

تأثير المحتوى المائي للوسط (الإشباع المائي) على قوة الانعكاس وقدرة التمييز في قياسات الجيورادار

فرحان أحمد الجواد¹ رياض محمد طيفور²

¹ طالب دكتوراه في قسم الجيولوجيا كلية العلوم جامعة دمشق

farhan.aljawad@damascusuniversity.edu.sy

² أستاذ في جامعة دمشق-كلية العلوم-قسم الجيولوجيا

riad.taifour81@damascusuniversity.edu.sy

الملخص

تم في هذا البحث التوجه إلى دراسة إمكانية استخدام الطريقة الجيورادارية في تحديد المحتوى المائي للوسط المدروس. وجرى من أجل ذلك بناء نموذج حقلي مكون من وسط رملي (رمل مازار أبيض) طمر بداخله مجموعة من الأجسام المعدنية والبلاستيكية ونفذت فوقها مجموعة من القياسات الجيورادارية باستخدام الهوائيات 100 و 200 و 500 ميغاهرتز.

ترافقت القياسات المنفذة بأخذ مجموعة من العينات من موقع الدراسة إلى المخبر وتحديد نسبة المحتوى المائي لها مخبرياً.

بعد الانتهاء من تنفيذ القياسات ومعالجة المقاطع المنفذة تم حساب أزمنا الوصول للأجسام ومن ثم حساب قيم ثابت المعزالية ومعامل الانعكاس وقوة الانعكاس لها، ومن ثم ربط قيم معامل الانعكاس وقوة الانعكاس مع قيم المحتوى المائي المحسوبة مخبرياً ورسم المنحنيات البيانية واستنتاج العلاقات الرياضية التي تربط بين قيم معامل الانعكاس أو قوة الانعكاس من جهة وبين قيم المحتوى المائي من جهة أخرى.

من أجل التحقق من العلاقات التجريبية المستنتجة فقد تم تطبيقها وتجريبها على مجموعة أخرى من القياسات المنفذة في الموقع ذاته في فترات زمنية مختلفة وتبين من خلالها أن العلاقات الرياضية المستنتجة تعطي قيماً للمحتوى المائي قريبة من القيم المحسوبة مخبرياً للمحتوى المائي.

الكلمات المفتاحية: جيورادار، المحتوى المائي، الأمواج الكهرومغناطيسية، معامل الانعكاس، قوة الانعكاس، ثابت المعزالية

تاريخ الإيداع: 2022/09/12

تاريخ الموافقة: 2022/12/07



حقوق النشر: جامعة دمشق

سورية، يحتفظ المؤلفون

بحقوق النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

The effect of water content of the medium (water saturation) on the reflection power and resolution in Georadar measurements

Farhan Ahmad Aljawad¹ Riad Mohammad Taifour²

¹PhD student at Damascus University - Faculty of Science - Department of Geology
farhan.aljawad@damascusuniversity.edu.sy

²Professor at Damascus University - Faculty of Science - Department of Geology
riad.taifour81@damascusuniversity.edu.sy

Abstract

In this research, it was directed to the study of the possibility of using the georadaric method in determining the water content of the studied medium. For this purpose, a field model consisting of a sandy medium (white Mazar sand) was built, inside which a group of metal and plastic objects were buried, and a set of georadaric measurements were carried out over them using the antennas 100, 200 and 500 MHz.

The implemented measurements were accompanied by taking a group of samples from the study site to the laboratory and determining the percentage of its water content in the laboratory.

After completing the measurements and processing the executed sections, the arrival times of the objects were calculated, and then the values of the dielectric constant, the reflection coefficient and the strength of reflection were calculated, and then the values of the reflection coefficient and the power of reflection were linked with the values of the water content calculated in the laboratory, drawing the graphic curves and deducing the mathematical relationships that link the values d , and the values of water content on the other.

In order to verify the inferred empirical relationships, they were applied and tested on another set of measurements carried out at the same site in different time periods. It was found that the inferred mathematical relationships give values for water content close to the laboratory calculated values for water content.

Keywords: Georadar, water content, electromagnetic waves, reflection coefficient, reflection power, dielectric constant.

Received : 12/09/2022
Accepted: 07/12/2022



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

1 مقدمة:

الجيورادار (Ground Penetrating Radar (GPR) هو تقنية جيوفيزيائية تطورت خلال الثلاثين سنة الأخيرة لأغراض استكشاف حالات عدم التجانس المختلفة وبدرجة وضوح عالية جدا. ينتمي الجيورادار إلى عائلة أنظمة الرادار ويختص بالكشف عن الأجسام التحت سطحية. ويعتبر اليوم من أكثر التقنيات المستخدمة في الدراسات الهندسية والبيئية. تعمل منظومة الجيورادار على إرسال نبضات (إشارات) صغيرة جدا من الطاقة (أمواج كهربية) إلى داخل المادة أو الوسط هدف الدراسة، ومن ثم يتم تسجيل الإشارات المرتدة من الوسط وتخزين البيانات المتعلقة بالإشارات المرتدة لاستخدامها في الحصول على معلومات عن الوسط.

تعتمد سرعة الموجة وسعة الإشارة وخصائص التوهين الموجي للموجات الكهربية على قيمة النفوذية المعزالية (dielectric permeability) المعقدة لوسط الانتشار (Halabe et al.1993)، وتعطى سرعة الموجة الكهربية (v) في الوسط بالمعادلة التالية:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$$

حيث أن:

C: هي سرعة الأمواج الكهربية في الفراغ (3x10⁸ م/ثا).

ε: هي ثابت المعزالية لوسط الانتشار.

كما يمكن الحصول على عمق السطح أو الجسم المظومور من العلاقة التالية:

$$d = \frac{vt}{2}$$

حيث:

t: هو إجمالي زمن الارتحال ذهابا وإيابا الذي تستغرقه الموجة الكهربية للانتقال من الهوائي إلى الجسم الموجود تحت السطح والعودة إلى الهوائي. وهنا يفترض أن هوائي الجيورادار موضوع ملامس لسطح الأرض.

يزداد معامل توهين الموجة بازدياد تردد الهوائي ومحتوى المحتوى مائي لوسط الانتشار (Halabe et al.1993)، ولذا تستخدم عادة الهوائيات ذات التردد المنخفض (15-900) ميغاهرتز لاستكشاف الأعماق تحت السطحية في الأرصفة والتربة، وتستخدم الهوائيات عالية التردد (1 - 2.5 جيجا هرتز) في حالات المكونات الإنشائية الخرسانية والمركبة حيث يكون عمق الاختراق المطلوب أقل بكثير (بضعة سنتيمترات إلى 1 متر). تؤمن الترددات الأعلى أطوال موجية أقصر وهي بالتالي توفر دقة تمييز أفضل، بحيث تمكن من اكتشاف الظواهر ذات الأبعاد الصغيرة¹.

تحدث الانعكاسات أو الانكسارات في الوسط المدروس عندما تصادف الأمواج الكهربية موادا متباينة في خصائصها الكهربية (الناقلية الكهربية Electrical conductivity و النفوذية المعزالية dielectric permeability , والنفوذية المغناطيسية and magnetic permeability)، بينما ينفذ قسم آخر إلى باطن الأرض دون انعكاس أو انكسار حتى يتلاشى بشكل كامل. ويتعلق الزمن الذي تستغرقه الموجة الكهربية حتى تتلاشى بطبيعة الوسط الذي تنتشر عبره من ناحية وبنسبة الإشباع المائي من جهة أخرى. فمن المعروف أن قيم ثابت المعزالية (ε) للمواد الموجودة في الطبيعة تتراوح بين 1-30 إلا أنها ترتفع في الماء

¹ Non-destructive evaluation (NDE) of composites: techniques for civil structures, U.B. Halabe, in Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites, 2013

بشكل كبير نسبيا لتصل إلى (81) وبالتالي يساهم وجود الماء في مسامات الوسط إلى زيادة أزمنا الارتحال للأمواج الكهرطيسية وتخميدها بشكل كبير. كما يلعب الماء الموجود في مسامات الوسط دورا كبيرا في التأثير على شدة الانعكاس ويختلف ذلك حسب طبيعة المواد في الوسط.

وسوف نتطرق في هذا البحث إلى دراسة تأثير المحتوى المائي (أو الإشباع المائي) للوسط على قوة الانعكاس وقدرة التمييز في قياسات الجيورادار في دراسة نموذجية منفذة على نموذج مبني ضمن وسط رملي.

2 مشكلة البحث:

يعتبر المحتوى المائي واحدا من أكثر العوامل المؤثرة سلبا على قياسات الجيورادار لما له من تأثير سلبي على انتشار الأمواج الكهرطيسية. فهي تحد من قدرة القياسات الجيورادارية على تحقيق أعماق اختراق كبيرة كونها تسهم بشكل كبير في تلاشي الأمواج الكهرطيسية والتأثير في قيم أزمنا الوصول والسرعة للأمواج الكهرطيسية وبالتالي التغيير في قيم ثابت المعزالية لوسط الانتشار. يتباين مقدار هذا التأثير من وسط لآخر أو في الوسط نفسه تبعا لتغير نسب الإشباع المائي للوسط (المحتوى مائي)، كما يتباين من مادة لأخرى تبعا لطبيعة المادة وقيم معامل الانعكاس لها.

هدف البحث:

يهدف البحث إلى دراسة تأثير قيم الإشباع المائي المختلفة في الأوساط الرملية على دقة التمييز في قياسات الجيورادار من جهة، وعلى قوة الانعكاس للأجسام المعدنية والبلاستيكية من جهة أخرى.

3 منطقة الدراسة:

3.1 موقع منطقة الدراسة:

تقع منطقة الدراسة في مدينة دمشق في حرم جامعة دمشق، منطقة البرامكة، توسع كلية العلوم، الشكل (1)، وفق الإحداثيات التالية:

Latitude: 33°30'37.80"N

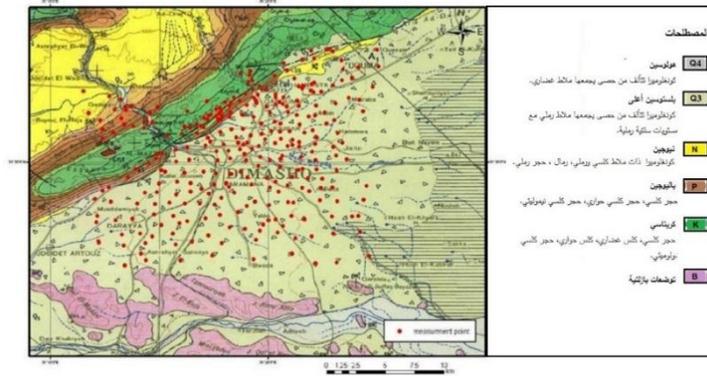
Longitude: 36°17'03.61"E



الشكل (1): صورة من موقع غوغل لمنطقة الدراسة

3.2 الوصف الجيولوجي لمنطقة الدراسة:

تتألف منطقة الدراسة من رسوبات نهريّة رباعية مؤلفة بشكل رئيسي من الحصى والرمال والحجر الرملي والغضار وتكون على شكل كونغلواميرا ذات ملاط غضاري وكربونات أو على شكل عدسات غضارية أو رملية. تغطي الرسوبات النهريّة والبحيرية القديمة رسوبات رباعية تعود للرباعي المتوسط كما هو مبين في الشكل (2) (الخريطة الجيولوجية لسوريا-رقعة شمال دمشق الصادرة عن المؤسسة العامة للجيولوجيا والثروة المعدنية، 1998).



الشكل (2): الخريطة الجيولوجية لمنطقة الدراسة (مأخوذة من الخريطة الجيولوجية لسوريا-رقعة شمال دمشق الصادرة عن المؤسسة العامة للجيولوجيا والثروة المعدنية، 1998)

4 التجهيزات المستخدمة:

تم هنا استخدام جهاز جيورادار نوع راماك والمكون من وحدة التحكم والهوائيات ووحدة العرض المتمثلة بحاسب محمول مرفق بالجهاز ووحدة التزود بالطاقة وهي عبارة عن مجموعة من البطاريات بالإضافة للأجهزة والمعدات الملحقة به كعداد قياس المسافة والكابلات. وتم اختيار الهوائيات 500، 200، 100 ميغاهرتز من أجل تنفيذ البحث كونها مناسبة جدا للكشف عن الأجسام المطمورة من حيث الأبعاد والأعماق. يبين الشكل (3) الوحدات الرئيسية المكونة لمنظومة الجيورادار (Ramac GPR).



الشكل (3): الوحدات الرئيسية المكونة لمنظومة الجيورادار Ramac GPR

5 عمق الاختراق ودقة تمييز الأهداف:

إن أكثر البارامترات تأثيراً على عمق الاختراق للأمواج الجيورادارية هي خصائص الوسط الكهربية متمثلة بثابت العازلية الكهربية ومقاومية الوسط المدروس والتردد المستخدم للهوائيات، فكلما كانت قيمة التردد أكبر كلما قل عمق الاختراق وبالمقابل تزداد قدرة التمييز. يبين

الجدول (1) قدرة التمييز وعمق الاختراق لبعض الترددات المستخدمة في قياسات الجيورادار (حسب مالا-2008).

الجدول (1) عمق الاختراق التقريبي وقدرة التمييز لترددات مختلفة في قياسات الجيورادار (مالا-2008)

عمق الاختراق الأعظمي التقريبي (m)	قدرة التمييز $c=100 \text{ (m/}\mu\text{s)}$, $\lambda c/4 \text{ (cm)}$	تردد الهوائي (MHz)
50	100	25
40	50	50
25	25	100
8	10	250
6	5	500
2.5	3	800
1	2.1	1200
0.5	1.6	1600
0.4	1.3	2300

نلاحظ من

الجدول (1) أن عمق الاختراق يتناسب عكسا مع التردد المستخدم حيث يصل في حالة التردد 25 ميغاهرتز لحوالي 50 م في حين أنه لا يمكن تمييز الأجسام التي يقل نصف قطرها عن 100 سم في الشروط الجيدة للقياس وينخفض عمق الاختراق لأقل من 40 سم في حال كان التردد المستخدم 2300 ميغاهرتز ولكن التمييز يزداد قدرة بحيث يمكن الكشف عن الأجسام التي تكون أبعادها تساوي (1.3) سم و أكبر. ولكن حتى مع الترددات المنخفضة قد ينخفض عمق الاختراق لأقل من (1) م عندما يكون الوسط ذو مقاومة منخفضة (Sushil Sheena, 2004; Sami Eyuboglu, 2004) حيث تلعب الخصائص الكهربائية للوسط الدور الأهم بتخميد الإشارات الكهرومغناطيسية في وسط الانتشار (Sushil Sheena, 2004 ; Bernth Johansson, 2005; Kuk Fa Leeabc, 2009)²

6 السرعة وأزمنة الوصول:

يمكن الحصول على السرعة بعد حساب أزمنة الوصول للأمواج الكهرومغناطيسية المنعكسة من سطوح الطبقات أو من حالات عدم التجانس المختلفة، وفي دراستنا سوف نستخدم أزمنة الوصول للأمواج المنعكسة من أجسام مطورة على أعماق معروفة، وتستخدم من أجل ذلك العلاقة الرياضية التالية:

$$T=2d/v \quad (1)$$

حيث:

t: أزمنة الوصول.

d: عمق الجسم.

v: سرعة الأمواج الكهرومغناطيسية في الوسط.

² The Effect of Air Reflection on Ground Penetrating Radar (GPR) Data, Ahmed Omran Abdulkareem Firas Subhi Hameed , Anas Abdulrazzaq Muhammed , Suad Mohammed Ali (2013).

7 ثابت المعزالية:

ثابت المعزالية الكهربائية هي قدرة المادة على الاحتفاظ بشحنة من الحقل الكهرومغناطيسي المؤثر عليها (الأسقطاب) ومن ثم إعادة نشر هذه الطاقة المختزنة.

تقل سرعة الأمواج الكهرومغناطيسية عند مرورها خلال المواد ذات قيم النفوذية المعزالية الكهربائية العالية، وتكون قيم المعزالية بالنسبة للصخور غالباً غير ثابتة حيث تتغير بتغير تردد الحقل الكهرومغناطيسي المطبق، والذي يتأثر بدوره بالمحتوى المائي ودرجة المسامية والتركييب المينرالوجي للصخور ودرجة الحرارة.

يمكن حساب قيمة ثابت المعزالية من خلال العلاقة الرياضية التالية:

$$\epsilon = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \dots \dots (2)$$

حيث: c: سرعة الأمواج الكهرومغناطيسية في الخلاء (0.3 m/ns)، v: سرعة الأمواج الكهرومغناطيسية في الوسط، ε: ثابت المعزالية. يبين الجدول (2) التالي تغير قيم النفوذية المعزالية الكهربائية وسرعة الأمواج الكهرومغناطيسية لبعض الأوساط. ويتبين من خلاله تناسب السرعة عكسا مع قيم النفوذية المعزالية الكهربائية للوسط.

الجدول (2): ثابت المعزالية وسرعة الأمواج الكهرومغناطيسية لأهم الأوساط الجيولوجية (حسب Hendarmawan-2010).

السرعة m/μs	ثابت المعزالية	الوسط
300.00	1.00	الهواء
81.00	81.00	الماء العذب
75--113	7-16	الحجر الكلسي
113--134	5-7	الغرانيت
77--134	5-15	جيسيت
95--150	4-10	الأسمنت
74--150	4-16	الغضائر
63--100	9-23	السلت
55--150	4-30	الرمل
60--100	9-25	حطاميات
150--173	3-4	الجليد
106--150	4-8	التراب المتجمدة

8 معامل الانعكاس وقوة الانعكاس:

8.1 معامل الانعكاس:

يعتبر معامل الانعكاس (RC) لإشارات الجيورادار في المواد غير المغناطيسية هو دالة للمقاومية الكهرومغناطيسية (EM). إذا تم استبدال EM بما يعادله، وهو الجذر التربيعي لثابت المعزالية الكهربائي، فيمكن حساب معامل الانعكاس:

$$RC = \left[\frac{\sqrt{\epsilon r_1} - \sqrt{\epsilon r_2}}{\sqrt{\epsilon r_1} + \sqrt{\epsilon r_2}} \right] \dots (3)$$

حيث: ϵr_1 هو ثابت المعزالية للوسط الأول، ϵr_2 ثابت المعزالية للوسط الثاني. يمكن استخدام المعادلة السابقة لتحديد معامل الانعكاس عند اختراق إشارات الجيورادار لمواد متباينة في عازليتها (أي ثوابت عازلة مختلفة).

8.2 قوة الانعكاس:

تعتبر قوة الانعكاس (Pr) مقياس للطاقة المنعكسة من هدف ما إلى هوائي استقبال. يمكن تقدير قوة الانعكاس (Pr) باستخدام العلاقة التي قدمها عنان (1996):

$$Pr=(RC)^2 \dots(4)$$

9 الأعمال الحقلية:

9.1 أعمال الحفر وبناء الأجسام تحت السطحية:

بعد اختيار موقع الدراسة المبين في الشكل (1)، تم تنفيذ عملية الحفر وطرر مجموعة من الأجسام المختلفة (B1, B2, B3, B4, B5) ، تم اختيارها من مواد بلاستيكية ومعدينية وبأقطار مختلفة. يبين الجدول (3) مواصفات الأجسام المطمورة وأبعادها ومواقعها بالنسبة لبروفيل القياس.

الجدول (3): مواصفات الأجسام المطمورة وأبعادها ومواقعها

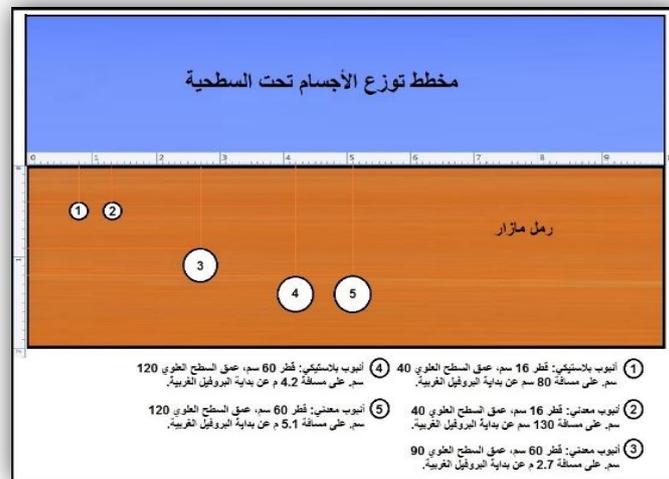
الرقم	النموذج	الطول (م)	القطر (سم)	عمق السطح العلوي (سم)	البعد عن بداية البروفيل الغربية (م)
B1	أنبوب بلاستيكي	1.25	16	40	0.8
B2	أنبوب معدني	1.25	16	40	1.3
B3	برميل معدني	0.9	60	90	2.7
B4	برميل بلاستيكي	0.95	65	120	4.3
B5	برميل معدني	0.9	60	120	5.1

مع الإشارة هنا إلى أنه تم استخدام مادة "رمل المازار الأبيض" لطرر هذه الأجسام، كون هذه المادة تتمتع بخصائص مناسبة لتحقيق هدف الدراسة:

- تحقيق توزيع شبه متساوي للمحتوى مائي على طول البروفيل.
- مساميته عالية وتصل إلى 30% من حجم الوسط مما يمكننا من الوصول لدرجات إشباع جيدة.
- نفوذيته عالية تسمح بارتشاح المياه عبره بسرعة مما يساعد على السرعة في تنفيذ القياسات وبالتالي تكرار عمليات القياس خلال فترات زمنية قصيرة

يبين الشكل (4) توزيع هذه الأجسام على طول بروفيل القياس من الشمال إلى الجنوب.

مع الإشارة إلى أن الدراسة نفذت على الأجسام البلاستيكية فقط، وتم استبعاد الأجسام المعدنية كون ناقليتها 10,000 mho/m وفي هذه الحالة فإن قوة حقل الانعكاس تساوي تقريبا 0.9999 أي أنها تعكس تقريبا كل الأمواج الواردة إليها.



الشكل (4): مخطط توزيع الأجسام تحت السطحية

10 منهجية العمل:

- بعد الانتهاء من أعمال الحفر والطرر وتجهيز الموقع تم تنفيذ القياسات الحقلية وفق المنهجية التالية:
- 1- تغذية موقع الدراسة بالماء لمدة 24 ساعة أو حتى يتم الإشباع بالماء على كامل البروفيل.
 - 2- تنفيذ مجموعة من القياسات في منطقة الدراسة باستخدام الهوائيات المختارة 100،200 و 500 ميغاهرتز (الهوائي 500 ميغاهرتز هو الهوائي الوحيد المحمي).
 - 3- إعادة تنفيذ القياسات وفق برنامج زمني محدد من أجل التمكن من تنفيذها في درجات مختلفة من الإشباع المائي للوسط المدروس حتى الوصول إلى أعلى درجة ممكنة من الجفاف.
 - 4- نقل عينات من الموقع إلى المختبر لتحديد درجة رطوبتها مخبرياً، حيث يتم بالتوافق مع كل حملة قياس قطف عينتين أو ثلاث عينات من مواقع مختلفة موزعة على طول بروفيل القياس.
 - 5- إعادة الخطوات (2، 3، 4) لعدة مرات من أجل التمكن من الحصول على نسب محتوى مائي كافية من جهة ومن أجل التأكيد على نتائج العمل من جهة أخرى.
 - 6- معالجة النتائج وحساب المعطيات المطلوبة لحساب قيم ثابت المعزالية الكهربائية والتي تتضمن السرعة وأزمة الوصول، أما أعماق طمر الأجسام فهي محددة ممن خلال عمليات الطمر في الموقع.
 - 7- حساب معامل الانعكاس للوسط بدرجات المحتوى مائي المختلفة بالنسبة للأجسام البلاستيكية المظورة.
 - 8- حساب قوة الانعكاس للوسط بدرجات المحتوى مائي المختلفة للأجسام البلاستيكية المظورة.
 - 9- معالجة وتفسير النتائج والمعطيات.

11 القياسات الحقلية:

تم تنفيذ مجموعة من القياسات الجيورادارية على طول البروفيل المحدد وينسب مختلفة للمحتوى مائي تراوحت بين (3-30)%. يبين الجدول (4) بعض القياسات المنفذة خلال الدراسة ومعاملات القياس (التردد المستخدم، اتجاه القياس، قيمة التكديس) حيث تم اختيارها من مجموعة كبيرة من القياسات المنفذة (200 قياس بالهوائي 500 ميغاهرتز) بما يلبي حاجة الدراسة. وتم في هذه الدراسة التركيز على عرض نتائج القياس باستخدام الهوائي 500 ميغاهرتز، كونه الهوائي المحمي المتوفر، وأيضاً يعد الأنسب للأعماق المدروسة.

الجدول (4): بيانات بروفيلاات القياس باستخدام الهوائي 500 ميغاهرتز متضمنة نسب المحتوى مائي المتوافقة مع القياسات المنفذة مقدراً %

Md=Wm/Ws*100	التكديس	القياس
المحتوى المائي على أساس الوزن الجاف		
2.01	8	Prof1
3.59	8	Prof2
4.48	8	Prof3
5.83	8	Prof4
6.16	8	Prof5
8.83	8	Prof6
9.80	8	Prof7
10.28	8	Prof8
12.89	8	Prof9
13.90	8	Prof10
24.53	8	Prof11
27.42	8	Prof12

12 معالجة المعطيات:

من أجل الوصول لأفضل صورة للمقطع الجيوراداري والحصول على قيم دقيقة للبارامترات المطلوبة لحساب معامل الانعكاس للأجسام المظمورة، قمنا بمعالجة المقاطع الجيورادارية المنفذة باستخدام بعض طرائق المعالجة حقلًا كالتحكم بالتقوية والتكديس وغيرها من بارامترات القياس، وكذلك تم لاحقًا تنفيذ بعض طرائق المعالجة على المعطيات المقاسة بعد الانتهاء من عملية المسح باستخدام برنامج reflex2D وشملت طرائق المعالجة، استخدام بعض أنواع المصفيات والتقوية لإزالة الضجيج في الخلفية وغيرها (Gain function و bandpass و background removal و stack traces و running average)، من طرائق المعالجة الأخرى الضرورية حسب حالة المعطيات.

13 حساب قيم معامل الانعكاس للأجسام المظمورة:

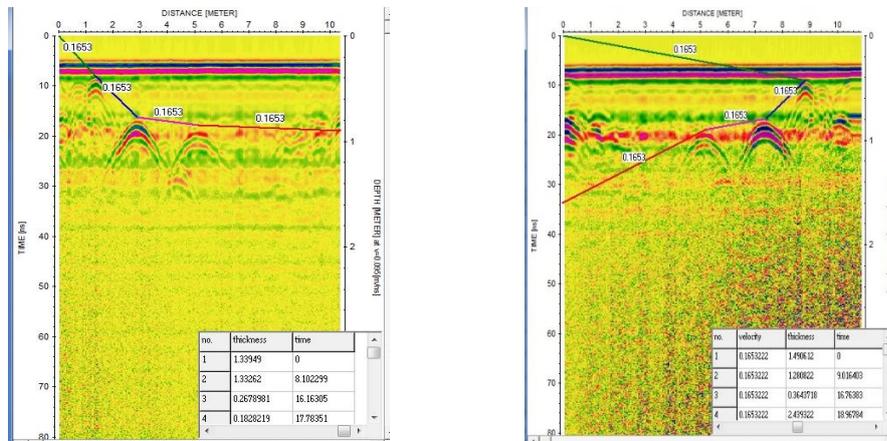
يمكن الحصول على قيم معامل الانعكاس للأجسام المظمورة كما ذكرنا سابقًا من العلاقة الرياضية رقم (3) سابقة الذكر. ومن أجل الحصول على قيم ثابت العازلية للوسط يتوجب علينا بداية حساب قيم أزمنة الوصول والسرع من خلال المقاطع الجيورادارية المنفذة على الشكل التالي:

- 1- حساب أزمنة الوصول للجسم المظمور من خلال المقاطع الجيورادارية المنفذة.
- 2- حساب السرع الموافقة لأزمنة الوصول المحسوبة.
- 3- حساب قيم ثابت المعزالية للوسط بنسب رطوبته المختلفة.
- 4- حساب قيم معامل الانعكاس للأجسام (RC).
- 5- حساب قيم قوة الانعكاس للأجسام (P).

13.1 حساب أزمنة الوصول للجسم المظمور

تم تحديد أزمنة الوصول للأجسام المظمورة من خلال المقاطع الجيورادارية المنفذة. يبين الشكل (5) أحد المقاطع الجيورادارية المقاسة باستخدام الهوائي 500 ميغاهرتز وكيفية تحديد أزمنة الوصول للأجسام المظمورة، بينما يبين

الجدول (5) قيم أزمنة الوصول للجسم (B3) وذلك في درجات المحتوى المائي المختلفة للوسط.



الشكل (5): حساب أزمنة الوصول للأجسام المظمورة من خلال المقاطع المقاسة

باستخدام الهوائي 500 ميغاهرتز

الجدول (5): أزمنة الوصول للأجسام المظمورة من خلال المقاطع المقاسة باستخدام الهوائي 500 ميغاهرتز

t	Md=Wm/Ws*100	التكديس	القياس
ns	المحتوى مائي على أساس الوزن الجاف		
13	2.01	8	Prof1
14.369	3.59	8	Prof2
15.8	4.48	8	Prof3
15.76	5.83	8	Prof4
16.45	6.16	8	Prof5
17.374	8.83	8	Prof6
18.67	9.80	8	Prof7
19.2	10.28	8	Prof8
20	12.89	8	Prof9
20.69	13.90	8	Prof10
23.4	24.53	8	Prof11
25.6	27.42	8	Prof12

13.2 حساب السرعة

تم حساب السرعة الموافقة لأزمنة الوصول المحددة من خلال المقاطع الجيورايدارية المنفذة باستخدام العلاقة الرياضية رقم (1) سابقة الذكر.

علما بأن الأجسام تحت السطحية تم طمرها على أعماق محددة ومعلومة، ومن خلال تعويض قيم أزمنة الوصول وأعماق الأجسام المظمورة تم الحصول على قيم السرعة المطلوبة كما هو مبين في الجدول (6).

13.3 حساب قيم ثابت المعزالية

تم حساب قيم ثابت المعزالية للوسط بنسب رطوبته المختلفة من خلال العلاقة رقم (2) يبين الجدول (6) قيم ثابت المعزالية للوسط والمحسوبة بدرجات المحتوى مائي المختلفة والتي تتراوح بين 2-28%.

الجدول (6): قيم أزمنة الوصول والسرعة وثابت المعزالية للوسط بدرجات المحتوى مائي المختلفة (الهوائي 500 ميغاهرتز)

ε	V	t	Md=Wm/Ws*100	التكديس	القياس
	m/ns	ns	المحتوى مائي على أساس الوزن الجاف		
4.694444	0.092	13	2.01	8	Prof1
5.735227	0.084	14.369	3.59	8	Prof2
6.934444	0.076	15.8	4.48	8	Prof3
6.899378	0.076	15.76	5.83	8	Prof4
7.516736	0.073	16.45	6.16	8	Prof5
8.384885	0.069	17.374	8.83	8	Prof6
9.682469	0.064	18.67	9.80	8	Prof7
10.24	0.063	19.2	10.28	8	Prof8
11.11111	0.060	20	12.89	8	Prof9
11.891	0.058	20.69	13.90	8	Prof10
15.21	0.051	23.4	24.53	8	Prof11
18.20	0.047	25.6	27.42	8	Prof12

13.4 حساب قيم معامل الانعكاس

بعد حساب قيم ثابت المعزالية للوسط، تم حساب قيم معامل الانعكاس له في درجات محتوى مائي مختلفة (12 حالة) والتي تتراوح بين 2-28% وحيث تم تنفيذ القياسات في درجات حرارة تتراوح بين 20-30 مئوية.

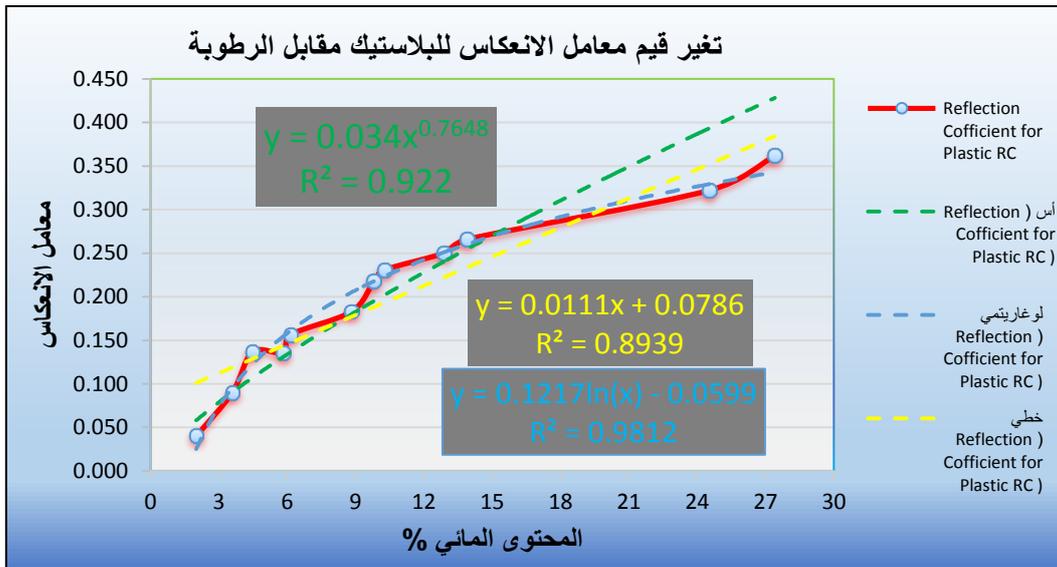
13.4.1 حساب قيم معامل الانعكاس للأجسام البلاستيكية:

من المعروف أن قيم ثابت المعزالية تتغير من مادة لأخرى أو من وسط لآخر كما ذكرنا في الفقرة (8) من البحث وتتراوح معظم القيم بين 1-30 إلا أنها تتغير لتصل إلى 80 في الماء، هذا التغير الكبير يجعل من الأوساط المشبعة بالماء مؤثرا إيجابيا قويا على معامل الانعكاس للوسط الذي يرتبط بدوره بثابت المعزالية بالعلاقة الرياضية رقم (3).
بتعويض قيم ثابت المعزالية للوسط والتي تغيرت تبعا لتغير درجة المحتوى المائي للوسط، وقيمة ثابت المعزالية للبلاستيك (PVC) والتي تتراوح بين (3.39 - 4.52) (وفقا لـ Nathan Ida & Mario Fernández Pantoja & X. Lucas Travassos) (وهنا تم اعتماد القيمة 4 له أسوة بالدراسات الأخرى المنفذة في هذا المجال) تم الحصول على قيم معامل الانعكاس في كل مرة يتغير فيها ثابت المعزالية كما هي مبينة في الجدول (7).

الجدول (7): تغير قيم معامل الانعكاس تبعا لتغيرات درجة المحتوى المائي للوسط

معامل الانعكاس للبلاستيك	ثابت المعزالية للبلاستيك	ثابت المعزالية للوسط	Md=Wm/Ws*100	القياس
RC	ε2	ε1	المحتوى مائي على أساس الوزن الجاف	
0.040	4	4.69	2.01	Prof1
0.090	4	5.74	3.58	Prof2
0.137	4	6.93	4.48	Prof3
0.135	4	6.9	5.83	Prof4
0.156	4	7.52	6.16	Prof5
0.183	4	8.38	8.83	Prof6
0.217	4	9.68	9.8	Prof7
0.231	4	10.24	10.28	Prof8
0.250	4	11.11	12.9	Prof9
0.266	4	11.89	13.9	Prof10
0.400	4	15.21	24.53	Prof11
0.362	4	18.2	27.42	Prof12

من أجل إيضاح تأثير درجة المحتوى المائي على قيم معامل الانعكاس في الأوساط الرملية للأجسام البلاستيكية، تم عرض المنحنيات البيانية التي تبين العلاقة بين معامل الانعكاس ونسبة المحتوى المائي في الوسط. كما هي مبينة في الشكل (6).



الشكل (6): العلاقة بين قيمة المحتوى المائي للوسط ومعامل الانعكاس للأجسام البلاستيكية

تحليل منحنى المحتوى المائي-معامل الانعكاس:

تبيين من خلال الشكل (6) ومن خلال الجدول (7) أن قيم معامل الانعكاس تزداد بازدياد قيم المحتوى المائي للوسط حيث تراوحت عموماً بين 0.04 في درجة محتوى مائي للوسط تعادل و 2.01 % حيث كانت قيمة ثابت المعزالية للوسط تساوي 4.69 تزداد هذه القيم لمعامل الانعكاس مع زيادة نسبة المحتوى المائي للوسط لتصل إلى 0.362 وذلك مقابل درجة محتوى مائي تساوي 27.42 % وقيمة ثابت معزالية للوسط تساوي 18.2.

تفسير منحنى المحتوى المائي-معامل الانعكاس:

من الملاحظ أن معامل الانعكاس يزداد بازدياد المحتوى المائي وذلك لأن زيادة المحتوى المائي تؤدي إلى زيادة قيم ثابت المعزالية للوسط (E) والتي تؤدي بدورها إلى زيادة في قيم معامل الانعكاس [العلاقة رقم (3)] وذلك لأنها تساهم في خلق تباين أكبر بين قيم ثابت المعزالية للوسط (تزداد قيمة ثابت معزاليته بازدياد المحتوى المائي) وقيمة ثابت المعزالية للبلاستيك (وهي ثابتة وتساوي 4). بناء عليه تم استخلاص المعادلات التي تعبر عن العلاقة بين نسبة المحتوى المائي للوسط وبين معامل الانعكاس باستخدام برنامج الأكسل، وفيما يلي أهم العلاقات المستنتجة:

1- العلاقة الخطية: ويمكن التعبير عنها كالآتي:

$$RC = 0.0111W + 0.0786 \dots (5)$$

حيث:

RC: معامل الانعكاس للبلاستيك.

W: المحتوى المائي للوسط (%)

2- العلاقة الأسية: ويمكن التعبير عنها كالآتي:

$$RC = 0.034W^{0.7648} \dots (6)$$

حيث:

RC: معامل الانعكاس للبلاستيك.

W: المحتوى المائي للوسط (%)

3- العلاقة اللوغارتمية (اللوغاريتم الطبيعي): ويمكن التعبير عن قيم معامل الانعكاس مقابل اللوغاريتم الطبيعي لنسبة المحتوى المائي للوسط كالآتي:

$$RC = 0.1217 \ln(W) - 0.0599 \dots (7)$$

حيث:

RC: معامل الانعكاس للبلاستيك.

W: المحتوى المائي للوسط (%)

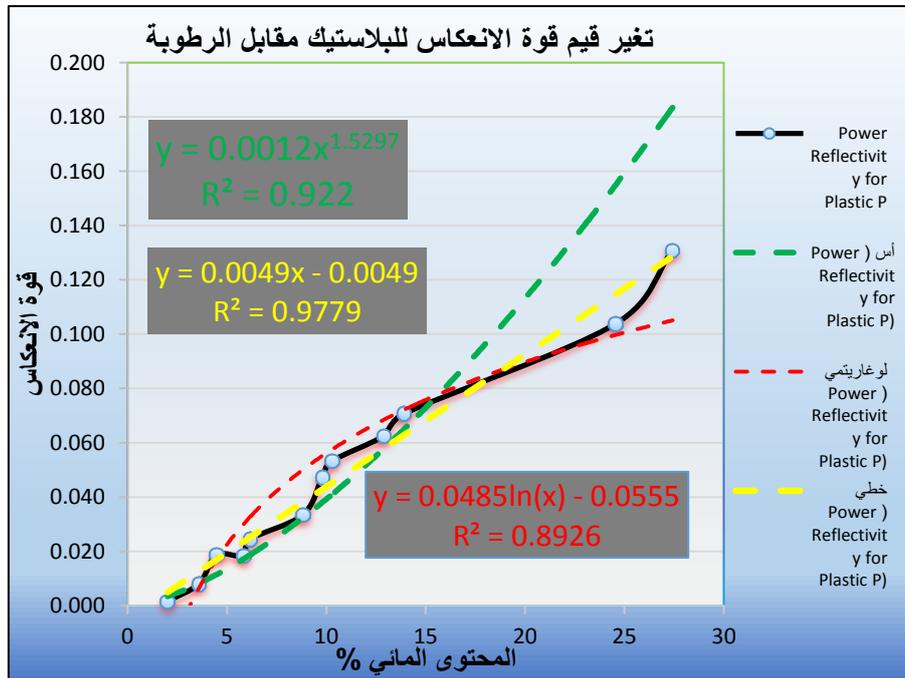
14 حساب قيم قوة الانعكاس (Power Reflectivity):**14.1 حساب قيم قوة الانعكاس للأجسام البلاستيكية:**

تتغير قيمة قوة الانعكاس (P) تبعاً لتغير قيمة معامل الانعكاس (RC)، حيث ترتبط قوة الانعكاس بمعامل الانعكاس بالعلاقة الرياضية رقم (4). ويتعويض قيم معامل الانعكاس السابقة المبينة في الجدول (7) في العلاقة (4)، يتم الحصول على قيم قوة الانعكاس الجدول (8).

الجدول (8): يبين قيم قوة الانعكاس المحسوبة للجسم البلاستيكي ومعامل الانعكاس والمحتوى المائي الوسط الموافقة لها (الهوائي 500 ميغا هرتز)

قوة الانعكاس P1 للبلاستيك	معامل الانعكاس RC1 للبلاستيك	ثابت المعزلية E		Md=Wm/Ws*100 المحتوى مائي على أساس الوزن الجاف	القياس
		للبلاستيك	للوطن		
0.002	0.040	4	4.69	2.011	Prof1
0.008	0.090	4	5.74	3.589	Prof2
0.019	0.137	4	6.93	4.478	Prof3
0.018	0.135	4	6.9	5.834	Prof4
0.024	0.156	4	7.52	6.163	Prof5
0.033	0.183	4	8.38	8.828	Prof6
0.047	0.217	4	9.68	9.799	Prof7
0.053	0.231	4	10.24	10.283	Prof8
0.063	0.250	4	11.11	12.889	Prof9
0.071	0.266	4	11.89	13.899	Prof10
0.104	0.400	4	15.21	24.531	Prof11
0.131	0.362	4	18.2	27.415	Prof12

من خلال العرض البياني للعلاقة بين قيم قوة الانعكاس والمحتوى المائي للوسط، الشكل (7)، تم التوصل إلى المنحنيات البيانية والعلاقات الرياضية الموافقة لها.



الشكل (7): يبين تغير قيم قوة الانعكاس المحسوبة للجسم البلاستيكي مقابل المحتوى المائي

تحليل منحنى المحتوى المائي-قوة الانعكاس:

يتبين من الشكل (7) أن العلاقة بين قوة الانعكاس ودرجة المحتوى المائي تبدو على شكل منحنى تزداد تدريجياً بشكل شبه خطي. فبعد حساب قيم قوة الانعكاس للأجسام البلاستيكية المظورة تبين أن قيمها تتراوح بين 0.002 و 0.131 وهي تتناسب طردياً مع قيم المحتوى المائي للوسط. ففي حين كانت قيمة المحتوى المائي للوسط تعادل 2.011% كانت قوة الانعكاس تساوي 0.002

والتي تقابل قيمة لمعامل الانعكاس تساوي 0.040 وأخذت القيم بالازدياد مع زيادة المحتوى مائي حتى وصلت إلى 0.131 في درجة المحتوى مائي 27.415% والتي تقابل قيمة لمعامل الانعكاس تساوي 0.362.

تفسير منحنى المحتوى المائي-قوة الانعكاس:

نلاحظ أن قوة الانعكاس تزداد بازدياد المحتوى المائي وذلك لأن زيادة المحتوى المائي تؤدي إلى زيادة قيم ثابت المعزالية للوسط (E) والتي تؤدي بدورها إلى زيادة في قيم معامل الانعكاس [العلاقة رقم (3)] وذلك لأنها تساهم في خلق تباين أكبر بين قيم ثابت المعزالية للوسط (الذي تزداد قيمة ثابت معزاليته بازدياد المحتوى المائي) وقيمة ثابت المعزالية للبلستيك (وهي ثابتة وتساوي 4)، وكلما ازدادت قيمة معامل الانعكاس تزداد قيمة قوة الانعكاس حيث أنها تساوي مربع قيمة معامل الانعكاس [العلاقة رقم (4)] تم استخلاص العلاقات الرياضية التي تعبر عن العلاقة بين نسبة المحتوى المائي للوسط وبين قوة الانعكاس للأجسام البلاستيكية باستخدام برنامج الأكسل، وفيما يلي أهم العلاقات المستنتجة:

1- العلاقة الخطية: ويمكن التعبير عنها كآتي:

$$P=0.0049W - 0.0049..... (8)$$

حيث:

P: قوة الانعكاس للبلستيك.

W: المحتوى المائي للوسط (%)

2- العلاقة الأسية: ويمكن التعبير عنها كآتي:

$$P= 0.0012W^{1.5297} (9)$$

حيث:

P: قوة الانعكاس للبلستيك.

W: المحتوى المائي للوسط (%)

3- العلاقة اللوغارتمية (اللوغارتم الطبيعي): ويمكن التعبير عن قيم معامل الانعكاس مقابل اللوغارتم الطبيعي لنسبة المحتوى المائي للوسط كآتي:

$$P= 0.0485\ln(W) - 0.0555.....(10)$$

حيث:

P: قوة الانعكاس للبلستيك.

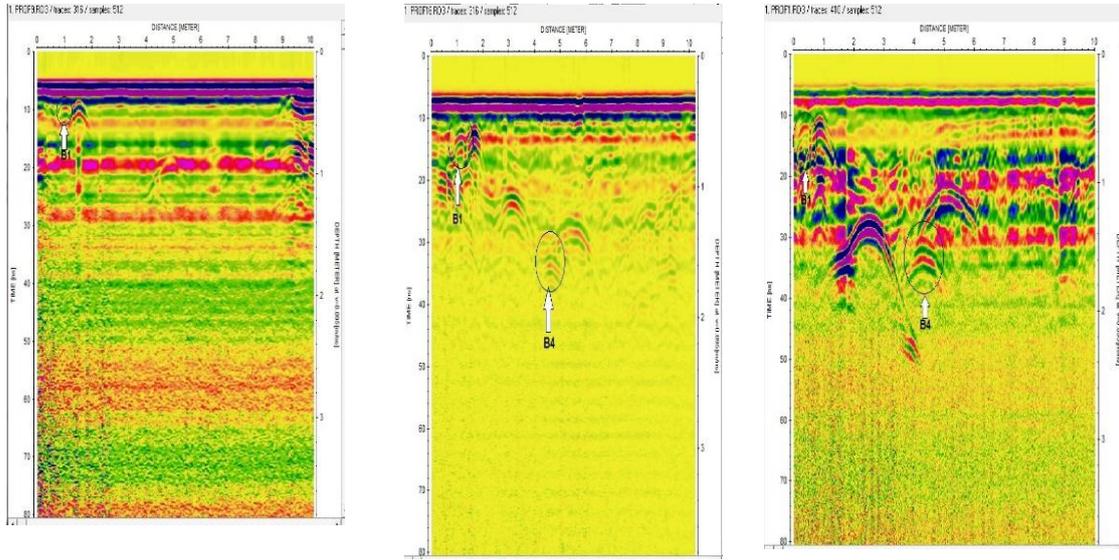
W: المحتوى المائي للوسط (%).

من أجل إظهار تأثير تغيرات قيم قوة الانعكاس على دقة ظهور ووضوح الأجسام المظمورة، نعرض مجموعة من المقاطع الجيورادارية المقاسة الشكل (8) بحالات مختلفة لدرجات المحتوى مائي. حيث نلاحظ من الشكل أن الجسم البلاستيكي (B1) تزداد درجة وضوحه على المقطع مع ازدياد المحتوى المائي للوسط، في حين أن الجسم البلاستيكي (B2) لا يظهر على المقطع عند درجة المحتوى مائي 2.011% ولكن يظهر على المقاطع عند درجة المحتوى مائي 10.283 و 27.415% ويكون وضوحه أفضل عند المحتوى مائي الأعلى 27.415.

وهذا التباين الواضح يعود بشكل أساسي إلى التغيرات في ثابت المعزالية الذي ينعكس بدوره على قيم معامل الانعكاس والتي تربط بينهما العلاقة الرياضية (3). وبالتالي فكلما كان التباين في قيم المعزالية أكبر كلما ازدادت قيمة معامل الانعكاس، وبما أن قيمة

المعزالية للجسم المظمو (الجسم البلاستيكي ثابتة وتساوي 4) وقيمة المعزالية للوسط تزداد بزيادة المحتوى المائي فهذا يعني أن الزيادة في نسبة المحتوى المائي يقابلها انعكاس أكبر للأوج الكهرطيسية وبالتالي وضوح أكبر للجسم المظمو.

أ- المحتوى المائي الوسط 27.415 % ب- المحتوى المائي للوسط 10.283 % ج- المحتوى المائي للوسط 2.011 %



الشكل (8): العلاقة بين قي قوة الانعكاس للأجسام البلاستيكية المظموه قيمة المحتوى المائي للوسط الرملي

أ- المحتوى المائي الوسط 27.415 %، ب- المحتوى المائي للوسط 10.283 %، ج- المحتوى المائي للوسط 2.011 %

تدقيق النتائج

من أجل التحقق من العلاقات الرياضية التجريبية، تم تنفيذ مجموعة من القياسات في موقع القياس خلال فترات زمنية مختلفة. مع أخذ عينات مخبرية من الموقع لتحديد قيم المحتوى المائي لها. تم بعدها حساب كل من أزمنة الوصول وثابت المعزالية وقيم معامل الانعكاس لها. يبين الجدول (9) قيم المحتوى المائي التي تم حسابها باستخدام العلاقات التجريبية التي تم استنتاجها 5 و 6 و 7 والتي تربط بين قيم معامل الانعكاس وقيم المحتوى المائي ومقارنته مع قيم المحتوى المائي المحسوبة مخبريا.

يتبين من خلال الجدول (9) مايلي:

- العلاقة الخطية تعطي قيم للمحتوى المائي أكبر بقليل من القيم الحقيقية المحسوبة مخبريا ففي حين تتراوح القيم الحقيقية للمحتوى المائي بين 8.9-13.199 % فهي تتراوح بين 7.51-18.46 %.
 - العلاقة الأسية تعطي قيم للمحتوى المائي أصغر بقليل من القيم الحقيقية المحسوبة مخبريا ففي حين تتراوح القيم الحقيقية للمحتوى المائي بين 8.9-13.199 % فهي تتراوح بين 6.23-10.9 %.
 - العلاقة اللوغاريتمية تعطي قيم للمحتوى المائي قريبة جدا من القيم الحقيقية المحسوبة مخبريا ففي حين تتراوح القيم الحقيقية للمحتوى المائي بين 8.9-13.199 % فهي تتراوح بين 9.1-10.28 %.
- وعموما فإن قيم المحتوى المائي المحسوبة من خلال العلاقات التجريبية عموما متقاربة إلا أن الاختلاف بينها وبين القيم المحسوبة مخبريا تتراوح بين 1-10 % ويمكن عزو تلك الاختلافات إلى طبيعية العمل الحقلية ومواقع قطف العينات والاختلافات في توزع المياه على طول البروفيل.

الجدول (9): مقارنة قيم المحتوى المائي التي تم الحصول عليها مخبريا مع قيم المحتوى المائي التي تم الحصول عليها

باستخدام العلاقات التجريبية المستنتجة

المحتوى المائي على أساس الوزن الجاف	المحتوى المائي المحسوب من خلال العلاقات			معامل الانعكاس للبلستيك	ε		V	t	التردد	التكبير	القياس
	اللوغارتمية	الأسية	الخطية		للوسط	بالستيك	m/ns	ns			
$Md = Wm / Ws * 100$	$RC1 = 0.1217 \ln(W)$ - 0.0599	$RC1 = 0.034 W^{\wedge}$ 0.7648	$RC1 = 0.0111 W +$ 0.0786								
8.9	9.10	6.23	7.51	0.162	4	7.689	0.108	16.637	8	500	Test1
9.03	9.25	6.85	8.97	0.178	4	8.221	0.105	17.203	8	500	Test2
9.24	9.70	8.68	13.26	0.226	4	10.028	0.095	19	8	500	Test3
10.272	9.94	9.61	15.44	0.250	4	11.111	0.090	20	8	500	Test4
12.45	10.07	10.10	16.58	0.263	4	11.731	0.088	20.55	8	500	Test5
13.199	10.28	10.90	18.46	0.283	4	12.836	0.084	21.496	8	500	Test6

15 النتائج والتوصيات

- 1- يتأثر وضوح ودقة استكشاف وتمييز الأهداف على المقاطع الجيورادارية المختلفة بمقدار المحتوى المائي للوسط وذلك حسب قيم معامل الانعكاس وقوة الانعكاس للهدف وحسب درجة المحتوى المائي للوسط.
- 2- قوة الانعكاس للأجسام المعدنية أكبر منها للأجسام غير المعدنية ولذلك لأن قيمة ثابت المعزالية للأجسام المعدنية كبير جدا ولا نهائية وهذا يعطينا قيمة لا نهائية لمعامل الانعكاس وبالتالي قيمة لانتهائية لقوة الانعكاس عن الهدف (أي أن جميع الأمواج الكهرطيسية الواردة إلى الهدف المعدني سوف تنعكس عنه)، أما بالنسبة للأهداف اللامعدنية فلها قيم ثابت معزالية أصغر وبالتالي فمعامل الانعكاس لها أصغر.
- 3- من خلال التجارب العديدة المنفذة في هذا البحث تم التوصل إلى مجموعة من العلاقات الرياضية (العلاقات ذات الأرقام 5) و6 و7 و8 و9 و10) المذكورة خلال البحث)، وهذه العلاقات هي علاقات تجريبية بنيت على أساس نموذج حقيقي مكون من وسط رملي وهو وسط أقرب ما يكون للمثالي لتنفيذ مثل هذا النوع من الدراسات النموذجية وتبين من خلال تجربتها أن نسبة الخطأ فيها لا تتعدا 10% وقد تصل لأقل من 1% في بعض الحالات، وبالتالي فهي تساهم في إعطاء صورة شبه حقيقية للواقع يمكننا من حساب قيم المحتوى المائي للأوساط القريبة من السطح. وعموما تبقى العلاقة اللوغارتمية هي الأنسب في حساب المحتوى المائي للوسط كونها تعطي نتائج أقرب لنتائج التحليل المخبرية من العلاقات الأخرى.
- 4- تعتمد دقة حساب المحتوى المائي للوسط باستخدام العلاقات التجريبية المستنتجة على الدقة في حساب أزمنة الوصول وثابت المعزالية للوسط وبالتالي الدقة في حساب معامل الانعكاس.
- 5- يتأثر انتشار وانعكاس الأمواج الكهرطيسية بمعزالية المواد التي تمر خلالها، ولا يحدث انعكاس لها طالما أنها لا تواجه تباين في قيمة المعزالية للمواد، أما شدة الانعكاس وقوته فهي تعتمد على مقدار التباين في قيم معزالية المواد وكلما كبر هذا التباين كلما ازدادت شدة الانعكاس وبالتالي ازداد وضوح الأجسام على المقاطع الجيورادارية.
- 6- إن مقدار تأثير المحتوى المائي على تلاشي الأمواج الكهرطيسية هو نتيجة التغير في الناقلية الكهربية للوسط ويعتبر هذا الدور كبيرا إلا أنه قد يكون سببا في زيادة وضوح الأجسام المظومة عندما يساهم في زيادة التباين في قيم معزالية المواد التي تمر خلالها الموجة والعكس صحيح وذلك طالما استمرت الأمواج ولم تتلاشى وتمكنت من الوصول إلى هوائيات الأستقبال.
- 7- استخدم خلال الدراسة الهوائيات (100 و 200 و 500) ميغاهرتز وتبين من خلال الدراسة أن الهوائيات (500) ميغاهرتز تعطي دقة تمييز للنماذج المظومة أكبر من الهوائيات (100 و 200) ميغاهرتز ويعود ذلك لأعماق طمر النماذج وتأثير المحتوى المائي على دقة التمييز في قياسات الجيورادار. ولذا فالهوائيات (100 و 200) ميغاهرتز لم تلبى الغاية منها في هذه الدراسة وقد تكون فعالة بشكل أكبر في حال وجود نماذج مظومة على أعماق أكبر وبأبعاد أكبر وشروط مختلفة للوسط.

16 المراجع والمراجع الإلكترونية:

16.1 المراجع:

- 1- Ahmed Omran Abdulkareem Firas Subhi Hameed (2013) The Effect of Air Reflection on Ground Penetrating Radar (GPR) Data.
- 2- Annan AP. (2003). Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications, p(286).
- 3- Daniels DJ. (2004) Ground penetrating radar (2nd edition). The Institution of Electrical Engineers: London, p(761).
- 4- Hijab and M. Yass.(2012). Detection of external effects of ground penetrating radar surveys.
- 5- Jay D. Gatrell and Ryan R. Jensen (2013) GPR Remote sensing in Archaeology
- 6- Jeffrey J. Daniels (2000). Ground Penetrating Radar Fundamentals, Department of Geological Sciences, The Ohio State University. P(21).
- 7- John J. Schultz, Ph.D.(2012) Detecting Buried Remains Using Ground-Penetrating Radar. P(235).
- 8- Kazunori Takahashi¹, Jan Igel¹, Holger Preetz¹ and Seiichiro Kuroda², Basics and Application of Ground-Penetrating Radar as a Tool for-Monitoring Irrigation process, p (27).
- 9- Ligang Zhou, Zhaoyan Wang and Xiangdong Wang (2019) Soil Water Content Estimation Using High-Frequency Ground Penetrating Radar. P(16).
- 10- Luigia Nuzzo. (2003) Coherent noise attenuation in GPR data by linear and parabolic Radon Transform techniques.
- 11- Motoyuki Sato (2001) Fundamentals of GPR Data Interpretation. Tohoku University.
- 12- Neal A. (2004) Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress.

16.2 المراجع الإلكترونية:

- 1- https://www.researchgate.net/publication/259273800_Preliminary_Seismic_MicroZoning_Study_for_Damascus_City_by_Using_Microtremors/figures?lo=1
- 2- <https://www.kgs.ku.edu/Current/2001/martinez/martinez4.html>