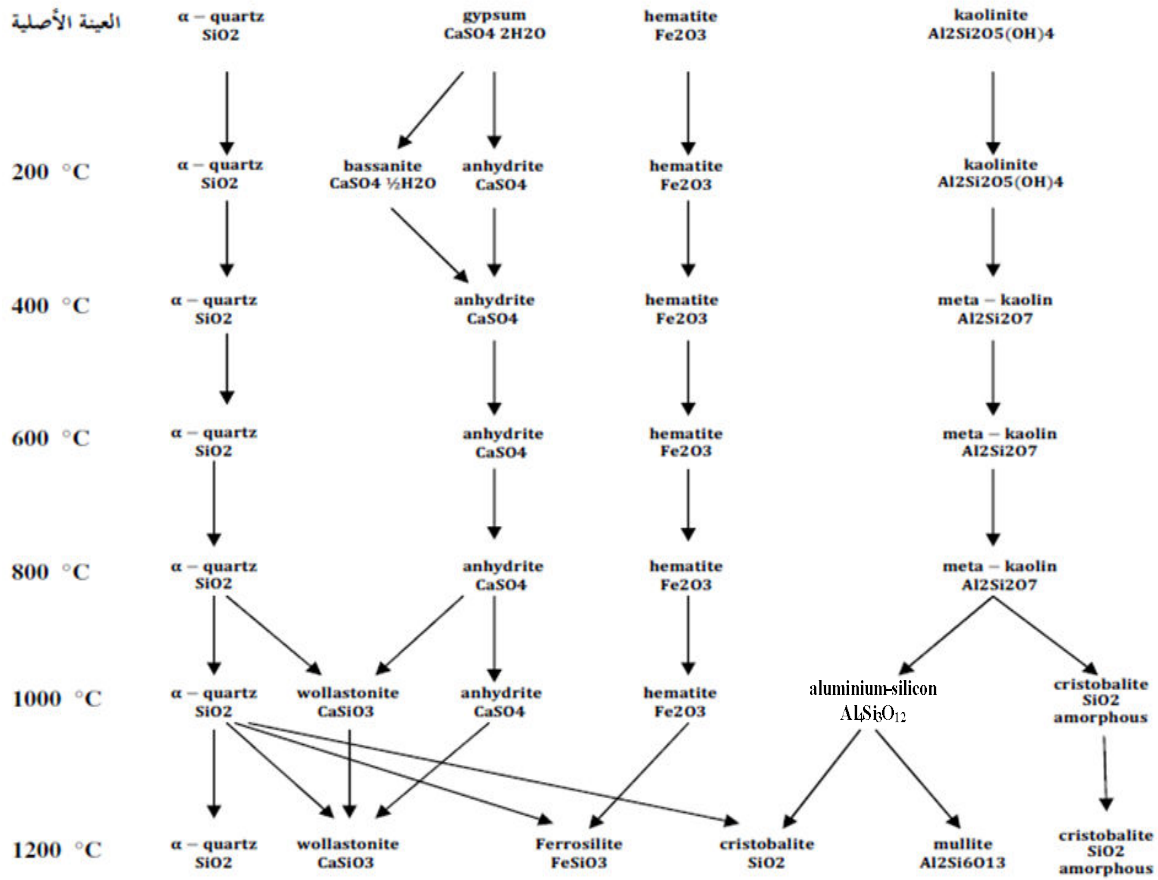


الشكل (IV-3): الناقلية الكهربائية للعينات الطبيعية و المسخنة في مجال الترددات $[10^2 - 3 \times 10^4 \text{ Hz}]$

من الشكل (IV-2) يمكن ملاحظة ما يلي:

- لا تتميز العينة الطبيعية سوى بظهور بارز في المجال $[1-10 \text{ Hz}]$. عند مقارنة هذه العينة الطبيعية ببقية العينات المسخنة، حتى تلك التي عند 200°C ، فإننا لا نجد لها متميزة سوى بحضور الجبس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) فيها، ممّا يجعلنا نرجح أنه هو السبب في بروز هذا التغير في الناقلية الكهربائية.

- تميز العينة 200°C ببروز في المجال $[0,1-1\text{Hz}]$ ، فإذا قارنًا ذلك بمخطط التحولات الطورية، الشكل (IV-4) [13]، فإننا سنجد أن العينة 200°C تتميز بظهور bassanite $\left(\text{CaSO}_4 \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}\right)$ الناتج عن بداية فقد الجبس للماء.
- عند العينة 400°C يبدأ البروز السابق للمجال $[0,1-1\text{Hz}]$ بالاضمحلال، و هو ناتج عن تحول كل ال bassanite إلى مركب آخر هو ال anhydrite (CaSO_4) . زيادةً على ذلك فإنه يبدأ ال kaolinite $(2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$ بالتفكك و يظهر مركب آخر هو meta-kaolin $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7)$ ، و هو الوحيد الذي يميز العينة 400°C ثم يستمر حتى العينة 600°C ، ممّا يجعلنا نرجح أن يكون هو السبب في بروز الاضطراب عند $[0,01-0,1\text{Hz}]$ في العينة 600°C .
- بقاء المنطقة $[1-10\text{Hz}]$ مضطربةً عند العينة الطبيعية و العينات من 200°C حتى 800°C ، ثم زوال هذا الاضطراب تماما بعد ذلك. إذا ما تفحصنا مخطط التغيرات الطورية للرمال الشكل (IV-4) [13]، فإننا سنجد أنه بعد الدرجة 800°C يبدأ الكوارتز ألفا $(\alpha-\text{SiO}_2)$ و ال anhydrite (CaSO_4) بالاتحاد معًا لإنتاج مادة wollastonite (CaSiO_3) ، و أن meta-kaoline يبدأ بالتفكك إلى alluminium-silicon $(\text{Al}_4\text{Si}_3\text{O}_{12})$ و cristobalite (amorphous SiO_2) ، و هذا معناه أن المركبات التي زالت أو بدأت بالزوال هي المسؤولة عن الاضطراب في المنطقة $[1-10\text{Hz}]$.
- خُلُو المجال $[10-100\text{Hz}]$ تقريبًا من أي اضطراب لكل العينات الطبيعية و المسخنة عند كل درجات الحرارة.
- ظهور بعض الاضطرابات في المجال $[0,1-1\text{Hz}]$ للعينات من 1000°C حتى 1200°C مصاحبٌ لظهور ال wollastonite (CaSiO_3) أو ال cristobalite (amorphous SiO_2) ؛ ذلك أن هذه العينات تتميز عن غيرها بهذين المركبين.

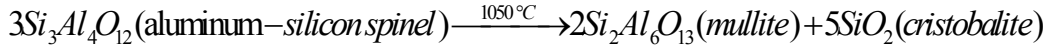


الشكل (IV-4): مخطط التحولات الطورية للرمل عند تسخينه في المجال [200-1200°C]^[13]

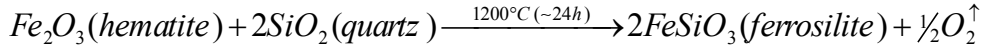
من الشكل (IV-3) يمكن ملاحظة ما يلي:

- كلّ العينات الطبيعية و المسخنة حتى 600°C في المجال [10² - 3×10⁴ Hz] لم تبد أيّ سلوك متبدّل؛ إذ ظلّت كما هي لم تتغيّر.
- تغير نوعي ملحوظ ابتداءً من العينة 800°C في المجال [150-15000 Hz].
- بروز واضح لنتوء حول التردد 9000 Hz لكل العينات من 800°C حتى 1200°C عدا العينة 1150°C حيث اضمحلّ تقريباً، نرجح أن يكون راجعاً للـ wollastonite (CaSiO_3) أو الـ cristobalite غير المتبلور (amorphous SiO_2).
- بروز نتوء بقمّتين عند 430 Hz و 1020 Hz للعينات من 800°C حتى 1150°C. بالرجوع إلى مخطط التحولات الطورية فإننا سنرى أن الطور الوحيد الذي يظهر في المجال [800-1200°C] و يختفي قبل بلوغ الدرجة 1200°C هو aluminium-silicon ($\text{Al}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$)، وهذا ما يجعلنا نرجح مسؤوليته عن هاتين القمّتين.

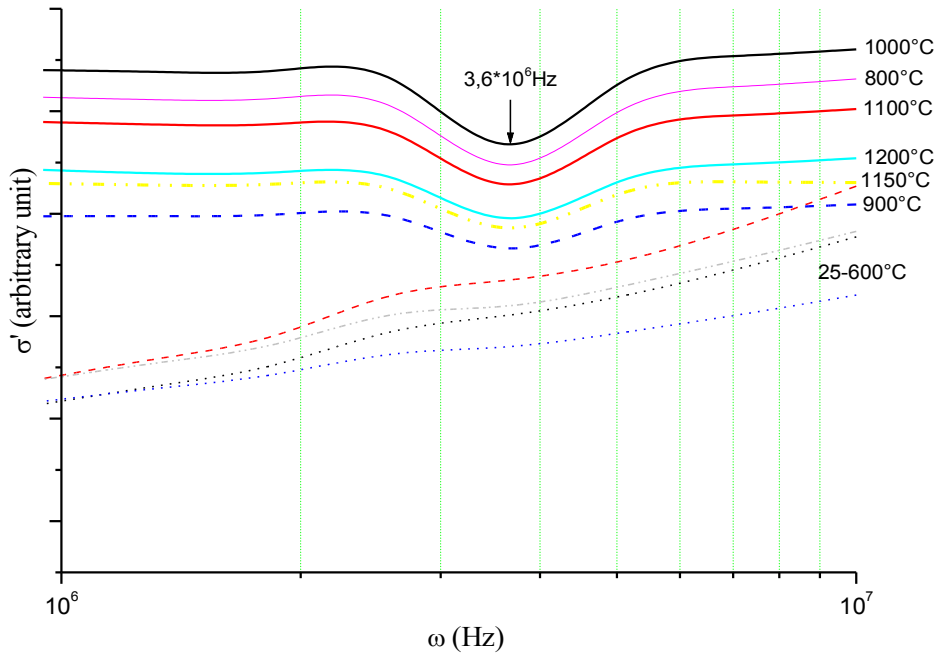
- نتوء بارز بوضوح عند 790Hz في العينة 1100°C ، و هو راجع إلى الـ mullite ($\text{Si}_2\text{Al}_6\text{O}_{13}$)؛ ذلك أن



- ظهور بارز عند 1080Hz للعينة 1200°C ، نرجح أن يكون راجعاً لـ ferrosilite (FeSiO_3)؛ ذلك أنه هو المركب المميز للعينة 1200°C عن بقية العينات، كما بالمعادلة التالية:



- بالعودة للشكل (IV-1) سنرى بوضوح وجود اضطراب حول التردد $3,6 \times 10^6\text{Hz}$ لكل العينات المسخنة، ابتداءً من 800°C حتى 1200°C ، الشكل (IV-5). بالرجوع إلى مخطط التحولات الطورية و إلى معادلات التفاعلات عند درجات الحرارة المختلفة فإننا سنلاحظ بشكل لافت تفكك metakaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) ابتداءً من 925°C و استمراره حتى 1200°C .

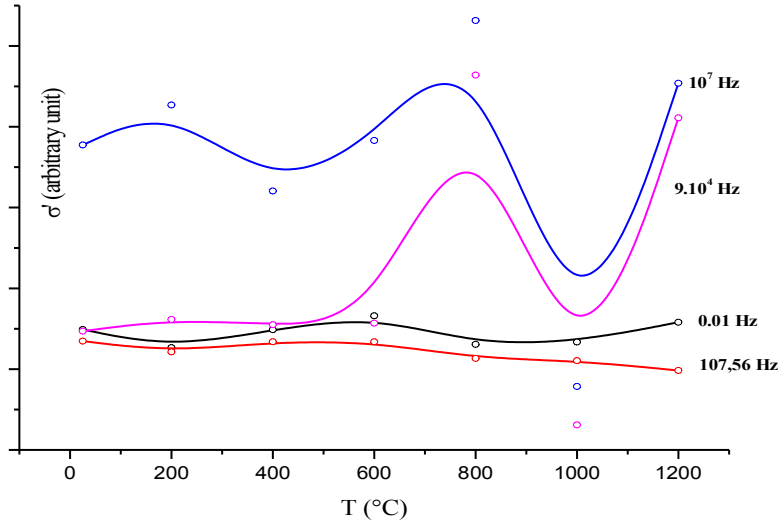


الشكل (IV-5): الاضطراب المميز للناقلية للعينات المسخنة في المجال $[800-1200^\circ\text{C}]$ عند التردد $3,6 \times 10^6\text{Hz}$

2. مراقبة تغير ناقلية عينات الرمل المسخنة عند درجات حرارة مختلفة عند تردد وحيد:

لإبراز مدى ارتباط التغير النوعي للناقلية بتغير أطوار الرمل سنتتبع تغير الناقلية الكهربائية بتغير درجة حرارة التسخين عند تردد وحيد.

إن التغير النوعي للناقلية مرتبط بالتردد، كما يختلف من عينة إلى أخرى، و ذلك من حيث قيمة و كيفية التغير (الشكل IV-6).



الشكل (IV-6): تغير الناقلية الكهربائية لرمل كثبان ورقلة بدلالة درجة حرارة التسخين عند ترددات محدّدة مختلفة

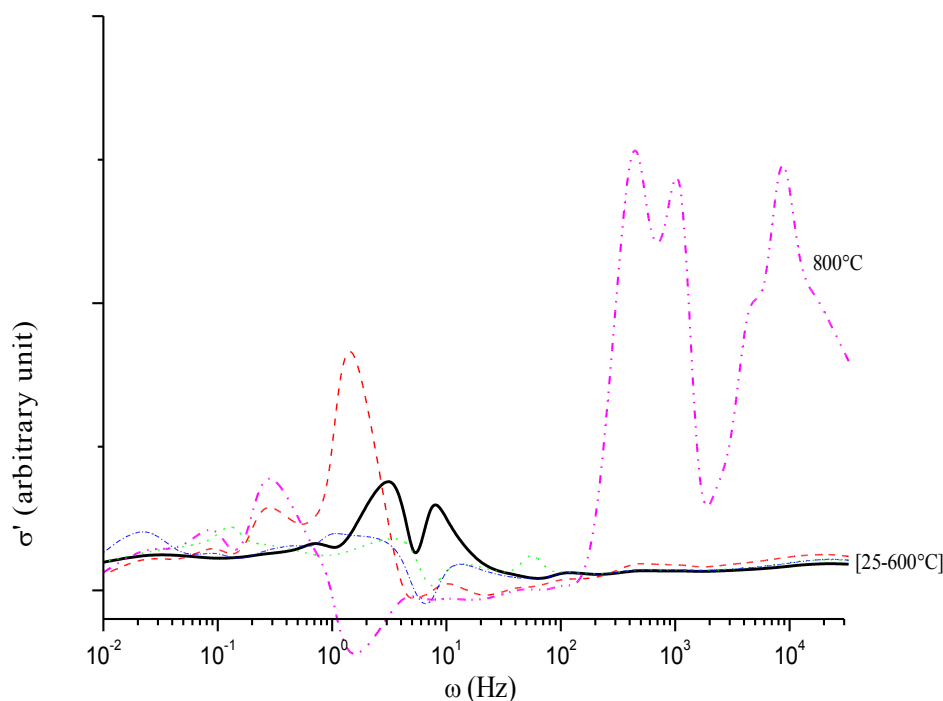
بتفحص الشكل (IV-6) يمكن ملاحظة ما يلي:

- تقارب قيم ناقلية العينات المختلفة من بعضها عند الترددات المنخفضة و المنخفضة جداً، في حين يظهر الفرق بينها واضحاً عند الترددات المتوسطة $9 \times 10^4 \text{ Hz}$ و العالية 10^7 Hz .
- عند التردد 10^7 Hz ترتفع ناقلية الرمل المسخّن عند 200°C مقارنةً بناقلية الرمل غير المسخن، ثم تنخفض للعينه المسخنة عند 400°C ، ثم تزداد بعد ذلك لكل العينات المسخنة عند الدرجات 600°C و 800°C ثم تنخفض للعينه المسخنة عند 1000°C ، ثم ترتفع مرّةً أخرى عند 1200°C .
- عند التردد $9 \times 10^4 \text{ Hz}$ يكون تغير الناقلية الكهربائية للعينات الطبيعية و المسخنة حتى 600°C طفيفاً، ثم تزداد للعينه المسخنة عند 800°C ، ثم تنخفض بعدها للعينه المسخنة عند 1000°C ، ثم ترتفع عند 1200°C .
- عند الترددين 10^2 Hz و 10^{-2} Hz لا يكون تغير الناقلية الكهربائية ذا أهمية كبيرة.
- تدل الملاحظات السابقة على أن الناقلية الكهربائية ذات علاقة وطيدة بالأطوار و المركّبات الغالبة في العينه، كما أنّها تتغير في الوقت نفسه مع تردد الحقل الكهربائي المسلط على العينه ($\sigma' = \omega \epsilon_0 \epsilon''$).

إن تأرجح قيمة الناقلية الكهربائية عند كل تردد بازياد درجة حرارة تسخين العينه يدل على أن الرمل حسّاس جداً لتغيّرات درجة حرارة التسخين؛ إذ كلما كانت هذه الدرجة كبيرة زادت التفاعلات الكيميائية، خاصةً و أن الرمل متعدّد الأطوار، فتزداد معها التحولات الطورية، و التي بدورها تؤدي إلى تغيير الخصائص الفيزيائية للرمل، و التي من ضمنها الناقلية الكهربائية.

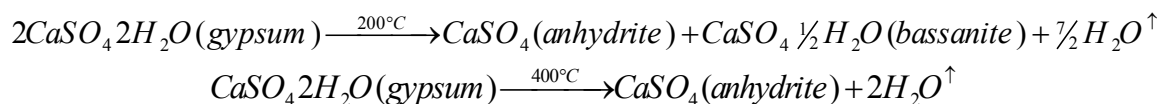
3. تأثير درجة حرارة تسخين الرمل على الناقلية الكهربائية له:

يُلاحظ من الشكل (IV-7) في مجال الترددات $[10^2 - 3 \times 10^4 \text{ Hz}]$ أن العينات الطبيعية و المسخنة عند درجات الحرارة 200°C و 400°C و 600°C لم تتغيّر ناقليتها الكهربائية إلا تغيراً طفيفاً، و لا يبدأ أثر الحرارة على الرمل في الظهور إلا عند العينة المسخنة عند الدرجة 800°C ، ممّا يدل على أن هذا المجال من درجات الحرارة حتى و إن حدثت به بعض التطورات فهي طفيفة، و أن محتوى الرمل من الشحنات الحرة بقي كما هو تقريباً.



الشكل (IV-7): الناقلية الكهربائية للعينات الطبيعية و المسخنة في المجال $[200-800^\circ\text{C}]$

إن هذا يتفق كثيراً مع ما ورد في دكتوراه مشري^[13]، حيث أن التسخين في المجال $[200-600^\circ\text{C}]$ لا يُحدث سوى تبخر للماء و انطلاق بعض الغازات، فالأثر على العينة هو نفسه، على الأقل بالنسبة للروابط الكيميائية:

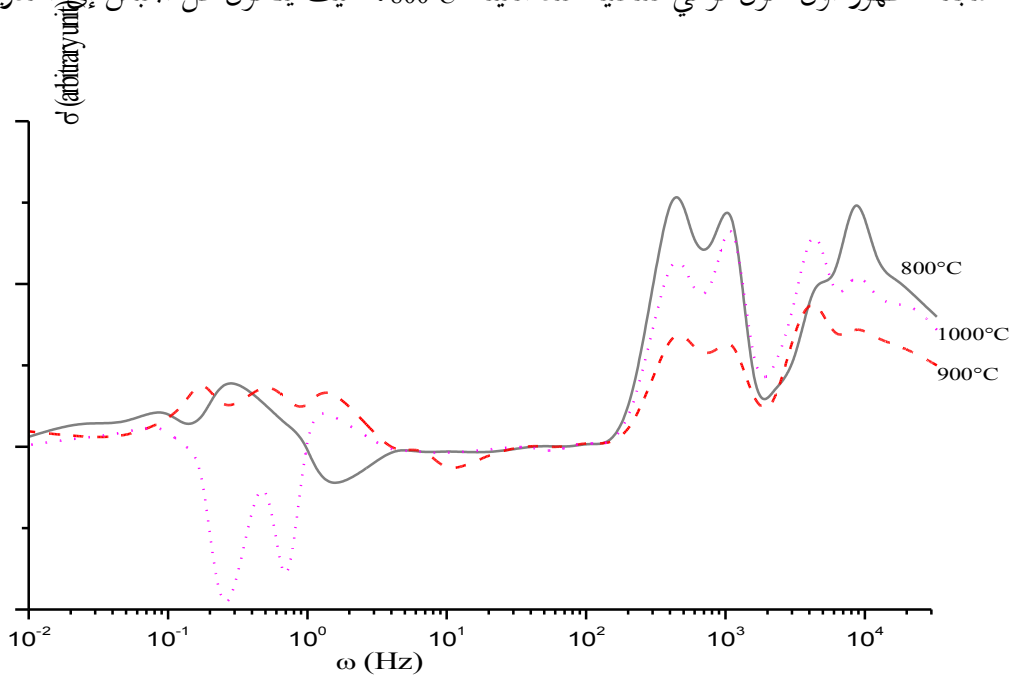


في حين لا يظهر الأثر الواضح لحرارة تسخين الرمل إلا ابتداءً من الدرجة 800°C ، حيث يتحول كل الجبس إلى أنهدريت.

واضح جدا من الشكل (IV-7) أن تغير الناقلية حول التردد 2Hz عائدٌ إلى مركب الـ bassanite؛ ذلك أن هذا المركب لا يظهر سوى بعد تسخين الرمل عند 200°C ، ثم يختفي.

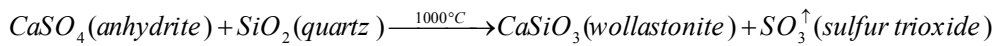
إن تحول كل الجبس إلى أنهدريت بعد الدرجة 800°C يجعلنا نرجح أن يكون ظهور التغير النوعي للناقلية الكهربائية عند منطقة الترددات $[200-3 \times 10^4 \text{Hz}]$ ، الشكل (IV-7)، راجعًا بالأساس إلى مركب الأنهدريت.

إذا ما فحصنا الناقلية الكهربائية للعينات المسخنة في المجال $[800-1000^\circ\text{C}]$ ، الشكل (IV-8)، فإننا سنلاحظ - كما أشرنا سابقًا - ظهور أول تحول نوعي للناقلية عند العينة 800°C ، حيث يتحول كل الجبس إلى أنهدريت.



الشكل (IV-8): الناقلية الكهربائية للعينات المسخنة في المجال $[800-1000^\circ\text{C}]$

إن تسخين الرمل عند درجة حرارة 1000°C يسبب بدايات حدوث تفاعل بين الكوارتز و الـ anhydrite، ينتج عنه الـ wollastonite مثلما توضحه المعادلة:

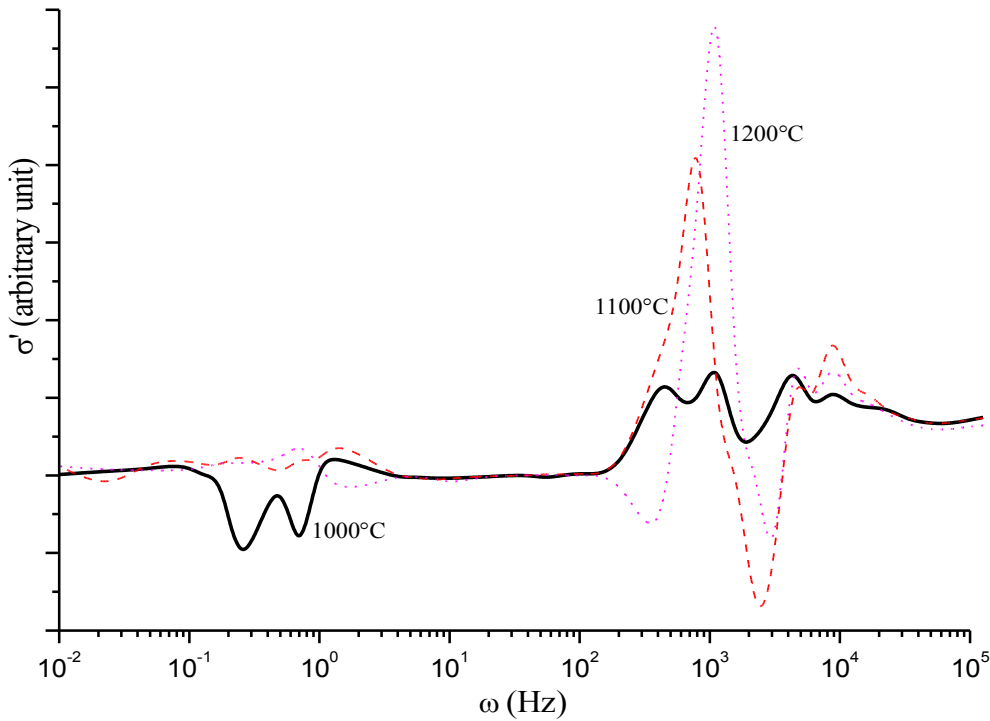


و ينخفض الأنهدريت.

إن هذا يعزّز ما ذكرناه آنفاً من كون الأنهدريت مسؤولاً عن الناقلية الكهربائية عند منطقة الترددات $[200-3 \times 10^4 \text{Hz}]$ ؛ إذ تتراجع الناقلية عند هذه الترددات للعينة 1000°C ، الشكل (IV-8)، في حين يظهر تحوّل

نوعي بارز عند المنطقة $[0.1-1Hz]$ ، نرجح أن يكون راجعاً إلى الـ wollastonite؛ إذ هو الوحيد الذي يظهر عند الدرجة $1000^{\circ}C$.

بالنظر إلى الشكل (IV-9) فإن البارز هو اختفاء التغير النوعي عند $[0.1-1Hz]$ ، ممّا يعني اضمحلال الـ aluminium-silicon في العينة $1100^{\circ}C$ ، كما و يظهر تغير نوعي آخر عند $[10^2-5 \times 10^3 Hz]$ ، نرجح أن يكون عائداً إلى الـ cristobalite؛ ذلك أن التسخين عند درجة الحرارة $1200^{\circ}C$ يحوّل الكوارتز ألفا إلى cristobalite، وهو لا يختلف عن الكوارتز ألفا إلا في البنية الهندسية^[13].



الشكل (IV-9): الناقلية الكهربائية للعينات المسخنة في المجال $[1000-1200^{\circ}C]$

4. ملخص تغيّرات الناقلية الكهربائية للرمل الطبيعي و المسخن:

في كثير من التطبيقات التكنولوجية يكون من المهم أو الضروري جدا اختيار مجال ترددات محددة يناسب التطبيق المطلوب، كاستخدامات الاتصالات و علم معالجة الإشارات و مولدات الجهد ذات الترددات المنخفضة أو العالية.

لأجل ذلك تُستخدم عناصر إلكترونية محضرة بطرق خاصة و شروط خاصة تؤدي الغرض المطلوب منها بالضبط.

لمثل هذا المبرر فإننا سنعرض ملخصًا لنتائج التأثيرات المختلفة بطريقة تسهّل للقارئ اختيار البحث في مجال الترددات أو درجات حرارة تسخين الرمل في شكل جدول يتضمن كل التغيرات الطارئة على الناقلية الكهربائية للرمل، سواءً كانت زيادةً أو نقصانًا، الجدول (1-IV).

الجدول (1-IV): ملخص تغيّرات الناقلية الكهربائية للرمل الطبيعي و المسخن

(يعني ↑ زيادة في الناقلية، و يعني ↓ نقصانًا فيها، فإذا تضمن المجال أكثر من تغيّر واحدٍ أُشير إليه بأسهم بعدد التغيرات)

Hz \ °C	$[10^{-2} - 10^{-1}]$	$[10^{-1} - 10^0]$	$[10^0 - 10^1]$	$[10^1 - 10^2]$	$[10^2 - 10^3]$	$[10^3 - 10^4]$	$[10^4 - 10^5]$	$[10^5 - 10^6]$	$[10^6 - 10^7]$
رمل طبيعي			↑↑						
100	↑↑		↑↓						
200		↑	↑						
300	↑↓	↑	↓						
400		↑	↑↓	↑↑					
500			↑	↑			↑		
600	↑		↑↓	↑					
700	↑	↑	↑	↓			↑↓		↑↓
800	↑	↑	↓		↑↑	↓↑	↓		↓
900		↑↑	↑	↓	↑↑	↓↑↑	↓		↓
1000		↓↓	↑		↑	↑↓↑↓↑	↓		↓
1100			↑		↑	↓↑↑			↓
1150	↑		↑	↓↑	↑↑	↓↑↑	↓↑		↓
1200		↑			↓	↑↓↑↑			↓

إذا ما تأملنا الجدول (1-IV) فإننا سنلاحظ بوضوح مثلًا أن:

- أكثر تغيّرات الناقلية الكهربائية تحدث ابتداءً من الرمل المسخن عند 700°C ، و تزداد بازدياد درجة الحرارة.
- الناقلية في مجال الترددات $[10^0 - 10^1 \text{ Hz}]$ ظلّ مضطربًا لكل العينات الطبيعية و المسخنة عند كل درجات الحرارة في المجال $[100 - 1150^{\circ}\text{C}]$.
- أغلب تغيّرات الناقلية حدثت في مجالي الترددات $[10^2 - 10^3 \text{ Hz}]$ و $[10^3 - 10^4 \text{ Hz}]$.
- مجال الترددات $[10^5 - 10^6 \text{ Hz}]$ لم تحدث به أي تغيّرات للناقلية.
- الناقلية تنقص في المجال $[10^6 - 10^7 \text{ Hz}]$ ، و بالضبط عند التردد $3,6 \times 10^6 \text{ Hz}$ ابتداءً من الرمل المسخن عند 700°C .

الخلاصة العامة و الآفاق

الخلاصة العامة و الآفاق

في هذا العمل قلّمنا موجزًا عن رمل الكثبان، فعرضنا وصفه عموماً بناءً على ما نشر في الأبحاث المختلفة، خاصةً تلك المهمة بتشخيص الرمل من حيث كونه مركّباً من العديد من المركّبات البلورية و غير البلورية.

عرضنا كذلك المبادئ و الأسس التي انبنت عليه تقنية القياس باستخدام مطيافية الممانعة الكهربائية، و كذا القوانين الرئيسة التي تحكم أطرافها، و تصل بين المقادير المختلفة المراد معرفتها من خلال هذه التقنية، كارتباط الناقلية الكهربائية و السماحية الكهربائية - و بالتالي قرينة الانكسار - بالممانعة الكهربائية.

لقد استخدمنا تقنية القياس هذه على عينات طبيعية و مسخنة عند درجات حرارة في المجال $[100-1200^{\circ}C]$ من رمل كثبان منطقة محيرزة بورقلة.

من خلال ذلك تمكّننا من الحصول على عدة مقادير فيزيائية: الممانعة الكهربائية، السماحية الكهربائية، الناقلية الكهربائية و زاوية الطور، إلا أننا اهتمنا بمقدار واحد هو الجزء الحقيقي للناقلية الكهربائية المركبة، و ذلك لاستغلاله في تحديد تأثير التسخين على الناقلية الكهربائية للرمل، و بالتالي ربط ذلك بالتحويلات الطورية له.

لقد عرفنا من خلال ذلك أن الرمل حسّاس جداً للحرارة؛ إذ تحوّل مكوناته من مركب إلى آخر، و بالفعل، لقد رصدنا اختفاءً لبعض المركبات و ظهور مركبات أخرى، و كلُّ ذلك يؤثر -بطبيعة الحال- في الخصائص الفيزيائية للرمل، و التي من بينها الناقلية الكهربائية.

لقد تمكّننا من ربط تغيرات الناقلية الكهربائية الحاصلة لعينات من الرمل مسخنة عند درجات حرارة مختلفة و في مجالات مختلفة من الترددات بالتغيرات الطورية للرمل، إضافة إل تحديد المركّبات المسؤولة عن تلك التغيرات، و ذلك اعتماداً على مخطط التحويلات الطورية للرمل الذي أعده باحثٌ آخر قبلنا.

تتبع تغيرات الناقلية الكهربائية للرمل الطبيعي و المسخن عند درجات حرارة مختلفة وجدنا أن أكثرها تحدث ابتداءً من الرمل المسخن عند $700^{\circ}C$ ، و تزداد بازدياد درجة حرارة التسخين.

من جهة أخرى فإننا وجدنا أن أغلب تغيرات الناقلية الكهربائية تحدث في مجالي الترددات $[10^2-10^3 Hz]$ و $[10^3-10^4 Hz]$ ، و أننا لم نرصد أي تغيرات للناقلية في مجال الترددات $[10^5-10^6 Hz]$ ، كما سجلنا نقصاناً ملحوظاً للناقلية الكهربائية عند التردد $3,6 \times 10^6 Hz$ لكل العينات المسخنة ابتداءً من الدرجة $700^{\circ}C$ ، و أن الناقلية في مجال الترددات $[10^0-10^1 Hz]$ ظلّ مضطرباً لكل العينات الطبيعية و المسخنة عند كل درجات الحرارة في المجال $[100-1150^{\circ}C]$.

الخلاصة العامة و الآفاق

لقد خلصنا في النهاية إلى أن الناقلية الكهربائية للرمل مقدار متعلق بالتردد و بالمركبات المكونة للمادة، و لخصنا ذلك في جدول.

بموصلة هذه النتائج نكون قد تمكنا من تحقيق الهدف المرجو من هذا البحث، و هو إجراء قياسات كهربائية بتقنية مطيافية الممانعة، و رصد التغيرات الطورية للرمل نتيجة تسخينه، و كذا تحديد أهم المركبات المسؤولة عن التغيرات النوعية للناقلية في كل عينة.

بإتمامنا لهذا البحث فإننا نسجل آفاقا مستقبلية، لعلها تكون مجال بحث و دراسة لأعمال أخرى تُدعم النتائج المتحصل عليها، و بلوغ نتائج تحمل معلومات أكثر عن خصائص الرمل الكهربائية و الضوئية و البنيوية، و ذلك بقصد تثمينه كمورد طبيعي متوفر و رخيص، من أجل زيادة تطبيقاته العلمية و التكنولوجية:

- إجراء قياسات كهربائية للرمل بتقنيات أخرى.
- إجراء قياسات بمطيافية الممانعة في مجالات تردد أكبر.
- تحديد الخصائص الضوئية للرمل.
- إمكانية استخدام الرمل كمادة عازلة كهربائيا أو لتخزين الحرارة.

المراجع

- [1] <https://www.alarabiya.net/qafilah.html> (6/2019) مجلة القافلة، أرامكو السعودية
- [2] Youcef Touil, Samir Taha, Rachid Issaadi, Abdelatif Amrane; "Pilot plant for wastewater treatment involving septic pit and biological filtration on sand of dunes of the Algerian Sahara"; Desalination and Water Treatment, 10, pp 148-152 (2009)
- [3] محمد العيد مشري و إسماعيل شبيحي؛ دراسة التركيب الذري لرمل كثبان منطقة ورقلة باستخدام مطيافية XRF و MEB و EDX و AAN؛ حوليات العلوم و التكنولوجيا جامعة ورقلة، 2، 69-79 (2012)
- [4] Mahdadi, N., Chihi, S., Bouguettaia, H. et al.; " Chromatic Classification of Ouargla (Algeria) Dunes Sand: Determination of Main Compositions and Color Causes, by Using XRD, FTIR and XRF "; Silicon (2017) 9: 211. <https://doi.org/10.1007/s12633-016-9432-x>
- [5] سميحة بالضياف و إسماعيل شبيحي؛ دراسة بعض الخصائص البنيوية للكوارتز الموجود برمل كثبان منطقة ورقلة، حوليات العلوم والتكنولوجيا جامعة ورقلة، 1، 5-12 (2014)
- [6] درهاب صبحي، مجلة "الكثبان الرملية"، مركز البحوث الزراعية، جمهورية مصر العربية، 2003
- [7] Z. Damene, M.S. Goual, J. Houessou, R.M. Dheilily, A. Goullieux and M. Quénedec; "The use of southern Algeria dune sand in cellular light weight concrete manufacturing: effect of lime and aluminium content on porosity, compressive strength and thermal conductivity of elaborated materials"; European Journal of Environmental and Civil Engineering, (2016)
- [8] <https://www.mapsofworld.com/algeria> (29/06/2019/10:24)
- [9] محمد القاضي، الرمل الكوارتزي، الجزء الأول، جامعة قطر (1999)
- [10] <https://www.britannica.com/science/sand-dune> (29/06/2019)
- [11] سامي أحمد حجاوي، فحوصات التربة للأغراض الإنشائية، المجلس الاقتصادي الفلسطيني للتنمية و الإعمار، القدس، فلسطين (2003)
- [12] Cale A. Bigelow, Daniel Bowman and D. Keith Cassel; "physical Properties of Sand Amended with Inorganic materials or Sphagnum Peat Mos" Turfgass and Environmental Research, USGA, Volume 3, Number 6, March 15 2004, pp2
- [13] محمد العيد مشري، "دراسة أثر المعالجة الحرارية على تركيب رمل كثبان ورقلة، و على ناقلتيه الكهربائية، باستخدام الطرق الطيفية"، أطروحة دكتوراه، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، (2016)
- [14] Tafraoui A, Libali S, Slimani; A Study physico-chemical of the sand of the Western Erg of the area of Saoura (Western South Algeria); Res J Appl Sci 1 :1-6 (2006)
- [15] Maazouzi A, Kettab A, Badri A, Zahraoui B, Khelfaoui R; Algerian Sahara Sand Dunes Characterization ; Silicon, 6 (3) : 149-154 (2014)

- [16] محمد العيد مشري و إسماعيل شبحي، دراسة التركيب الذري لرميل كئبان منطقة ورقلة باستخدام مطيافية MEB، EDX و AAN، مخبر فيزياء الإشعاع والبلازما و فيزياء السطوح (LRPPS)، قسم علوم المادة، جامعة ورقلة، مذكرة تخرج لنيل شهادة ماستر، (جوان 2012)
- [17] HARROUZ Omar , ‘ Analyse de la relaxation dans les espèces végétales à différentes températures à partir des spectres ’, mémoire de Magister en physique, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran- Mohamed Boudiaf, (2012)
- [18] Harald Ibach, Hans Luth, ‘ Solid-state Physics An Introduction to principles of Materials Science’ Springer 2009
- [19] David J. Griffiths, ‘ INTRODUCTION TO ELECTRODYNAMICS’ Reed College, Fourth edition (2013)
- [20] D. J. Bergman and D. Strout, ‘ Physique Properties of Macroscopically, Inhomogeneous Media Solid State Physics’, 46, (1996) 147
- [21] Charles Kittel, physique des solides (Dunod –paris) (2002)
- [22] [22] J.R. Reitz and F.J. Milford; Foundations of electromagnetic theory; 2nd edition, Reading, Mass Addison-Wesley Pub. Co. Massachusetts, U.S.A and London, England (1967); arabic translation: أساسيات النظرية الكهرومغناطيسية؛ ترجمة يحي عبد الحميد الحاج علي و رحمن رستم؛ جامعة الموصل، العراق (1988)
- [23] <http://slevil.mit.edu/define-electrically-polarized-light/> (06/2019)
- [24] R. Fournier and Roland COELHO; ‘ Diélectrique: bases théoriques, Technique de l’ingénieur’ (D21), D213, (2000)
- [25] Chafé CHEBALLAH; ‘Étude des mécanismes physiques à l’origine de la permittivité colossal observée dans certaines céramiques’; THÈSE DOCTORAT DE L’UNIVERSITÉ DE TOULOUSE; (13 décembre 2012)
- [26] <https://www.geologyofmesopotamia.com> (06/2019)
- [27] J. Ross Macdonald, Impedance Spectroscopy, John Wiley and Sons, New York (2005)
- [28] CHARI Fairouz , ‘ Etude de la variation en fréquence de la conductivité d’un mélange métal/diélectrique au seuil de percolation pour des fréquences proche de DC" mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran- Mohamed Boudiaf, (2011)
- [29] Alfred DIBAO-DINA, ‘Elaboration d’un système in vitro de suivi en continu par spectroscopie d’impédance électrique de l’infection d’une lignée de cellules cancéreuses par un protozoaire parasite: Cryptosporidium parvum’; THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE LILLE 1 SCIENCES ET TECHNOLOGIES, (16 JANVIER 2015)
- [30] F. Kremer, A. Schönhals; ‘ Broadband Dielectric Spectroscopy’ Springer-Verlag (2003)
- [31] PHAM HONG Think; ‘Caractérisation et modélisation du comportement diélectrique d’un matériau composite soumis à un vieillissement hydrothermique’; THESE de Doctorat de l’Université Joseph Fourier, (21 novembre 2005)
- [32] "Alpha-A High Resolution Dielectric, Conductivity, Impedance and Gain Phase Modular Measurement System", catalogue de l’appareil d’impédancemètre
- [33] D. W. Davidson and R. H. Cole; J. Chem. Phys. 19, (1951) 1484
- [34] Novocontrol Technologie GmbH & Co.KG, ‘Test Interfaces for Alpha-A Modular Measurement System’
- [35] Novocontrol Technologies WinDETA Owner's Manual, Germany, (2009)
- [36] P. P. Bobrov, V. N. Krasnoukhova, E. S. Kroshka and A. S. Lapina; "Modeling of Dielectric Relaxation Processes in Moist Sand Rocks"; Russian Physics Journal; August 2017, Volume 60, Issue 4, pp 711–716

المختصر:

في هذا العمل قيست الممانعة الكهربائية المركبة تابعةً للتردد في المجال $[10^{-2} - 10^7 \text{ Hz}]$ لعينات من الرمل الطبيعي و المسخن عند درجات حرارة في المجال $[100 - 1200^\circ\text{C}]$ ، و ذلك باستخدام مطيافية الممانعة. أستنبطت الناقلية الكهربائية من قياسات الممانعة، و وُصِدَتْ تغيّراتها في المجالات المختلفة من الترددات، و كذا لعينات الرمل المسخنة عند درجات مختلفة. لقد أوضحت النتائج أن الناقلية الكهربائية تابعةً للتردد و - في الوقت نفسه - لدرجة حرارة تسخين الرمل. أغلب تغيّرات الناقلية تحدث ابتداءً من العينة المسخنة عند 700°C ، و في مجال الترددات $[10^{-2} - 3 \times 10^4 \text{ Hz}]$ ، إضافة إلى تغيّر آخر يقع عند نهاية الطيف حول التردد $3,6 \times 10^6 \text{ Hz}$. لقد دلّت تغيّرات الناقلية الكهربائية و اضطراباتها لكل عينة و عند مجالات تردد محددة على حدوث تحولات طورية في تركيب الرمل؛ إذ اضمحلّت بعض المركبات و برزت أخرى، و هو ما يتوافق و مخطط التحولات الطورية للرمل عند تسخينه في هذا المجال.

الكلمات المفتاحية: رمل، مطيافية الممانعة، الناقلية الكهربائية، التحولات الطورية

Abstract:

In this work, using the impedance spectroscopy, the electrical impedance as frequency function was measured in the range $[10^{-2} - 10^7 \text{ Hz}]$ for natural and heated samples of Ouargla dunes sand in $[100 - 1200^\circ\text{C}]$. The electrical conductivity was deduced from the impedance measurements, and its changes were monitoring in the different fields of the frequencies, as well as for the sand samples heated at different degrees. The results showed that the electric conductivity is dependent to the frequency and the heating temperature. The most variation of the conductivity occurs starting from the 700°C heated sample, and at the range frequency $[10^{-2} - 3 \times 10^4 \text{ Hz}]$, in addition to another change at the end of the spectrum around the frequency $3,6 \times 10^6 \text{ Hz}$. The changes in the electrical conductivity and its fluctuations for each sample and at specific frequency fields have shown phase transformations in the composition of sand. Some of the compounds have been dissolved and others have emerged, which corresponds to the phase diagram of sand when heated in this temperature range.

Key words: sand, impedance spectroscopy, electrical conductivity, phase transformations