



رقم الترتيب:

رقم التسلسل:

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة قاصدي مرباح-ورقلة

كلية الرياضيات و علوم المادة

قسم الفيزياء

أطروحة مقدّمة لنيل

شهادة دكتوراه علوم

في الفيزياء

تخصص: فيزياء مواد

من إعداد: زُمَيْتة نُعْمَانُ

تحت عنوان

أثر الحرارة على الخصائص الكهربائية لرمل كثبان منطقة ورقلة

نُوقِشَتْ يَوْمَ: 08 نوفمبر 2023

أمام اللجنة المؤلفة من:

رئيساً	جامعة ورقلة	أستاذ تعليم عالٍ	غرياني رشيد
ممتحناً	جامعة ورقلة	أستاذ تعليم عالٍ	بن طويلة عمر
ممتحناً	جامعة الوادي	أستاذ تعليم عالٍ	محبوب محمد الصادق
ممتحناً	جامعة سكيكدة	أستاذ محاضر أ	بولخصايم سليم
ممتحناً	المدرسة العليا للأساتذة ورقلة	أستاذ محاضر أ	سويقات عبد القادر
مقرراً	جامعة ورقلة	أستاذ تعليم عالٍ	شيحي إسماعيل

المختصر:

تهدف هذه الدراسة إلى حساب قيم الجزء الحقيقي و الجزء التخيلي لكل من الممانعة الكهربائية، السماحية و الناقلية لرملة منطقة ورقلة، عند درجة حرارة الغرفة و درجات الحرارة 200-1200 درجة مئوية، في ترددات مختلفة 10^{-02} Hz ، 54,877 Hz و 10^{+07} Hz ، بتطبيق تيار متناوب يساوي 1 فولط، و ذلك باستعمال تقنية التحليل الطيفي للممانعة (Impedance Spectroscopy)، تعتمد هذه التقنية على نتائج النمذجة عن طريق الدوائر الكهربائية المكافئة التي لها نفس تفاعل التردد مثل العينة.

أظهرت النتائج التجريبية اختلاف في قيم الجزء الحقيقي والجزء التخيلي للممانعة، الناقلية والسماحية الكهربائية عند درجات الحرارة والترددات المختلفة، هذا ما يقودنا إلى معرفة مدى أثر الحرارة على الخصائص الكهربائية لعينات رمل منطقة ورقلة.

الكلمات المفتاحية: الناقلية الكهربائية، السماحية، الممانعة، رمل كثبان ورقلة، التحليل الطيفي للممانعة

Abstract:

The goal of this study is the estimation the values of real and imaginary parts of each of the electrical impedance, permittivity and conductivity of Ouargla sand, at room temperature and temperatures 200-1200 ° C, at different frequencies 10^{-02} Hz, 54.88 Hz and 10^{+07} Hz, with alternating current (AC) equal to 1 volt, using the impedance spectroscopy (IS). This method is based totally at the modeling results by way of equal electrical circuits that have the same frequency reaction as the sample.

The experimental results showed a difference in the values of real and imaginary parts of impedance, conductivity and electrical permittivity at different temperatures and frequencies, this is what leads us to know the extent of the effect of heat on the electrical properties of the sand samples of the Ouargla region.

Keywords: Electrical conductivity, permittivity, impedance, Ouargla dune sand, impedance spectroscopy

Résumé :

Le but de cette étude est l'estimation des valeurs des parties réelles et imaginaires de chacune de l'impédance électrique, de la permittivité et de la conductivité du sable de Ouargla, à température ambiante et températures (200-1200°C), à différentes fréquences 10^{-02} Hz, 54,88 Hz et 10^{+07} Hz, avec un courant alternatif (AC) égal à 1 volt, en utilisant la spectroscopie d'impédance (IS). Cette méthode est entièrement basée sur les résultats de la modélisation au moyen de circuits électriques équivalent qui ont la même réaction de fréquence que l'échantillon.

Les résultats expérimentaux ont montré une différence dans les valeurs des parties réelles et imaginaires de l'impédance, de la conductivité et de la permittivité électrique à différentes températures et fréquences, c'est ce qui nous amène à connaître l'étendue de l'effet de la chaleur sur les propriétés électriques des échantillons de sable de la région d'Ouargla.

Mots clés: Conductivité électrique, permittivité, impédance, sable des dunes de Ouargla, spectroscopie d'impédance



إلى من علمني كيف أتف بكل نبات فوق الأرض

أبي المحترم

إلى نبع المحبة والإيثار والكرم

أهي الموقرة

إلى من شاركني السراء والضراء، إلى أقرب الناس إلى نفسي

زوجتي رفيقة الدرب

إلى من أتشوق لأن أرى مستقبلهم المشرق بإذن الله

بناتي الغاليات (جهانة، سيدة، درهنا)

إلى سندي وعضدي

إخواني وأخواتي

إلى جميع من تلقيت منهم النصيح والدعم

أهديكم خلاصة جهدي العلمي



شكر خاص إلى الأستاذ الفاضل **اسماعيل شيحي** (أستاذ تعليم عال بجامعة قاصدي مرباح - ورقلة)، الذي له الفضل بعد الله تعالى على البحث و الباحث مذ كان الموضوع عنوانا و فكرة إلى أن صار رسالة و بحثا، فله مني كل الشكر و التقدير و العرفان.

و أتوجه بالشكر الجزيل إلى الأستاذ **نور الدين زكري** (أستاذ تعليم عال بجامعة العلوم و التكنولوجيا بوهران)، على حسن استقباله و كرم ضيفته و نصائحه، وعلى فتحه لمخبره لإجراء قياسات هذه الأطروحة.

بدون ما أنسى الدكتور **عمر حروز**، أستاذ محاضر بالمدرسة العليا للأساتذة بورقلة، شاكرا له على مساعدته في أخذ قياسات هذه الأطروحة.

وكذلك أتوجه بالشكر الجزيل إلى الدكتور **محمد العيد المشري**، أستاذ محاضر بمعهد العلوم و التقنيات التطبيقية بورقلة، على السماح لنا باستعمال عيناته.

كما أتوجه بجزيل الشكر و عظيم الإمتنان إلى كل من:

- الأستاذ **غرياني رشيد**، أستاذ تعليم عال بجامعة قاصدي مرباح - ورقلة.

على قبوله ترأس لجنة المناقشة

- الأستاذ **محبوب محمد الصادق**، أستاذ تعليم عال بجامعة حمى لخضر - وادي سوف.

- الدكتور **بن طويلة عمر**، أستاذ تعليم عال، بجامعة قاصدي مرباح - ورقلة.

- الدكتور **بولخصايم سليم**، أستاذ محاضر أ، بجامعة 20 أوت 1955 - سكيكدة

- الدكتور **سويقات عبد القادر**، أستاذ محاضر أ، بالمدرسة العليا للأساتذة - ورقلة

على قبولهم مناقشة هذه الأطروحة.

الفهرس

i	..... قائمة الأشكال
iv	..... قائمة الجداول
1	..... مقدمة عامة
الفصل الأول: الخصائص الكهربائية للمواد و أثر الحرارة عليها	
6	..... 1- التصنيف الكهربائي للمواد
6	..... 1-1- النواقل Conductors
7	..... 1-2- العوازل Insulators
7	..... 1-2-1- إستقطاب العوازل
8	..... 1-2-2-1- تصنيف العوازل
8	..... 1-2-2-1-أ- عوازل غير قطبية
8	..... 1-2-2-1-ب- عوازل قطبية
8	..... 1-3-2-1- آليات الاستقطاب
8	..... 1-3-2-1-أ- الإستقطاب الإلكتروني
9	..... 1-3-2-1-ب- الإستقطاب الأيوني
9	..... 1-3-2-1-ج- الإستقطاب ثنائي الأقطاب أو التوجيهي
9	..... 1-3-2-1-د- الإستقطاب بين الوجوه
9	..... 1-3-2-1-د- الإستقطاب بواسطة الشحنات الفضائية
10	..... 1-4-2-1- الفقدان العزلي: (Dielectric losses)
10	..... 1-3-1- أنصاف النواقل: Semiconductors
11	..... 1-3-1- أنصاف النواقل النقية
11	..... 1-3-2- أنصاف النواقل المشوبة
11	..... 1-3-2-1- أنصاف النواقل السالبة (N)
12	..... 1-3-2-1-ب- أنصاف النواقل الموجبة (P)
13	..... 1-4- نظرية النطاق (الحُرْم)
13	..... 1-4-1- نطاق (شريط) التكافؤ B_v
14	..... 1-4-2- نطاق (شريط) التوصيل B_c
15	..... 1-4-3- النطاق الممنوع (المحظور) B_i
16	..... 1-5- إحصائيات لملء مستويات الطاقة

- 16 1-5-1- توزيع فارمي-ديراك
- 17 1-5-2- تقريب ماكسويل-بولتزمان
- 18 2- أثر الحرارة على المواد
- 18 1-2- تأثير درجة الحرارة و المجال الكهربائي على التوصيل الكهربائي
- 19 2-2- أثر الحرارة على المواد الناقلة
- 19 2-3- أثر الحرارة على المواد العازلة
- 20 2-4- أثر الحرارة على المواد نصف الناقلة

الفصل الثاني : الرمل الطبيعي و خصائصه

- 22 1- الرمل
- 22 1-1- تعريف الرمل
- 23 1-2- أماكن تواجد الرمل
- 24 1-3- مقاييس و مواصفات دولية للرمل
- 25 1-4- أصناف الرمل
- 26 1-5- المكونات الرئيسة للرمل
- 28 1-6- الخواص الفيزيوكيميائية للرمل
- 30 2- رمل منطقة ورقلة
- 30 2-1- لمحة عن منطقة ورقلة
- 30 2-2- التركيب البلوري و الكيميائي لرمل منطقة ورقلة
- 32 2-3- الخصائص الكيميائية لعينة طبيعية من رمل منطقة ورقلة
- 32 2-1-3- التركيب الذري
- 33 2-2-3- التركيب الجزيئي

الفصل الثالث: الأدوات المستعملة

- 34 1- جمع العينات
- 34 2- تحضير العينات
- 35 3- طرق قياس الخصائص الكهربائية للعينات
- 36 3-1- جهاز التحليل الطيفي للممانعة
- 38 3-2- تطبيقات التحليل الطيفي للممانعة
- 39 3-3- شروط الاستخدام و حدود التحليل الطيفي للممانعة

الفصل الرابع: مطيافية الممانعة (Impedance Spectroscopy)

- 40 1- مبدأ عمل مطيافية الممانعة
- 42 2- طريقة الحصول على منحنيات الممانعة بدلالة التردد تجريبيا
- 43 3- طرق حساب بعض الخواص الكهربائية
- 43 3-1- حساب الممانعة الكهربائية المركبة
- 44 3-1-1- التمثيل البياني للممانعة
- 46 3-2- حساب السماحية الكهربائية المركبة
- 47 3-3- حساب الناقلية الكهربائية المركبة
- 48 3-4- حساب الفقد المماسي (The loss Tangent)
- 48 3-5- حساب فرق الطور

الفصل الخامس: نتائج القياسات و مناقشتها

- 49 1- نتائج قياس الممانعة الكهربائية للرمل غير المسخن
- 49 1-1- الجزء الحقيقي للممانعة
- 50 1-2- الجزء التخيلي للممانعة
- 51 1-3- الفقد المماسي
- 51 2- نتائج قياس الممانعة الكهربائية للرمل المسخن
- 52 2-1- الجزء الحقيقي للممانعة الكهربائية
- 54 2-2- الجزء التخيلي للممانعة الكهربائية
- 56 3- نتائج قياس السماحية الكهربائية و مناقشتها
- 56 3-1- الجزء الحقيقي للسماحية
- 59 3-2- الجزء التخيلي للسماحية
- 61 4- نتائج قياس الناقلية الكهربائية و مناقشتها
- 61 4-1- الجزء الحقيقي للناقلية الكهربائية
- 65 4-2- الجزء التخيلي للناقلية الكهربائية
- 67 5- نتائج قياس الفقد المماسي
- 69 خلاصة عامة
- 72 الملحقات
- 75 المراجع
- 84 المقالات و المداخلات العلمية المتعلقة بالأطروحة

قائمة الأشكال

الفصل الأول: الخصائص الكهربائية للمواد و أثر الحرارة عليها

الصفحة	إسم الشكل	رقم الشكل
12	مبدأ التوصيل في أشباه الموصلات من نوع N	الشكل (1-I)
13	مبدأ التوصيل في أشباه الموصلات من النوع P	الشكل (2-I)
16	رسم تخطيطي لنطاقات الطاقة ناقل (على اليسار) وأشباه الناقل (في الوسط) وعازل (على اليمين).	الشكل (3-I)
17	إحصائيات فيرمي-ديراك: تغير $f(E)$ بدلالة E عند درجات حرارة مختلفة	الشكل (4-I)
18	تقريب بولتزمان للطاقات (a) الأقل من مستوى فيرمي (b) الأكبر من مستوى فيرمي	الشكل (5-I)
19	المقاومية الكهربائية بدلالة درجة الحرارة في الناقل	الشكل (6-I)
21	المقاومية الكهربائية بدلالة درجة الحرارة في أنصاف الناقل	الشكل (7-I)
21	الناقلية الكهربائية في المواد الناقلة و المواد العازلة و المواد نصف الناقلة	الشكل (8-I)

الفصل الثاني: الرمل الطبيعي و خصائصه

الصفحة	إسم الشكل	رقم الشكل
23	حبيبات الرمل بين الحصى و الطمي	الشكل (1-II)
24	كمية الرمل في بعض مناطق العالم	الشكل (2-II)
24	توزيع الصحاري في العالم باللون الأحمر	الشكل (3-II)
25	حبيبات الرمل تحت المجهر الإلكتروني	الشكل (4-II)
27	البنية البلورية للكوارتز	الشكل (5-II)
27	التحويلات الطورية للكوارتز	الشكل (6-II)
27	البنية البلورية للجبس	الشكل (7-II)
28	التحويلات الطورية للجبس	الشكل (8-II)
28	البنية البلورية للكالسيت	الشكل (9-II)
30	الموقع الجغرافي لولاية ورقلة	الشكل (10-II)

31	مخطط انعراج الأشعة السينية لرمل منطقة ورقلة في حالته الطبيعية و المسخنة	الشكل (11-II)
----	---	---------------

الفصل الثالث: الأدوات المستعملة

الصفحة	إسم الشكل	رقم الشكل
35	جهاز الطحن الميكانيكي	الشكل (1-III)
35	الأواني الخزفية	الشكل (2-III)
35	الفرن الكهربائي	الشكل (3-III)
35	العينات المعالجة داخل الأنابيب	الشكل (4-III)
36	جهاز التحليل الطيفي للممانعة	الشكل (5-III)
37	وحدة الحاسب المركزي	الشكل (6-III)
38	(أ) حامل العينات (ب) خلية حامل العينات ZGS	الشكل (7-III)

الفصل الرابع: مطيافية الممانعة

الصفحة	إسم الشكل	رقم الشكل
40	مبدأ عمل مطيافية الممانعة	الشكل (1-IV)
41	تمثيل مخطط بود	الشكل (2-IV)
41	تمثيل مخطط نايكست	الشكل (3-IV)
45	إنزياح إشارة الاستجابة عن إشارة الإثارة	الشكل (4-IV)

الفصل الخامس: نتائج القياسات و مناقشتها

الصفحة	إسم الشكل	رقم الشكل
50	الجزء الحقيقي للممانعة الكهربائية بدلالة التردد	الشكل (1-V)
50	الجزء التخيلي للممانعة الكهربائية بدلالة التردد	الشكل (2-V)
51	تغير فقد المماسي بدلالة التردد	الشكل (3-V)
52	الجزء الحقيقي للممانعة الرمل المسخن عند درجات حرارة مختلفة و عند ترددات إثارة مختلفة	الشكل (4-V)
53	النسب المئوية لمركبات رمل منطقة ورقلة الطبيعي و المسخن عند درجات حرارة مختلفة	الشكل (5-V)
55	الجزء التخيلي للممانعة الرمل الطبيعي و المسخن عند درجات حرارة مختلفة و عند ترددات إثارة مختلفة	الشكل (6-V)

57	الجزء الحقيقي للسماحية الكهربائية للعينات الطبيعية و المسخنة عند درجات حرارة مختلفة عند بعض الترددات	الشكل (7-V)
59	الجزء التخيلي للسماحية الكهربائية للعينات الطبيعية و المسخنة عند درجات حرارة مختلفة عند بعض الترددات	الشكل (8-V)
61	الجزء الحقيقي للناقلية الكهربائية للعينات الطبيعية و المسخنة عند درجات حرارة مختلفة عند بعض الترددات	الشكل (9-V)
64	الناقلية الكهربائية للعينة الطبيعية و العينات المسخنة في مجال (200-800) درجة	الشكل (10-V)
64	الناقلية الكهربائية للعينات المسخنة عند (800-1000) درجة	الشكل (11-V)
65	الناقلية الكهربائية للعينات المسخنة عند (1000-1200) درجة	الشكل (12-V)
66	الجزء التخيلي للناقلية الكهربائية للعينات الطبيعية و المسخنة عند درجات حرارة مختلفة عند بعض الترددات	الشكل (13-V)
67	الفقد المماسي للعينات الطبيعية و المسخنة عند درجات حرارة مختلفة عند بعض الترددات	الشكل (14-V)

قائمة الجداول

الفصل الأول: الخصائص الكهربائية للمواد و أثر الحرارة عليها

الصفحة	إسم الجدول	رقم الجدول
20	قيم ثابت العزل لبعض المواد	الجدول (1-I)

الفصل الثاني: الرمل الطبيعي و خصائصه

الصفحة	إسم الجدول	رقم الجدول
24	تصنيف حبيبات الرمل (ISO 14688)	الجدول (1-II)
25	التصنيف الأمريكي لحبيبات الرمل	الجدول (2-II)
29	بعض الخواص الفيزيوكيميائية لمكونات الرمل الرئيسية	الجدول (3-II)
32	التقدير الشبه الكمي (بالنسبة المئوية %) للمركبات في العينة الأصلية و العينات المسخنة باستخدام تقنية انعراج الأشعة السينية	الجدول (4-II)

الفصل الرابع: مطيافية الممانعة

الصفحة	إسم الجدول	رقم الجدول
43	قيم بعض الخواص الكهربائية لعينة مسخنة في 200 درجة مئوية	الجدول (1-IV)

الفصل الخامس: نتائج القياسات و مناقشتها

الصفحة	إسم الجدول	رقم الجدول
54	القيم الموجبة و القيم السالبة للجزء الحقيقي للممانعة الكهربائية للعينات المسخنة عند مختلف درجات الحرارة و الترددات	الجدول (1-V)
56	القيم الموجبة و القيم السالبة للجزء التخيلي للممانعة الكهربائية للعينات المسخنة عند مختلف درجات الحرارة و الترددات	الجدول (2-V)
58	القيم الموجبة و القيم السالبة للجزء الحقيقي للسماحية الكهربائية للعينات المسخنة عند مختلف درجات الحرارة و الترددات	الجدول (3-V)
60	القيم الموجبة و القيم السالبة للجزء التخيلي للسماحية الكهربائية للعينات المسخنة عند مختلف درجات الحرارة و الترددات	الجدول (4-V)
63	القيم الموجبة و القيم السالبة للناقلية الكهربائية للعينات المسخنة عند مختلف درجات الحرارة و الترددات	الجدول (5-V)
67	القيم الموجبة و القيم السالبة للجزء التخيلي للناقلية الكهربائية للعينات المسخنة عند مختلف درجات الحرارة و الترددات	الجدول (6-V)

مقدمة عامة

مقدمة عامة:

ترتبط معظم البحوث الجيولوجية بدراسة الصخور، حيث أن الصخور هي السجل الأساسي للتأريخ الجيولوجي للأرض، و ذلك لكون الصخور هي الوحدة الأساسية في بناء الأرض، حيث تتكون من تشكيلات تحتوي على مجموعة من المعادن المتواجدة في الطبيعة، و تكون جزءا أساسيا في تركيب القشرة الأرضية [1].

تتكون القشرة الأرضية من العناصر التالية [1، 2]:

الأكسجين: يُقدّر العلماء بأن نصف كتلة القشرة الأرضية تتكون من عنصر الأكسجين. السيليكون: و هو ثاني أكثر العناصر وفرة في القشرة الأرضية؛ إذ تبلغ نسبته 27.7% من القشرة، و عادةً ما يتواجد في القشرة الأرضية مُتفاعلاً مع الأكسجين و مُشكِّلاً معادن السيليكات. الألمنيوم: هو العنصر الثالث الأكثر وفرة في القشرة الأرضية، و يُكوّن ما نسبته 8.1% من معادن القشرة الأرضية، و لا يتواجد الألمنيوم كعنصر حر في القشرة، و إنما يتواجد مُتفاعلاً مع الأكسجين في مركباتٍ من أشهرها أكسيد الألمنيوم، و هيدروكسيد الألمنيوم، و كبريتات الألمنيوم و البوتاسيوم. الحديد: هو العنصر الرابع من حيث الوفرة في القشرة الأرضية، و يُشكل ما نسبته 5% من عناصر القشرة الأرضية، و عادةً ما يتواجد الحديد ضمن مركبات أكسيد الحديد؛ كالهيماتيت و المغنتيت. الكالسيوم: هو العنصر الخامس من حيث الوفرة في القشرة الأرضية، و يُشكل أكثر من 4% من القشرة الأرضية، و عادةً ما يتواجد الكالسيوم ضمن مركبات متفاعلاً مع الأكسجين بوجود الماء. الصوديوم: يشكل هذا العنصر ما نسبته 2% من القشرة الأرضية، كما أنه من المستحيل أن يتواجد حُرّاً في القشرة الأرضية.

المغنيسيوم: يشكل أكثر من 2% من معادن القشرة الأرضية، و لا يتواجد حُرّاً في الطبيعة.

البوتاسيوم: يشكل ما نسبته 2% من القشرة الأرضية، و هو عنصر شديد التفاعل، و عادةً ما يتواجد ضمن مركبات العناصر الأخرى.

تتفتت الصخور إلى جسيمات أصغر كالرمل، و ذلك بفعل العوامل المناخية من رياح و أمطار و دورات تجمد و ذوبان في الأماكن الباردة خلال حقب تاريخية طويلة تمتد إلى عشرات ملايين السنين. و نظراً لطول الزمن الذي يتطلبه تشكّل الرمل، يمكن القول إنه مورد طبيعي غير متجدّد، شأنه في ذلك شأن البترول.

تكوّن الرمل و تاريخ استعماله:

يتكوّن الرمل بفعل عدة عوامل طبيعيةٍ تفاعلت مع مكونات الأرض عبر عشرات ملايين السنين، و أهم هذه العوامل الرياح و الأمواج و الأمطار و البراكين.

يعود استخدام الرمل إلى ما قبل التاريخ، و هناك أدلة أثرية على أنه استُخدم قبل الميلاد بنحو 6000 سنة لشحذ و تلميع الحجارة لجعل أطرافها حادةً و صالحةً للقطع.

كما ظهرت أولى الخزرات المطلية بالزجاج المصنوع من صهر الرمال في مصر ما بين 3000-3500 قبل الميلاد، و قبل ذلك بنحو ألف سنة كان الرمل قد دخل في صناعة طوب البناء في وادي السند أولاً، و منذ ذلك الزمن و حتى يومنا هذا لم يغيب الرمل يوماً عن صناعتي الزجاج و البناء، غير أن الاستخدام الكثيف للرمل اتخذ منعطفاً حاداً مع انطلاق الثورة الصناعية في أواخر القرن الثامن عشر و توسع المدن و بناء الطرقات، و من ثم ظهور الخرسانة كمادة رئيسة للبناء.

إزداد الطلب على الرمل في بداية القرن العشرين، و خلال الحربين العالميتين اللتين تطلبتا شق كثير من الطرق قبلهما و خلالهما، ثم إعادة الإعمار الواسعة التي تلتها.

يتكون الرمل من حبيبات معدنية ناعمة تتراوح أقطارها بين 0.0625 و 2 ملمتر [3]، الواحدة

منها تسمى حبة رمل، فإذا كانت أصغر حجماً تسمى طمي، و الأكبر حجماً تسمى حصى .

يتشكّل الرمل بمعظمه من مادة الكوارتز أو ثاني أكسيد السيليكون، أو السيليكا، المكون الأكثر

شيوعاً في الرمال، و يكون عادةً على شكل معدن الكوارتز (Quartz)، و يختلف عن المعادن الأخرى

بكونه صلباً و قاسياً و غير قابل للذوبان في الماء، كما أنه لا يتحلل بسهولة بفعل التغيرات

الجوية [4]، بالإضافة إلى مقاومته الشديدة للتعرية، و عدم تأثره بمياه الأمطار الحمضية، كما أنه

مقاوم للتآكل الصخري [5].

يحتوي الرمل على مكونات صخرية تتأثر بالتغيرات الجوية تضم معدن الفلسبار

(Feldspar)، البيروكسين (Pyroxene)، الأمفيبول (Amphiboles) [6,5] و من مكونات صلبة لا

تتأثر بالتغيرات الجوية، و تضم معادن رملية غير مهمة في الصخور، و لكنها تبقى في الرمال لفترة

طويلة جداً، منها: الزركون (Zircon)، التورمالين (Tourmaline) و الروتيل (Rutile) [7].

الرمل هو المادة الأولية في صناعة الزجاج و الخرسانة و الطوب و القرميد و الجص و رقائق

الكمبيوتر، و يدخل أيضاً في بناء البيوت و الطرقات و الجسور و السدود، وصولاً إلى بعض

مستحضرات التجميل، فهو المورد الطبيعي الأكثر استعمالاً على الإطلاق، لذا قد لا يكون من المبالغة

القول إن الرمل هو المادة الأساس في بناء الحضارة الحديثة.

الرمل هو مادة صلبة، و خواص المادة هي سماتٌ مميزة لكل مادة، و تعرف بأنها غير

مقدارية (لا تختلف باختلاف مقدار المادة)، و يمكن غالباً وصفها كمياً، و ذلك من خلال وحدات

للقياس تمكننا من المقارنة بين المواد و ترتيبها حسب كل خاصية، مما يساعد في اختيار المادة حسب

المواصفات المطلوبة. تنقسم خواص المادة من الناحية الفيزيائية إلى: ميكانيكية و حرارية و

مغناطيسية و ضوئية و صوتية و كهربائية. هذه الأخيرة تختلف إلى حد كبير بناء على تركيبها الكيميائي، و هي مقسمة إلى ثلاث مجموعات: مواد ناقلة للكهرباء و مواد عازلة و مواد نصف أو شبه ناقلة.

ركزت الدراسات السابقة [8،9،10] على الجانب المورفولوجي و التركيب الذري لرمال كثبان منطقة ورقلة، فبيّنت أن رمال الكثبان هذا يحتوي على ما يقرب من خمسين عنصراً، إلا أن معظمها ذات تركيز ضئيل جداً، عدا بعض العناصر كالسيليسيوم (Si)، الكالسيوم (Ca)، الأكسجين (O)، البوتاسيوم (K)، الحديد (Fe)، المنغنيز (Mn) فقد وجدت بتراكيز عالية، و أخرى بتراكيز أقل كالصوديوم (Na)، الكبريت (S)، الكروم (Cr) و أخرى بتراكيز أضال كالألمنيوم (Al)، الباريوم (Ba)، السيريوم (Ce)، المغنيزيوم (Mg) و أخرى تكاد تكون معدومة.

لم يتعمق الباحثون في دراسة الخصائص الفيزيائية، الميكانيكية، الضوئية و الكهربائية لرمال كثبان منطقة ورقلة، لهذا السبب كان الهدف من عملنا هو دراسة الخصائص الكهربائية عينات مسخنة عند درجات حرارة مختلفة. من أجل تحقيق هذا الهدف قسمنا أطروحتنا هذه إلى خمسة فصول.

الفصل الأول "الخصائص الكهربائية للمواد و أثر الحرارة عليها"، سنتطرق فيه إلى التصنيف الكهربائي للمواد (ناقلة، عازلة، نصف ناقلة)، ثم نعرض على نظرية النطاقات (نطاق التكافؤ، نطاق التوصيل، النطاق الممنوع)، ثم نختم هذا الفصل بالتطرق إلى أثر الحرارة على المواد الناقلة و العازلة ثم النصف ناقلة.

الفصل الثاني "الرمال الطبيعي و خصائصه"، سوف نبدأ فيه بتعريف الرمل و مقاييسه و مواصفاته الدولية و أصنافه و مكوناته الرئيسية و خواصه الفيزيوكيميائية، ثم نركّز على التركيب البلوري و الكيميائي و الخصائص الكيميائية.

الفصل الثالث "الأدوات المستعملة"، سنتطرق فيه أولاً إلى طريقة جمع العينات و كيفية تحضيرها و الأدوات المستعملة في ذلك، ثم ننتقل إلى طرق قياس الخصائص الكهربائية للعينات. بعدها سنتعرف على جهاز التحليل الطيفي (**Impedance Spectroscopy**)، و بعد ذلك سنتناول بعض تطبيقات التحليل الطيفي للممانعة، و نختم بذكر بعض شروط الاستخدام و حدود التحليل الطيفي للممانعة.

الفصل الرابع "مطيافية الممانعة"، سوف نركز في هذا الفصل أولاً على مبدأ عمل جهاز مطيافية الممانعة، ثانياً طريقة الحصول على منحنيات الممانعة بدلالة التردد تجريبياً، ثالثاً طرق حساب بعض الخواص الكهربائية: الممانعة الكهربائية المركبة و السماحية الكهربائية و الناقلية الكهربائية و فرق الطور.

الفصل الخامس، و هو الفصل الأخير في هذه الأطروحة، "نتائج القياسات و مناقشتها"، سنعرض فيه نتائج القياسات الكهربائية، و نناقش مدى تأثير الحرارة عليها.

في ختام هذه الأطروحة سنحوصل أهم النتائج المتحصل عليها في خلاصة عامة، و نبين مدى إمكانية استغلال هذه النتائج تطبيقياً، مع سرد بعض الآفاق المستقبلية لتطوير البحث العلمي في هذا المجال.

الفصل الأول
الخصائص الكهربائية للمواد
و أثر الحرارة عليها

خواص المادة هي سمات مميزة؛ أي أنها تميز المادّة بغضّ النظر عن مقدارها. يمكن -غالباً- تقدير هذه الخواص كمّيًا، و ذلك من خلال وحدات للقياس تمكّننا من المقارنة بين المواد و ترتيبها حسب كل خاصية، مما يساعد في اختيار المادة حسب المواصفات المطلوبة. قد تكون خواص المادة رقمًا ثابتًا، و قد تتغير حسب متغير أو أكثر، كدرجة الحرارة مثلاً.

تُصنّف خواص المادة من الناحية الفيزيائية إلى خواص ميكانيكية و خواص حرارية و خواص مغناطيسية و خواصّ ضوئية و خواص صوتية و خواص كهربائية، و هذه الأخيرة هي محل دراستنا الحالية، و لهذا كان الفصل الأول بعنوان "الخصائص الكهربائية للمواد و أثر الحرارة عليها".
لمزيد من التفصيل سنتطرق أولاً إلى التصنيف الكهربائي للمواد من حيث نقلها للشحنات (ناقلة، عازلة، شبه ناقلة)، ثم ننتقل إلى أثر الحرارة في المواد.

1- التصنيف الكهربائي للمواد:

يمكن تصنيف المواد الصلبة -بناءً على خصائصها الكهربائية- إلى ثلاث مجموعات: نواقل و عوازل و أشباه نواقل.

1-1- النواقل: Conductors

النواقل الكهربائية هي المواد التي تسمح بمرور التيار الكهربائي عبرها، و تُعدّ المعادن من أكثر المواد الناقلة للكهرباء، و تُلحَق بها مواد أخرى كالمحاليل الشارديّة، و الأحماض، و القواعد والكربون، حيث تتميز هذه المواد باحتوائها على إلكترونات حرة في المدار الخارجي لذراتها، ممّا يجعلها قابلةً للحركة عند وجود أي مؤثّر خارجي.

من أفضل النواقل الكهربائية معادن الذهب و الفضة و الألمنيوم و النحاس. هذا الأخير من أشهر المعادن في التوصيلات الداخلية و الأجهزة الكهربائية، و ذلك لجودته و انخفاض تكلفته، على خلاف الذهب و الفضة ذوي التكلفة المرتفعة [11].

1-2-1- العوازل: Insulators

العوازل هي مواد ذات مقاومة كهربائية عالية جدًا؛ ذلك أنها لا تحوي سوى عدد قليل جدًا من الإلكترونات الحرة.

يتميز العازل بخصائصه الكهربائية و الميكانيكية و الكيميائية و الحرارية، و لا يسمح العازل الجيد بتدفق التيار عند تعرضه لجهد مباشر، بعبارة أخرى: يجب أن تكون مقاومة العازل كبيرة بشكل لا نهائي [12].

1-2-1-1- إستقطاب العوازل:

يرتبط مفهوم المادة العازلة بقدرتها على احتواء مجال كهربائي أو نقله؛ أي بقدرتها على الاستقطاب.

تتوافق ظاهرة الاستقطاب مع ظهور عزم ثنائي أقطاب تحت تأثير مجال كهربائي خارجي، و ينتج الاستقطاب إما عن فصل مراكز الشحنات الموجبة و السالبة للذرات و الجزيئات (تكون غير مفصولة قبل التأثير عليها)، و إما إعادة توجيهه في اتجاه رئيسٍ باتجاه الحقل الكهربائي الخارجي للجزيئات التي لها عزم ثنائي أقطاب دائم.

يمكن قياس حالة الاستقطاب للمادة بواسطة متجه الاستقطاب \bar{p} ، و هي تساوي الكثافة الحجمية لمحصلة العزوم الكهربائية $\sum \bar{p} / \Delta v$ ، حيث $\bar{p} = q\bar{r}$ عزم ثنائي القطب و q القيمة المطلقة لشحنة أحد قطبي ثنائي الأقطاب المعني (الذرة، الجزيء، السلسلة الجزيئية، . . .) و \bar{r} الشعاع الممتد من القطب السالب إلى القطب الموجب.

ميكروسكوبياً تُحدَّد قدرة عازل على الاستقطاب من خلال السماحية العازلة المطلقة، و هي مقياس لقدرته على جذب الشحنات عند حدوده [12].

تُحدَّد السماحية النسبية للعزل الكهربائي كنسبة $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ ، حيث ϵ_0 هي سماحية الفراغ.

يرتبط الاستقطاب \bar{P} و شعاع الإزاحة الكهربائية \bar{D} و الحقل الكهربائي \bar{E} بالعلاقات:

$$\bar{D} = \epsilon_0 \bar{E} + \bar{P} = \epsilon \bar{E} = \epsilon \epsilon_0 \bar{E} \quad (I-1)$$

2-2-1-2 تصنيف العوازل:

تصنّف العوازل وفقاً لبنيتها إلى فئتين [12]:

2-2-1-1 أ- عوازل غير قطبية:

تتكون من جزيئات يكون فيها مركزا ثقل الشحنات الموجبة و الشحنات السالبة مندمجين في غياب الحقل الكهربائي، مما يؤدي إلى عزم ثنائي أقطاب صفري، و لا يظهر هذا العزم إلا عند خضوع العازل لحقل كهربائي خارجي (أمثلة: بولي إيثيلين، بولي بروبيلين، . . .) [12].

2-2-1-2 ب- عوازل قطبية:

تتكون من جزيئات لها عزم ثنائي أقطاب دائم، و يمكن توجيه عزوم هذه الثنائيات بشكل أساس في اتجاه الحقل الكهربائي الخارجي عند تطبيقه على هذه العوازل (أمثلة: PVC، PMMA، PET . . .) [12]، و هو ما يسمى استقطاب التوجيه.

2-2-1-3 آليات الاستقطاب:

تسمح الآليات التي يتم بها إنشاء أو توجيه ثنائي القطب على المستوى الميكروسكوبي بوضع

التصنيف التالي [12]:

2-2-1-3 أ- الإستقطاب الإلكتروني:

يتميز هذا النوع من الاستقطاب جميع العوازل، حتى تلك التي لها استقطاب من نوع آخر. يرجع ذلك إلى تشوّه السحابة الإلكترونية المحيطة بالذرات أو الأيونات تحت تأثير الحقل الكهربائي الخارجي، ممّا ينشئ ثنائي أقطاب على مستوى كل ذرة أو أيون.

1-2-3-ب- الاستقطاب الأيوني:

يحدث الاستقطاب الأيوني في المواد ذات الروابط الأيونية. الإنزياح النسبي بين الأيونات الموجبة و الأيونات السالبة تحت تأثير الحقل الكهربائي ينشئ عزمًا كهربائيًا أيونيًا متحرّضًا بثابت زمني من رتبة 10^{-12} - 10^{-13} ثانية. يحدث هذا التأثير أيضًا للجزيئات ذات الروابط التساهمية إذا كانت استقطابية ذراتها مختلفة.

1-2-3-ج- الإستقطاب ثنائي الأقطاب أو التوجيهي:

هذا النوع من الاستقطاب خاص بالعوازل القطبية، ففي غياب الحقل الكهربائي تتوجّه ثنائيات الأقطاب عشوائيًا في كل الاتجاهات بسبب الإثارة الحرارية، فإذا أخضعت لحقل كهربائي فإن ثنائيات الأقطاب تميل إلى التوجّه باتجاه الحقل. هذه الظاهرة معروفة جيدًا، و مدروسة على نطاق واسع [13،14،15]، و يمكن أن تستمر لفترة طويلة بعد إزالة الحقل الكهربائي، ممّا جعلها أصلًا للعديد من التطبيقات.

1-2-3-د- الإستقطاب بين الوجوه:

أدخل ماكسويل مفهوم الاستقطاب بين الوجوه في نهاية القرن التاسع عشر [16]. إنه مفهوم جهري (عياني)، يترجم التأثيرات الملحوظة في المواد غير المتجانسة، و الذي يتوافق مع تراكم الشحنات الكهربائية عند الأسطح البينية بين الأطوار ذات السماحيات و الناقلية المختلفة المكوّنة لبنية العازل، و ذلك تحت تأثير الحقل الكهربائي الخارجي.

1-2-3-هـ- الإستقطاب بواسطة الشحنات الفضائية:

يأخذ هذا المفهوم في الحسبان هجرة الشحنات الحرة في المادة، و بالتالي إذا اعتبرنا عازلًا سُمكه d مزودًا بأقطاب كهربائية و يحمل العديد من الشحنات الحرة، فإنه في غياب حقل كهربائي خارجي

و إذا كانت الأقطاب الكهربائية معيقة فالعينة معتدلة كهربائياً في جميع النقاط. من ناحية أخرى، فإنه عند تطبيق حقل كهربائي خارجي تنتقل الناقلات الحرة إلى القطب ذي الإشارة المعاكسة، و تظلّ العينة عموماً حياديةً، و يمكن تعريف متوسط الاستقطاب على النحو التالي [17، 18]:

$$P_{CE} = \frac{1}{d} \int_0^d x \rho(x) dx \quad (I-2)$$

حيث $\rho(x)$ الكثافة الحجمية للشحنات عند التوازن عند عمق x داخل المادة.

1-2-4- الفقدان العزلي: (Dielectric losses)

يتوافق الفقدان العزلي مع الطاقة التي تُبدد في العازل عندما يتعرّض إلى حقل كهربائي خارجي، و بالتالي فإنه عند تطبيق حقل كهربائي على العازل فإن الاستقطاب لا يحدث فوراً، و هو ما يترجم امتصاص الطاقة بواسطة العازل، و الذي يعادل العمل اللازم لتحريك أو تحفيز ثنائيات الأقطاب و نقل الشحنات الحرة.

دراسة الحالة التي تتوافق مع الوضع المتكرر عند تطبيق جهد جيبي على عازل هو حقل كهربائي خارجي متغيّر جيبياً بنبض ω ، إذ يُلاحظ وجود مركبة للتيار العابر للعازل متّفقة في الطور مع الحقل الكهربائي (على خلاف مركبة الإزاحة التي تكون على ترابع طوري (فرق طور مقداره $\pi/4$ مع الحقل). و عليه فإن وجود مركبة للتيار متّفقة طورياً مع الحقل يترجم الفقدان العزلي [19].

1-3- أنصاف النواقل: Semiconductors

تُعرّف أنصاف النواقل (أشباه الموصلات) بأنها مجموعة من المواد الصلبة البلورية التي تمتلك قدرةً متوسطةً على توصيل الكهرباء، فهي لا توصل الكهرباء بكفاءة المواد الناقلة، لكنها ليست أيضاً موادّ عازلةً.

تمتاز أنصاف النواقل بكفاءتها في مجال الطاقة، و بانخفاض أسعارها، لذلك فهي تستخدم على نطاق واسع في مجال صناعة الأجهزة الإلكترونية، بما في ذلك الصمامات الثنائية (Diodes) و الترانزستورات (Transistors) و الدوائر المتكاملة (Integrated circuits) [20].

يوجد نوعان من أنصاف النواقل:

1-3-1- أنصاف النواقل النقية (الذاتية):

بكلمات بسيطة فإن نصف الناقل النقي هو الذي يتكون من مادة شبه نقية للغاية، و في المصطلحات الأكثر تقنية يمكن القول إن أنصاف النواقل النقية هي تلك التي يكون فيها عدد الثقوب مساوياً عددَ الإلكترونات في نطاق التوصيل.

فجوة الطاقة المحظورة في حالة أنصاف النواقل هذه دقيقة للغاية، و حتى الطاقة المتاحة في درجة حرارة الغرفة كافية لإلكترونات التكافؤ للقفز إلى نطاق التوصيل [21].

سمة مميزة أخرى لأنصاف النواقل النقية هي أن مستوى فيرمي لها يقع في مكان ما بين نطاق التكافؤ و نطاق التوصيل.

1-3-2- أنصاف النواقل المشوبة (لا ذتية):

أنصاف النواقل المشوبة هي التي تَقَلُّ نقاوة المواد نصف الناقلية عن طريق إضافة كميات دقيقة جدا من الشوائب. هذه الشوائب تعرف باسم المطعمات أو العوامل المطعمة، و التي عادةً ما تكون ذات تراكيز عددية ضئيلة جداً [22].

تُختار المواد المُشِيبَة بطريقة معينة، حيث أنها تحوي إما خمسة (5) أو ثلاثة (3) إلكترونات في نطاق التكافؤ، و ينتج تبعاً لنوع المطعمات نوعان من أنصاف النواقل المشوبة هما:

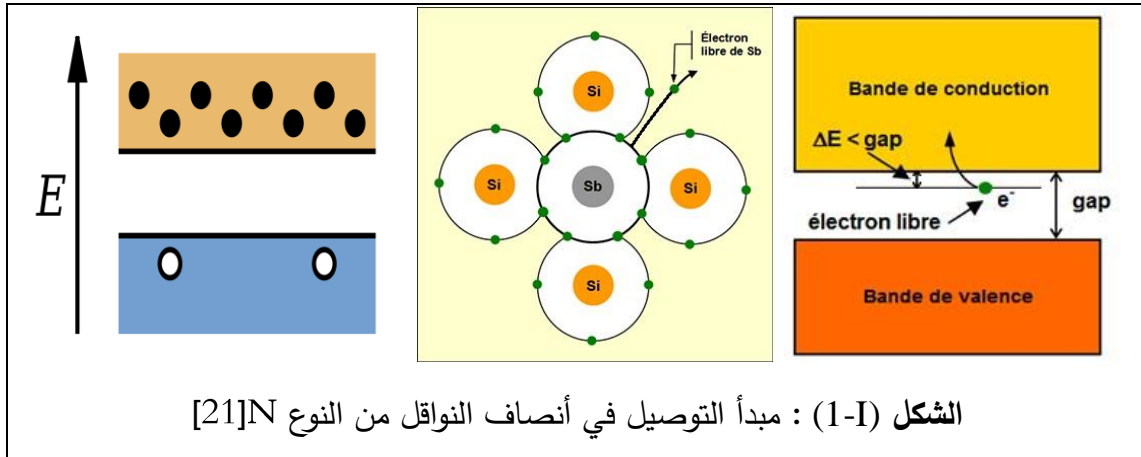
1-3-2-أ- أنصاف النواقل السالبة (N):

هي أشباه موصلات ذاتية، يكون تركيز الإلكترونات بها أعلى من تركيز الثقوب، و يسمَّى بالنوع N لكثرة الشحنات الكهربائية السالبة (Negative charges) به، و هي الإلكترونات.

للمطعمات من النوع N ينبغي زيادة كثافة الإلكترونات، ففي حالة السيليكون (Si) أو الجرمانيوم (Ge)، و هما رباعيا التكافؤ، تُضاف ذرات عنصر خماسي التكافؤ، مثل الفوسفور (P) أو الزرنيخ

(As) أو الأنتيمون (Sb). تشكل الذرات المُدخلة في الشبكة البلورية أربع روابط تساهمية مع أربع ذرات سيليكون، و يبقى الإلكترون الخامس من طبقة التكافؤ منفردًا. سيكون ارتباط هذا الإلكترون بالذرة ضعيفا جدًا، و سيكون ذا مستوى طاقة أقرب إلى نطاق التوصيل، و لا يحتاج سوى طاقة إضافية منخفضة ($\Delta E \approx 0.01 \text{ eV}$) للوصول إليه. نتيجة لذلك سيكون المُركَّب ذا توصيل كهربائي أفضل، الشكل (1-I).

إن هذه الإلكترونات الحرة لا تخلق ثقبًا في الشبكة، و بالتالي فإن العدد الإجمالي للإلكترونات أكبر من عدد الثقوب؛ أي أن الإلكترونات هي الحاملات ذات الأغلبية و الثقوب هي الحاملات ذات الأقلية، و تُدعى هذه الذرات المطعمة بالذرات المانحة.

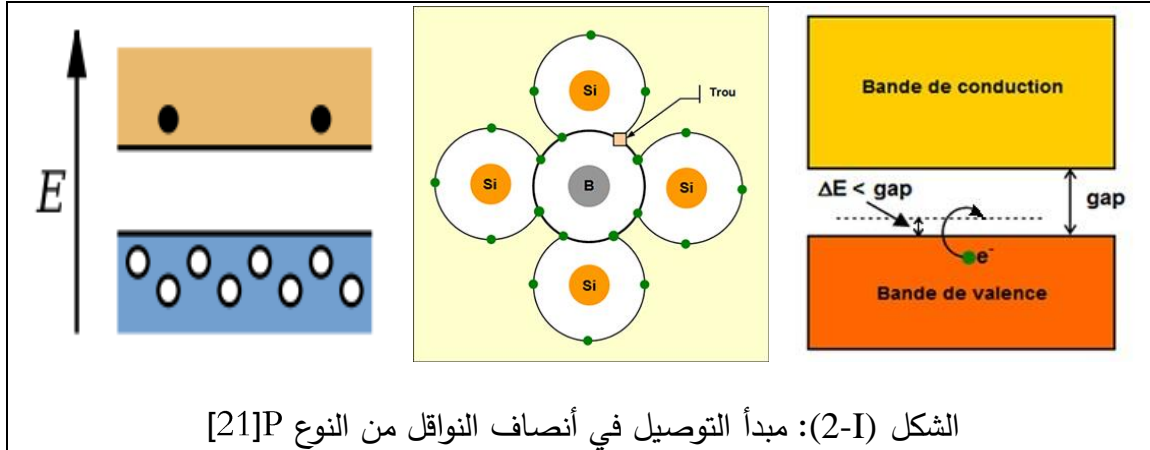


1-3-2-ب- أنصاف النواقل الموجبة (P):

يكون تركيز الثقوب بها أعلى من تركيز الإلكترونات، و يسمّى بالنوع P لكثرة الشحنات الكهربائية الموجبة (Positive charges) به، و هي الثقوب.

للمطعمات من النوع P ينبغي زيادة كثافة الثقوب، ففي حالة السيليكون (Si) أو الجرمانيوم (Ge)، و هما رباعيا التكافؤ، تُضاف ذرات عنصر ثلاثي التكافؤ، مثل الجاليوم (Ga) أو البورون (B) أو الألمنيوم (Al) أو الأنديموم (In). تشكل الذرات المُدخلة في الشبكة البلورية ثلاث روابط تساهمية مع ثلاث ذرات السيليكون المجاور فينشأ ثقب ذو مستوى طاقة جديد و قريب من نطاق

التكافؤ ($\Delta E \approx 0.05 \text{ eV}$)، يمكن الوصول إليه بسهولة أكبر من الإلكترونات، كما يمكن ملؤه بإلكترونات من ذرة سيليكون أخرى، و هي بدورها تطلق ثقباً آخر، الشكل (2-I)، و هكذا تصبح المادة موصلة للكهرباء. و في النهاية يتجاوز عدد الثقوب عدد الإلكترونات، و تصبح الثقوب هي الحاملات ذات الأغلبية و الإلكترونات. تسمى ذرات المنشطات في هذه الحالة ذرات المتقبلين.



الشكل (2-I): مبدأ التوصيل في أنصاف النواقل من النوع [21]P

1-4-4 - نظرية النطاق (الخزم):

تُحدّد الخواص الكهربائية للمادة بتوزيع شحناتها، فعلى سبيل المثال، يعتمد التوصيل على شغل الإلكترونات في نطاقاتها الطاقوية.

في الواقع تُملأ نطاقات الطاقة من قِبل مجموعة من الإلكترونات، و بالمعنى الطاقوي ازدياد الحجات الكمية. عند درجة حرارة الصفر المطلق يُدعى المستوى العالي من الطاقة المشغولة مستوى فارمي E_F . ما فوق هذا المستوى تكون كل الحجات الكمية فارغة [23]. حول مستوى فارمي، نميز ثلاثة نطاقات رئيسية للطاقة [24]:

1-4-4-1 نطاق (شريط) التكافؤ B_V :

يُرمز لطاقته بـ E_V ، و هو نطاق الطاقة الذي يقع مباشرة أسفل مستوى فارمي. إلكترونات هذا النطاق في حالات موضعية، و تساهم في تماسك المادة الصلبة.

1-4-2- نطاق (شريط) التوصيل B_c :

يُرمزُ لطاقته بـ E_c ، وهو نطاق الطاقة الذي يحوي مستوى فارمي أو أعلى منه. إن المدارات في حزمة التوصيل كبيرة بالقدر الذي يجعل جذب النواة للإلكترون ضعيفا جدا، و بعبارة أخرى لو رُفع الإلكترون إلى داخل حزمة التوصيل لاستطاع التحرك بحرية من ذرة إلى أخرى، و لهذا السبب تسمى الإلكترونات الموجودة في حزمة التوصيل بالإلكترونات الحرة.

لكي يصعد الإلكترون من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل يحتاج إلى طاقة تساوي على الأقل فجوة النطاق، و لكي يهبط من نطاق التوصيل إلى نطاق التكافؤ عليه فقدان طاقة تساوي على الأقل فجوة النطاق على هيئة فوتون أو فونون.

عند درجة حرارة الصفر المطلق تتكدس الإلكترونات فوق بعضها، و أعلى طاقة تبلغها تلك الإلكترونات المتكدسة تدعى طاقة فيرمي. في النواقل تكون طاقة فيرمي ضمن منطقة تداخل نطاقي التوصيل و التكافؤ، و لذلك تُعدُّ قادرة على نقل الكهرباء عند مختلف درجات الحرارة، بعكس أنصاف النواقل و العوازل.

1-4-3- النطاق الممنوع (المحظور) B_i :

يُعرّف أيضا بنطاق فارمي، و هو النطاق الذي يقع بين الجزء العلوي من نطاق التكافؤ و الجزء السفلي من نطاق التوصيل. يُعرّف هذا النطاق فقط في العوازل و أنصاف النواقل، و عرضه E_G يُسمّى الفجوة، و يُعطى بالعلاقة [25]:

$$E_G = E_c - E_v$$

في معظم المواد الناقلة يكون مستوى فارمي تقريبا عند منتصف نطاق التوصيل، و عدد الحالات التي تشغلها الإلكترونات يساوي تقريبا عدد الحالات الفارغة، لذلك فإنه حتى في درجات الحرارة المنخفضة يكون عدد كبير من الإلكترونات حراً في الانتقال من حجرة كمية إلى أخرى، وهو سبب

الناقلية العالية لهذه المواد. في حالات أخرى، يتداخل نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل، مما يؤدي إلى التأثير نفسه كما كان من قبل.

في المواد العازلة يكون مستوى فارمي عند منتصف النطاق الممنوع، بين نطاق التكافؤ المسموح به المليء بالإلكترونات و نطاق التوصيل المسموح به الخالي من الإلكترونات.

بما أن شريط التكافؤ ممتلئ لم يُعد هناك حجات كمية حرة، و لا يمكن للإلكترونات أن تتحرك. و بالمثل، بما أن شريط التوصيل فارغ، فإنه لا يحوي إلكترونات لتنتقل.

بزيادة درجة الحرارة، لا تكون طاقة التنشيط الحراري كافية لنقل إلكترونات كافية من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل، مما يمنع التوصيل.

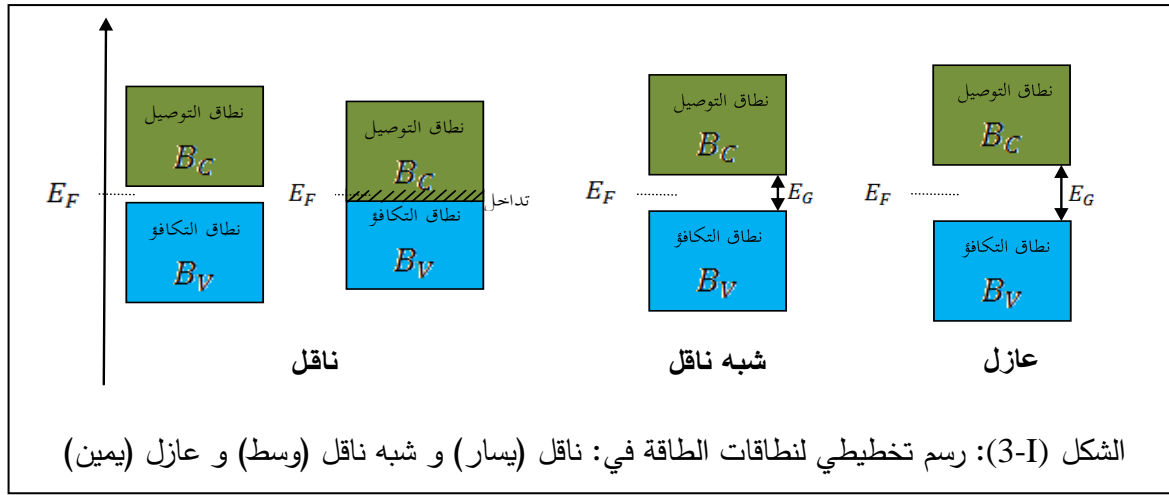
في أنصاف النواقل يكون مستوى فيرمي في منتصف النطاق الممنوع بين نطاق التكافؤ و نطاق التوصيل مع أن الشريط الممنوع له عرض أصغر بكثير من عرضه في المواد العازلة.

عند درجات الحرارة المنخفضة جدًا تتصرف أنصاف النواقل مثل العوازل لأن طاقة التنشيط الحراري لا تزال غير كافية لنقل الإلكترونات من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل.

من ناحية أخرى، عند درجة حرارة الغرفة يكون تزويد الطاقة الحرارية kT كافيًا لتمرير الإلكترونات من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل، و بالتالي يزداد توصيل أنصاف النواقل مع درجة

الحرارة، و من ناحية أخرى لأن الإلكترونات التي تصل إلى نطاق التوصيل يمكن أن تتحرك بسهولة، كما أن الحجات الكمية المنبعثة في نطاق التكافؤ تسمح أيضًا للإلكترونات في نطاق التكافؤ

بالتحرك، الشكل (3-I). هناك عوامل أخرى تؤثر على موصلية المواد نصف الناقلية، مثل المطعومات [25].



5-1- إحصائيات لملاء مستويات الطاقة:

عند رفع درجة حرارة المادة البلورية، خاصة أنصاف النواقل، فإن الطاقة الحركية للإلكترونات ترتفع. إحصائياً يمكن لبعض الإلكترونات أن تترك حالتها المربوطة و تتحرك عبر البلورة. يمكن أن يكون لهذه الإلكترونات تفاعلات مع ذرات الشبكة، مما يخلق تصادمات بين الإلكترونات و ذرات الشبكة البلورية. لمعرفة توزيع الحالات النشطة للإلكترونات ينبغي تحليل تأثير هذه التصادمات.

1-5-1- توزيع فارمي-ديراك:

إن الاحتمالية $f_{(E)}$ لتواجد الإلكترون في مستوى معين من الطاقة E عند الاتزان الحراري عند

درجة حرارة معينة T تُعطى بدلالة دالة فيرمي-ديراك [26]:

$$f_{(E)} = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{kT}}} \quad (I-3)$$

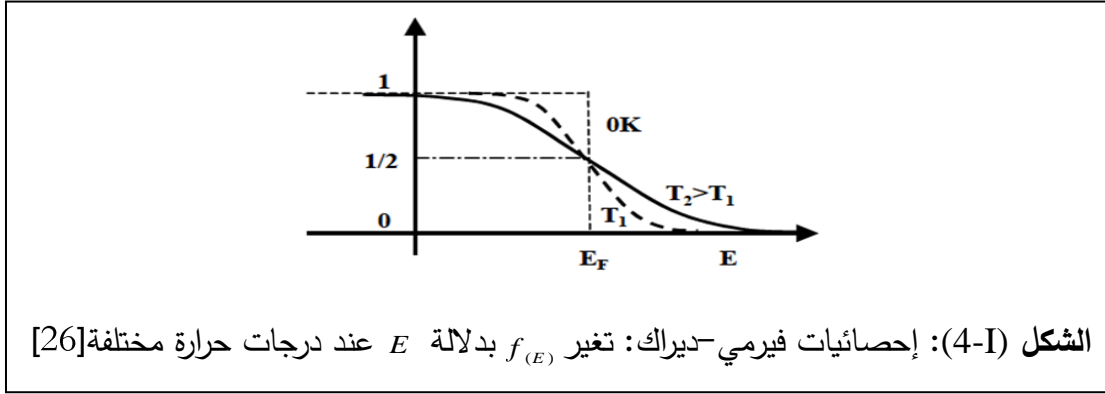
حيث E_F طاقة فيرمي، و قيمتها تعتمد على طبيعة المادة و درجة الحرارة، k ثابت بولتزمان، T درجة الحرارة المطلقة.

عند درجة حرارة الصفر المطلق يكون:

$$f_{(E)} = \begin{cases} 0 & : E > E_F \\ 1 & : E < E_F \end{cases} \quad (I-4)$$

من المعادلة (4-1) يتضح أنه عند درجة حرارة الصفر المطلق تكون مستويات الطاقة الأعلى من طاقة فيرمي فارغة تماماً ($f_{(E)} = 0$)، بينما تكون مستويات الطاقة الأقل من طاقة فيرمي مملوءة تماماً ($f_{(E)} = 1$)، و منه يمكن تعريف طاقة فيرمي بأنها أعلى قيمة للطاقة يمكن أن يمتلكها الإلكترون في درجة حرارة الصفر المطلق.

يمكن أيضاً ملاحظة أنه عند درجة الحرارة الأعلى من الصفر المطلق و عندما تكون $E = E_F$ فإن $f_{(E)} = \frac{1}{2}$ ؛ أي أنه يمكن تعريف مستوى فيرمي بأنه مستوى الطاقة الذي تكون احتمالية شغله من طرف الإلكترون مساويا 50%، الشكل (4-1).



1-5-2 - تقريب ماكسويل-بولتزمان:

لإجراء حسابات تحليلية من الضروري عمل تقديرات تقريبية لدالة فيرمي، و العبارة المعنية

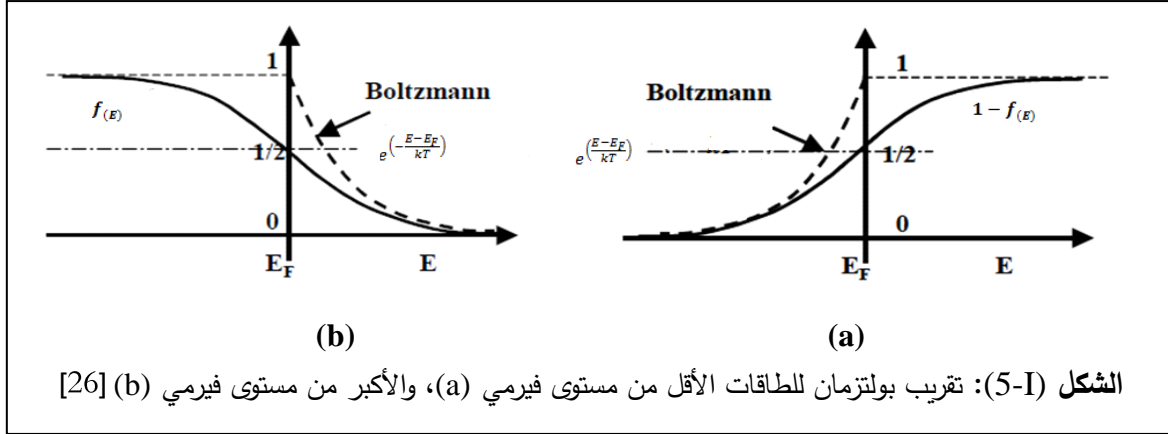
بالتقريب في هذه الحالة هي $\frac{E-E_F}{kT}$.

- إذا كان $E - E_F \gg kT$ فإن $e^{\frac{E-E_F}{kT}} \gg 1$ ، و منه تُكتب عبارة دالة فيرمي-ديراك:

$$f_{(E)} = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{kT}}} \approx \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}}} = e^{-\frac{E-E_F}{kT}} \quad (I-5)$$

- أما إذا كان $E - E_F \ll kT$ فإن $e^{\frac{E-E_F}{kT}} \ll 1$ ، و يكون:

$$f_{(E)} = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{kT}}} \approx 1 - e^{-\frac{E-E_F}{kT}} \quad (I-6)$$



1- أثر الحرارة على المواد:

تعرّف المادة الصلبة علمياً على أنها المادة التي لها شكل ثلاثي أو رباعي الأبعاد وتشغل حيزاً ملموساً من الفراغ، وتتكوّن من جزيئات صغيرة متلاصقة جنباً إلى جنب وفوق بعضها البعض، فهي غير حرة الحركة.

أمثلة المواد الصلبة عديدة، نذكر منها [27]: الخشب، الذهب، الحديد، الصخور، الرمال، الزجاج، ورق الألمنيوم، الجليد . . . إلخ. من بين هذه المواد مواد ناقلة للكهرباء ومواد عازلة وأخرى شبه ناقلة.

تُقسّم المواد الصلبة -بناءً على كيفية ترتيب الجزيئات فيها- إلى فئتين رئيسيتين: المواد الصلبة البلورية، و التي تُعدّ مواداً صلبة حقيقيةً، مثل ملح الطعام، أمّا الفئة الثانية فهي المواد الصلبة غير المتبلورة، و هي مواد صلبة زائفة دون شكل، كالزجاج و المطاط و معظم المواد البلاستيكية. توجد أربعة أنواع من المواد الصلبة البلورية، هي المواد الصلبة الأيونية، المواد الصلبة الجزيئية، المواد الصلبة التساهمية في الشبكة و المواد الصلبة المعدنية [28].

1-2- تأثير درجة الحرارة و المجال الكهربائي على التوصيل الكهربائي:

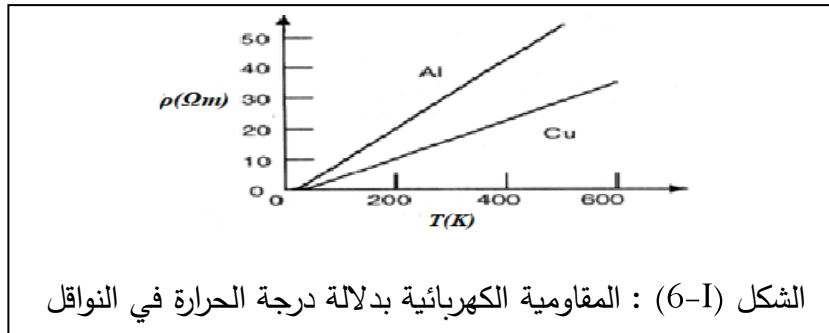
لدرجة الحرارة تأثيرٌ على تيارات التوصيل، و في الواقع يؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى تحرك ثنائيات الأقطاب بشكل أسرع، و بالتالي اتجاهاتها في اتجاه الحقل الكهربائي.

بارتفاع درجة الحرارة تزداد قيمة تيارات التوصيل نتيجةً لزيادة تنقل حاملات الشحنة، وفي الواقع تعمل الحرارة و الحقل الكهربائي معاً لتسهيل حركة الشحنات في شريط التوصيل، و لقد نوقشت هذه المسألة على نطاق واسع في أدبيات هذا الموضوع على مواد مختلفة [29-33].

إن تيارات التوصيل تزداد بازدياد درجة الحرارة والحقل الكهربائي المطبق [34].

2-2- أثر الحرارة على المواد الناقلة:

تزداد قيمة المقاومة الكهربائية للمواد الناقلة للتيار بازدياد درجة حرارتها؛ ذلك أن ذراتها تكون في حالة اهتزاز دائم في مواضعها، كما أن إكسابها طاقة حرارية يؤدي إلى ازدياد هذا الاهتزاز، مما يجعل الذرات تصطدم بالإلكترونات التيار الكهربائي و تعيقه، فضلاً عن أن الحرارة تؤدي إلى تحرير عدد من الإلكترونات الحرة، مما يزيد من قدرة هذه المواد على التوصيل و تزداد معها الإعاقة أيضاً. إن ازدياد درجة حرارة الناقل تزيد الحركة الحرارية للذرات، مما يؤدي إلى ازدياد انتشار إلكترونات التوصيل، مما يُقلل متوسط مسارها الحر، و بالتالي تقليل قدرتها على حمل الشحنات الكهربائية، لذلك تزداد مقاومتها و تقل ناقليتها الكهربائية، الشكل (I-6).



2-3- أثر الحرارة على المواد العازلة:

تزداد قدرة المواد العازلة على التوصيل الكهربائي بازدياد درجة حرارتها، فالحرارة تؤدي إلى تحرير عدد من إلكترونات ذرات المادة. في الوقت نفسه تعمل الحرارة على زيادة اهتزاز الذرات حول مراكزها، مما يزيد موصليتها [35].

يُضَعِفُ العازلُ الكهربائي القوةَ الكهروستاتيكية بين الشحنات، و عند وضعه بين لبوسيّ مكثفة

تزداد السعة الكهربائية لهذه المكثفة كما يلي [36]:

$$C = \epsilon_r C_0 \quad (I-7)$$

حيث ϵ_r السماحية الكهربائية النسبية للعازل (ثابت العزل)، C_0 سعة المكثفة في الفراغ دون عازل.

الجدول (1-I) يعطي قيم ثابت العزل لبعض المواد.

الجدول (1-I): قيم ثابت العزل لبعض المواد [37]

Material		Dielectric Constant
SiO ₂	Silicon Dioxide	3.5-4.5; 3.9
Al ₂ O ₃	Aluminium Oxide	8.5-9
Si ₃ N ₄	Silicon Nitride	6.2
HfO ₂	Hafnium Oxide	22; 25
MgO	Magnesium Oxide	9.8
ZrO ₂	Zirconium Dioxide	25; 17.5
TiO ₂	Titanium Dioxide	80-100

تحت تأثير الحقل الكهربائي المطبق على المكثفة تُستقطب جزيئات العازل الكهربائي، و يُعَرَّفُ

الاستقطاب بأنه محصلة عزوم ثنائيات الأقطاب المستحثة لكل وحدة حجم.

تتماشى ثنائيات الأقطاب الكهربائية المستحثة مع الحقل الكهربائي و تخلق حقلاً معاكساً للحقل

المطبق، و بالتالي تقلّ الجهد، و بما أن $C \propto \frac{1}{V}$ فإن السعة الكهربائية ستزداد بوجود عازل.

2-4- أثر الحرارة على المواد نصف الناقلة:

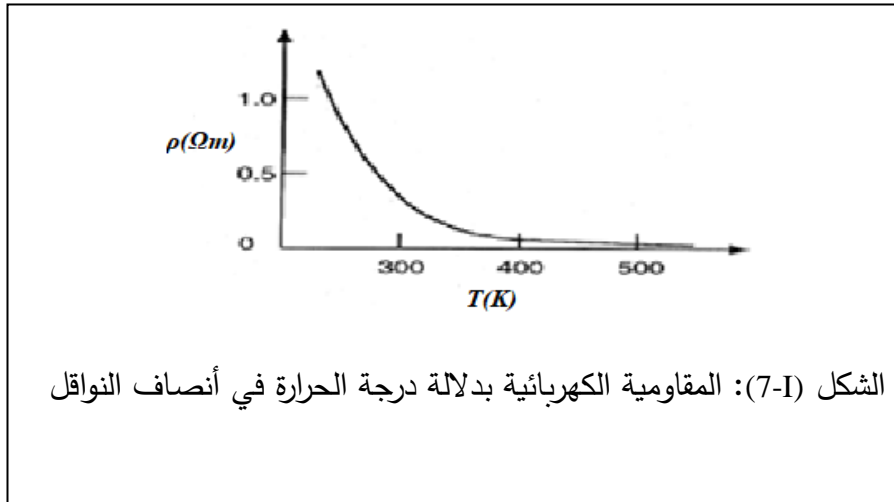
عند تسخين البلورة النقية إلى درجة الحرارة العادية فإن ذلك يؤدي إلى تكسير بعض الروابط.

ينتج عن ذلك بعض الإلكترونات الحرة التي تترك مكانها فجواتٍ تؤدي إلى حركة الإلكترونات بين

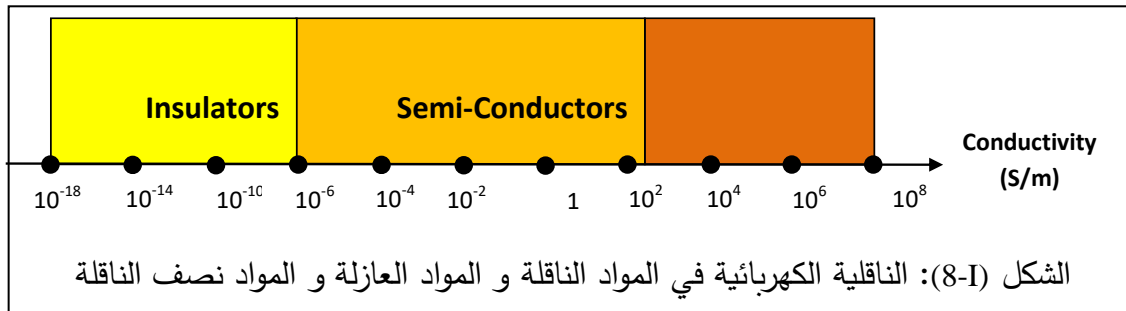
الروابط؛ أي أن التوصيل الكهربائي في بلورة نصف الناقل النقي نتج عن حركة الإلكترونات و الفجوات داخل البلورة [38].

تُمثّل حركة الإلكترونات اتجاه مرور التيار الإلكتروني، بينما تمثل حركة الفجوات اتجاه مرور التيار الاصطلاحي، و هما متعاكسان، فالتيار الإلكتروني و التيار الاصطلاحي عند درجات الحرارة العادية متساويان مقداراً و متعاكسان اتجاهًا.

مع زيادة درجة الحرارة يزداد عدد الإلكترونات التي تمر عبر نطاق التوصيل، ممّا يؤدي إلى زيادة التوصيل الكهربائي، الشكل (7-I).



يمكن تلخيص مجال تغير الناقلية الكهربائية في المواد الناقلة و المواد العازلة و المواد نصف الناقلة في الشكل (8-I).



الفصل الثاني

الرمال الطبيعي و خصائصه

الرمل هو المادة الأولية في صناعة الزجاج والخزّانة و الطوب و القرميد و الجص و رقائق الكمبيوتر، و يدخل أيضاً في بناء البيوت و الطرقات و الجسور و السدود، وصولاً إلى بعض مستحضرات التجميل، فهو المورد الطبيعي الأكثر استعمالاً على الإطلاق. لكل ذلك و غيره قد لا يكون مبالغاً القول: إن الرمل هو المادة الأساس في بناء الحضارة الحديثة.

سوف نركز في هذا الفصل على الحديث عن الرمل الطبيعي و خصائصه، فنتطرق إلى تعريفه و مقاييسه و مواصفاته الدولية و أصنافه و مكوناته الرئيسية و تكوّنه و تاريخ استعماله.

1- الرمل:

1.1. تعريف الرمل:

الرمل مادة طبيعية على شكل حبيبات صغيرة مفكّكة ناتجة عن تفتت الصخور و المعادن و بعض المواد العضوية الجافة نتيجة العوامل الطبيعية المختلفة من رياح و أمطار و أمواج و دورات تجمد و ذوبان في الأماكن الباردة خلال حقبة تاريخية طويلة ممتدة إلى عشرات الملايين من السنين. نظراً لطول الزمن الذي يتطلبه تشكّل الرمل يمكن القول إنه مورد طبيعي غير متجدّد، شأنه في ذلك شأن البترول [39، 40].

يتشكّل الرمل بمعظمه من مادتي الكوارتز و السيليكا المتشابهتين، و هما تجعلان تركيبة الرمل غير متفاعلة كيميائياً و قاسية للغاية و أشدّ مقاومة للظروف المناخية.

تختلف ألوان الرمل تبعاً لطبيعة الصخور أو المعادن أو المواد العضوية التي أتى منها [41، 42].

توفّر دراسة حبيبات الرمل علمياً كشف كثير من المعلومات التاريخية حولها، كتلك التي تتعلق بمصدرها و طريقة انتقالها من منطقة إلى أخرى، فالصخور و المعادن و غيرها -قبل أن تتحوّل إلى

رملٍ- تنتقل بفعل الأمطار و السيول آلاف الكيلومترات، أما الرمل فتذروه الرياح مسافاتٍ بعيدةً، و تحمله المياه معها، فهو يتآكل و يصبح مستديراً أشبه بالكريات بفعل الدرجة لفترات زمنية طويلة، و يحمل على صفحته آثار التآكل بفعل الريح و الظروف المناخية، و هذه هي حال رمل الصحاري نتيجة هبوب الرياح العاتية في هذه البيئة.

يتميز الرمل عن أنواع التراب و باقي المواد الطبيعية الأخرى بخاصيتين:

أ- حجم حبيباته أصغرُ من الحصى الذي يزيد قطر حبته عن 2 ملم، و أخشن من الطمي الذي يقلُّ قطر حبيبه عن 0.05 ملم تقريباً، الشكل (1-II).



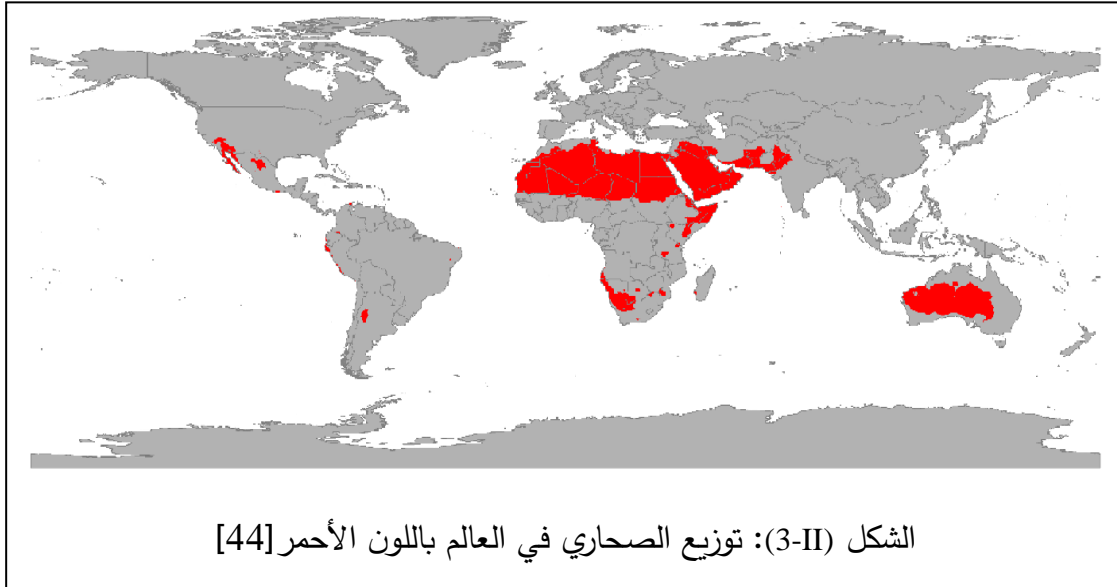
ب- نظافة حبيباته و قساوتها النسبية مقارنة بباقي مكونات الأرض الصلبة المفتتة، خاصة أنواع التراب الأخرى التي تحوي موادَّ عضويةً حيَّةً، حيث تلتصق بها مكوناتٌ بكتريولوجية.

1.2. أماكن تواجد الرمل:

يوجد الرمل في كافة أنحاء العالم، في المناخات الباردة و الساخنة و المعتدلة، لكن أكبر مقرَّاته و أجود نوعياته موجودة في الصحاري مثل الصحراء الإفريقية الكبرى و صحاري الجزيرة العربية،

و على شواطئ المحيطات و البحار و الأنهار و البحيرات و المستنقعات. الشكل (2-II) يبيّن مقادير

الرمل في بعض مناطق العالم المختلفة، و الشكل (3-II) يبيّن أهم الصحاري المشهورة في العالم.



1.3. مقاييس و مواصفات دولية للرمل:

تصنّف منظمة المقاييس الدولية ISO 14688 الرمل على النحو المبيّن بالجدول (1-II) [45]:

الجدول (1-II): تصنيف حبيبات الرمل (ISO 14688)

صنف الرمل	قطر حبيباته
ناعم	0.063 – 0.2 ملم
متوسط	0.2 – 0.63 ملم
خشن	0.63 – 2.0 ملم

توجد تصنيفات أخرى كثيرة، كالتصنيفات الأمريكية التي تقسم الرمل حسب الحجم أيضاً إلى

خمسة أصناف [46]، الجدول (II-2)، و هي تستند إلى مقياس Krumbein phi [46].

الجدول (II-2): التصنيف الأمريكي لحبيبات الرمل	
صنف الرمل	قطر حبيباته
ناعم جدا	0.125 – 0.0625 ملم
ناعم	0.25 – 0.125 ملم
متوسط	0.5 – 0.25 ملم
خشن	1.0 – 0.5 ملم
خشن جدا	2.0 – 1.0 ملم

1.4. أصناف الرمل:

ليس هناك تصنيف علمي للرمل خارج مواصفات و مقاييس حجمه، ربما لأنه شديد التنوع و يصعب إحصاؤه، الشكل (II-4). مع ذلك يمكن تمييز أنواع بعضها عن البعض الآخر بناءً على اختلاف مصادرها و طبيعة مواقعها و أحوالها الجيولوجية و بعض تركيباتها و ألوانها:



➤ رمل السيليكا أو ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2) في البقاع القارية الداخلية و المناطق الساحلية، و غالباً ما يكون مؤلفاً من الكوارتز، و يمتاز بحبيباته القاسية و حوافها الحادة، حيث يستخدم في صنع الزجاج لنقاوته، كما يصنع منه ورق الزجاج لشحذ الخشب و المعادن و تنظيفها. أما النوع الذي يحتوي على الكوارتز الصافي فيستخدم في صنع رقاقات السيليكون شبه الموصلة للمعالجات الدقيقة.

➤ رمل الكلسيوم كربونات (CaCO_3)، و يعرف أيضاً باسم الرمل الجيري، يتكوّن في معظمه من الأراغونيت، و تشكل في غضون خمسمائة مليون سنة من أشكال منوّعة من الحياة البحرية كالمرجان و المحار، فهو الشكل الأولي من الرمل الذي تكوّن في المناطق العامرة بالشعاب المرجانية.

➤ رمل الرماد البركاني، و هو خليط من شظايا المعادن و الصخور التي قُذفت خلال ثوران البراكين.

➤ الرمل الأسود، من جزر الكناري، يتكوّن من تفتت الصخور السوداء.

➤ الرمل الأخضر، من إستونيا، و يكتسب لونه من معدن الغلوكونايت ذي الصيغة الكيميائية $(\text{K,Na})(\text{Fe,Al,Mg})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$.

➤ الرمل الأحمر، و هو شائع في الصحاري العربية، و يتضمن مقادير ضئيلةً من أكاسيد الحديد.

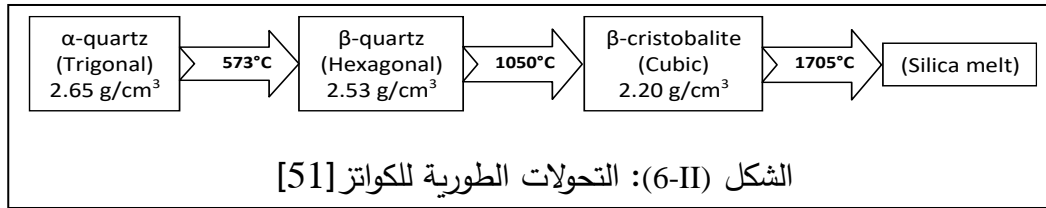
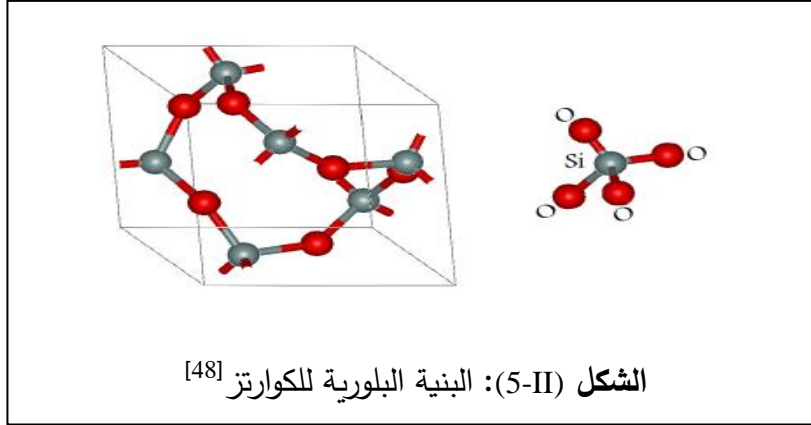
➤ الرمل المعدني الثقيل، و يتضمن عدداً من أنواع المعادن الثقيلة، مثل الغارنت و الماغنيثايت و الزيركونيوم و غيرها.

1.5. المكونات الرئيسية للرمل:

ثلاثة معادن رئيسية تدخل في تكوين الرمل، و هي: الكوارتز و الجبس و الكالسيت، و هي على العموم تتواجد فيه على شكل بلورات. فيما يلي بيان كل منها.

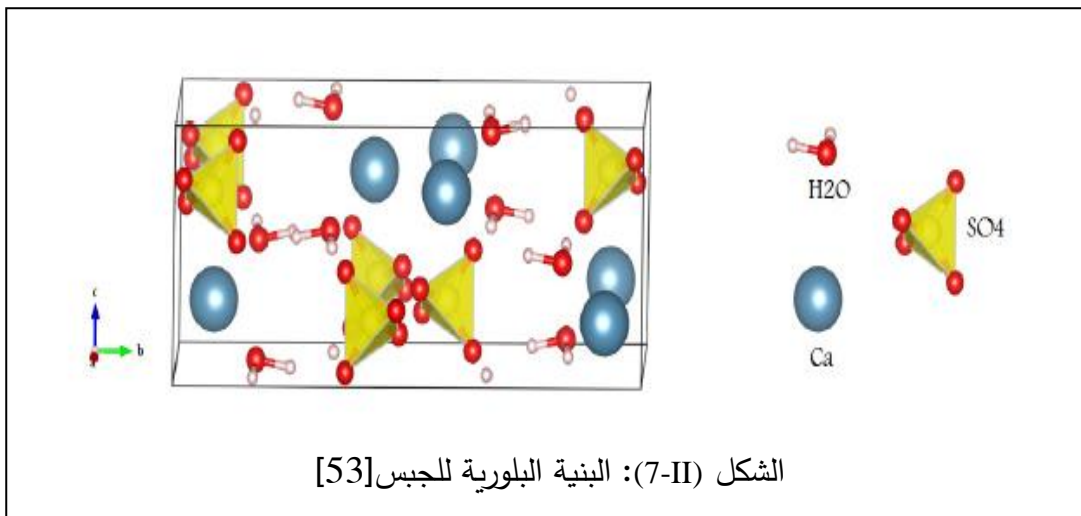
أ) الكوارتز:

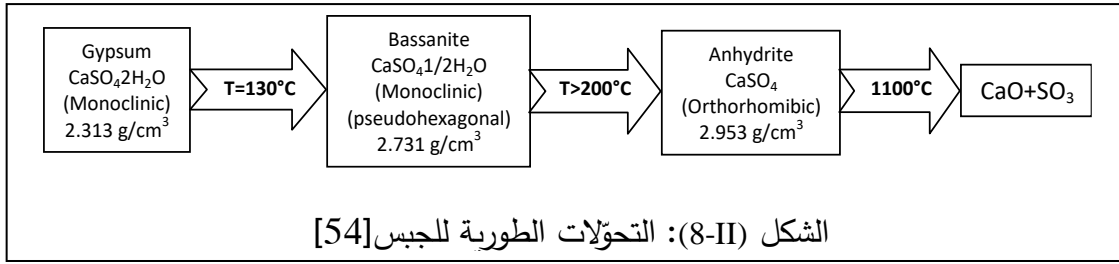
يُعدُّ الكوارتز (SiO_2) من أكثر المواد وفرة على سطح الأرض بعد الفلدسبار [48، 49] ذي الصيغ الكيميائية $\text{KAlSi}_3\text{O}_8 - \text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. يشكل الكوارتز حوالي 70% من تركيب الرمل [50]، كما يوجد كترسبات نقية. للكوارتز بنية بلورية سداسية، الشكل (II-5)، و عند تعرضه لحرارة مرتفعة في الشروط العادية و بدون إضافات تحدث له عدة تحولات طورية، الشكل (II-6).



(ب) الجبس:

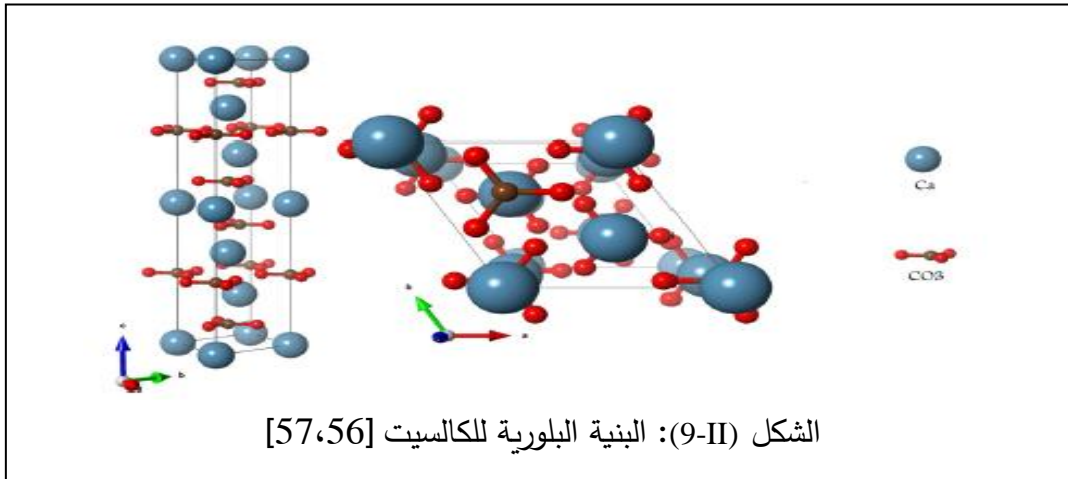
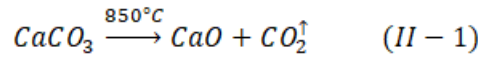
هو كبريتات الكالسيوم المائية ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، أحد أهم المعادن الكبريتية المنتشرة في الطبيعة، يتواجد في الصخور الرسوبية، كما يتواجد أحيانا في باطن الأرض على أعماق تصل إلى 350 مترا [52]. ينتج الجبس أيضا في المناطق البركانية [49]، و له بنية كما بالشكل (7-II)، و بتسخينه عند درجة حرارة 128 درجة مئوية يفقد محتواه من الماء تدريجيا، و يتحول إلى بازانيت (bassanite) و أنهيدريت (anhydrite)، كما يحدث له تفكك عند درجات الحرارة العالية، الشكل (8-II).





(ج) الكالسييت:

يُسمَّى أيضا الحجر الكلسي، و هو يتكون من كربونات الكالسيوم (CaCO_3)، و قد يحتوي على كميات كبيرة من كربونات المغنيزيوم (الدولوميت) ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)، كما قد يحوي مكونات أخرى بكميات ضعيفة مثل الطين و كربونات الحديد (FeCO_3) و الفلدسبار و البيراييت (FeS_2) و الكوارتز. يستقر الكالسييت عند درجة حرارة أقل من 850 درجة مئوية على شكل بلوري ثلاثي الميل (Trigonal)، الشكل (8-II)، و لكن عند تسخينه في درجة حرارة أكبر، فإنه يتفكك إلى ثاني أكسيد الكربون و الكلس، كما بالمعادلة (II-1) [55].



1.6. الخصائص الفيزيوكيميائية للرمل:

يبين الجدول (3-II) بعض الخصائص الفيزيوكيميائية لبعض المكونات الرئيسية للرمل.

الجدول (3-II): بعض الخواص الفيزيوكيميائية لمكونات الرمل الرئيسية [58]

		الكوارتز	الجبس	الكالسيت
الصيغة الكيميائية		SiO ₂	CaSO ₄ 2H ₂ O	CaCO ₃
الكتلة المولية (g/mol)		60.085	172.173	100.089
الحجم المولي (cm ³)		22.688	74.440	36.9257
قابلية الذوبان		غير قابل	في حمض HCL مع التسخين	في الأحماض المخففة
صلابة (هوس)		7	2-1.5	3
الكثافة (g/cm ³)		2.648	2.313	2.7106
التبلور		ثلاثي الزوايا	أحادي البعد	ثلاثي الزوايا
أبعاد الخلية البلورية	a(Å)	4.9134	5.670	4.9896
	b(Å)	-	15.201	-
	c(Å)	5.4052	6.533	17.0610
	β(°)	-	118.60	-
المجموعة الفضائية		P3 ₂ 21 or P3 ₁ 21	12/a	<i>R3c</i>
اللون		شفاف، وردي، أسود	أبيض، شفاف، أسود، أصفر، أخضر	أبيض
البريق		زجاجي شمعي	زجاجي إلى حريري، لؤلؤي أو شمعي	زجاجي إلى لؤلؤي على سطح الانقسام
الشفافية		شفاف إلى معتم تقريبا	شفاف إلى نصف شفاف	شفاف إلى نصف شفاف
قرينة الإنكسار		1.543-1.554	1.519-1.530	1.486-1.660
المقاومية الكهربائية (Ωm)		4 × 10 ¹² – 2 × 10 ¹⁶	1.21 × 10 ¹⁴	2 × 10 ¹²
درجة الانصهار (°C)		1705-1713	-	-

2- رمل منطقة ورقلة:

2-1- لمحة عن منطقة ورقلة:

تقع مدينة ورقلة على خط طول $5^{\circ} 20'$ شرقاً، و خط عرض $31^{\circ} 58'$ شمالاً، و ترتفع عن مستوى سطح البحر مسافة قدرها 138 متراً [59]. المساحة الإجمالية لولاية ورقلة قبل التقسيم الجديد 2887 كم²، الشكل (10-II)، و هي توجد على الحافة الغربية لحوض صحراوي مغلق و كبير [60]، بها أكبر منبع بترولي، و هي تزود الجزائر بما يزيد عن 98% من دخلها الوطني.

تعدّ مدينة ورقلة واحدةً من أهم المدن الجزائرية، يبلغ عدد سكانها 133024 نسمة في 2008 وفقاً للإحصائيات الصادرة عن جهاز الإحصاء الجزائري.

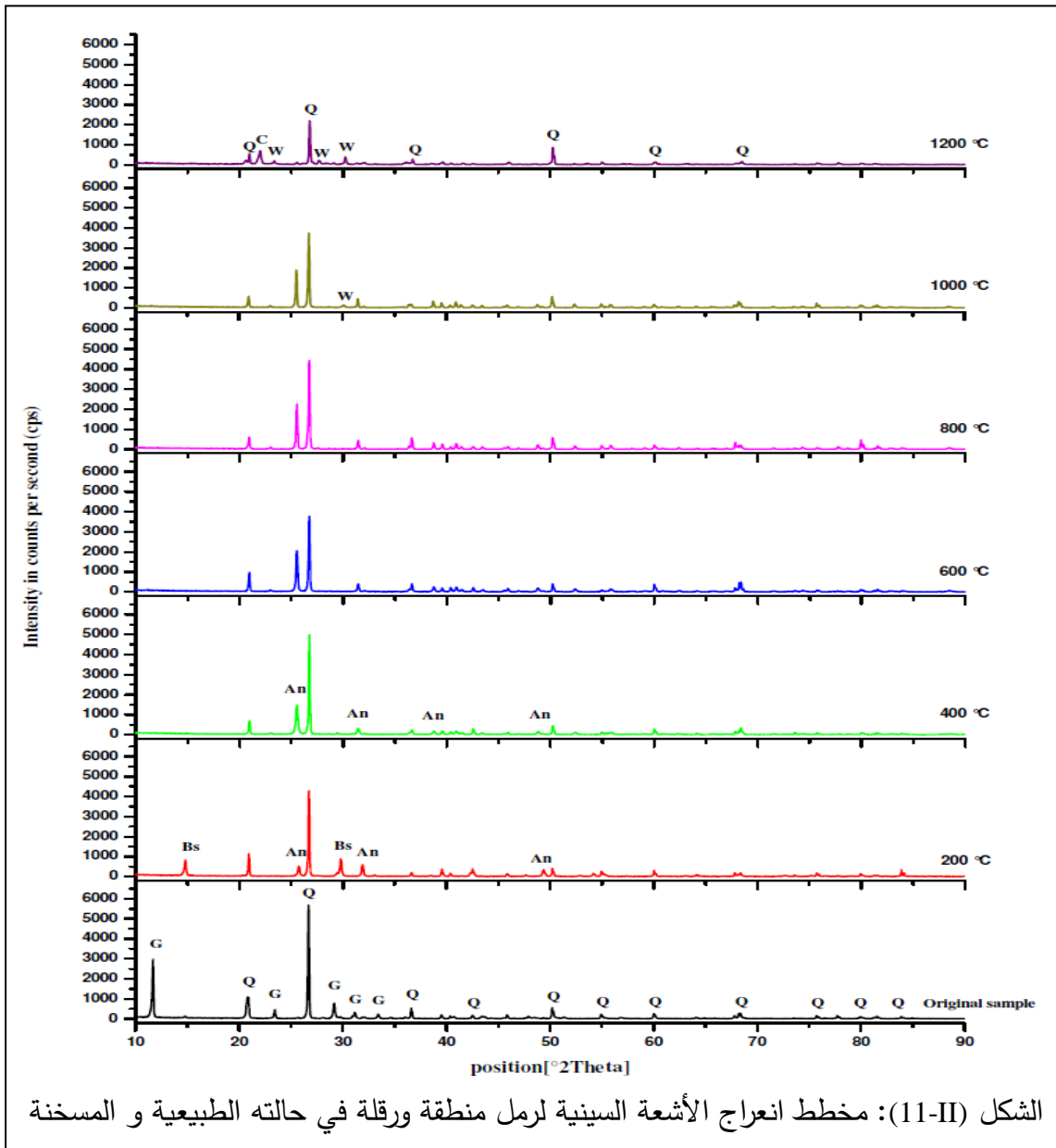


2-2- التركيب البلوري و الكيميائي لرمل منطقة ورقلة:

بناءً على دراسة سابقة [62، 63] باستعمال تقنية انعراج الأشعة السينية (XRD) تبين أن رمل كثبان منطقة ورقلة في حالته الطبيعية يحتوي على المركبات البلورية التالية: الكوارتز (quartz) في طوره α و الجبس (gypsum).

عند تعريض رمال طبيعية إلى درجات حرارة مختلفة لوحظ تغيير في المركبات البلورية؛ فمثلا عند درجة الحرارة 200°م ظهر مركبان جديدان هما البازنيت (bassanite) و الأنيدريت (anhydrite) و بقي الكوارتز، أما عند درجة الحرارة 400°م فبقي الأنيدريت و الكوارتز. أما عند درجة الحرارة 1000°م فظهر مركب جديد هو الـوولاستونيت (wollastonite) و بقي من الأنيدريت و الكوارتز. عند 1200°م بقي الكوارتز و الـوولاستونيت و ظهر مركب جديد هو الكريستوباليت (crystalite).

كل ذلك مبين في مخططات انعراج الأشعة السينية بالشكل (11-II) [62, 63].



أما النسب المئوية للمركبات البلورية في رمل ورقلة الطبيعي و كذا المسخن عند درجات حرارة مختلفة فملخص بالجدول (4-II).

الجدول (4-II): التقدير شبه الكمي (بالنسبة المئوية %) للمركبات في العينة الطبيعية و العينات المسخنة من رمل ورقلة باستخدام تقنية انعراج الأشعة السينية [62]

المكونات العينات	كوارتز (SiO ₂)	جبس (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	باسنيت (CaSO ₄ ·½H ₂ O)	أنهدريت (CaSO ₄)	وولاستونيت (CaSiO ₃)	كريستوباليت (SiO ₂)
طبيعية	63.8	36.2				
200°C	66.9		33.1			
400°C	71.4			28.6		
600°C	60.2			39.8		
800°C	62.5			37.5		
1000°C	57			34.4	8.6	
1200°C	53.7				31.3	15

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

2-3-3-1- التركيب الذري:

من خلال دراسة أجراها مشري محمد العيد [8] باستخدام تقنية التحليل بالتنشيط النيوتروني (AAN) و هي تعطي التركيب الذري - تبيّن أن رمل ورقلة يتكون من العناصر التالية: الكالسيوم (Ca) و البوتاسيوم (K) و الحديد (Fe) و المنغنيز (Mn) و السيليسيوم (Si) و الأكسجين (O)، كما يحتوي على العديد من المعادن الثمينة و النادرة، لكن تراكيزها ضئيلة، نذكر منها: المولبيديوم (Mo)، الغاليوم (Ga)، الجارمانيوم (Ge)، و هي معادن نادرة خفيفة، كما يحوي بعض المعادن النادرة الأرضية: النيوديميوم (Nd)، اللانثانوم (La)، الأوروبيوم (Eu)، كما يحتوي اليورانيوم (U) و الثوريوم (Th)، و هما معدنان نادران مشعان.

2-3-2- التركيب الجزيئي:

أوضحت دراسة سابقة لمشري محمد العيد[63] أن رمل كثبان ورقلة الطبيعي يتكون من الكوارتز (SiO_2) و الجبس المشبع بالماء ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، و كذا من بعض المركبات المعدنية و العضوية بتراكيز ضعيفة جدا كالهيماتيت (Fe_2O_3) و الكاولينيت ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$).

الفصل الثالث

الأدوات المستعملة

سنتناول في هذا الفصل منطقة الدراسة، ثم سنتحدث عن كيفية تحضير العينات. سنركز على طرق قياس الخصائص الكهربائية للعينات، وخصوصاً جهاز التحليل الطيفي للممانعة (impedance spectroscopy).

1- جمع العينات:

أُخذت العينات المدروسة من كثبان رمل منطقة محيريزة الواقعة في الجنوب الغربي لمدينة ورقلة، و هي كثبان نجمية الشكل نتيجة ورود الرياح إليها من اتجاهات عديدة، و هي ذات لون آجري خفيف نتيجة احتوائها على عنصر الحديد [62].

2- تحضير العينات:

حُضرت عينات الرمل وفقاً للخطوات التالية:

الخطوة الأولى: سُحقت عينات الرمل باستعمال جهاز طحن ميكانيكي، الشكل (III-1). يحوي الجهاز بداخله كريات صغيرة من العقيق (agate)، تتصادم فيما بينها عند الاهتزازات التي يحدثها الجهاز، فتتحرر حبيبات الرمل المراد طحنها بين كريات المتصادمة فتسحق. تستمر هذه العملية حوالي خمسة عشر دقيقة، فيصبح عندئذ الرمل جِدَّ ناعم.

الخطوة الثانية: أُخِذت سبع عينات متماثلة، تزن كل منها 100 غرام و وُضعت في أوانٍ خزفية، الشكل (III-2). إحدى هذه العينات لم تعرض للحرارة (عينة طبيعية أو أصلية)، أما العينات الأخرى فوُضعت في أوانٍ خزفية، ثم وُضعت -كلٌّ على حدة- داخل فرن كهربائي، الشكل (III-3)، عند درجات حرارة مختلفة (200، 400، 600، 800، 1000، 1200°C) و ذلك ليوم كامل (أربعة و عشرون ساعة) عند الضغط الجوي العادي، ثم تُركت لتبرد طبيعياً.

الخطوة الثالثة: وُضعت العيناتُ السبعُ في أنابيب بلاستيكية، الشكل (III-4)، للحفاظ عليها من التلوث بالشوائب.



الشكل (III-1): جهاز الطحن الميكانيكي



الشكل (III-3): الفرن الكهربائي



الشكل (III-2): الأواني الخزفية



الشكل (III-4): العينات المعالجة داخل الأنابيب

3- طرق قياس الخصائص الكهربائية للعينات:

كل القياسات الكهربائية في عملنا حول عينات رمل كثنان ورقلة الطبيعية و المعالجة بالحرارة أنجزت باستخدام جهاز مطيافية الممانعة (impedance spectroscopy instrument)، لذلك ينبغي تقديم نبذة عن هذا الجهاز و كيفية عمله.

3-1 جهاز التحليل الطيفي للممانعة (impedance spectroscopy):

جهاز التحليل الطيفي للممانعة الذي استخدمناه موجود في مخبر الدراسات الفيزيائية للمواد (LEPM) التابع لجامعة العلوم و التكنولوجيا بوهران، الشكل (5-III)، و هو من نوع (Novocontrol Alpha)، يعمل في مجال الترددات (1μHz-1MHz)، و يشتغل عند درجات حرارة تتراوح بين درجة حرارة النيتروجين السائل (77K=-196°C) و 400°C، و ذلك بالنسبة للممانعات التي تتراوح بين الملي أوم (mΩ) و 100 تيرا أوم (100TΩ)، و هو مُعدّ خصيصا لدراسة المواد التي تتميز بممانعة عالية و معامل ضياع منخفض، لكن يمكنه أن يقيس بدقة عالية ممانعة المواد ذات الناقلية العالية و الممانعة المنخفضة.

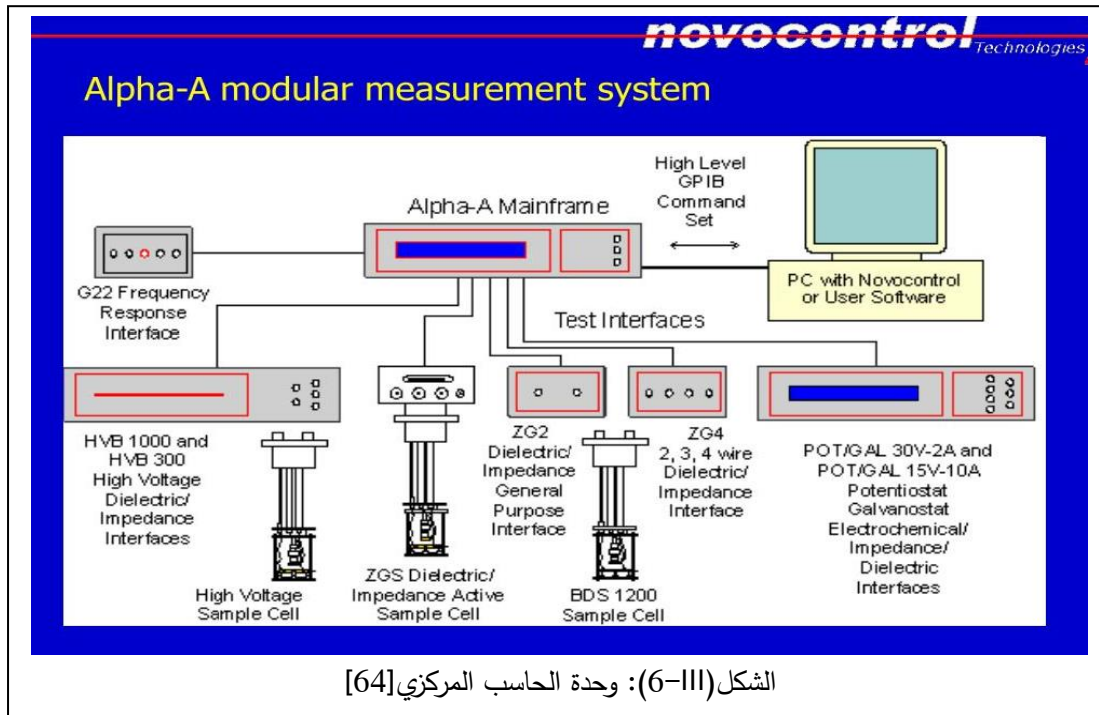


الشكل (5-III): جهاز التحليل الطيفي للممانعة (impedance spectroscopy)

يتكوّن جهاز التحليل الطيفي للممانعة من:

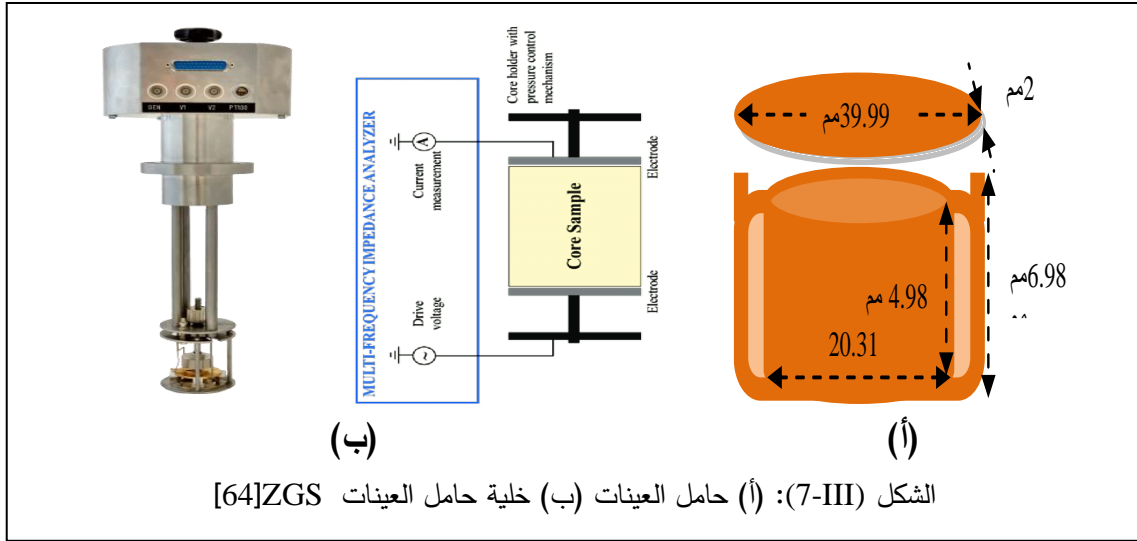
- وحدة قياس أساسية تسمى "وحدة الحاسب المركزي" (Alpha-Analyzer mainframe)، الشكل (6-III).
- خلية حامل عينات.
- حامل عينات و خزان آزوت.
- كل هذا يكون متصلا بحاسوب و طابعة.

وحدة الحاسب المركزي أداة قوية و مرنة؛ إذ يمكن توسيعها عن طريق واجهات الاختبار، لذا يوصى باستخدام هذا النظام لتصميمات الأجهزة الجديدة. من خصائص هذا النظام تحديد سرعة أجهزة تحليل مجال التردد الكهربائي، لذلك يمكن قياس السماحية و الناقلية و مقاومة جميع المواد، بما في ذلك الممانعة الكهربائية في مجالات تردد و درجات حرارة مختلفة دون تغيير هندسة العينة أو خلاياها.



يحتوي الحاسوب المركزي على محل تردد الاستجابة مع موجة جيبية و مولد تيار مستمر و قناتين لإدخال جهد تيار متناوب. بالإضافة إلى ذلك، يحتوي الحاسوب المركزي على مصادر الطاقة و خطوط التحكم التماثلية و الرقمية و البرامج الثابتة لتشغيل واجهات الاختبار. بعد التشغيل يكتشف الحاسوب المركزي تلقائيًا واجهة الاختبار المتصلة، و يضبط وظائف النظام وفقًا لها. يُنحَكَّمُ في جميع وظائف نظام الحاسوب المركزي و واجهات الاختبار المتصلة بواسطة منفذ واجهة الحاسب الرئيسي (IEEE488 GPIB) بواسطة أوامر GPIB عالية المستوى عبر كمبيوتر خارجي، الشكل (III-6).

حامل العينات (مصنوع من النحاس) و خليته مبينان كما بالشكل (7-III).



3-2- تطبيقات التحليل الطيفي للممانعة:

تُستخدم مطيافية الممانعة الكهروكيميائية في مجموعة واسعة من التطبيقات، في صناعة الطلاء و التغطية أو الترسية؛ إذ هي أداة مفيدة للتحقق من جودة الترسية و اكتشاف وجود التآكل.

تُستخدم أيضا في العديد من أنظمة المستشعرات الحيوية لقياس تركيز البكتيريا و اكتشاف مسببات الأمراض الخطيرة مثل الإشريكية القولونية، السلمونيلا و خلايا الخميرة [65].

تُستخدم مطيافية الممانعة الكهروكيميائية أيضا لتحليل و توصيف المنتجات الغذائية المختلفة، مثل تقييم تفاعلات الأغذية مع العبوات المخزنة فيها، و تحليل مكونات الحليب، و توصيف و تحديد نقطة التجمد لمزيج الأيس كريم، و قياس تقادم اللحوم، و التحقق من نضوج و جودة الفواكه، و تحديد حموضة زيت الزيتون [66،67].

تُعرف مطيافية الممانعة الكهروكيميائية في مجال مراقبة صحة الإنسان باسم تحليل الممانعة الكهربائية البيولوجية، و تستخدم لتقدير مكونات جسم الإنسان، بالإضافة إلى معايير مختلفة مثل إجمالي مياه الجسم و كتلة الدهون في الجسم.

تعتمد المستشعرات الطبية الحيوية العاملة في نطاق الموجات القصيرة على التحليل الطيفي للعزل الكهربائي للكشف عن تغيرات خواص المواد العازلة في نطاق ترددي معين [68،69].
يمكن استخدام التحليل الطيفي للممانعة الكهروكيميائية للحصول على استجابة التردد للبطاريات.

على العموم يُعدُّ التحليل الطيفي للممانعة الكهروكيميائية تقنيةً تحليل قويةً، فهو يُستخدم على نطاق واسع في مختلف قطاعات البحث [70،71] مثل الهندسة الكهربائية و الكيمياء الكهربائية و الإلكترونيات الدقيقة و الصناعات الدوائية و ما إلى ذلك.
يبدو من المؤكد أن دراسات الممانعة ستصبح شائعة بشكل متزايد مع تزايد عدد علماء الكيمياء الكهربائية و علماء المواد.

3-3- شروط الاستخدام و حدود التحليل الطيفي للممانعة:

الشروط الوحيدة لدراسة التحليل الطيفي للممانعة الكهروكيميائية هي الخطية و الثباتية للنظام الكهروكيميائي. يُتَحَقَّق من الخطية من خلال مقارنة الاستجابات بترددات مختلفة للإثارة ذات السعات المتزايدة. في الواقع، في حالة الأنظمة الخطية، تكون وظيفة النقل مستقلة عن إشارة الإثارة. يُتَحَقَّق من ثبات النظام الكهروكيميائي عن طريق مراقبة ثابت التيار و الجهد قبل كل قياس و بعده [70].

الفصل الرابع:

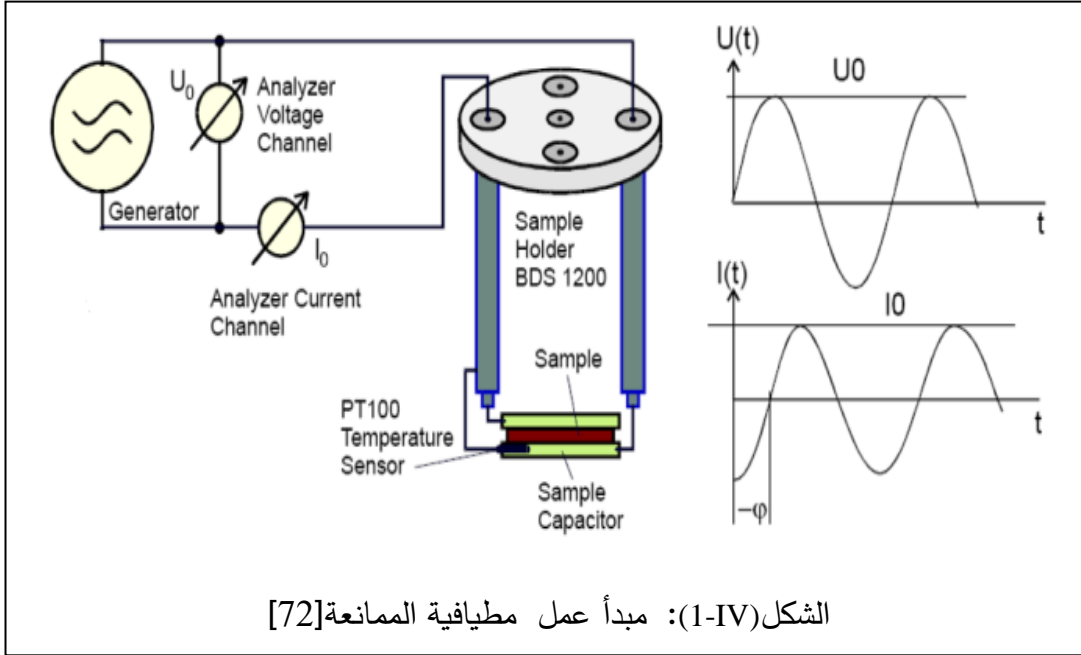
مطيافية الممانعة

(Impedance Spectroscopy)

1- مبدأ عمل مطيافية الممانعة:

يعتمد مبدأ مطيافية الممانعة الكهروكيميائية على تطبيق جهد جيبى منخفض (اضطراب)، تكون

إشارة الإدخال عبارة عن شدة تيار وإشارة الاستجابة تمثل الكمون [72]، الشكل (1-IV).

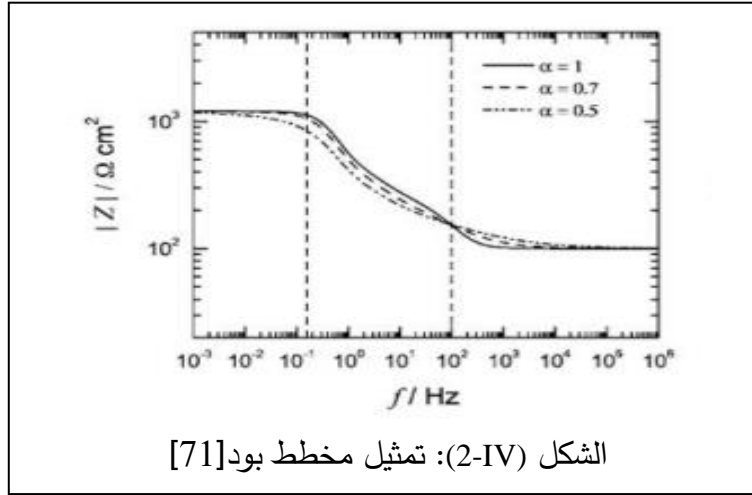


النسبة بين سعة الجهد و التيار تمثل طولية الممانعة الكهربائية المركبة $|Z|$ ، و يكمل فرق الطور بينهما المعلومات اللازمة لمعرفة الجزء الحقيقي و الجزء التخيلي للممانعة الكهربائية المركبة. أثناء القياسات، يتم مسح مجال كبير من الترددات f ، و هو ما يُعرف بطيف التردد أو مصطلح طريقة التحليل الطيفي.

التحليل الطيفي هو طريقة تجريبية لوصف الأنظمة الكهروكيميائية؛ إذ تقيس هذه التقنية ممانعة النظام (استجابة النظام للاضطراب المُدخَل) عند ترددات مختلفة، بما في ذلك خصائص تخزين الطاقة و تبديدها. يُعبّر غالبًا عن البيانات المُحصَل عليها بواسطة مطيافية الممانعة الكهروكيميائية بيانيًا في مخطط بود (Bode) أو معيار نايكست (Nyquist).

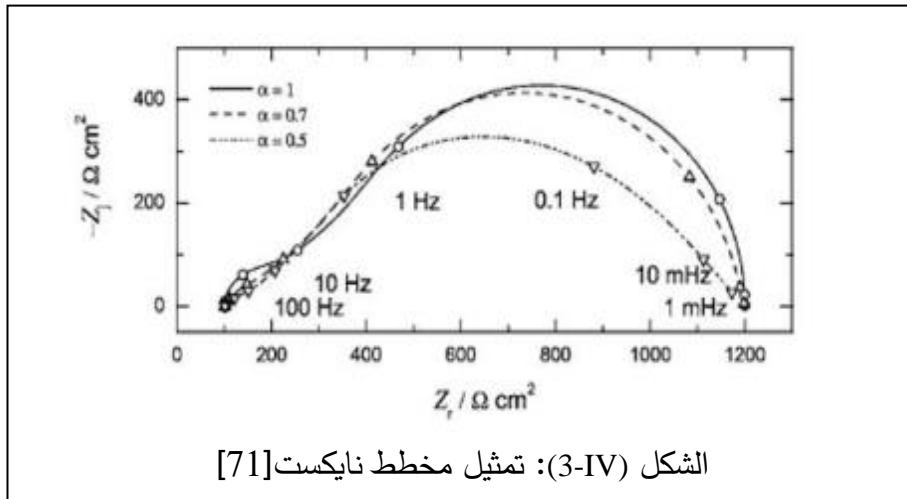
(أ) مخطط بود (Bode):

في مخطط بود يكون محور الفواصل حاملا للتردد f أو النبض ω ، أما محور الترتيب فيكون مرتبطا بطويلة الممانعة $|Z|$ ، الشكل (2-IV). يستخدم علماء الكهرباء و الأوتوماتيك $20\log(|Z|)$ في محور الترتيب، أما محور الفواصل فيضعون $\log(f)$ أو $\log(\omega)$.



(ب) مخطط نايكست (Nyquist):

في مخطط نايكست يتوافق محور الفواصل مع الجزء الحقيقي للممانعة $\text{Re}(Z)$ ، أما محور الترتيب فيكون مرتبطا بالجزء التخيلي لها $\text{Im}(Z)$ ، الشكل (3-IV). يستخدم هذا التمثيل من قبل المهتمين بالجانب الكهربائي للمواد، أما علماء الكيمياء الكهربائية فيفضلون $\text{Im}(Z)$ - [71].



من الممكن ربط نتائج القياسات بالخصائص الفيزيائية و الكيميائية للمادة، و ذلك من خلال نمذجة استجابة العينة للتردد بدوائر كهربائية مكافئة مناسبة تتكون من مقاومات و مكثفات تعكس الطبيعة المقاومة أو السعوية للمواد.

إن استغلال أطيف الممانعة يجعل من الممكن أيضًا الحصول على معلومات عديدة مثل الخصائص الضوئية و الخصائص الكهربائية للمواد كالممانعة و السماحية و الناقلية و كذلك معاملات الانتشار و السعات و الثوابت العازلة [73-76]، و ما إلى ذلك.

قيم الناقلية و السعة التي يمكن حسابها تجعل من الممكن التمييز بين المواد العازلة و شبه الناقلة أو حتى المواد الناقلة [73،77].

2- طريقة الحصول على منحنيات الممانعة بدلالة التردد تجريبياً:

بعد وضع العينة المراد قياس خصائصها تُضبط أولاً معاملات برنامج EC-Lab (نشرته Bio-Logic Instruments) المثبت بالحاسوب المرفق بالجهاز. يحوي هذا الأخير خوارزمية لتحسين الأطيف التجريبية، و من ثَمَّ الحصول على الخصائص المراد قياسها (كهربائية، ضوئية، . . .)، و لكننا سنركز في أطروحتنا هذه على الخصائص الكهربائية: الممانعة و السماحية و الناقلية و فرق الطور (الفرق الجبري بين الجهد و التيار) و الفقد المماسي (the loss tangent)، و هو يشمل كلاً من فقد العزل الكهربائي و الفقد الأومي.

بعد تحديد المقادير المراد قياسها تُعَيَّنُ الترددات التي سيُجرى القياس عندها واحداً واحداً، ثم يُطلب من البرنامج إصدار النتائج المرغوب فيها.

يُظهر البرنامج النتائج بشكلين، الأول رسم بياني بدلالة التردد، و الثاني ملف بيانات عددية، يمكن تحويله إلى رسم بياني عن طريق البرنامج المشهور Origin، كما بالجدول (1-IV).

الجدول (1-IV): قيم بعض الخواص الكهربائية لعينة مسخنة في 200 درجة مئوية

SABLE 200.TXT - Bloc-notes							
Fichier Edition Format Affichage Aide							
[Test Sample, 24.11.2015, 12:2							
Fixed value(s) : AC Volt [Vrms]=1.000							
Freq. [Hz]	Eps'	Eps''	Sig' [S/cm]	Sig'' [S/cm]	Delta [Deg]	Zp' [Ohms]	Zp'' [Ohms]
1.0000e+07	7.0573e+02	1.1749e+03	6.5364e-03	-3.9206e-03	5.9008e+01	8.5020e+00	1.4154e+01
7.1429e+06	8.8416e+02	1.4382e+03	5.7151e-03	-3.5094e-03	5.8418e+01	9.7239e+00	1.5817e+01
5.1020e+06	1.1079e+03	1.7768e+03	5.0432e-03	-3.1420e-03	5.8054e+01	1.1019e+01	1.7671e+01
3.6443e+06	7.8056e+02	2.2952e+03	4.6533e-03	-1.5805e-03	7.1217e+01	1.1943e+01	3.5117e+01
2.6031e+06	1.6644e+03	3.1538e+03	4.5673e-03	-2.4088e-03	6.2178e+01	1.2168e+01	2.3057e+01
1.8593e+06	2.0947e+03	3.3855e+03	3.5020e-03	-2.1657e-03	5.8254e+01	1.5869e+01	2.5648e+01
1.3281e+06	2.5958e+03	4.3227e+03	3.1939e-03	-1.9172e-03	5.9015e+01	1.7400e+01	2.8975e+01
9.4865e+05	3.2644e+03	5.2749e+03	2.7839e-03	-1.7223e-03	5.8249e+01	1.9963e+01	3.2257e+01
6.7760e+05	4.0411e+03	6.4823e+03	2.4436e-03	-1.5230e-03	5.8061e+01	2.2742e+01	3.6481e+01
4.8400e+05	4.9513e+03	8.0563e+03	2.1693e-03	-1.3329e-03	5.8426e+01	2.5618e+01	4.1684e+01
3.4572e+05	6.0866e+03	1.0011e+04	1.9255e-03	-1.1705e-03	5.8701e+01	2.8862e+01	4.7472e+01
2.4694e+05	7.4830e+03	1.2472e+04	1.7134e-03	-1.0279e-03	5.9037e+01	3.2434e+01	5.4058e+01
1.7639e+05	9.1613e+03	1.5553e+04	1.5262e-03	-8.9888e-04	5.9501e+01	3.6413e+01	6.1818e+01
1.2599e+05	1.1253e+04	1.9533e+04	1.3691e-03	-7.8864e-04	6.0055e+01	4.0591e+01	7.0460e+01
8.9993e+04	1.3045e+04	2.4549e+04	1.2290e-03	-6.5304e-04	6.2014e+01	4.5217e+01	8.5092e+01
6.4281e+04	1.3306e+04	3.2209e+04	1.1518e-03	-4.7578e-04	6.7554e+01	4.8248e+01	1.1679e+02
4.5915e+04	1.2016e+04	4.4380e+04	1.1336e-03	-3.0690e-04	7.4851e+01	4.9022e+01	1.8106e+02
3.2796e+04	1.0589e+04	6.4535e+04	1.1775e-03	-1.9319e-04	8.0681e+01	4.7197e+01	2.8763e+02
2.3426e+04	1.2539e+04	9.6137e+04	1.2529e-03	-1.6340e-04	8.2569e+01	4.4355e+01	3.4007e+02
1.6733e+04	2.3632e+04	1.3302e+05	1.2383e-03	-2.1997e-04	7.9926e+01	4.4879e+01	2.5262e+02
1.1952e+04	4.1583e+04	1.8154e+05	1.2071e-03	-2.7649e-04	7.7099e+01	4.6037e+01	2.0099e+02
8.5371e+03	6.5938e+04	2.3697e+05	1.1255e-03	-3.1316e-04	7.4451e+01	4.9376e+01	1.7745e+02
6.0979e+03	7.5900e+04	3.0617e+05	1.0387e-03	-2.5748e-04	7.6077e+01	5.3504e+01	2.1583e+02
4.3557e+03	8.9210e+04	3.9864e+05	9.6598e-04	-2.1617e-04	7.7386e+01	5.7530e+01	2.5708e+02

3- طرق حساب بعض الخواص الكهربائية:

3-1- حساب الممانعة الكهربائية المركبة:

الممانعة هي مقاومة تدفق التيار المتناوب (المتردد) في النظام المُركَّب. يشتمل النظام الكهربائي المركب غير الفعال على عناصر مبدِّدة للطاقة (المقاومة) و عناصر مخزِّنة للطاقة (المكثف). إذا كان النظام أومياً بحثاً فالممانعة للتيار المتناوب أو التيار المستمر هي ببساطة المقاومة الكهربائية R.

عادةً ما تُظهر المواد أو الأنظمة ذات الأطوار المتعددة (مثل المواد المركبة أو غير المتجانسة) استجابةً عازلةً شاملةً؛ إذ يكشف التحليل الطيفي للعزل عن وجود علاقة بين الممانعة و التردد في مجال التيار المتناوب.

المقاومة الكهربائية هي قدرة عنصر الدارة على مقاومة تدفق التيار الكهربائي، و يحدد قانون أوم المقاومة من حيث العلاقة بين الجهد V و التيار I، المعادلة (1-IV).

$$R = \frac{V}{I} \quad (1-IV)$$

هذا القانون معروفٌ جيداً، و استخدامه يقتصر فقط على المقاومة المثالية، و هي التي تتميز

بالعديد من الخصائص البسيطة:

- يتبع قانون أوم على جميع مستويات التيار و الجهد.
- قيمة المقاومة مستقلة عن التردد.
- وجود فرق في الطور بين التيار المتناوب و الجهد.

في الواقع تُظهر عناصر الدارة سلوكاً أكثر تعقيداً؛ فهي تجربنا على التخلي عن المفهوم البسيط

للمقاومة؛ إذ على عكس المقاومة، لا تقتصر الممانعة على الخصائص البسيطة المذكورة آنفاً.

عادةً ما تُقاس الممانعة بتطبيق جهد متناوب (AC) على المادة، و من ثمَّ قياس التيار المتدفق

من خلالها. الاستجابة لهذا الجهد هي إشارة تيار متردد يمكن تحليلها على أنها مجموع دوال جيبية.

تُقاس الممانعة عادةً باستخدام إشارة إثارة صغيرة بحيث تكون استجابة الخلية شبه خطية، ففي

النظام الخطي (أو شبه الخطي) تكون استجابة التيار للجهد الجيبي جيبيةً بالتردد نفسه، و لكن بوجود

فرق طور بينهما. التقنية المستخدمة لمثل هذا القياس هي مطيافية الممانعة الكهروكيميائية [75].

3-1-1- التمثيل البياني للممانعة:

تكون إشارة الإثارة المعبرٌ عنها كدالة للزمن على الشكل التالي:

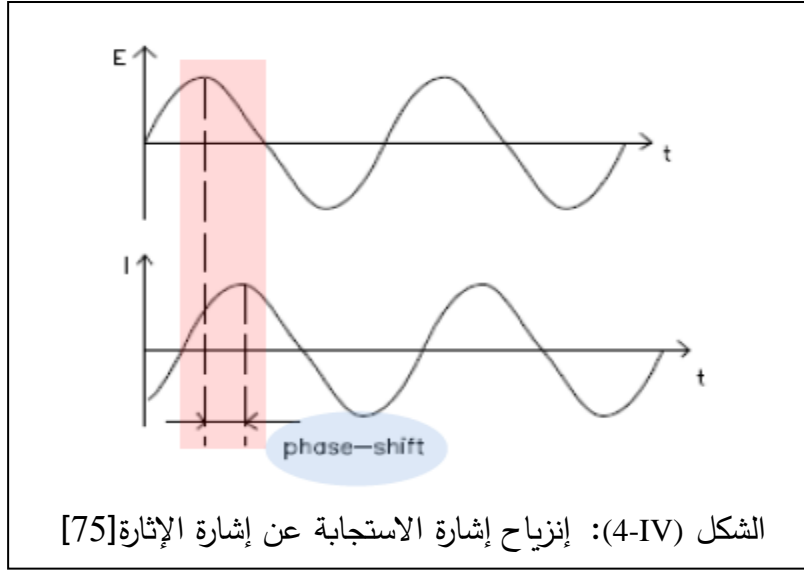
$$E(t) = E_0 \sin(\omega t) \quad (2-IV)$$

حيث يرتبط النبض ω بالتردد f بالعلاقة $\omega = 2\pi f$.

في النظام الخطي تتزاح إشارة الإستجابة $I(t)$ ، العبارة (3-IV)، بفرق طور φ ، الشكل (4-IV)، مع

تغير السعة لتصبح I_0 .

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (3-IV)$$



بتعبير مشابه لقانون أوم يمكن كتابة عبارة الممانعة كالآتي [78]:

$$Z = \frac{E(t)}{I(t)} = \frac{E_0 \sin(\omega t)}{I_0 \sin(\omega t + \varphi)} = Z_0 \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t + \varphi)} \quad (4-IV)$$

و باستخدام تعبير أولر (Euler) $e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi$ يمكن كتابة فرق الكمون (الإثارة)

$E(t) = E_0 e^{j\omega t}$ و التيار (الاستجابة) $I(t) = I_0 e^{j(\omega t + \varphi)}$ ، و تصبح الممانعة دالة مركبة [79]:

$$Z_c(\omega) = \frac{E(\omega)}{I(\omega)} = \frac{E_0 e^{j\omega t}}{I_0 e^{j(\omega t + \varphi)}} = Z_0 e^{-j\varphi} \quad (5-IV)$$

$$Z_c(\omega) = Z_0 (\cos \varphi - j \sin \varphi) \quad (6-IV)$$

$$Z_c(\omega) = Z'(\omega) - jZ''(\omega) \quad (7-IV)$$

حيث Z' و Z'' هما على الترتيب الجزء الحقيقي (يمثل المقاومة الكهربائية) و الجزء التخيلي (يمثل

المفاعلة الكهربائية) للممانعة الكهربائية.

يمكن كتابة عبارتي الجزء الحقيقي و الجزء التخيلي للممانعة كما يلي [80]:

$$Z' = \sum_i \frac{R_i}{1 + \omega^2 R_i^2 C_i^2} \quad (8-IV)$$

$$Z'' = \sum_i \frac{\omega R_i^2 C_i}{1 + \omega^2 R_i^2 C_i^2} \quad (9-IV)$$

حيث يُجرى الجمع \sum_i على المكونات المختلفة للعينة، ω التردد الزاوي، R_i تمثل مقاومة آليات

التوصيل الأيونية أو الإلكترونية، بينما تمثل السعة C_i قابلية استقطاب العينة.

إذا كان الجزء الحقيقي للممانعة موجباً فإن المادة منتجةً للطاقة، أما إذا كانت سالبة فهي فاقدة لها، و بالنسبة للجزء التخيلي للممانعة فإنه إذا كان موجبا فالمادة تؤدي دور وشيعة (حثية)، فإذا كان سالبا فالمادة لها دور مكثفة (سعوية)[81].

تُعطى طويلة الممانعة الكهربائية بالعلاقة:

$$|Z| = Z_0 = \sqrt{Z'^2 + Z''^2} \quad (10-IV)$$

لقد بينت دراسات سابقة [82-84] وجود علاقة مباشرة بين الممانعة الكهربائية و مختلف

المقادير الكهربائية كالسماحية و الناقلية مثلا.

3-2- حساب السماحية الكهربائية المركبة:

السماحية الكهربائية مقداراً فيزيائياً يصف استجابة وسط عازل للحقل الكهربائي، و تتعین

السماحية بقابلية المادة للاستقطاب استجابةً للحقل الكهربائي، و من ثَمَّ تُخَفَّضُ الحقل الكهربائي داخل

المادة، فالسماحية تتعلق بقابلية المادة على السماح للحقل الكهربائي بالنفوذ فيها، و تكتب عبارتها

المركبة كالتالي [81]:

$$\epsilon_c(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) = \frac{-j}{\omega Z_c(\omega)} \cdot \frac{1}{C_0} \quad (11-IV)$$

حيث C_0 هي سعة المكثفة المستوية الحاملة للعينة و هي فارغة، أما ϵ' و ϵ'' فهما الجزء الحقيقي

(يمثل نقل الطاقة عن طريق تيارات الإزاحة) و الجزء التخيلي للسماحية الكهربائية (يمثل فقدان الطاقة

بسبب التأخير في الاستقطاب) على الترتيب، و تُعطى عبارتهما كما يلي [81،82،83]:

$$\varepsilon'(\omega) = \frac{Z''}{\omega C_0 (Z'^2 + Z''^2)} \quad (12-IV)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{Z'}{\omega C_0 (Z'^2 + Z''^2)} \quad (13-IV)$$

3-3- حساب الناقلية الكهربائية المركبة:

تُعرف الناقلية الكهربائية بأنها الخاصية التي تشير إلى مدى قدرة المادة على توصيل الكهرباء، حيث ينشأ التيار الكهربائي نتيجة تدفق الشحنات الكهربائية، كما تعرف أيضًا بأنها نسبة كثافة هذا التيار إلى شدة الحقل الكهربائي [84] (قانون أوم $\sigma = \frac{J}{E}$)، و تعتبر هذه الخاصية من الخصائص المهمة، حيث تستخدم في عدد لا يحصى من التطبيقات، فهي التي تحدد المواد المناسبة للاستخدام في الأجزاء الكهربائية، و تستخدم أيضًا في اختبار نقاء الماء [85].

يمكن كتابة عبارة الناقلية المركبة كما يلي [85,83]:

$$\sigma_c(\omega) = \sigma'(\omega) - j\sigma''(\omega) = j\omega\varepsilon_0\varepsilon_c = j\omega\varepsilon_0 \frac{-j}{\omega Z_c(\omega)} \cdot \frac{1}{C_0} \quad (14-IV)$$

حيث $\varepsilon_0 \cong 8.854187 \times 10^{-12}$ F/m تُدعى السماحية الكهربائية في الفراغ، أما σ' و σ'' فهما على التوالي الجزء الحقيقي و الجزء التخيلي للناقلية الكهربائية.

يمثل الجزء الحقيقي للناقلية الكهربائية نقل الطاقة عن طريق ترحيل الشحنات (التوصيل الأومي)، أما الجزء التخيلي لها فيمثل التبديد بسبب السرعة المحدودة لحاملات الشحنة، و إلى الخسائر المختلفة عن طريق التشتت (التفاعلات الكيميائية أو الخسائر الحرارية) [86].

يمكن كتابة الجزء الحقيقي للناقلية و الجزء التخيلي لها على النحو التالي بالترتيب:

$$\sigma'(\omega) = \frac{\varepsilon_0 Z'}{C_0 (Z'^2 + Z''^2)} \quad (15-IV)$$

$$\sigma''(\omega) = \frac{\varepsilon_0 Z''}{C_0 (Z'^2 + Z''^2)} \quad (16-IV)$$

3-4- حساب الفقد المماسي (the loss tangent):

يعبر عن الفقد المماسي بالعلاقة [90]:

$$\tan(\delta) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma'}{\sigma''} \quad (17-IV)$$

3-5- حساب فرق الطور:

يمكن كتابة فرق الطور φ بين الجهد و التيار كما يلي [90]:

$$\varphi = \delta - 90^\circ \quad (18-IV)$$

الفصل الخامس

نتائج القياسات و مناقشتها

لقد اهتمَّ الباحثون محمادي و مشري و بضياف في دراسات سابقة [3، 8-10] حول رمل كَثبان منطقة ورقلة بالجوانب المورفولوجية (البنية و التركيب الذري و الجزيئي و البلوري لمكوّنات الرمل)، أمّا بحثنا الحالي فيدرس الخواص الكهربائية لرمل كَثبان منطقة ورقلة، و ذلك باستخدام التقنية المعروفة بمطيافية الممانعة.

بغرض رصد تغيرات الممانعة الكهربائية لرمل كَثبان ورقلة بالنسبة لتردد إشارة الإثارة سُجري أولاً قياسات على عينات من الرمل الطبيعي غير المسخّن، ثم لعينات مسخّنة عند درجات حرارة مختلفة.

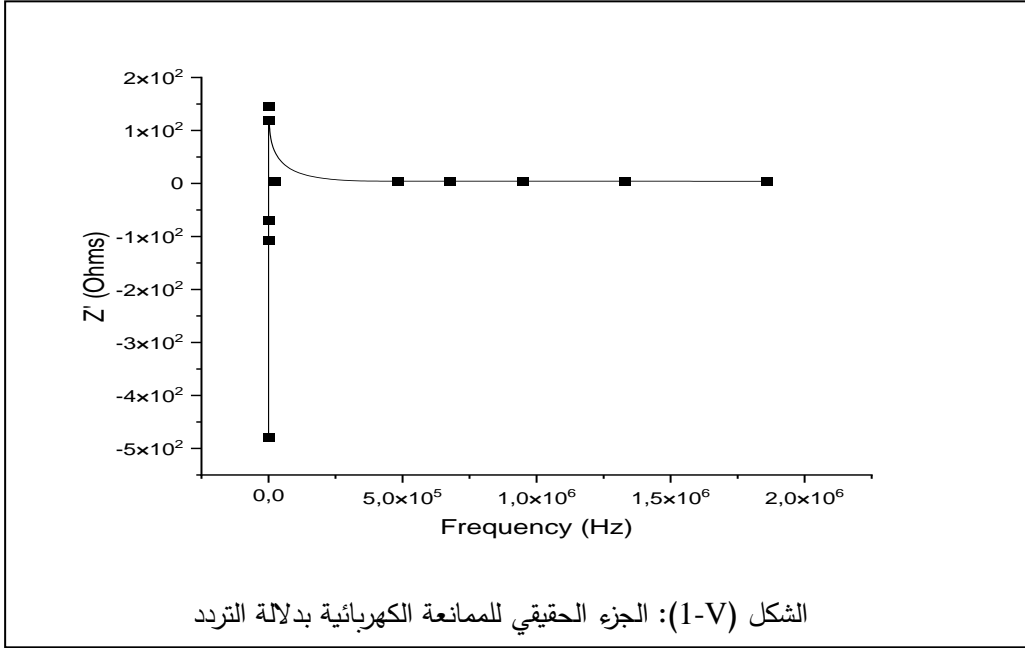
1- نتائج قياس الممانعة الكهربائية للرمل غير المسخّن:

في هذه الفقرة سنعرض قياسات الممانعة الكهربائية لعينة من رمل ورقلة الطبيعي غير المعرّض للحرارة.

1-1- الجزء الحقيقي للممانعة:

أظهرت نتائج القياس التجريبي أن قيم الجزء الحقيقي للممانعة الكهربائية في مجال الترددات $[4,9385 \times 10^{-01} \text{Hz} - 4,6849 \times 10^{-02}]$ للرمل الطبيعي غير المسخّن سالبة، أي أن رملنا في هذا المجال من الترددات يُعدُّ مادةً نشطةً (منتجة للطاقة).

يأخذ الجزء الحقيقي لهذه الممانعة أكبر قيمة موجبة عند التردد $5,4877 \times 10^{+01} \text{Hz}$ ، ثم تبدأ في الانخفاض قليلاً و تستقرُّ لبقية الترددات عند قيمة موجبة، ممّا يجعل رملنا مادةً سلبية (مستهلكة للطاقة) في هذا المجال من الترددات، الشكل (1-V).



1-2- الجزء التخيلي للممانعة:

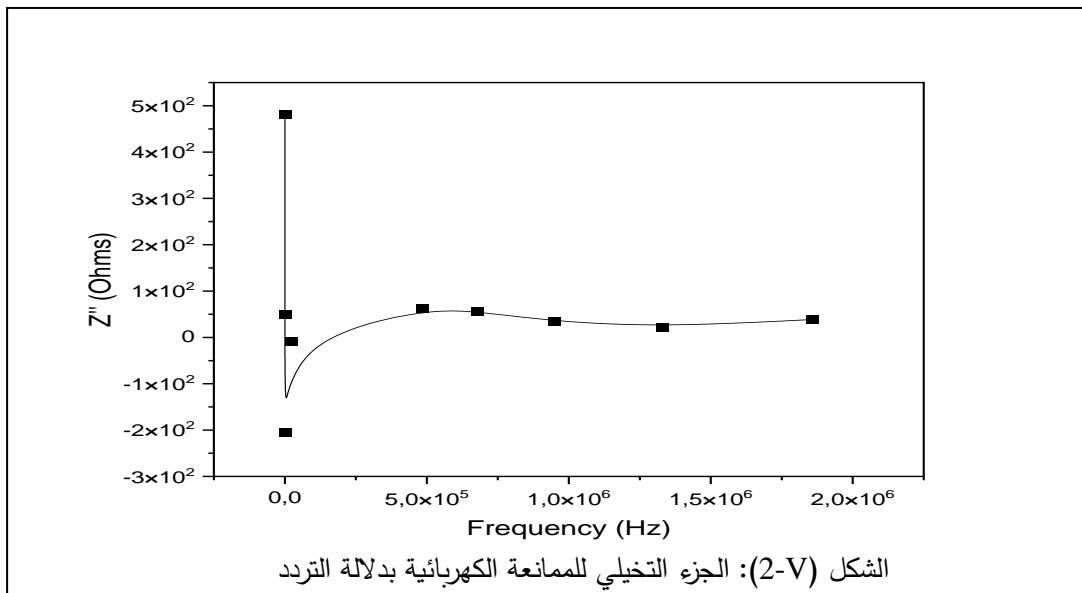
عند الترددات التي يكون فيها الجزء الحقيقي سالبًا يكون الجزء التخيلي موجبًا، مما يجعل رمل

ورقلة يسلك سلوك دائرة كهربائية حثية.

في نطاق الترددات $[2,3426 \cdot 10^{+04} - 5,4877 \cdot 10^{+01} \text{ Hz}]$ ، يكون الجزء التخيلي للممانعة الكهربائية

سالبًا، مما يعني أن العينة المدروسة غيّرت سلوكها، فأصبحت دائرة كهربائية سعوية، أمّا لبقية

الترددات فنلاحظ تزايدًا بقيم موجبة في قيم الجزء التخيلي للممانعة لتستقر في الأخير، الشكل (2-V).

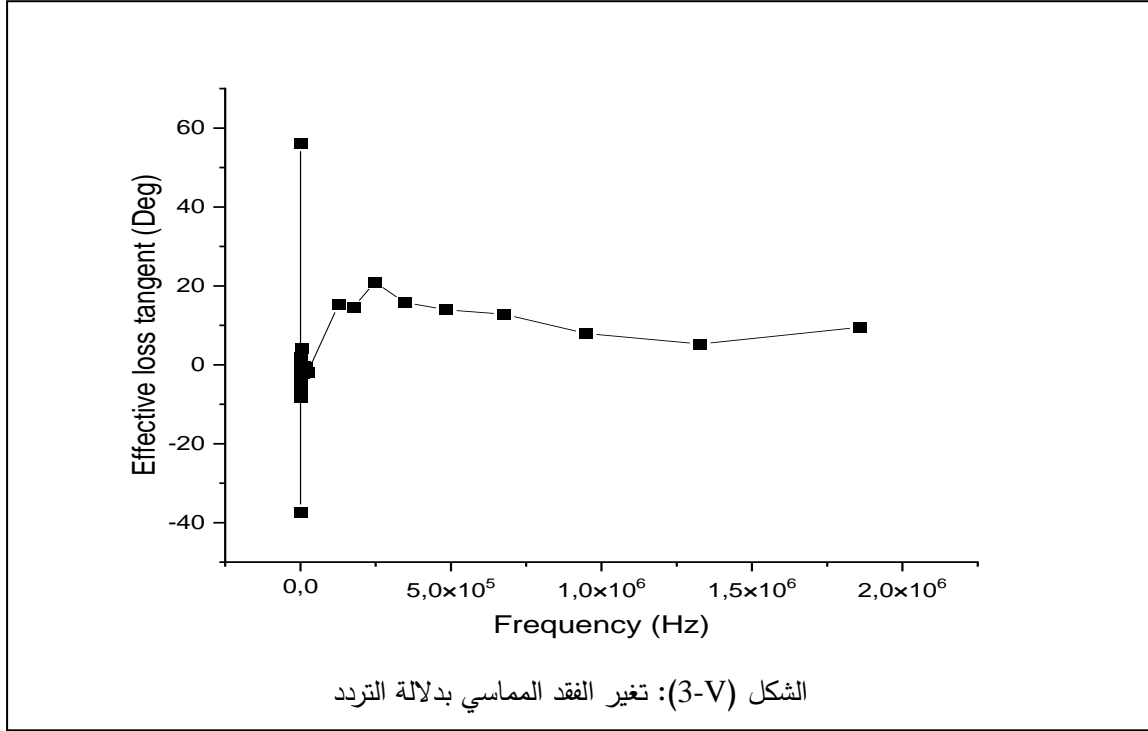


1-3- الفقد المماسي:

الفقد المماسي يشمل كلاً من فقد العزل الكهربائي و الفقد الأومي.

في مجال الترددات $[4,6849.10^{-02} - 2,5197.10^{-01} \text{Hz}]$ تزداد قيمة الفقد المماسي حتى تصل

إلى أعلى قيمة، ثم تنخفض لتستقر في الأخير، الشكل (3-V).



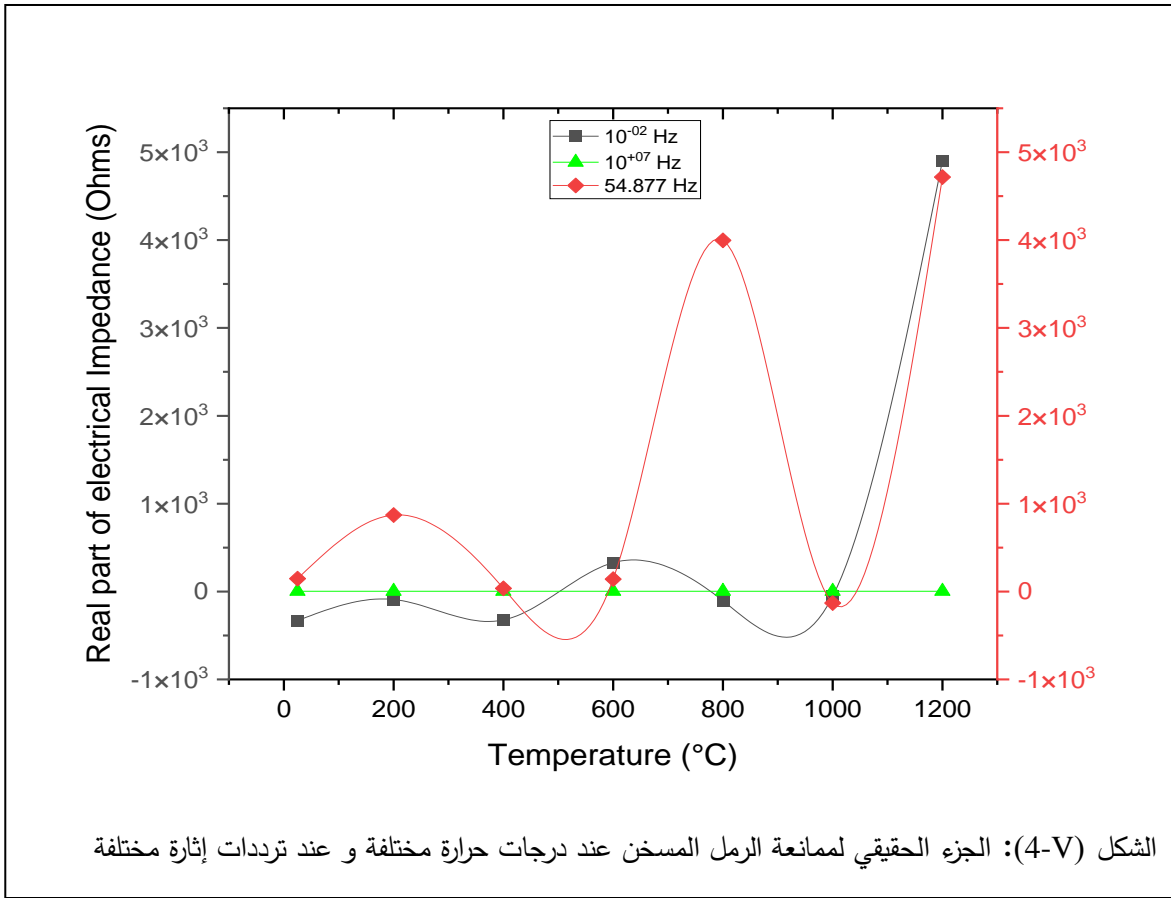
التباين في النتائج يمكن إرجاعه إلى التردد؛ حيث يقوم بهز ذرات العينة، و بالتالي تتغير بعض خصائصها.

2- نتائج قياس الممانعة الكهربائية للرمال المسخن:

في هذه الفقرة سنعرض قياسات الممانعة الكهربائية عند درجة حرارة الغرفة لعينات من رمل ورقلة مسخنة عند درجات حرارة مختلفة تراوحت بين 200 و 1200 درجة مئوية لمدة أربع و عشرين ساعة ثم بُردت طبيعياً. كل ذلك عند ثلاثة ترددات محددة، أحدها منخفض جداً، و الثاني منخفض، و الثالث مرتفع.

2-1- الجزء الحقيقي للممانعة الكهربائية:

بتفحص الشكل (4-V) يظهر جلياً تذبذب في قيم الجزء الحقيقي للممانعة الكهربائية (المقاومة) وذلك عند الترددات الضعيفة جداً و الضعيفة، أما عند الترددات العالية فكانت قيم الجزء الحقيقي للممانعة ثابتة تقريباً في جميع درجات الحرارة، ممّا يجعلنا نقول أن تأثير الحرارة في العينات عند الترددات العالية يكون ضعيفاً جداً.



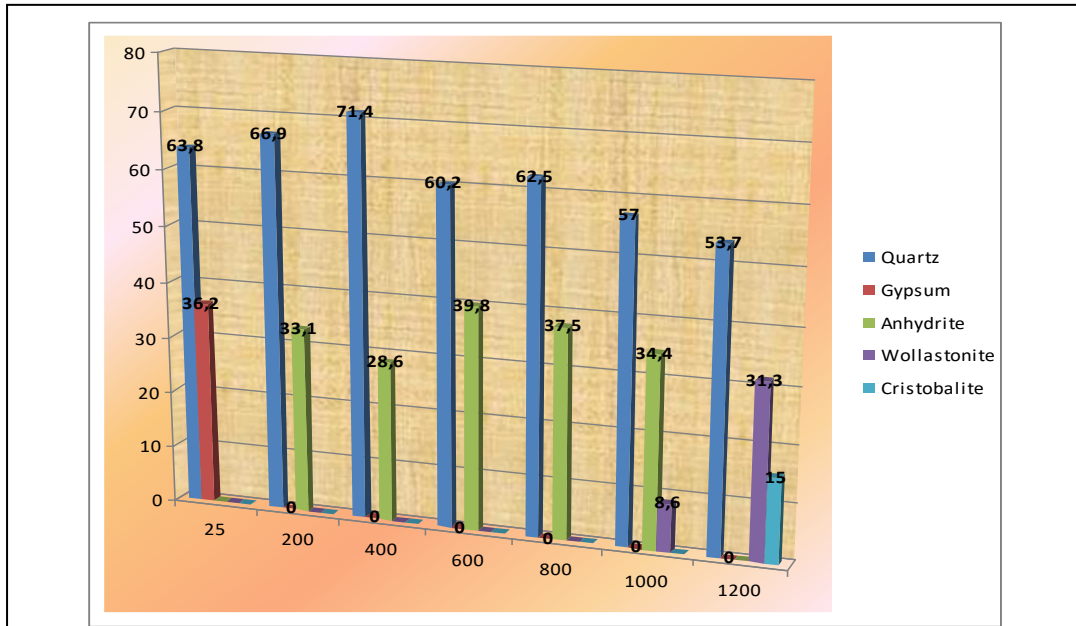
تكون قيمة الجزء الحقيقي للممانعة أكبر للعينات المسخنة عند درجات حرارة عالية في منطقة الترددات المنخفضة، و تنخفض تدريجياً بازدياد التردد.

يُظهر الشكل (4-V) أيضاً وجود قيم سالبة للجزء الحقيقي للممانعة عند الترددات المنخفضة للينة الأصلية (غير المسخنة) و للعينات المسخنة عند درجات الحرارة 200، 400، 800 و 1000 درجة مئوية، و هو ما يجعل هذه العينات تأخذ دور مادة منتجة للطاقة.

عند المجال نفسه من الترددات يكون الجزء الحقيقي للعينتين المسخنّتين عند 600 و 1200 درجة مئوية موجباً، مما يجعلهما مادة فاقدة للطاقة.

يمكن تفسير هذه النتائج بوجود نسبة عالية من الأنهدريت (anhydrite) في العينة المسخنة عند 600 درجة مئوية (39.8 %)، فهي أعلى قيمة سُجلت لهذه المادة من بين جميع العينات، الشكل (6-V)، وكذلك وجود كل من الولاستونيت (wollastonite) و الكريستوباليت (cristobalite) في العينة المسخنة عند درجة 1200 درجة مئوية، مع العلم أن الكريستوباليت موجود في العينة المسخنة عند 1200 درجة مئوية فقط.

مما يُلاحظ أيضاً عند الترددات المتوسطة و لجميع العينات المسخنة أن الجزء الحقيقي للممانعة موجب، باستثناء تلك المسخنة عند 1000 درجة مئوية كانت سالبة. يمكن عزو ذلك الاستثناء لنقصان نسبة الكوارتز في هذه العينة، و التي بلغت 57 %، و كذا انخفاض نسبة الأنهدريت (34.4 %) و ظهور الولاستونيت (Wollastonite) بنسبة ضئيلة (8.6 %). الشكل (5-V) يوضح النسب المئوية لمركبات رمل منطقة ورقلة الطبيعي و المسخن عند درجات حرارة مختلفة.



الشكل (5-V): النسب المئوية لمركبات رمل منطقة ورقلة الطبيعي و المسخن عند درجات حرارة مختلفة

تتزايد قيمة الجزء الحقيقي للممانعة في مجال الترددات المنخفضة بارتفاع درجة حرارة التسخين، فנסجل أكبر قيمة لها عند 1200 درجة مئوية. يمكن تفسير هذه الزيادة كما يلي:

الاهتزازات الحرارية في المادة الصلبة هي سرب من الجسيمات المجهرية تسمى "الفونونات"، تصطم هذه الفونونات بشكل مستمر بالإلكترونات التي تحاول العبور إلى الطرف الموجب باتجاهات عشوائية تؤدي إلى إعاقة محاولة الحركة المنظمة للإلكترونات ضد المجال الكهربائي، و هذا الانحراف أو التشتت الذي يحدث للإلكترونات بسبب الفونونات يعد من مصادر المقاومة، و مع ارتفاع درجة الحرارة يزداد عدد الفونونات، و بالتالي يزداد احتمال تصادمها مع الإلكترونات، مما يؤدي إلى زيادة المقاومة (الجزء الحقيقي للممانعة)[80].

يمكن تلخيص القيم الموجبة و القيم السالبة للجزء الحقيقي للممانعة الكهربائية عند درجات الحرارة المختلفة (200-1200 درجة مئوية) و في ترددات مختلفة في الجدول (1-V).

الجدول (1-V): القيم الموجبة و القيم السالبة للجزء الحقيقي للممانعة الكهربائية للعينات المسخنة عند مختلف درجات الحرارة و الترددات

درجة التسخين (°C) / تردد الإثارة (Hz)	غير مسخنة	200	400	600	800	1000	1200
10 ⁻²	-	-	-	+	-	-	+(max)
54.88	+	+	+	+	+	-	+
10 ⁺⁷	+	+	+	+	+	+	+

(max) أعلى قيمة

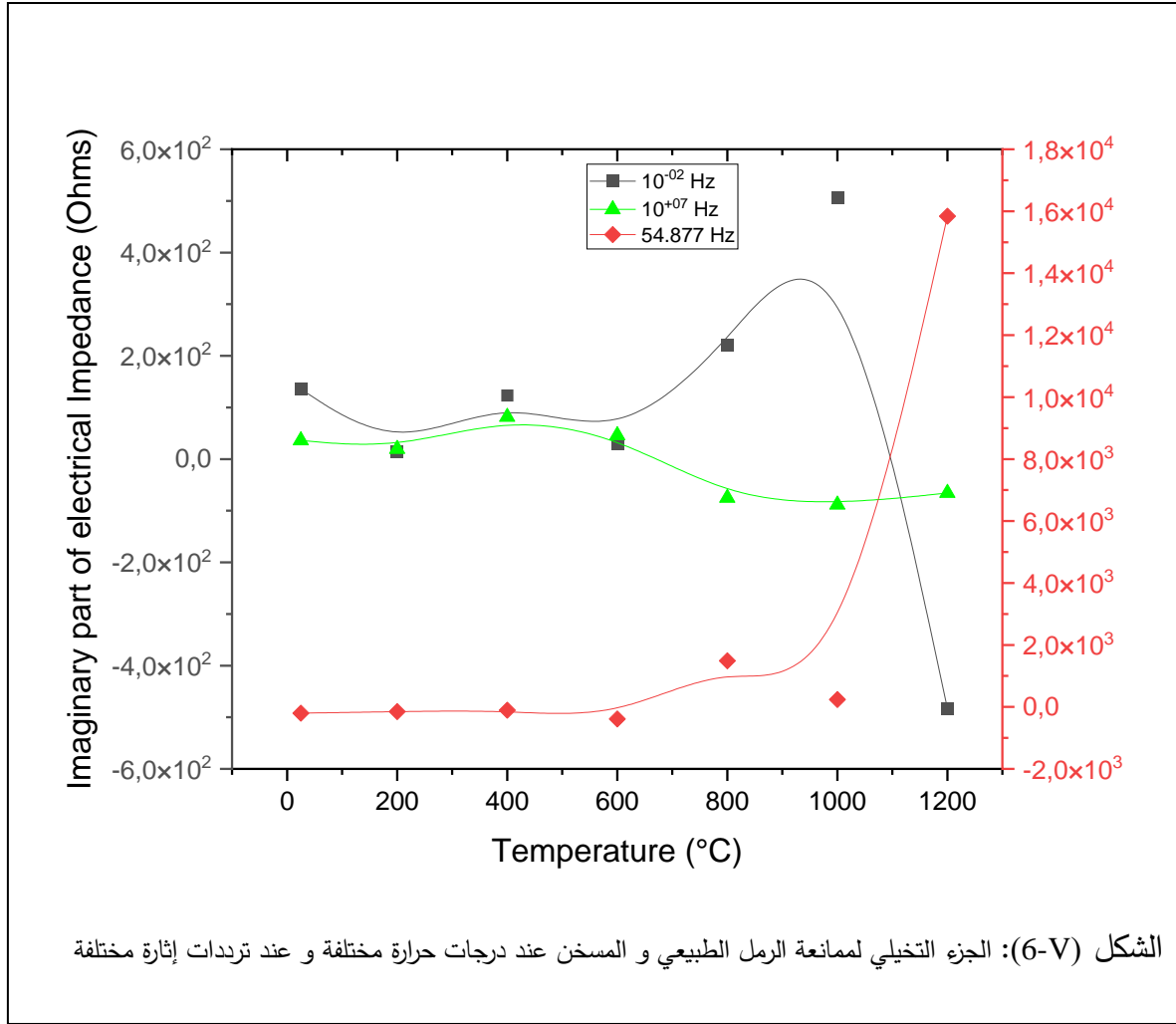
(-) قيمة سالبة

(+) قيمة موجبة

2-2- الجزء التخيلي للممانعة الكهربائية:

يبين الشكل (6-V) وجود اختلاف في قيم الجزء التخيلي للممانعة (المفاعلة) سواء بدلالة

الترددات أو درجات حرارة التسخين.



عند التردد المنخفض كانت قيم الجزء التخليبي موجبةً للعينات المسخنة عند جميع درجات الحرارة، عدا تلك التي عند 1200°C فكانت سالبةً، ممّا يدل على أن رمل منطقة ورقلة يسلك سلوك دائرة حثية، سواءً للرمل الطبيعي أو الرمل المسخن عند درجات حرارة لا تفوق 1000°C ، أمّا ذلك المسخن عند 1200°C فيتغير سلوكه إلى دائرة سعوية. يمكن تفسير هذا بظهور الكريستوباليت (SiO_2)، و هو يختلف عن الكوارتز ألفا في البنية الهندسية، عند تسخين الرمل عند درجة الحرارة 1200°C ، و هو ما أقرّه مشري و زملاؤه [62].

عند الترددات المتوسطة كانت قيم المفاعلة سالبةً للعينة الطبيعية و للعينتين المسخنين عند 200 و 600 درجة مئوية، و موجبةً لباقي العينات.

من جهة أخرى كانت قيم الجزء التخيلي للممانعة الكهربائية عند الترددات المرتفعة من رتبة MHz على عكس ما سجلناه عند الترددات المتوسطة. يمكن تبرير هذه التغيرات بحدوث اهتزاز للذرات عند الترددات العالية، مما يجعلها تغير خصائصها و هو ما ذهب إليه [88] Youngbin Yoon et al. نلخص القيم الموجبة و القيم السالبة للجزء التخيلي للممانعة الكهربائية عند درجات الحرارة المختلفة (200-1200 درجة مئوية) و في ترددات مختلفة في الجدول (2-V).

الجدول (2-V): القيم الموجبة و القيم السالبة للجزء التخيلي للممانعة الكهربائية للعينات المسخنة عند مختلف درجات الحرارة و الترددات

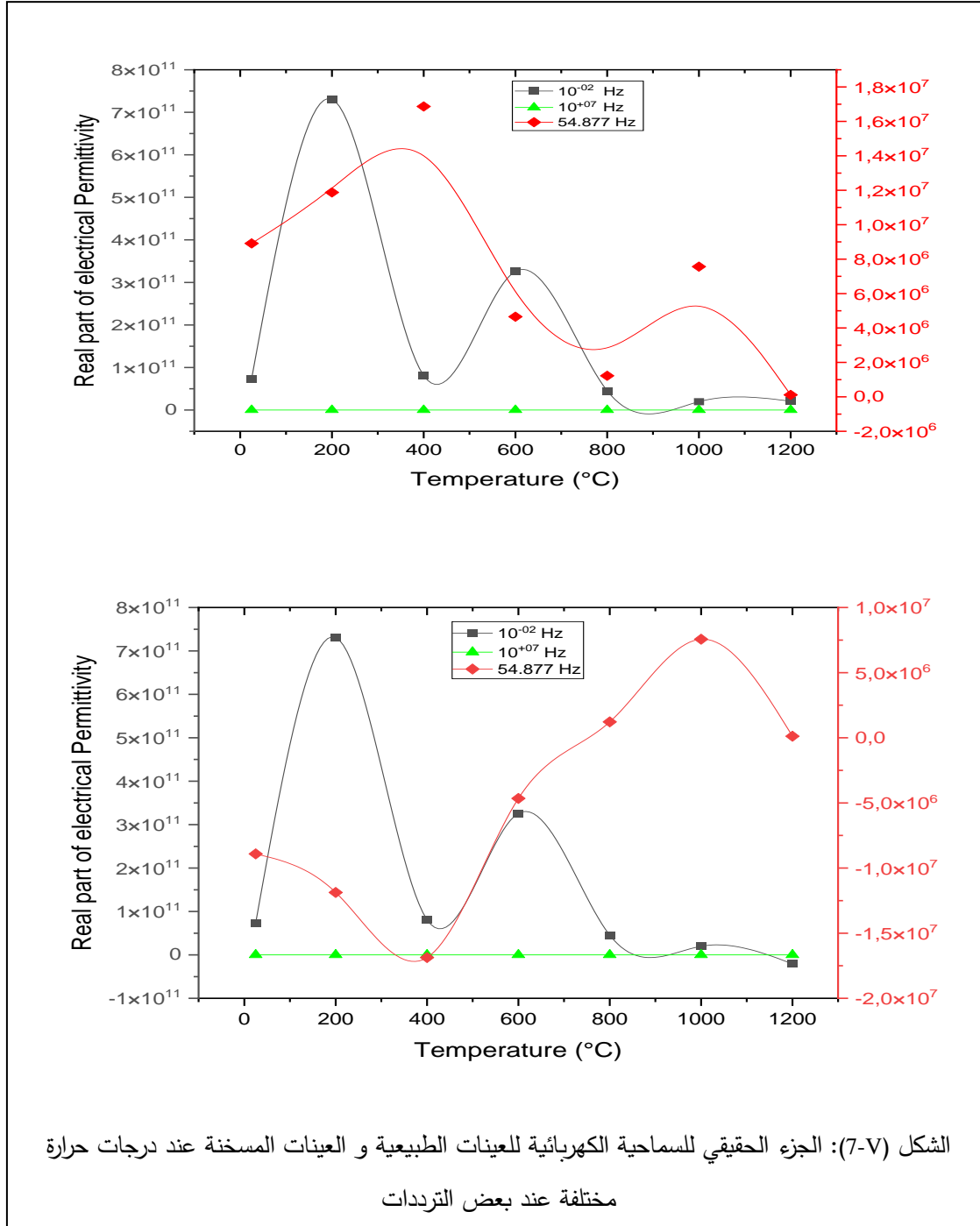
درجة التسخين (°C) / تردد الإثارة (Hz)	غير مسخنة	200	400	600	800	1000	1200
10 ⁻²	+	+	+	+	+	+	-
54.88	-	-	-	-	+	+	+(max)
10 ⁺⁷	+	+	+	+	-	-	-

(+) قيمة موجبة (-) قيمة سالبة (max) أعلى قيمة

3- نتائج قياس السماحية الكهربائية و مناقشتها:

3-1- الجزء الحقيقي للسماحية:

يتكون ثابت العزل الكهربائي (السماحية) من مساهمتين: واحدة من توصيل التيار المستمر عند الترددات المنخفضة و الأخرى من عمليات استقطاب العازل عند الترددات العالية [89]. يتضح من الشكل (7-V) أن السماحية الكهربائية تتناقص بازدياد التردد، فعند التردد المنخفض سجلنا قيم سماحية من رتبة 10⁺¹¹، و في الترددات المتوسطة من رتبة 10⁺⁰⁷، أما عند الترددات المرتفعة فكانت من رتبة 10⁺⁰².



يمكن تفسير تناقص قيم الجزء الحقيقي للسماحية بازدياد التردد كما يلي:

يُعزى ذلك إلى حقيقة أن جزيئات المادة الواقعة تحت تأثير مجال كهربائي خارجي متناوب ستكتسب عزم ثنائي أقطاب، علاوة على ذلك فإن حاملات الشحنة تتراكم فتسُد القطب السالب فضلاً عن أن شحنة الفراغ تؤدي إلى نقصان السعة، و هذا بدوره يؤدي إلى نقصان ثابت العزل [87].

يتضح من الشكل (7-V) أن قيم الجزء الحقيقي للسماحية الكهربائية عند أصغر تردد أخذت قيمةً كبيرةً للعينتين المسختين عند 200 و 600°C، أما أصغر قيمة للسماحية فسجلت عند أعلى تردد للعينة المسخنة عند 400°C.

يمكن تبرير ذلك (القيم الكبيرة للجزء الحقيقي للسماحية الكهربائية) بحقيقة أن حاملات الشحنة المقيدة تحصل تدريجياً على كمية متزايدة من طاقة الإثارة الحرارية، و حيث أنها قادرة على الاستجابة لتغير الحقل الكهربائي الخارجي ذي التردد المنخفض بسهولة أكبر، فإن هذا سيعزز مساهمة هذه الجزئيات في الاستقطاب، مما يؤدي إلى ازدياد الجزء الحقيقي للسماحية الكهربائية [88].

من الملاحظ أن القيم السالبة في الجزء الحقيقي للسماحية الكهربائية تعود إلى طبيعة الدارة المكافئة؛ إذا كانت الدارة سعوية تكون القيم سالبة و إذا كانت حثية تكون القيم موجبة. هذا ما يقودنا إلى رسم المنحنيات بقيم موجبة.

من أجل معرفة تغيرات الجزء الحقيقي للسماحية الكهربائية دون الخوض في طبيعة المادة (فاقدة للطاقة أو منتجة لها) نلخصها بالجدول (3-V).

الجدول (3-V): القيم الموجبة و القيم السالبة للجزء الحقيقي للسماحية الكهربائية للعينات المسخنة عند مختلف درجات الحرارة و الترددات

درجة التسخين (°C) / تردد الإثارة (Hz)	غير مسخنة	200	400	600	800	1000	1200
10 ⁻²	+	+(max)	+	+	+	+	-
54.88	-	-	-	-	+	+	+
10 ⁺⁷	+	+	+	+	-	-	-

(max) أعلى قيمة

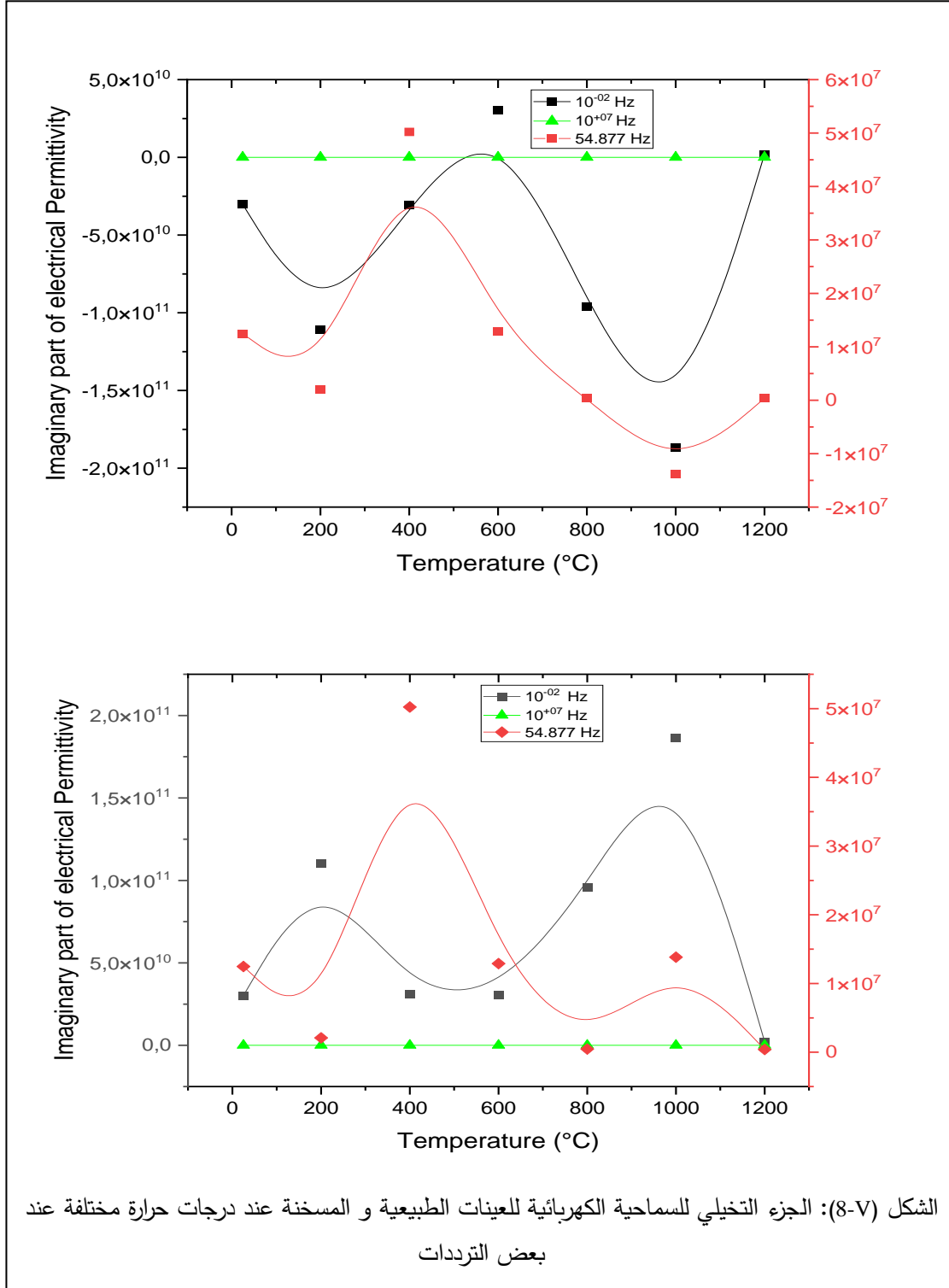
(-) قيمة سالبة

(+) قيمة موجبة

3-2- الجزء التخيلي للسماحية:

التباين في نتائج الجزء التخيلي للسماحية الكهربائية (الفقد العزلي) لعينات رمل منطقة ورقلة

الطبيعية و المسخنة عند درجات حرارة مختلفة و عند ترددات مختلفة مبينة في الشكل (8-V).



الشكل (8-V): الجزء التخيلي للسماحية الكهربائية للعينات الطبيعية و المسخنة عند درجات حرارة مختلفة عند بعض الترددات

نلاحظ من الشكل (8-V) وجود قيم كبيرة للجزء التخلي للسماحية الكهربائية عند أخفض تردد عند العينة المسخنة في 600 درجة مئوية، ثم تبدأ في التناقص كلما زاد التردد. يتفق هذه مع ما نشره

[89]M. R. Das et al.

يمكن شرح ذلك وفقاً لنموذج كوب (Koop's model) [90، 91] الذي ينص على أنه عند الترددات المنخفضة تكون حدود الحبيبات هي المسؤولة عن المقاومة العالية، و الشحنات تحتاج إلى طاقة عالية للقفز بين الحبيبات، بينما نجد أنه عند الترددات العالية تكون الحبيبات هي المناطق المسؤولة عن الناقلية، و تكون مقاومتها منخفضة بسبب ذلك في منطقة الترددات المنخفضة، و تكون المقاومة النوعية الكهربائية مرتفعة بين الحبيبات حيث تصطف حاملات الشحنة عند الحدود الحبيبية، و حتى تحدث عملية القفز الإلكتروني بين الحبيبات يلزم طاقة كبيرة للتغلب على مقاومة الاحتكاك بين ثنائيات القطب أثناء دورانها، و بالتالي سيحصل عندها ضياع كبير في الطاقة عند الترددات المنخفضة، بينما في منطقة الترددات المرتفعة الموافقة لمقاومة نوعية كهربائية منخفضة يكون المطلوب فقط كمية قليلة من الطاقة حتى تحدث عملية القفز الإلكتروني بين الحبيبات، و بالتالي فإن كمية الطاقة الضائعة ستكون قليلة عند الترددات المرتفعة.

من أجل معرفة تغيرات الجزء التخلي للسماحية الكهربائية دون الخوض في طبيعة المادة (فاقدة للطاقة أو منتجة لها) نلخصها بالجدول (4-V).

الجدول (4-V): القيم الموجبة و القيم السالبة للجزء التخلي للسماحية الكهربائية

للعينات المسخنة عند مختلف درجات الحرارة و الترددات

درجة التسخين (°C)	غير مسخنة	200	400	600	800	1000	1200
تردد الإثارة (Hz)							
10^{-2}	-	-	-	+ (max)	-	-	+
54.88	+	+	+	+	+	-	+
10^{+7}	+	+	+ (min)	+	+	+	+

(min) أقل قيمة

(max) أعلى قيمة

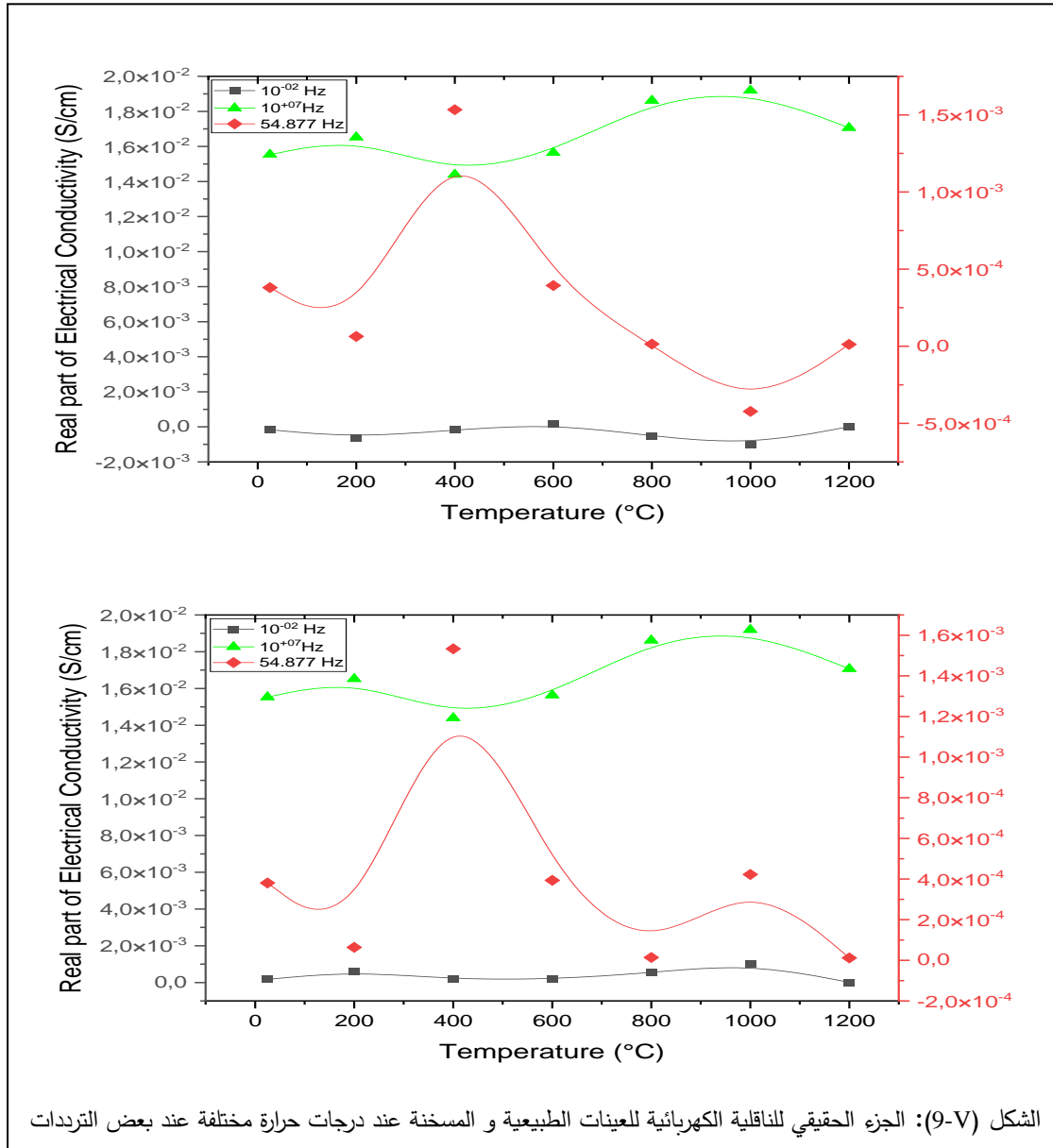
(-) قيمة سالبة

(+) قيمة موجبة

4- نتائج قياس الناقلية الكهربائية و مناقشتها:

4-1- الجزء الحقيقي للناقلية الكهربائية:

يبين الشكل (9-V) تغير قيمة الجزء الحقيقي للناقلية عند الترددات المنخفضة و المتوسطة بزيادة درجة حرارة تسخين العينة مما يدل على أن الرمل حساس جداً لتغيرات درجة حرارة التسخين؛ إذ كلما كانت هذه الدرجة كبيرة زادت التفاعلات الكيميائية، خاصةً و أن الرمل متعدد الأطوار، فتزداد معها التحولات الطورية، و التي بدورها تؤدي إلى تغيير الخصائص الفيزيائية للرمل، و التي من ضمنها الناقلية الكهربائية.



لاحظنا أيضا أن قيم الجزء الحقيقي للناقلية عند الترددات المرتفعة لم تتغير بشكل ملفت للعينات المسخنة عند درجات حرارة مختلفة، إذ كانت كلها من رتبة 10^{-2} S/cm، على خلاف منطقتي الترددات المنخفضة و المتوسطة سجّلنا تباينا غير كبير في قيم الجزء الحقيقي للناقلية الكهربائية، رجّحنا أن يكون ناتجا عن تغيّر الأطوار البلورية للعينات نتيجة درجات حرارة التسخين.

عند ثبات درجة الحرارة فإن الجزء الحقيقي للناقلية الكهربائية يزداد بازدياد التردد، و لقد بلغت قيمتها العظمى عند أعلى تردد. يمكن أن نُرجع ذلك إلى مساهمة الأنواع المختلفة من الاستقطاب (الإستقطاب البيني، الإستقطاب الاتجاهي، الإستقطاب الأيوني، الإستقطاب الإلكتروني).

عند الترددات المنخفضة تكون للاستقطابية البينية و الاستقطابية الاتجاهية مساهمة كبيرة في قيمة الناقلية الكهربائية، بينما عند الترددات المرتفعة فإن تأثير بعض أنواع الاستقطاب يقل كثيرا حتى يكاد يهمل تأثيره مثل الاستقطاب البيني، و بزيادة التردد لا يبقى سوى الاستقطابية الإلكترونية، مما يؤدي إلى تزايد كبير في قيمة الناقلية.

نسجّل من الشكل (9-V) أيضا أن أقل قيمة للجزء الحقيقي للناقلية كانت عند أخفض تردد للعينة المسخنة عند أعلى درجة حرارة 1200°C . نرجح ذلك لدور الكريستوباليت، و هو الوحيد الذي يظهر عند هذه الدرجة، و كذلك زيادة النسبة المئوية للولوستونيت في هذه العينة.

من الملاحظ أن القيم السالبة للجزء الحقيقي للناقلية تعود إلى طبيعة المادة (فاقدة للطاقة أو منتجة لها).

بقصد معرفة تغيرات الجزء الحقيقي للناقلية الكهربائية دون الخوض في طبيعة المادة (فاقدة للطاقة أو منتجة لها) نلخصها بالجدول (5-V).

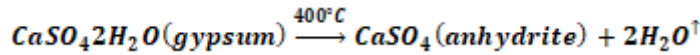
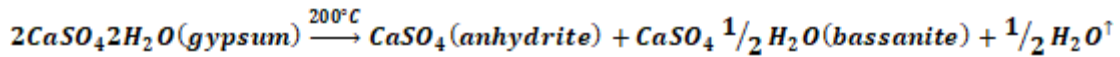
الجدول (5-V): القيم الموجبة و القيم السالبة للناقلية الكهربائية للعينات المسخنة عند مختلف درجات الحرارة و الترددات

درجة التسخين (°C) / تردد الإثارة (Hz)	غير مسخنة	200	400	600	800	1000	1200
10 ⁻²	-	-	-	+	-	-	+(min)
54.88	+	+	+	+	+	-	+
10 ⁺⁷	+	+	+	+	+	+(max)	+

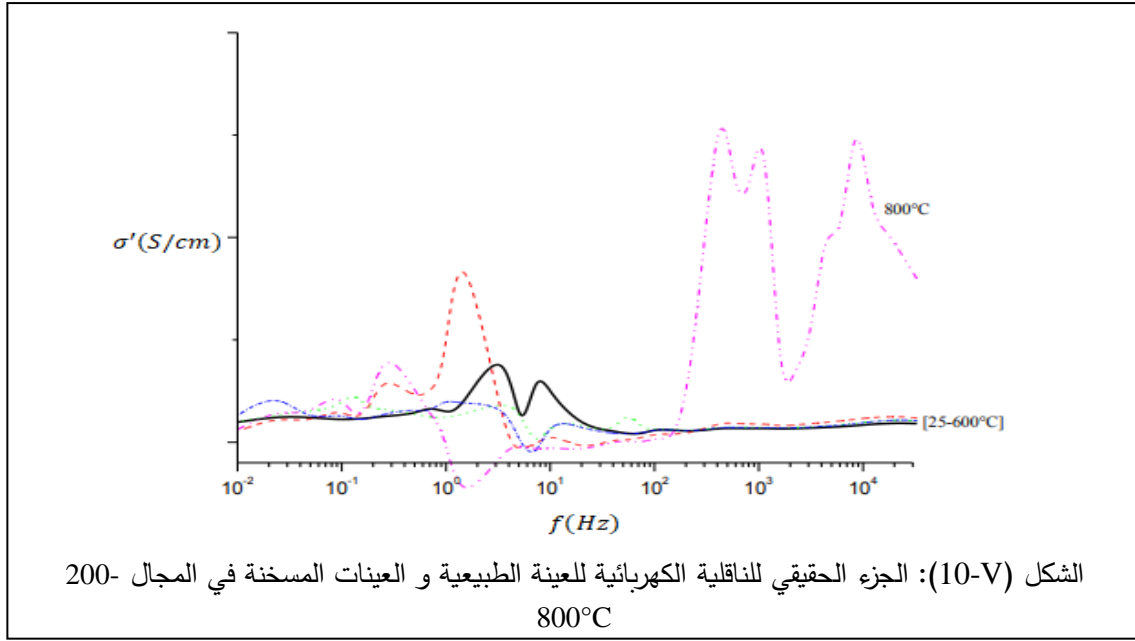
(+) قيمة موجبة (-) قيمة سالبة (max) أعلى قيمة (min) أقل قيمة

يلاحظ أيضا من الشكل (10-V) في مجال الترددات (10²-3.10⁴ Hz) أن العينات الطبيعية و المسخنة عند درجات الحرارة 200 و 400 و 600 درجة مئوية لم تتغير قيمة الجزء الحقيقي لناقليتها الكهربائية إلا تغيرا طفيفاً، و لا يبدأ أثر الحرارة على الرمل في الظهور إلا عند العينة المسخنة عند الدرجة 800 درجة، مما يدل على أن هذا المجال من درجات الحرارة لا يحدث سوى تغيرات طفيفة، و أن محتوى الرمل من الشحنات الحرة لم يتغير.

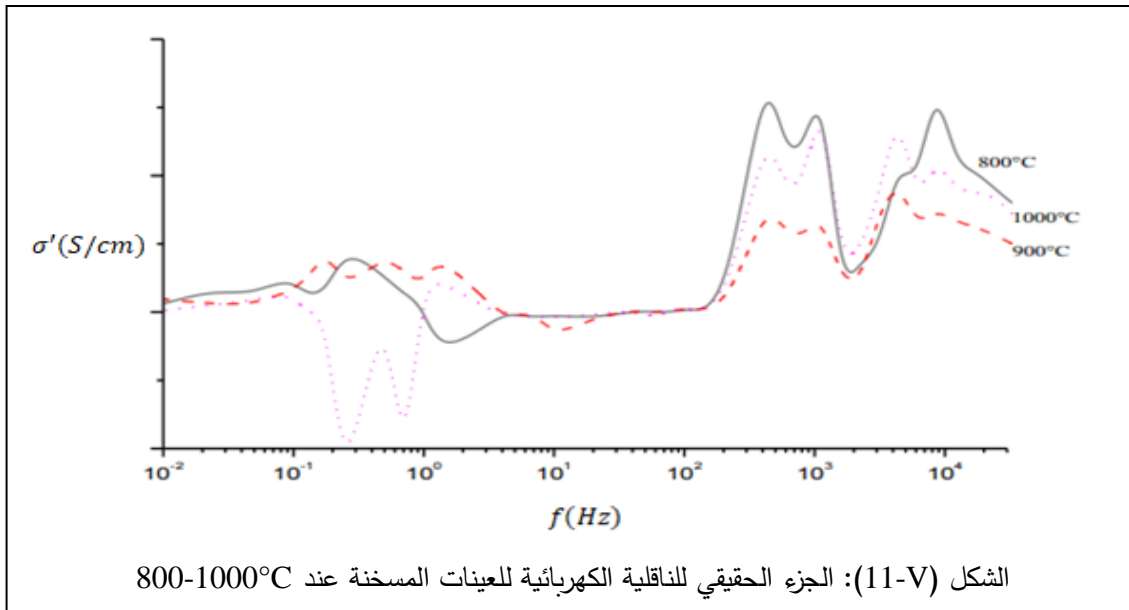
هذه الملاحظات تتفق مع ما أقره مشري[62]، حيث أن التسخين في المجال (200-600) درجة مئوية ينجم عنه تبخر الماء فقط مع انطلاق بعض الغازات، و بالتالي لا يحدث أي تغيير في العينة، على الأقل بالنسبة للروابط الكيميائية، و هو ما تُظهره المعادلة الكيميائية التالية:



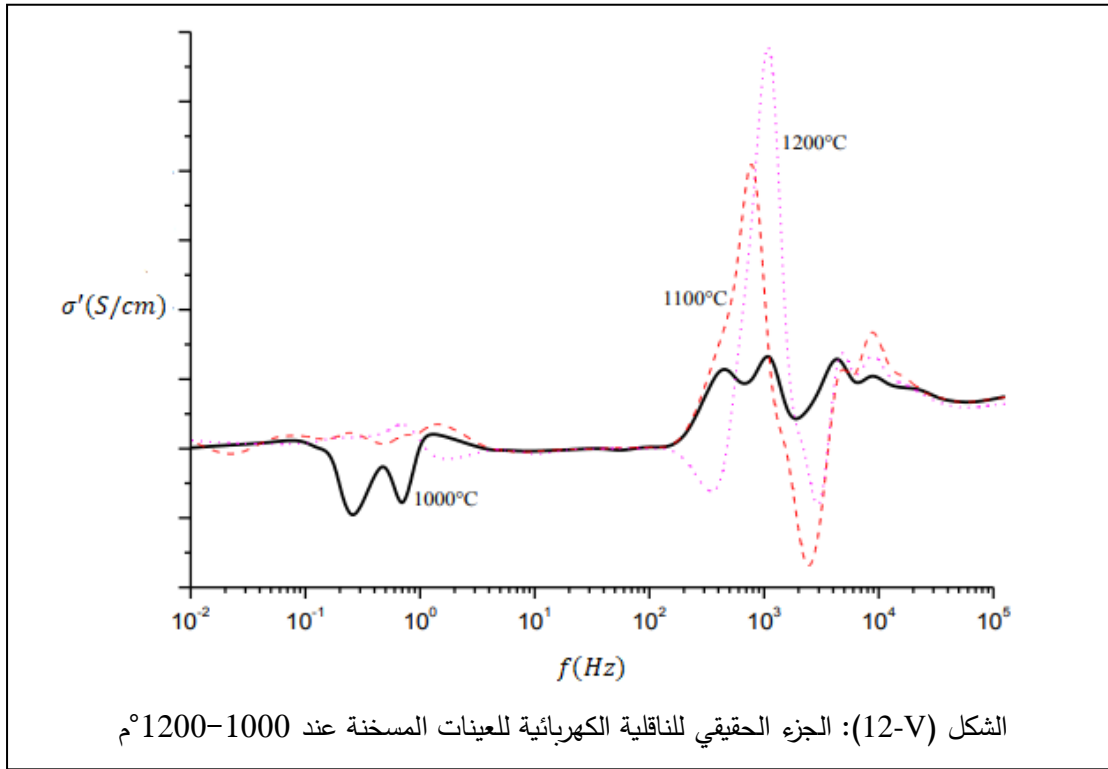
كما أن أثر حرارة التسخين لا يظهر إلا ابتداءً من 800 درجة، حيث يتحول كل الجبس إلى أنهيدريت (anhydrite).



من الشكل (10-V) يتضح أن تغير قيمة الجزء الحقيقي للناقلية عند التردد 2 Hz راجع إلى مركب البازانيت (bassanite)، لأنه لا يظهر سوى بعد تسخين العينة عند 200°C، و بعدها يختفي. نرجح ظهور التغير النوعي للجزء الحقيقي للناقلية عند المجال 800-1000°C، الشكل (11-V)، إلى تحول كل الجبس إلى أنهيدريت بعد 800°C، كما أن تسخين الرمل عند 1000°C يسبب بداية حدوث تفاعل بين الكوارتز و الأنهدريت، الذي ينتج عنه الـ وولاستونيت وفق المعادلة التالية:



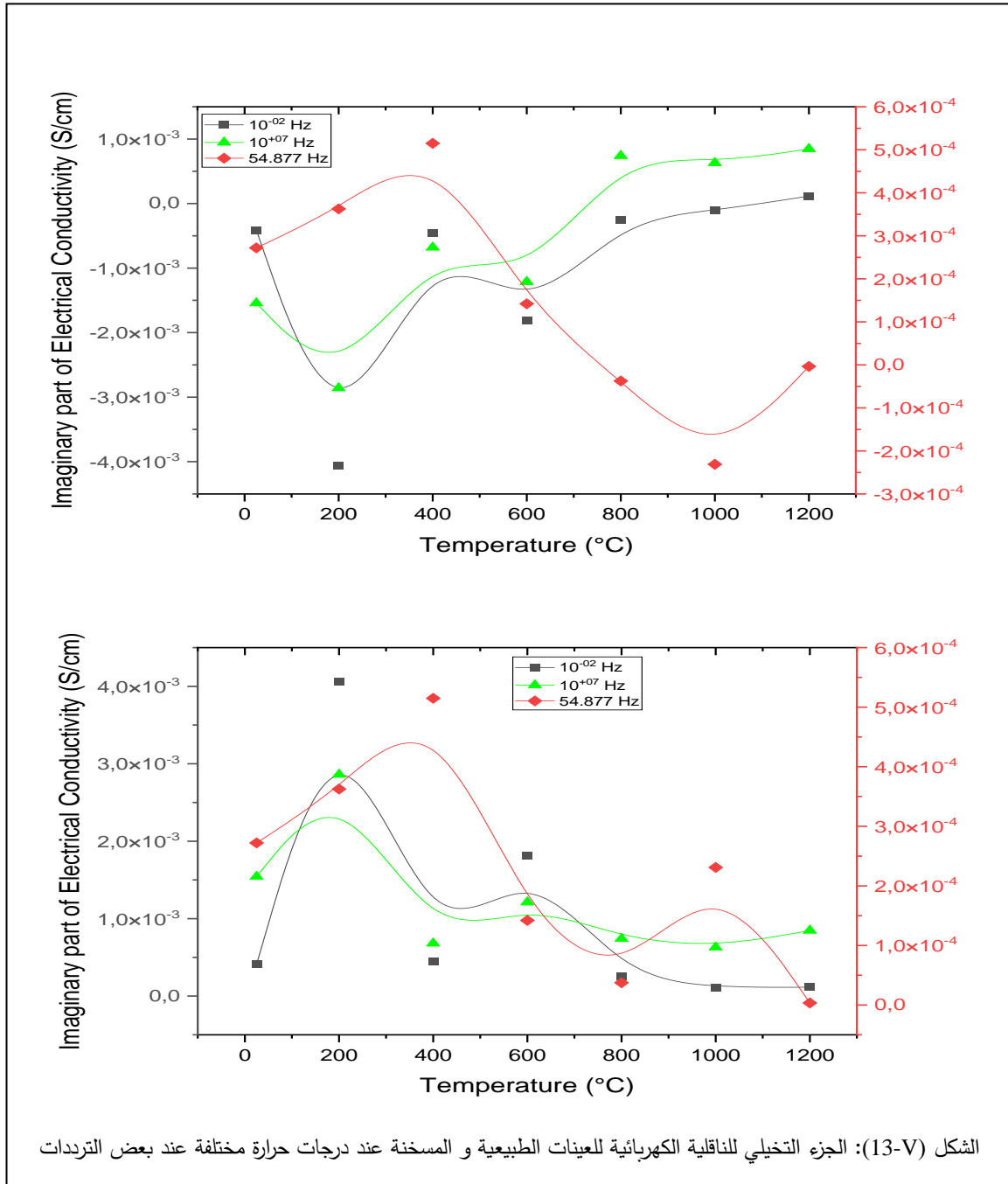
هذا يعزز ما ذكرناه سابقا من كون الأنهدريت هو المسؤول عن الناقلية الكهربائية في منطقة الترددات ($2.10^2-3.10^4$ Hz)؛ إذ نلاحظ تراجع قيم الجزء الحقيقي للناقلية عند هذه الترددات للعينة المسخنة عند 1000°C ، الشكل (11-V)، في حين يظهر تحول نوعي واضح عند المنطقة ($0.1-1\text{Hz}$)، يمكن إرجاعه إلى ظهور وولاستونيت، حيث أنه المركب الوحيد الذي يظهر عند 1000°C . يُظهر الشكل (12-V) تغيراً نوعياً آخر للجزء الحقيقي للناقلية عند الترددات ($10^2-5.10^3\text{Hz}$)، نرجح أن يكون راجعاً إلى الكريستوباليت، لأن التسخين عند 1200°C يُحوّل الكوارتز ألفا إلى كريستوباليت، و هو يختلف عن الكوارتز ألفا في البنية الهندسية فقط.



4-2- الجزء التخلي للناقلية الكهربائية:

يبين الشكل (13-V) أن قيم الجزء التخلي للناقلية الكهربائية عند الترددات المنخفضة تكون من رتبة $10^{-3}-10^{-4}\text{S/cm}$ ، و عند الترددات المتوسطة تنخفض إلى 10^{-6}S/cm للعينة المسخنة عند 1200°C ، و هي بذلك أقل قيمة.

أما عند الترددات المرتفعة فلقد كانت قيم الجزء التخيلي للناقلية الكهربائية قريبةً من تلك المسجلة عند الترددات المنخفضة مع تسجيل أكبر قيمة للعينة المسخنة عند درجة الحرارة 200°C. يمكن القول أن سبب وجود قيم سالبة للجزء التخيلي للناقلية الكهربائية مرتبط بنوعية الدارة المكافئة؛ فإذا كانت الدارة المكافئة حثيةً فإن قيم الجزء التخيلي تكون سالبةً، وإذا كانت الدارة المكافئة سعويةً فإن قيم الجزء التخيلي للناقلية الكهربائية تكون موجبةً.



الشكل (13-V): الجزء التخيلي للناقلية الكهربائية للعينات الطبيعية و المسخنة عند درجات حرارة مختلفة عند بعض الترددات

على العموم يمكن القول أن التردد و درجة حرارة تسخين العينات لا يؤثران بشكل كبير على قيم الجزء التخيلي للناقلية الكهربائية.

بغرض معرفة تغيرات الجزء التخيلي للناقلية الكهربائية دون التطرق إلى طبيعة المادة (فاقدة للطاقة أو منتجة لها) نلخصها بالجدول (6-V).

الجدول (6-V): القيم الموجبة و القيم السالبة للجزء التخيلي للناقلية الكهربائية للعينات المسخنة عند مختلف درجات الحرارة و الترددات

درجة التسخين (°C) / تردد الإثارة (Hz)	غير مسخنة	200	400	600	800	1000	1200
10 ⁻²	-	-	-	-	-	-	+
54.88	+	+	+	+	-	-	-(min)
10 ⁺⁷	-	-	-	-(max)	+	+	+

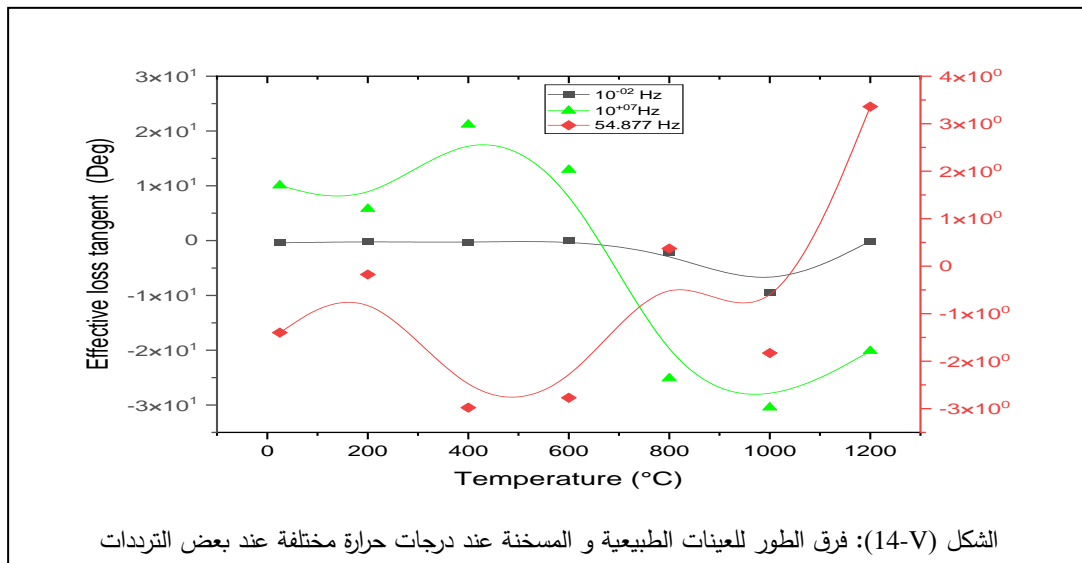
(+) قيمة موجبة (-) قيمة سالبة (max) أعلى قيمة (min) أقل قيمة

5- نتائج قياس الفقد المماسي:

يظهر الفقد المماسي بسبب فقدان الطاقة داخل العينة عند تردد معين، و هو ذو علاقة مباشرة بالجزء الحقيقي و الجزء التخيلي لكل من الممانعة الكهربائية و كذا السماحية.

الشكل (14-V) يُظهر العلاقة بين فرق الطور و تردد الإثارة الكهربائية لعينات الرمل الطبيعية و

كذا المسخنة عند درجات حرارة بين 200 و 1200°C.



يمكن ملاحظة أن أكبر قيمة للفقد المماسي سجلت عند الترددات المرتفعة للعينة المسخنة عند 600°C ، وأن أقل قيمة عند المجال نفسه من الترددات كانت للعينة المسخنة عند 1000°C . نرجع ذلك إلى زيادة النسبة المئوية لمركب الأنهدريت عند 600°C ، وظهور مركب الـ وولاستونيت بنسبة ضئيلة عند 1000°C .

خلاصة عامة

خلاصة عامة:

الرمل مورد طبيعي مهم و متوفر بكثرة في صحرائنا، هذا ما جعل الباحثين يهتمون بدراسته، فمنهم من اهتم بدراسة شكله المورفولوجي و منهم من ركز في دراسته على تكوينه البلوري. أما في دراستنا هذه فلقد ركزنا على دراسة الخواص الكهربائية لرمل منطقة ورقلة و ذلك بقياس كل من الممانعة الكهربائية، السماحية و الناقلية الكهربائية، و فرق الطور في الحالة الطبيعية لرمل منطقة ورقلة و في للرمل المسخن عند درجات مختلفة من 200 إلى 1200 درجة مئوية بقفزة قدرها 200 درجة.

لقد قمنا بقياس هذه الخواص الكهربائية باستعمال جهاز مطيافية الممانعة، هذا الجهاز مكننا من قياس الخواص سالفة الذكر بدلالة التردد و في درجات حرارة مختلفة، فكانت الخلاصة كما يلي:

- التردد له دور في تحديد طبيعة العينة المدروسة سواء كانت العينة منتجة للطاقة أو فاقدة لها.
- للتردد أيضا دور في معرفة الدارة المكافئة للعينة (دارة حثية أو دارة سعوية).
- الجزء الحقيقي للممانعة الكهربائية يكون سالبا عند الترددات المنخفضة للعينة الطبيعية و كذا للعينات المسخنة حتى 400 درجة و كذا في المجال 800-1000 درجة (العينات في هذه الدرجات تكون فاقدة للطاقة)، أما عند 600 و 1200 درجة مئوية فتكون قيم الجزء الحقيقي موجبة، مما يجعلها منتجة للطاقة.
- تنخفض قيم الجزء الحقيقي للممانعة بزيادة التردد.
- الجزء التخيلي للممانعة يأخذ قيما سالبة عند الترددات المنخفضة و في أعلى درجة تسخين، في هذه الحالة تلعب العينات دور دارة مكافئة سعوية، أما في درجات الحرارة المتبقية فتلعب العينات دور دارة مكافئة حثية.

- عند الترددات العالية يتغير دور العينات، فتصبح في مجال درجات الحرارة 800-1200 درجة دارة مكافئة سعوية.
 - إشارة الجزء الحقيقي للسماحية الكهربائية تكون متعلقة بطبيعة العينة؛ فإذا كان لها دور دارة مكافئة سعوية تكون سالبة، فإذا كان لها دور دارة مكافئة حثية فتكون موجبة).
 - تناسب عكسي بين التردد و قيم الجزئين الحقيقي و التخيلي للسماحية الكهربائية؛ فكلما ازداد التردد نقصت قيم الجزئين الحقيقي و التخيلي للسماحية.
 - إشارة الجزء التخيلي للسماحية الكهربائية و الجزء الحقيقي للناقلية الكهربائية يكون متعلقا بطبيعة العينة؛ فالعينة الفاقدة للطاقة تكون سالبة، و العينة المنتجة للطاقة تكون موجبة.
 - إرتفاع قيم الجزء الحقيقي للناقلية الكهربائية بارتفاع التردد؛ إذ سُجِلت أعلى قيمة للناقلية عند أعلى تردد.
 - عند درجات الحرارة المرتفعة 1200 درجة سجلنا أقل قيمة للناقلية الكهربائية.
 - إشارة الجزء التخيلي للناقلية الكهربائية يكون متعلقا بطبيعة العينة؛ فالعينة الفاقدة للطاقة تكون قيم الجزء التخيلي موجبة، و للعينة المنتجة للطاقة تكون قيم الجزء التخيلي سالبة.
 - التغير الكبير الذي حدث في قيم الجزء التخيلي للناقلية كان عند الترددات المتوسطة و عند درجة الحرارة 1200 درجة مئوية.
 - فرق الطور يتأثر بالتردد و درجة الحرارة تأثرا طفيفا.
- في الأخير نعتقد أننا قد تمكنا من تحقيق الهدف المرجو من الأطروحة، و هو معرفة مدى تأثير الحرارة على الخواص الكهربائية (الممانعة، السماحية و الناقلية الكهربائية) لرملة منطقة ورقلة، و كذلك دور التغير في الأطوار البلورية في تغير الخواص الكهربائية سالفة لذكر.

تقودنا هذه النتائج إلى بعض الآفاق المستقبلية من بينها:

- زيادة رفع درجة الحرارة إلى درجات أعلى و إعادة القياسات.
- إعادة القياسات أثناء ارتفاع درجات حرارة.
- قياس الخواص الضوئية و الصوتية و الميكانيكية لرملة منطقة ورقلة باستعمال الجهاز نفسه.

الملحقات

-1 طرق تحليل البنى المجهرية للمواد:

1-1- تحليل البنية المجهرية بواسطة انعراج الأشعة السينية (DRX):

حيود الأشعة السينية هي طريقة مستخدمة عالمياً لتحديد طبيعة و بنية المواد المبلورة. تنطبق هذه الطريقة فقط على الوسائط البلورية (المعادن والسبائك المعدنية والصخور والبلورات والمعادن والأصباغ والطين ...) التي لها خصائص الحالة البلورية، أي ترتيب الذرات المكونة بطريقة دورية ومنظمة في مستويات شبكية ثلاثية الأبعاد. مجالات تطبيق حيود الأشعة السينية متنوعة و من بينها (التحقق من مادة جديدة ، تفاعل كيميائي أو فيزيائي ، دراسة الصخور ، أو هياكل البروتين، مراقبة جودة منتج صناعي ما، ... إلخ)

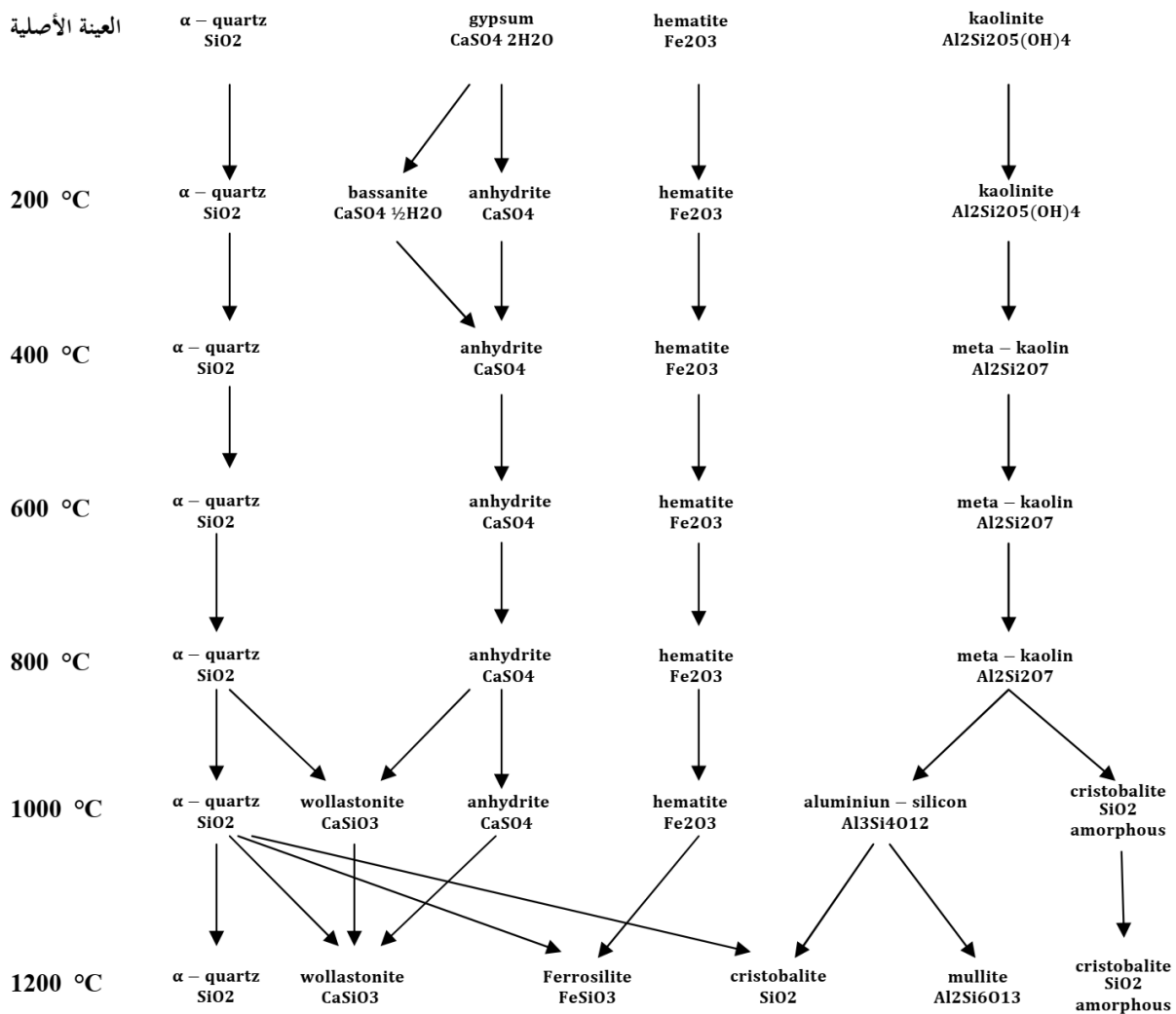
1-2- مطيافية التحليل بفلورة الأشعة السينية XRF:

يعد مطياف فلورة الأشعة السينية (XRF) أداة أشعة سينية تستخدم في التحليلات الكيميائية الروتينية غير هدامة نسبياً للصخور والمعادن والرواسب والسوائل. وهو يعمل على مبادئ التحليل الطيفي المشتت لطول الموجة والتي تشبه الدارة الإلكترونية الدقيقة (EPMA). ومع ذلك ، لا يمكن لـ XRF بشكل عام إجراء تحليلات بأحجام موضعية صغيرة (2-5) ميكرون، لذلك يتم استخدامه عادةً لتحليل المواد الجيولوجية. إن السهولة النسبية والتكلفة المنخفضة لإعداد العينات، واستقرار وسهولة استخدام مطياف الأشعة السينية تجعل هذه واحدة من أكثر الطرق المستخدمة على نطاق واسع لتحليل العناصر الرئيسية والصغيرة في الصخور والمعادن والرواسب.

الجدول (1): التحليل النوعي لنتائج انعراج الأشعة السينية للعيينة الأصلية و العينات المسخنة من رمل كثبان منطقة

ورقلة - الإشارة (0) تشير إلى وجود المركب في العينة المدروسة [62]

زوايا الانعراج 2θ (°)	معاملات ميلر h k l	d (Å)	المركبات	العيينة الأصلية	العينات المسخنة عند (° C)					
					200	400	600	800	1000	1200
11.69	0 2 0	7.5905	جيس	o						
14.81	2 0 0	5.9922	bassanite ^ل		o					
20.87	1 0 0	4.2548	كوارتز	o	o	o	o	o	o	o
22.01	1 0 1	4.0561	crystalite ^ل							o
23.37	4 0 0	3.8230	wollastonite ^ل							o
23.45	1 3 0	3.7928	جيس	o						
25.75	0 2 0	3.4861	anhydrite ^ل		o	o	o	o	o	
26.69	0 1 1	3.3430	كوارتز	o	o	o	o	o	o	o
27.67	4 0 1	3.2358	wollastonite ^ل							o
29.19	0 4 1	3.0609	جيس	o						
29.79	4 0 0	2.9961	bassanite ^ل		o					
30.23	3 2 0	2.9636	wollastonite ^ل						o	o
31.15	2 0 0	2.8647	جيس	o						
31.91	2 0 2	2.7943	anhydrite ^ل		o	o	o	o	o	
33.41	2 0 0	2.6802	جيس	o						
36.61	1 1 0	2.4565	كوارتز	o	o	o	o	o	o	o
38.77	2 0 2	2.3290	anhydrite ^ل			o	o	o	o	
42.51	2 0 0	2.1274	كوارتز	o	o	o	o	o	o	o
49.39	1 3 2	1.8485	anhydrite		o	o	o	o	o	
50.21	1 1 2	1.8176	كوارتز	o	o	o	o	o	o	o
54.93	0 2 2	1.6715	كوارتز	o	o	o	o	o	o	o
60.03	1 2 1	1.5413	كوارتز	o	o	o	o	o	o	o
68.21	0 3 1	1.3718	كوارتز	o	o	o	o	o	o	o
75.75	0 3 2	1.2550	كوارتز	o	o	o	o	o	o	o
79.75	1 2 3	1.1992	كوارتز	o	o	o	o	o	o	o
83.87	1 3 1	1.1522	كوارتز	o	o	o	o	o	o	o



الشكل (1): ملخص التحولات الطورية و الكيميائية لرمل كثنان منطقة ورقلة بفعل الحرارة

[62] (200-1200°C)

المراجع

- [1] Doug Donald (26-4-2018), "The Eight Most Abundant Elements in the Earth's Crust" ,
www.sciencing.com, Retrieved 21-5-2019. Edited.
- [2] Benjamin Elisha Sawe (17-7-2018), "The Most Abundant Elements In The Earth's
Crust" ,www.worldatlas.com,Retrieved.21-5-2019.Edited
- [3] BEDDIAF Samiha,"Determination of the molecular composition and the quartz
concentration in the different granular types of Ouargla dunes sand using
spectroscopic techniques" Doctorate LMD Thesis,University of Kasdi Merbah
Ouargla,2016
- [4] Joseph Castro (28-5-2013), "What Is Sand?" ,www.livescience.com, Retrieved 25-8
2018. Edited.
- [5] "What is sand made of", www.sandatlas.org, Retrieved 25-8-2018. Edited.
- [6] "SAND COMPOSITION", www-odp.tamu.edu, Retrieved 25-8-2018. Edited.
- [7] "Sand minerals", www.sandatlas.org, Retrieved 25-8-2018. Edited.
- [8] M. L. Mechri, S. Chihi, Study of the atomic composition of the sand dunes of Ouargla
region by XRF spectroscopy, SEM, EDX, and ANN. Ann Sci Technol Vol. 4, N°. 2,
2012, page 69-79.
- [9] Samiha Beddiaf, Smail Chihi, Hamza Bouguettaia, Mohammed Laid Mechri, Naouia
Mahdadi,"Qualitative and Quantitative Evaluation of Quartz in Different Granular
Types of Ouargla Region Sand Dunes – Algeria",Silicon DOI 10.1007/s12633-015-
9324-5,Springer Science+Business Media Dordrecht 2015
- [10] Naouia MAHDADI and Smail CHIHI,"Identification of molecular composition of
chromatic varieties of sand dunes of Ouargla region, by using absorption infrared
spectroscopy (FTIR)", Annales des Sciences et Technologie Vol6, N°2, Octobre
2014, Editée par l'Université Kasdi Merbah – Ouargla ISSN 2170-0672

-
- [11] Définition de conducteur, sur le site mediadico.com - consulté le 11 octobre 2012
- [12] YAHYAOUI Hanen, Matériaux isolants pour appareillages haute tension dans le domaine du courant continu Comportement et vieillissement, Délivré par l'UNIVERSITE de MONTPELLIER, Le 10 Avril 2015.
- [13] R. Fournie, « Les isolants en électrotechnique, concept et théorie », Édition Eyrolles, 1986.
- [14] R. Coelho et B. Aladenize, « Les diélectriques-propriétés diélectriques des isolants », Edition Hermès Paris, 1993.
- [15] G. Blaise, « Microscopic and Macroscopic description of the polarization of dielectric materials. The concept of Polaron applied to the conduction and trapping of charges », Interdisciplinary conference on dielectric, Supplément de revue: Le vide, les couches minces, No 260, 1992.
- [16] J. C. Maxwell, « A Treatise on Electricity and Magnetism », Clarendon, 1881.
- [17] J. R. Macdonald, « Theory of AC Space-charge polarization effects in Photoconductors, Semiconductors and Electrolytes », Physical review letters, Vol. 92, No 1, pp. 4-17, 1953.
- [18] R. Coelho, « Sur la relaxation d'une charge d'espace », Revue de Physique Appliquée, No 18, pp. 137-146, 1983.
- [19] T. Sebastian, R. Uvic & H. Jantunen (2015) Low-loss dielectric ceramic materials and their properties, International Materials Reviews, 60:7, 392-412, DOI: 10.1179/1743280415Y.0000000007.
- [20] "Semiconductor", www.britannica.com, Retrieved 2-5-2019. Edited.
- [21] Pr Robert Valls, Dr Richard Frèze, "PROPRIÉTÉS ET STRUCTURE DES SEMI-CONDUCTEURS", robert.valls@univ-amu.fr

-
- [22] H. Mathieu, physique des semiconducteurs et des composant électroniques, édition Dunod. Paris (2009).
- [23] R. Stern and J. Perry. Low-energy electron-diffraction dispersion surfaces and band structure in three-dimensional mixed laue and bragg reflections. *Reviews of Modern Physics*, 41(2) :275–295, 1969.
- [24] W. A. Harrison. *Electronic structure and the properties of solids: the physics of the chemical bond*. Dover Publications, 1989.
- [25] Basil Salamé, *Mesure de Charges dans les Matériaux Semi-conducteurs et les Métaux avec une Méthode Élasto-électrique*, THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE, soutenue le 19 Juin 2015
- [26] Professeur Olivier Bonnaud, *Physique des Solides, des Semiconducteurs et Dispositifs*, Groupe Microélectronique/IETR, Université de Rennes 1, Juin 2003
- [27] Mary Bagley (2014-7-23), "Properties of Matter: Solids" *livescience*, Retrieved 2019-11-16. Edited.
- [28] Anne Helmenstine (2018-10-29), "10 Examples of Solids, Liquids, Gases, and Plasma" *science notes*, Retrieved 2019-10-10. Edited.
- [29] E.J.Kim and Y.Ohki "Ionic behavior of dc conduction in polyetheretherkerone. " *IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul.* Vol.2 N°1, Feb.1995, pp 74-81.
- [30] T.Yamada, T. Mizutani and M.Ieda "Anomalous Discharging Current Peak in Unstretched α -Form Polyvinlidene Fluoride. " *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.23 N° 6, June 1984 pp. 738-740.
- [31] D.K. Das-Gupta "Conduction Mechanism and High-Field Effects in Synthetic Insulating Polymers" *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.* Vol.4 N°2, April 1997, pp 149-156.
- [32] Y.Segui "Courants de conduction" *Technique de l'ingénieur*, D2301, 2000.

- [33] D.K.Das Gupta and K.Joyner "On the nature of absorption currents in polyethylene terephthalate (PET)" J.Phys. D: App. Phys., Vol.9, 1976, pp 829-840.
- [34] MOUDOUD Mustapha, "ETUDE DE LA CONDUCTION ELECTRIQUE DANS LES POLYMERES ISOLANTS", THESE DE DOCTORAT, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté de Génie Electrique et d'Informatique, Département d'Electrotechnique, Soutenu le : 21 / 12 / 2010
- [35] باسم عبد اللطيف غالب الجمعة، "المقاومة و درجة الحرارة"، كلية العلوم للبنات-قسم فيزياء الليزر، 2017/03/26
- [36] Jalal Azadmanjiri, Christopher C. Berndt, James Y Wang, Ajay Kapoor, "A review on hybrid nanolaminate materials synthesized by deposition techniques for energy storage applications" February 2014 Journal of Materials Chemistry A 2(11) DOI: 10.1039/C3TA14034B
- [37] Brijesh Kumar, Brajesh Kumar Kaushik, Yuvraj Singh Negi , "Perspectives and challenges for organic thin film transistors: Materials, devices, processes and applications", January 2014 Journal of Materials Science Materials in Electronics 25(1) DOI: 10.1007/s10854-013-1550-2
- [38] http://300abad.blogspot.com/2015/02/blog-post_23.html
- [39] <https://www.argaam.com/ar/article/articledetail/id/951886>
- [40] Glossary of terms in soil science (PDF). Ottawa: Agriculture Canada. 1976. p. 35. ISBN 978-0662015338.
- [41] Padmalal, Maya (2014). "Sources of Sand and Conservation". Sand Mining. Springer, Dordrecht. pp. 155–160. ISBN 978-94-017-9143-4.
- [42] Seaweed also plays a role in the formation of sand. Susanscott.net (1 March 2002). Retrieved on 24 November 2011.
- [43] Maria Jolanta Sulewska, "Analysis of changes in the system of identification and classification of soils", MATEC Web of Conferences 262:04003 . January 2019

- [44] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Koppen_World_Map_BWh.png
- [45] M S Kovacevic, D Jurić-Kačunić, L Libric, G Ivoš, “Engineering soil classification according to EN ISO 14688-2:2018”, *Gradevinar* 70(10):873-879, October 2018, DOI:10.14256/JCE.2437.2018
- [46] Lara B. Hedrick, James T. Anderson, Stuart A. Welsh, Lian-Shin Lin, *Sedimentation in Mountain Streams: A Review of Methods of Measurement*, Published Online March 2013, *Natural Resources*, 2013, 4(1), 92-104
- [47] <http://mix.msfc.nasa.gov/abstracts.pp=743>
- [48] Al-abadi L (2009) Study of the optical characters of quartz minerals and the disclosure of its presence in some soils sediments. *Euphr. J. Agric. Sci* 1 (3): 73–80
- [49] Froideval A (2004) Chemistry of uranium (VI) in solution, minerals (quartz and aluminum hydrox), Experiment and Spectroscopic Characterization. University Louis Pasteur Strasbourg I pp 63–64
- [50] لمي عبد الاله صكبان العابدي (2009)، دراسة الخصائص البصرية و الضوئية لمعدن الكوارتز و الكشف عن تواجدهما ضمن مفصولات الرمال في بعض الترب الرسوبية، مجلة الفرات للعلوم الزراعية 1(3):104-115
- [51] http://ww.quartzpage.de/gen_mod.html (version01/2016)
- [52] <http://mawdoo3.com/>(version01/2016)
- [53] Pratiyogita Darpan, *Competition Science Vision*, March 2000, India, year 3, Issue 25, page 54.(version01/2016)
- [54] <http://crystallography365.wordpress.com/structures/>(version01/2016)
- [55] F. Wang, T. Kuzuya, S. Hirai, J. Li, Te. Li, Carbon Dioxide Absorption and Release Properties of Pyrolysis Products of Dolomite Calcined in Vacuum Atmosphere, *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, 2014, Article ID 862762, page 7.
- [56] <http://crystallography365.wordpress.com/structures/>(version01/2016)

- [57] Joseph R. Smyth and David L. Bish, *Crystal Structures and Cation Sites of the Rock-Forming Minerals*, Boston ALLEN&UNWIN, 1988.
- [58] Deer, W.A., R. A. Howie, and J. Zussman (1963) *Rock-Forming Minerals Vol 4*. Longmans, London, 435pp.
- [59] <https://www.marefa.org/%D9%88%D8%B1%D9%82%D9%84%D8%A9>
- [60] Where Is Ouargla, Algeria? ", www.worldatlas.com, 2-10-2015 'Retrieved 26-8-2018. Edited
- [61] The Editors of Encyclopaedia Britannica, "Wargla" 'www.britannica.com, Retrieved 26-8-2018. Edited
- [62] مشري محمد العيد، "دراسة أثر المعالجة الحرارية على رمل كثبان ورقلة، وعلى ناقلته الكهربائية باستخدام الطرق الطيفية"، أطروحة الدكتوراه الطور الثالث، جامعة قاصدي مرباح ورقلة في 2016/05/24
- [63] Mohammed Laid Mechri, Smail Chihi, Naouia Mahdadi, Samiha Beddiaf, "Study of Heat Effect on the Composition of Dunes Sand of Ouargla (Algeria) Using XRD and FTIR", *Silicon*, 9, pages 933–941(2017)
- [64] https://www.novocontrol.de/php/ana_alpha_main.php#gsc.tab=0
- [65] Lasia, A. Electrochemical Impedance Spectroscopy and Its Applications. In "Modern aspects of electrochemistry", volume 32. 248–143.
- [66] Hirschorn, B.; Orazem, M. E.; Tribollet, B.; Vivier, V.; Frateur, I.; Musiani, M., Determination of effective capacitance and film thickness from constant-phase-element parameters. *Electrochim. Acta* 2010, 55 (21), 6218-622
- [67] Rammelt, U.; Reinhard, G. (1992). "Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) for characterizing the corrosion-protective performance of organic coatings on metals". *Progress in Organic Coatings*. 21 (2–3): 205–226. doi:10.1016/0033-0655(92)87005-U.

-
- [68] Musiani, M.; Orazem, M. E.; Pebere, N.; Tribollet, B.; Vivier, V., Constant-Phase-Element Behavior Caused by Coupled Resistivity and Permittivity Distributions in Films. *J. Electrochem. Soc.* 2011, 158, C424-C428.
- [69] Bauchot, A.D.; Harker, F.R.; Arnold, W.M. (2000). " The use of electrical impedance spectroscopy to assess the physiological condition of kiwifruit". *Postharvest Biology and Technology*. 18 (1): 9–18. doi:10.1016/S0925-5214(99)00056-3
- [70] «Mesures d'impédance», C. Gabrielli, *Techniques de l'Ingénieur, traité analyse et caractérisation*, PE 2 210 – 1 : 20.
- [71] El Hassane Aglizim. *Caractérisation par spectroscopie d'impédance de l'impédance complexe d'une pile à combustible en charge : Evaluation de l'influence de l'humidité*. Autre. Université Henri Poincaré- Nancy 1, 2009. NNT : 2009NAN10103.
- [72] Dirk Wilmer "Alpha-A High Resolution Dielectric, Conductivity, Impedance and Gain Phase Modular Measurement System", Novocontrol Technologies, https://nanopdf.com/download/non-linear-eis_pdf
- [73] Kremer F., Schonhals A., Luck W. *Broadband Dielectric Spectroscopy*. – Springer-Verlag, 2002.
- [74] Sidorovich A. M., *Dielectric Spectrum of Water*. – *Ukrainian Physical Journal*, 1984, vol. 29, No 8, p. 1175-1181 (In Russian).
- [75] Hippel A. R. *Dielectrics and Waves*. – N. Y.: John Willey & Sons, 1954.
- [76] Volkov A. A., Prokhorov A. S., *Broadband Dielectric Spectroscopy of Solids*. – *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2003, vol. 46, Issue 8, p. 657–665.
- [77] «Comparison of fuel cell electrolyte, resistance measurement techniques», *The Magazine of Fuel Cell Business and Technology*, Avril/Mai 2005

- [78] Séverin LARFAILLOU, “ Application de la spectroscopie d’impédance électrochimique à la caractérisation et au diagnostic de micro batteries tout solide”, thèse de doctorat de l’université paris sud, 03/03/2015
- [79] N. H. Al-Hardan, M. J. Abdullah, A. Abdul Aziz, International Journal of Hydrogen Energy 35 (2010) 4428-4434.
- [80] Mahmoudi Chenari H, Golzan MM, Sedghi H, Hassanzadeh A, Talebian M (2011) Frequency dependence of dielectric properties and electrical conductivity of Cu/nano-SnO₂ thick film/Cu arrangement. Current Applied Physics 11:1071-1076.
- [81] https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_impedance#Capacitive_reactance
- [82] T. Veeramanikandasamy, K. Rajendran, K. Sambath, P. Rameshbabu,” Effect of Cu-doping on optical, electrical and magnetic properties of chemically synthesized MnS nanocrystals”, Materials Chemistry and Physics. Volume 171 (2016) 328-335
- [83] C.P. Symth, Dielectric Behaviour and Structure. McGraw-Hill, New York, 1955.
- [84] wacen kamel Hassane,"Studying Dielectric Properties of Polystyrene-Bentonite Composite and Effective Parameters",JOURNAL OF KUFA-PHYSICS VOL.3 NO.2(2011)
- [85] "How to Test Electrical Conductivity", sciencing.com, Retrieved 8-8-2019. Edited.
- [86] Waide Essa Saleh, Mohammed Deep,” Study of the electrical and thermal conductivity of compounds and solid solutions resulting from the study of the triple system(BaC12-CuSO4-Na2CO3), Journal of Nature, life and Applied Sciences Volume(5), Issue(4): 30 Dec 2021 P: 22-32.
- [87] Laetitia Comparon. Etude experimentale des proprietes electriques et dielectriques des materiaux argileux consolides. Géophysique [physics.geo-ph]. Institut de physique du globe de paris - IPGP, 2005. Français. tel-00135855
- [89] Youngbin Yoon , Jeonghoo Jo , Seungdu Kim , In Gyu Lee , Byung Jin Cho ,Myunghun Shin , and Wan Sik Hwang," Impedance Spectroscopy Analysis and

-
- Equivalent Circuit Modeling of Graphene Oxide Solutions", *Nanomaterials* 2017, 7, 446; doi:10.3390/nano7120446.
- [90] M. R. Das, A. Mukherjee and P. Mitra, ‘’ Structural, Optical and ac electrical characterization of CBD synthesized NiO thin films: Influence of thickness’’, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.physe.2017.06.018>
- [91] Hasan ALmohamad, Ghassan Nashed, Duha Ragab, Preparation of Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃ and Study Their Electric Properties, *Halab University Research Journal, Basic science series*, Issue 128, 2018

المقالات و المداخلات العلمية المتعلقة بالأطروحة

Naamane Remita, Smaïl Chihi, Mohammed Laïd Mechri, "Effect of frequencies on the change of electrical impedance in sand dunes of Ouargla region", International Conference on Advanced Materials, Microscopy and Energy (ICAMME'19) April 15-19,2019, Meknes, Morocco.

N. Remita, S. Chihi, ML. Mechri, "Effect of frequencies on the change of electrical impedance in sand dunes of Ouargla region", IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 783 (2020) 012002, doi:10.1088/1757-899X/783/1/012002.

Naamane Remita, Mohammed Laïd Mechri and Smaïl Chihi,"Study the effect of temperature on changing the electrical impedance values in Ouargla dunes sand at low frequencies", 1st International Conference on Sustainable Energy and Advanced Materials IC-SEAM'21 April 21-22, 2021, Ouargla, ALGERIA (Virtual conference).