

## دراسة بعض الخصائص لمادتي التفلون والبولي كربونات

أ. د. حسن عبد الكريم سليمان \*

أنس علي مغامس \*\*

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥ / ٣ / ٣ - تاريخ النشر ٢٠٢٥ / ٤ / ٢٩)

## □ ملخص □

تم في هذه الدراسة إيجاد السماحية الكهربائية العقدية بجزئها الحقيقي والتخيلي  $\tilde{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon''$  و النفوذية المغناطيسية العقدية بجزئها الحقيقي والتخيلي  $\tilde{\mu} = \mu' - i\mu''$  وأيضاً تم حساب قرينة الانكسار العقدية  $\tilde{n} = n' - ik$  ومعامل الفقد **Loos Factor**  $\tan(\delta)$  لمادتي التفلون والبولي كربونات.

حيث توصلنا إلى أن السماحية الكهربائية العقدية لمادة التفلون  $\tilde{\epsilon} = 2.0999925 - i0.00041846$  و نفوذيته المغناطيسية العقدية  $\tilde{\mu} = 1 - 0i$  أما معامل الفقد الكهربائي له فبلغ  $\tan(\delta) = 1.992673783 \times 10^{-4}$  و يبلغ معامل الفقد المغناطيسي الصفر وهذا ما يؤكد على أن التفلون مادة غير مغناطيسية وبالنسبة لقرينة انكساره العقدية كانت  $\tilde{n} = 1.44912 - i0.0001$

والبولي كربونات (**PolyCarbonate**) فبلغت السماحية الكهربائية العقدية له  $\tilde{\epsilon} = 2.75687 - 0.0289245i$  و نفوذيته المغناطيسية العقدية  $\tilde{\mu} = 1 - 0i$  أما معامل الفقد الكهربائي  $\tan(\delta) = 0.0104917896$  و يبلغ معامل الفقد المغناطيسي الصفر وهذا ما يدل على أن البولي كربونات مادة غير مغناطيسية وبالنسبة لقرينة انكساره العقدية كانت  $\tilde{n} = 1.6604 - 0.0087167i$  وذلك باستخدام الدليل الموجي المستطيل **WR<sub>90</sub>** عند ترددات المايكرويف **X\_Band** الذي يتراوح ما بين **8.2 - 12.5 GHz** وذلك بطريقة **S - Parameter Extraction** التي يوفرها برنامج المحاكاة **CST** والماتلاب.

الكلمات المفتاحية: الدليل الموجي المستطيل - **WR<sub>90</sub>** - التفلون - البولي كربونات - معامل الفقد الكهربائي - معامل الفقد المغناطيسي - ترددات المايكرويف **X\_Band - CST**.

\*أستاذ - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة طرطوس - طرطوس - سوريا.

\*\*طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة طرطوس - طرطوس - سوريا.

## Study of Some Properties of Teflon and Polycarbonate

Dr. Hassan Abdul Karim Suleiman\*\*

Anas Ali Maghames\*\*

(Received 3/3/2025. Accepted 29/4/2025)

### □ABSTRACT □

This study investigates the complex permittivity ( $\tilde{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon''$ ) and complex permeability ( $\tilde{\mu} = \mu' - i\mu''$ ) of materials, as well as the complex refractive index ( $\tilde{n} = n' - ik$ ) and the electric loss factor ( $\tan(\delta)$ ), were calculated for both Teflon and Polycarbonate materials.

We concluded that the complex permittivity of Teflon is  $\tilde{\epsilon} = 2.0999925 - i0.00041846$ , and its complex permeability is  $\tilde{\mu} = 1 - 0i$ . The electric loss factor  $\tan(\delta)$  was found to be  $1.992673783 \times 10^{-4}$ , while the magnetic loss factor is zero, confirming that Teflon is a non-magnetic material. The complex refractive index was determined to be  $\tilde{n} = 1.44912 - i0.0001$ .

For polycarbonate, the complex permittivity was found to be  $\tilde{\epsilon} = 2.75687 - 0.0289245i$ , and its complex permeability was  $\tilde{\mu} = 1 - 0i$ . The electric loss factor was  $\tan(\delta) = 0.0104917896$ , while the magnetic loss factor is zero, indicating that polycarbonate is a non-magnetic material. The complex refractive index was determined to be  $\tilde{n} = 1.6604 - i0.0087167$  These results were obtained using the rectangular waveguide  $WR_{90}$  within the microwave frequency range X-Band (8.2–12.5 GHz) through the S-Parameter Extraction method provided by CST simulation software and MATLAB.

**Keywords:** Rectangular Waveguide -  $WR_{90}$  - Teflon - Polycarbonate - electric Loss Factor - Magnetic loss coefficient - Microwave Frequencies - X-Band - CST .

\*Professor – Department of Physics, Faculty of Science, Tartous University, Tartous, Syria.

\*\*Postgraduate Student (Master's) – Department of Physics, Faculty of Science, Tartous University, Tartous, Syria.

**مقدمة:**

يُعتبر البولي تترافلوروايثيلين (Polytetrafluoroethylene, PTFE) والبولي كربونات (Polycarbonate, PC) من المواد العازلة كهربائياً ذات الأهمية الكبيرة في التطبيقات الصناعية المختلفة بفضل خصائصهما الفيزيائية والكهرومغناطيسية. يتميز الـ PTFE بكونه مادة صلبة مكونة بالكامل من الكربون والفلور، مما يمنحه وزناً جزيئياً عالياً وخصائص استثنائية. يُعد الـ PTFE مادة بيضاء عند درجة حرارة الغرفة، كارهة للماء، وبوليمراً حرارياً يتميز بخصائص عازلة فائقة، مما يجعله مثالياً للاستخدام في تطبيقات الترددات الراديوية العالية، المايكروويف، إضافة إلى دوره في تصنيع العوازل، الموصلات، وتجميعات الكابلات.

أما البولي كربونات (PC)، فهو بوليمر حراري يتمتع بخواص ميكانيكية وكهربائية جيدة، ويُستخدم في التطبيقات الصناعية حيث تُعد الحاجة إلى مواد عازلة قوية وخفيفة أمراً أساسياً. يتميز البولي كربونات بقدرته على العمل كعازل كهربائي جيد، مما يجعله مناسباً في العديد من التطبيقات مثل الإلكترونيات والهندسة الكهربائية.

تُعد دراسة الخصائص الكهرومغناطيسية، مثل السماحية الكهربائية والنفوذية المغناطيسية ومعامل الفقد وقرينة الانكسار العقدية، ضرورية لفهم أداء المواد العازلة كالـ PTFE والبولي كربونات. هذه الخصائص تُحدد مدى كفاءة المواد في تخزين الطاقة وتقليل الفقد الطاقوي عند الترددات المختلفة.

**أهمية البحث**

يكتسب هذا البحث أهمية كبيرة في مجال دراسة المواد العازلة بسبب التطبيقات الواسعة لها في الصناعات المختلفة، خاصةً في مجال الإلكترونيات الدقيقة، الاتصالات، والرادارات. يساهم في فهم الخصائص الكهرومغناطيسية للمواد العازلة، مثل السماحية الكهربائية والعقدية والنفوذية المغناطيسية العقدية، وتحسين تصميم الأجهزة التي تعتمد على الأداء الكهرومغناطيسي مثل الهوائيات، الموجات الميكروية، والأنظمة الكهروضوئية من أجل استخدامها في تغليف الهوائيات والأجهزة الإلكترونية لحمايتها من التداخلات الكهرومغناطيسية والرطوبة العالية، دراسة خواص PTFE و PC تساعد في تصميم أغلفة تقلل من الخسائر الإشعاعية وتوفر عزلاً ممتازاً بالتالي لأبد من حساب سماحياتها الكهربائية العقدية وتبيان الخسائر الناجمة عن امتصاص المواد للموجات وتخفيضها، مما يساهم في تحسين كفاءة الأنظمة عند تعرضها لمجالات كهرومغناطيسية عالية كالـ  $X - Band$  [1] كما يمكن تطوير مواد مضادة للتشويش الكهرومغناطيسي

**.EMI Shielding****أهداف البحث**

تحليل الخصائص الكهرومغناطيسية للتلون والبولي كربونات من خلال حساب السماحية الكهربائية العقدية ( $\epsilon'$ ) و ( $\epsilon''$ ) و قياس النفوذية المغناطيسية العقدية ( $\mu'$ ) و ( $\mu''$ ) ودراسة أداء المواد العازلة من خلال دراسة معامل الفقد الكهربائي لتحليل كفاءة المواد في تخزين الطاقة وتقليل الفقد وقياس قرينة الانكسار العقدية ( $n'$ ) و ( $k$ ) لفهم أداء المواد عند ترددات مختلفة باستخدام برنامج *Matlab* واستخدام تقنيات حاسوبية لتحليل المواد كتطبيق تقنية S-Parameter لاستخراج الخصائص الكهرومغناطيسية بدقة باستخدام برنامج *CST* بواسطة الدليل الموجي المستطيل  $WR_{90}$  وتحليل انتشار الموجات الكهرومغناطيسية ضمنه. [2]

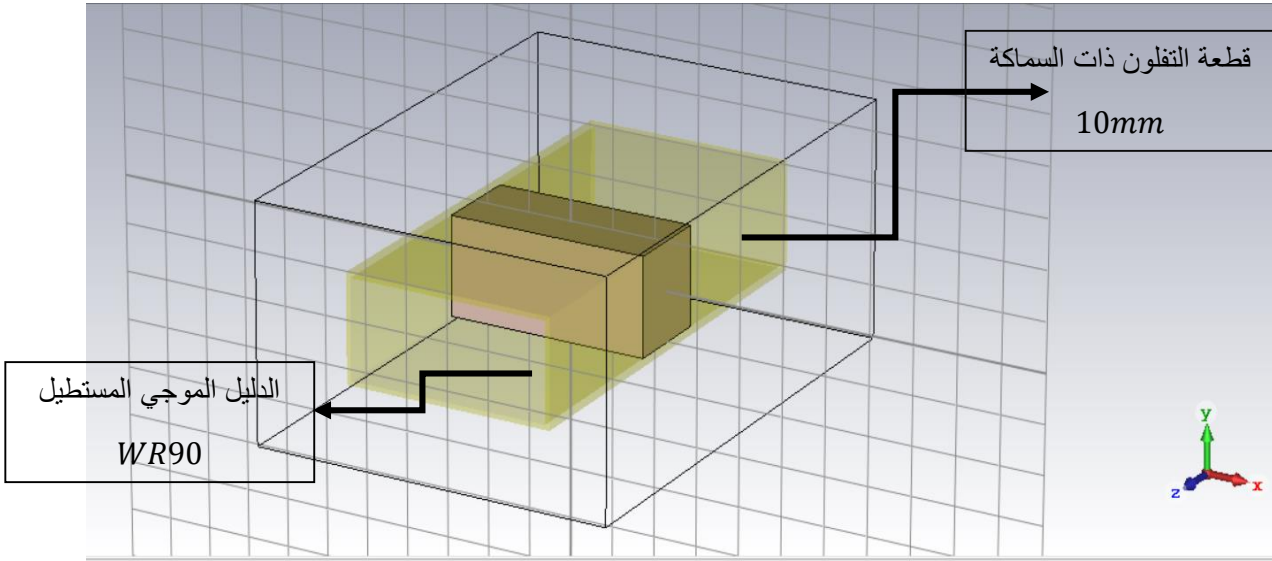
## منهجية البحث ومواده

أنجز هذا البحث باستخدام برنامج *CST* حيث تم نمذجة الدليل الموجي المستطيل *WR90* الذي يتميز بالأبعاد التالية عرض الدليل  $a = 22.86 \text{ mm}$  وارتفاعه  $b = 10.16 \text{ mm}$  وطوله  $L = 50 \text{ mm}$  يعمل هذا الدليل ضمن نطاق ترددات *X\_Band* ، والذي يتراوح بين  $8.2 - 12.5 \text{ GHz}$  ، حيث تنتشر داخله الموجات الكهرومغناطيسية وفق الأنماط الموجية المختلفة. تم تصميم نموذجين داخل الدليل الموجي لتحليل الخصائص الكهرومغناطيسية للمواد العازلة:

**النموذج الأول** يتضمن شريحة رقيقة من التفلون (PTFE) بسك  $d = 10 \text{ mm}$  ، وبأبعاد تتناسب مع أبعاد الدليل الموجي  $a$  و  $b$  ، وتم وضعها داخله والنموذج الثاني يحوي شريحة رقيقة من البولي كربونات (PC) بنفس الأبعاد المستخدمة في النموذج الثاني، حيث تم وضعها داخل الدليل لتحليل تأثير المادة على انتشار الموجات. ومن ثم تحليل الخصائص الكهرومغناطيسية للتفلون والبولي كربونات من خلال حساب السماحية الكهربائية العقدية و قياس النفوذية المغناطيسية العقدية ودراسة معامل الفقد الكهربائي قرينة الانكسار العقدية للمواد العازلة الثلاث [3],[4] .

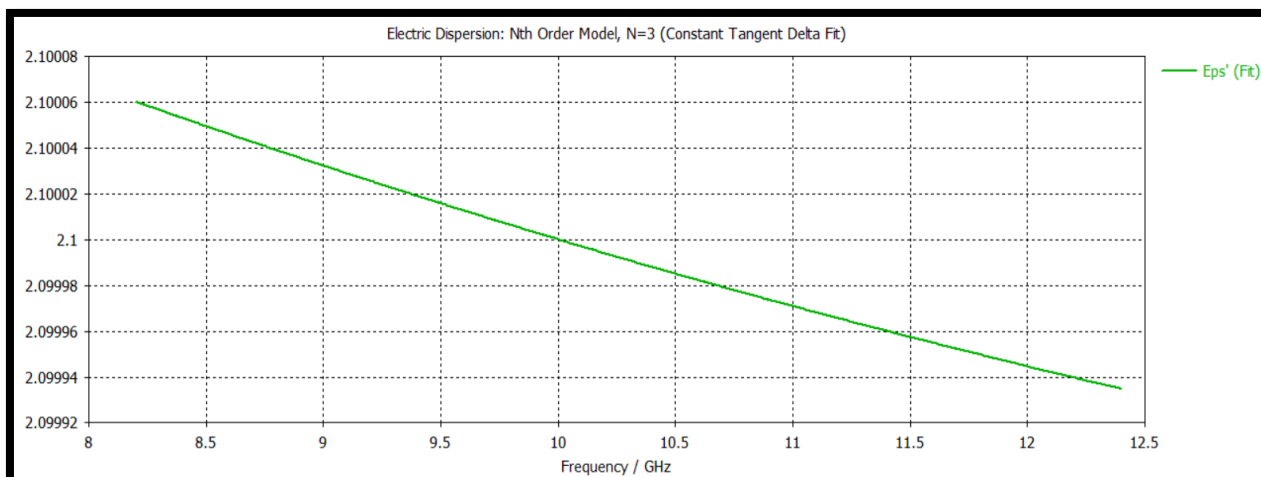
### الدراسة الحسابية والنظرية:

النموذج الأول الذي تم إدخاله في الدليل الموجي هي المادة العازلة التفلون وعند تشغيل البرنامج نحصل على النموذج المطلوب والموضح بالشكل (1):



الشكل (1): نموذج الدليل الموجي مع المادة العازلة التفلون

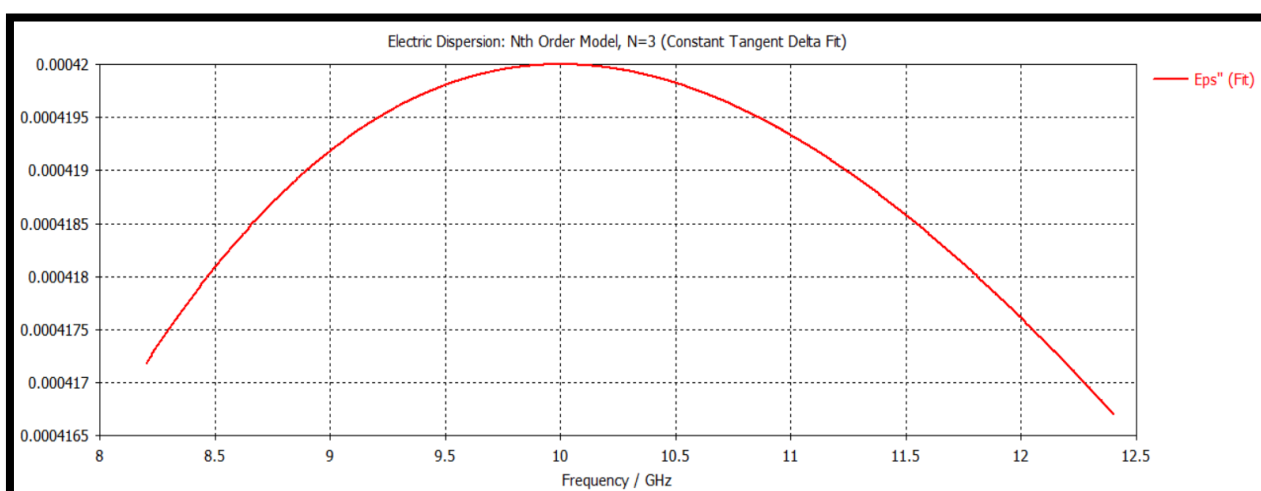
يوضح الشكل (2) نتائج حساب التغير في الجزء الحقيقي للسماحية الكهربائية العقدية ( $\epsilon'$ ) لمادة التفلون تبعاً لمجال الترددات بين  $8 \text{ GHz}$  إلى  $12 \text{ GHz}$  والذي يمثل المجال *X - Band* باستخدام برنامج *CST*



الشكل (٢): الجزء الحقيقي للسماحية الكهربائية العقدية ( $\epsilon'$ ) لمادة التفلون بدلالة التردد باستخدام برنامج *CST*

نلاحظ من الشكل (٢) أن التفلون مادة عازلة ذات سماحية كهربائية منخفضة نسبياً وهو ما ينعكس على قيمة  $\epsilon'$  التي تأرجحت حول القيمة 2.1 في الرسم البياني، يُظهر الخط البياني انخفاضاً في  $\epsilon'$  مع زيادة التردد هذا يعني أن المادة تصبح أقل قدرة على تخزين الطاقة الكهربائية مع ارتفاع التردد [5].

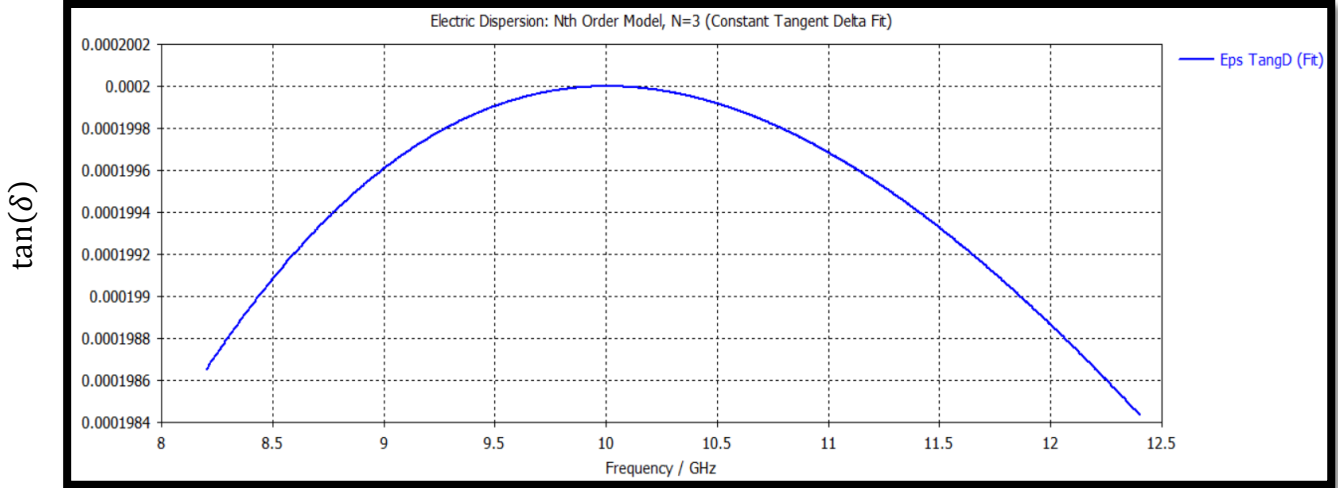
بينما يوضح الشكل (٣) نتائج حساب التغير الحاصل في الجزء التخيلي من السماحية الكهربائية العقدية ( $\epsilon''$ ) لمادة التفلون مع التردد في مجال الترددات **X – Band** باستخدام برنامج *CST*



الشكل (٣): الجزء الحقيقي للسماحية الكهربائية العقدية ( $\epsilon''$ ) لمادة التفلون بدلالة التردد باستخدام برنامج *CST*

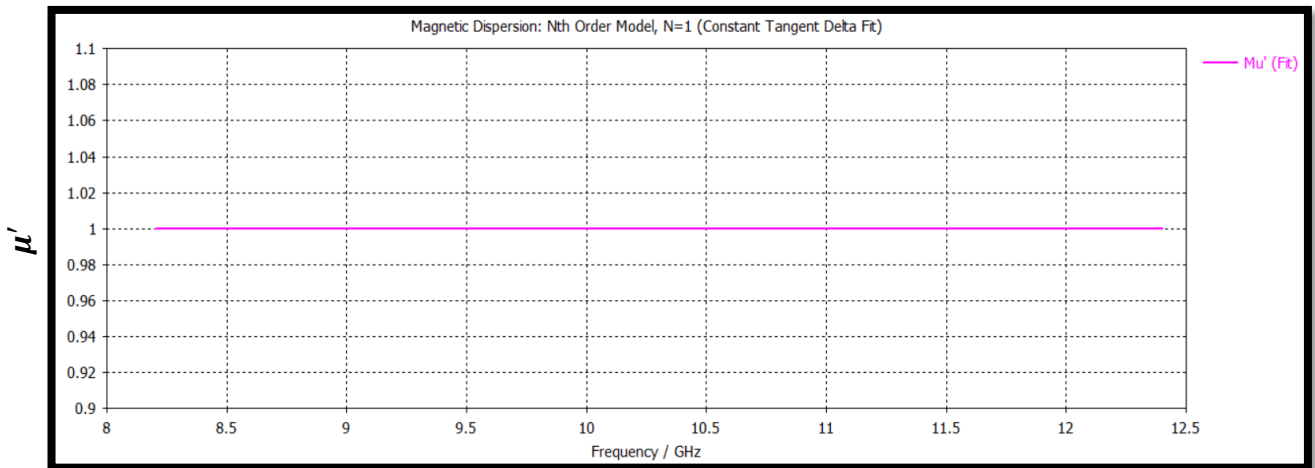
يعكس الجزء التخيلي فقد الطاقة الذي يحدث عندما تنتقل الموجات الكهرومغناطيسية عبر المادة وكلما زادت قيمة  $\epsilon''$ ، زادت الخسائر العازلة (**dielectric losses**) نتيجة تحويل الطاقة الكهرومغناطيسية إلى حرارة داخل المادة، يُظهر الخط البياني أن  $\epsilon''$  يبدأ بالزيادة الطفيفة مع التردد حتى يصل إلى قيمة قصوى عند 10 GHz في الترددات المتوسطة عند هذه النقطة تكون الخسائر الطاقية في المادة أعلى ما يمكن.

وتم حساب تغيرات معامل الفقد الكهربائي ( $\tan(\delta)$ ) لمادة التفلون كتابع للتردد. كما هو موضح في الشكل (٤) حيث نلاحظ أن معامل الفقد يبدأ بالارتفاع تدريجياً حتى يصل إلى ذروة عند تردد محدد تقريباً عند  $10\text{ GHz}$ ، ثم ينخفض بعد ذلك مع زيادة التردد وتبدأ الخسائر بالانخفاض هذا يشير إلى أن التفلون، كمادة عازلة، يعاني من زيادة طفيفة في الخسائر عند تلك الترددات وهو في حدود  $0.0002$  مما يعني أن المادة تحتفظ بخواصها العازلة.

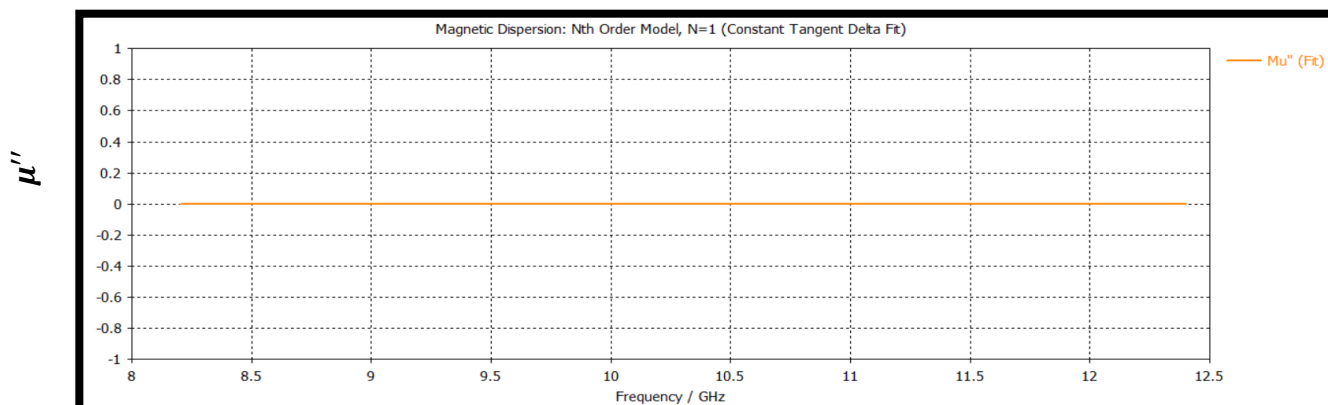


الشكل (٤): فقد الطاقة ( $\tan(\delta)$ ) الذي يحدث لمادة التفلون بدلالة التردد باستخدام برنامج CST

أما بالنسبة للتغيرات العقدية في النفاذية المغناطيسية بجزئها الحقيقي والتخيلي أظهرت لنا النتائج بأنها مقادير ثابتة على كامل المجال الترددي  $X\_Band$  فكانت النفاذية المغناطيسية الحقيقية  $\mu' = 1$  والنفاذية المغناطيسية التخيلية  $\mu'' = 0$  باستخدام برنامج CST كما يوضح الشكلان (٥) و (٦) على الترتيب:



الشكل (٥): النفاذية المغناطيسية الحقيقية  $\mu'$  بدلالة التردد لمادة التفلون باستخدام برنامج CST



الشكل (٦): النفاذية المغناطيسية التخيلية  $\mu''$  بدلالة التردد لمادة التفلون باستخدام برنامج CST

بالنسبة للشكل (٥) يشير الخط الثابت عند  $\mu' = 1$  إلى أن التفلون يتمتع بنفاذية مغناطيسية تساوي نفاذية الفراغ  $\mu_0$  أو النفاذية المغناطيسية للهواء وهذا يعكس أن التفلون هو مادة غير مغناطيسية أما بالنسبة للشكل (٦) يُظهر النفاذية المغناطيسية التخيلية  $\mu'' = 0$  تبقى مساوية "صفر" في نطاق التردد المدروس مما يشير إلى أن التفلون لا يمتلك خسائر مغناطيسية (lossless material) عند هذه الترددات وبالتالي الحقل المغناطيسي لا يؤثر على هذه المواد بشكل واضح [6].

وبناءً على النتائج التي حصلنا عليها من حساب السماحية الكهربائية النسبية للوسط يمكننا حساب قرينة الانكسار العقدية لمادة التفلون بجزئها الحقيقي والتخيلي

$$\tilde{n} = n' - ik \quad \text{بواسطة العلاقة } \tilde{n} = \sqrt{\epsilon} \text{، حيث أن:}$$

$n'$ : الجزء الحقيقي من قرينة الانكسار العقدية،  $k$ : الجزء التخيلي من قرينة الانكسار (معامل التوهين).

باستخدام برنامج الماتلاب تم حساب وتسجيل هذه النتائج فكانت قيم

الجزء الحقيقي من قرينة الانكسار العقدية بدلالة التردد المدروس

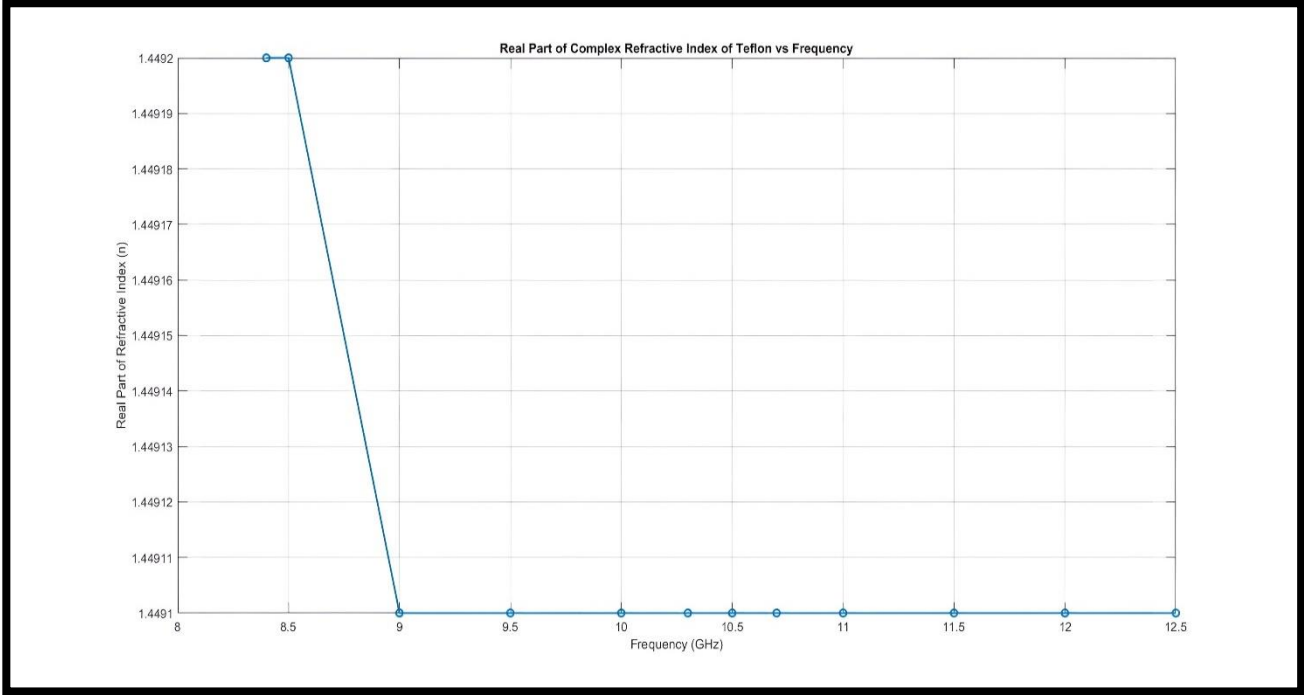
موضحة وفق الجدول (١):

$f(\text{HZ}) \times 10^9$	$n'$
8.4	1.4492
8.5	1.4492
9	1.4491
9.5	1.4491
10	1.4491
10.3	1.4491
10.5	1.4491
10.7	1.4491
11	1.4491
11.5	1.4491
12	1.4491
12.5	1.4491

وبناءً على هذه القيم تم باستخدام الماتلاب دراسة تغيرات الجزء الحقيقي

من قرينة

الانكسار العقدية بدلالة التردد الذي يظهره الشكل (٧):



الشكل (٧): تغيرات الجزء الحقيقي من قرينة الانكسار العقدية بدلالة التردد لمادة التفلون باستخدام برنامج

*Matlab*

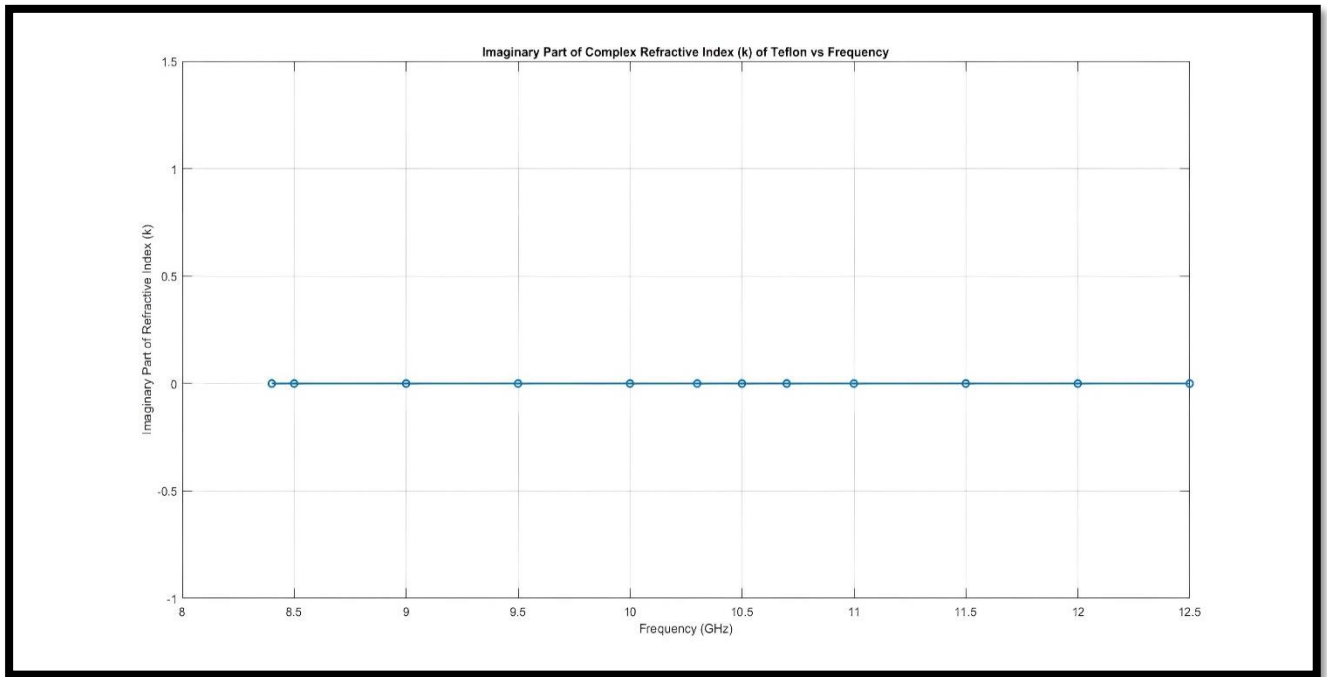
من الشكل نلاحظ أنه في مجال الترددات من 8 GHz إلى 8.7 GHz الجزء الحقيقي من قرينة الانكسار  $n'$  ثابت تقريباً عند قيمة حوالي ١.٤٤٩٢ وهو ما يشير إلى أن التفلون يمتلك خصائص ثابتة فيما يتعلق بالانكسار [7], [8] أما عند التردد حوالي ٨,٧ جيجا هرتز يحدث انخفاض طفيف في  $n'$  من ١.٤٤٩٢ إلى ١.٤٤٩١ يُعد هذا التغير صغير جداً أما بعد 9 GHz وحتى 12.5 GHz يبدو أن الجزء الحقيقي من قرينة الانكسار يظل ثابتاً تقريباً عند قيمة 1.4491 ، مما يشير إلى استقرار خصائص الانكسار في هذه المنطقة الترددية

أما بالنسبة لمعامل توهين هذه المادة عند المجال الترددي المدروس

الذي يمثل الجزء التخيلي من قرينة الانكسار العقدية فتم ترتيبها في الجدول (٢):

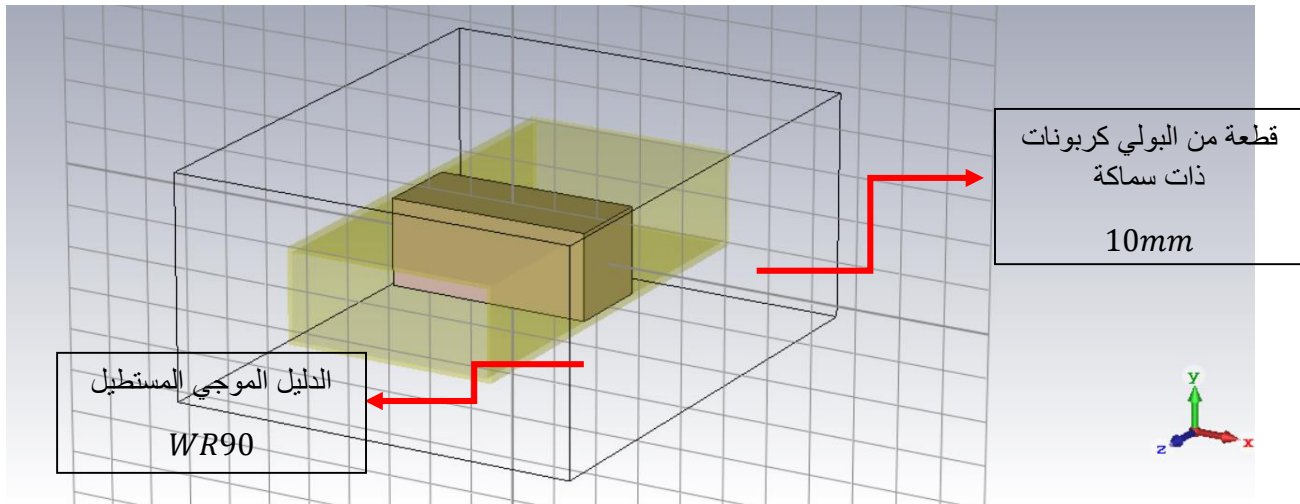
(الجدول ٢)

$f(HZ) \times 10^9$	$k$
8.4	0.0001
8.5	0.0001
9	0.0001
9.5	0.0001
10	0.0001
10.3	0.0001
10.5	0.0001
10.7	0.0001
11	0.0001
11.5	0.0001
12	0.0001
12.5	0.0001



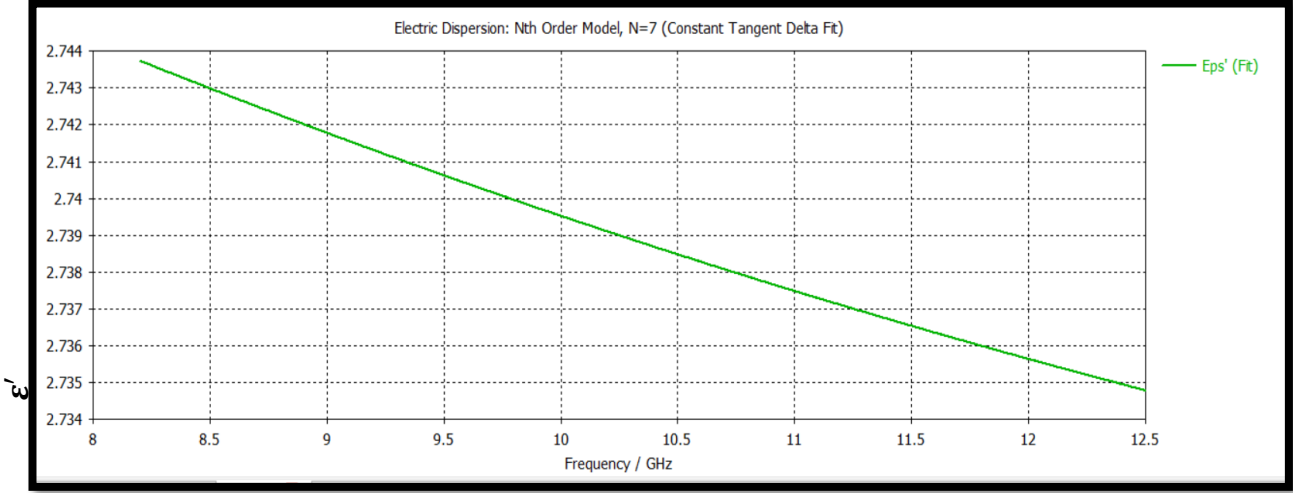
الشكل (٨): تغيرات الجزء التخيلي من قربة الانكسار العقدية بدلالة التردد لمادة التفلون باستخدام برنامج *Matlab*

يُظهر الخط البياني أن القسم التخيلي لقرينة الانكسار يبقى ثابتاً تقريباً عند الصفر في جميع نطاق الترددات  $X\_Band$  ولا يوجد تغير واضح في قيمة  $k$  مما يشير إلى عدم وجود امتصاص للطاقة الكهرومغناطيسية في التفلون ضمن هذا المجال من الترددات [10].  
النموذج الثالث الذي تم إدخاله في الدليل الموجي هي المادة العازلة البولي كربونات وعند تشغيل البرنامج نحصل على النموذج المطلوب والموضح بالشكل (٩):



الشكل (٩): نموذج الدليل الموجي والمادة العازلة البولي كربونات

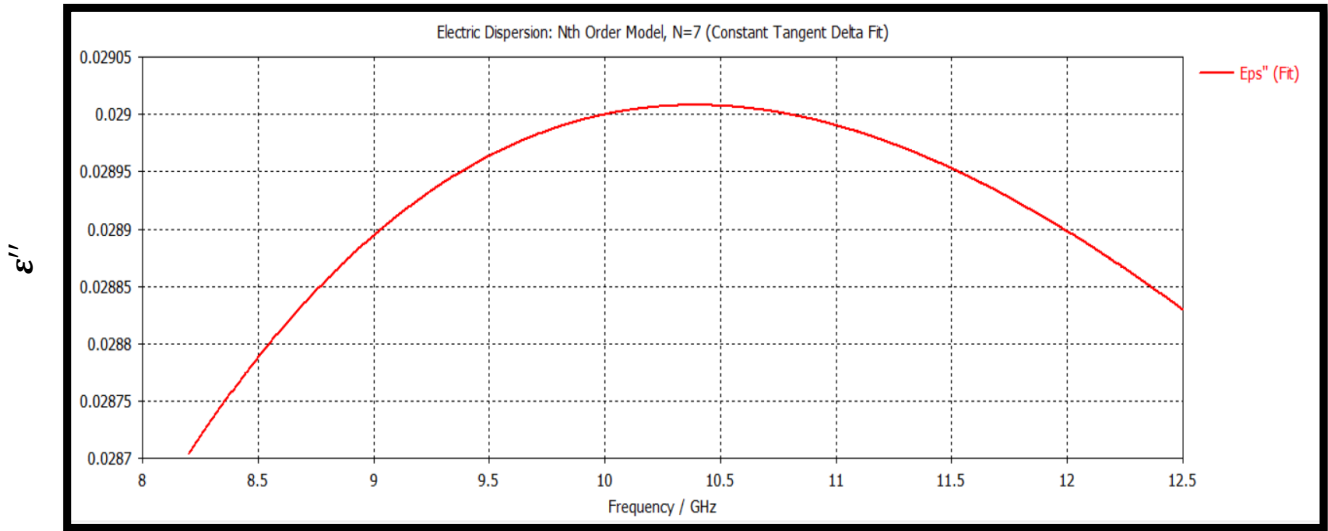
وكانت نتائج حساب التغير في الجزء الحقيقي للسماحية الكهربائية العقدية ( $\epsilon'$ ) لمادة البولي كربونات تبعاً لمجال الترددات باستخدام برنامج *CST* يوضحها الشكل (١٠):



الشكل (١٠): تغيرات الجزء الحقيقي للسماحية الكهربائية العقدية ( $\epsilon'$ ) لمادة البولي كربونات بدلالة التردد

يُلاحظ من الرسم أن  $\epsilon'$  ينخفض بشكل مستمر مع زيادة التردد حيث يبدأ الخط عند قيمة تقارب **2.743** عند تردد **8 GHz** ويستمر في الانخفاض حتى يصل إلى قيمة **2.735** عند **12.5 GHz** هذا السلوك يشير إلى أن السماحية الكهربائية للمادة تقل مع زيادة التردد أي عند الترددات الأعلى يكون استقطاب المادة أضعف مما يقلل من قدرتها على تخزين الطاقة الكهربائية

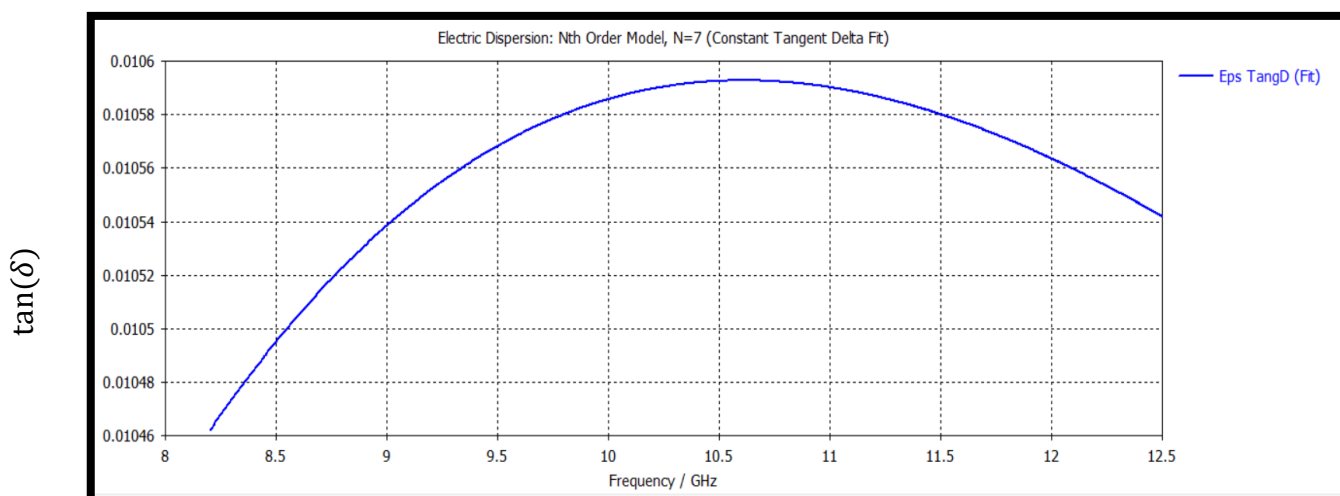
أما بالنسبة للجزء التخيلي من السماحية الكهربائية العقدية ( $\epsilon''$ ) لمادة البولي كربونات باستخدام برنامج *CST* فيوضحه الشكل (١١):



الشكل (١١): تغيرات الجزء التخيلي للسماحية الكهربائية العقدية ( $\epsilon''$ ) لمادة البولي كربونات بدلالة التردد

يبدأ الخط البياني بقيمة حوالي **0.0287** لـ  $\epsilon''$  ويستمر في الارتفاع حتى يصل إلى الذروة عند حوالي **10.4 GHz** ، بقيمة تقترب من **0.029** ثم يبدأ بالانخفاض بشكل تدريجي حتى تردد **12.5 GHz** جيجاهرتز هذا يدل على أن الخسائر العازلة تزداد مع زيادة التردد حتى نقطة تزيد قليلاً عن معينة **10.5 GHz** وبعدها تبدأ بالتناقص فعند الترددات المنخفضة نسبياً تزداد الخسائر بسبب استجابة جزيئات البولي كربونات للمجال الكهربائي مع زيادة التردد ،يزداد الاحتكاك بين الجزيئات المتذبذبة والمجال الكهربائي، مما يؤدي إلى خسائر أكبر في الطاقة.

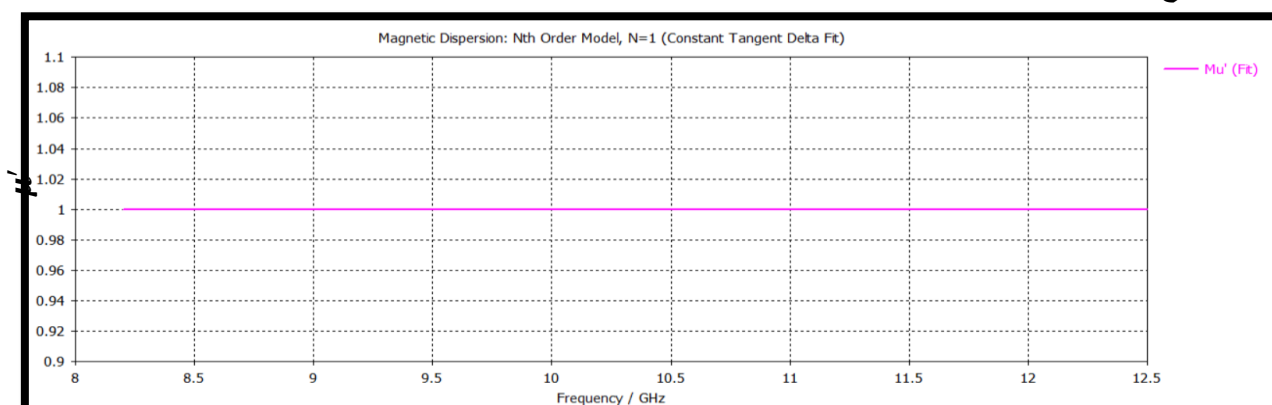
وبناءً على قيم السماحية الكهربائية العقدية يمكننا إيجاد قيم معامل الفقد ( $\tan(\delta)$ ) لمادة البولي كربونات باستخدام برنامج CST الذي يوضحه الشكل (١٢):



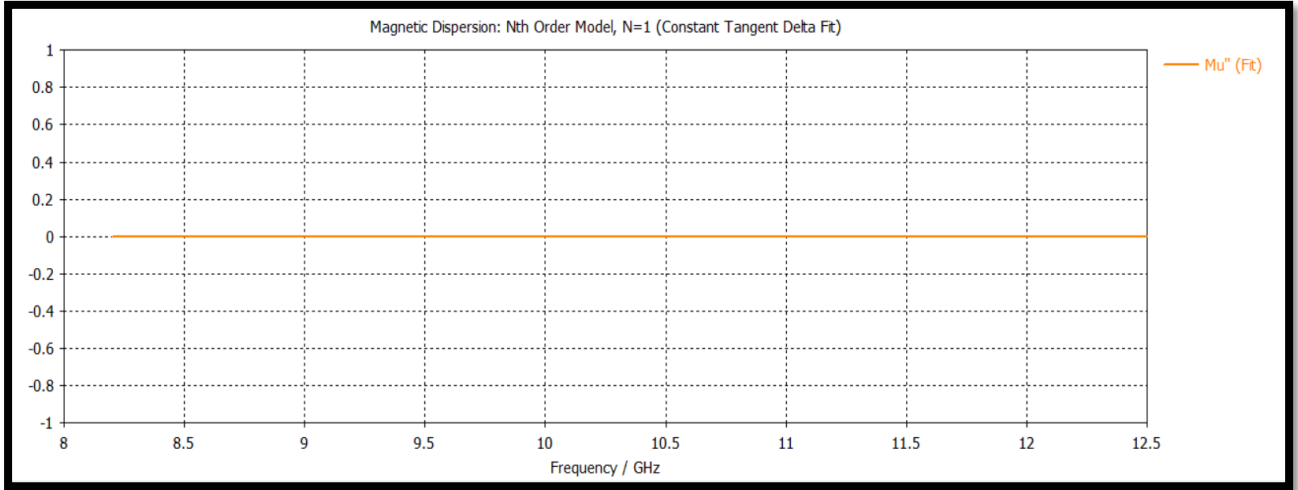
الشكل (١٢): تغيرات معامل الفقد ( $\tan(\delta)$ ) لمادة البولي كربونات بدلالة التردد

نلاحظ أن  $\tan(\delta)$  يرتفع تدريجياً من حوالي **0.01046** عند التردد  $8\text{ GHz}$  إلى أعلى قيمة تبلغ **0.01058** عند التردد  $10.5\text{ GHz}$  ، ثم يبدأ بالانخفاض إلى **0.01054** عند التردد  $12.5\text{ GHz}$  هذا يُشير إلى أن معامل الفقد الكهربائي يزداد مع زيادة التردد حتى نقطة معينة، ثم يبدأ في الانخفاض.

وبالنسبة للنفاذية المغناطيسية العقدية بجزئها والذي يوضحه الشكلان (١٣) و (١٤) نلاحظ أن النفاذية المغناطيسية الحقيقية ثابتة إذاً البولي كربونات مادة غير مغناطيسية، ليس لها أي استجابة للحقول المغناطيسية وبالتالي النفاذية المغناطيسية تكون مساوية تقريباً لنفاذية الفراغ  $\mu_0$  ، وهي قيمة ثابتة في النظام الدولي (SI units) وبالنسبة للجزء التخيلي من النفاذية فإن المادة لا تحتوي على أي تأثير تشتت للمجالات المغناطيسية ولها  $\mu'' = 0$  باستخدام برنامج CST



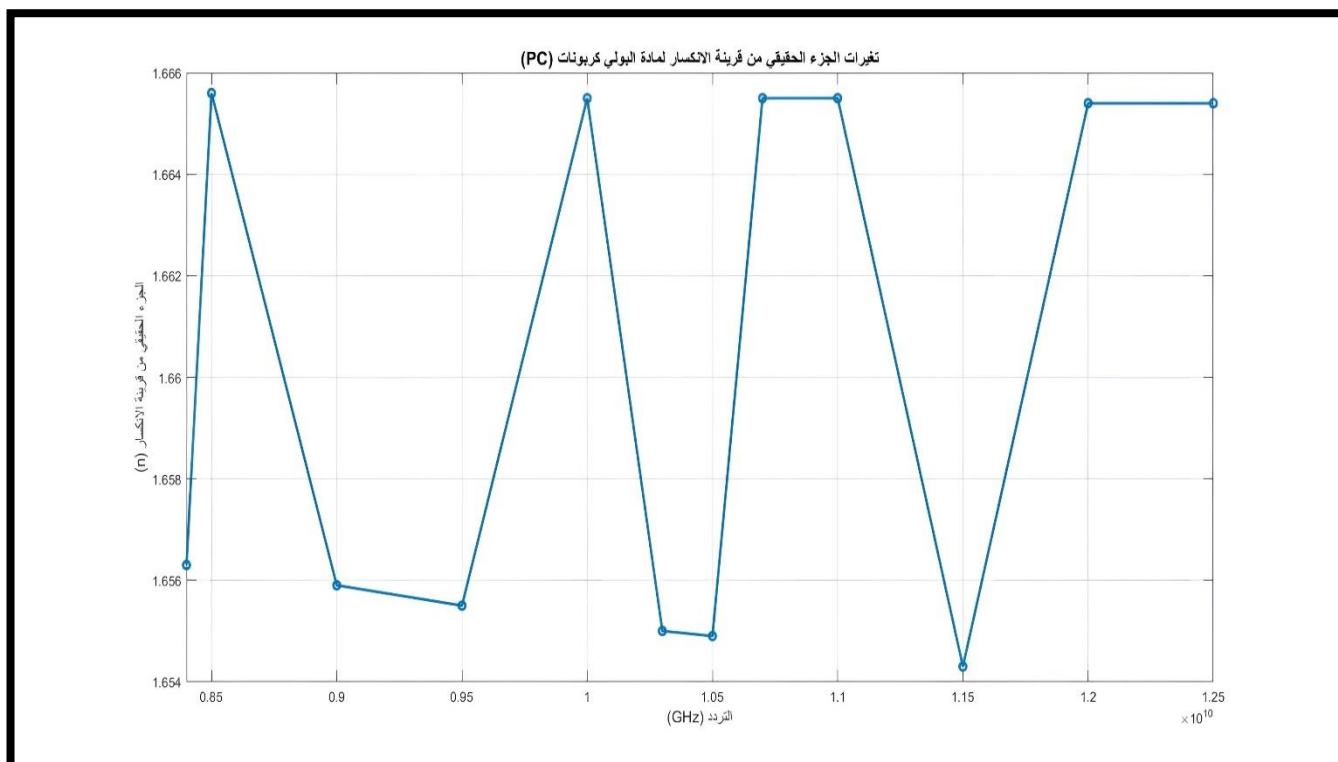
الشكل (١٣): النفاذية المغناطيسية الحقيقية  $\mu'$  بدلالة التردد لمادة البولي كربونات باستخدام برنامج CST



الشكل (١٤): النفاذية المغناطيسية الحقيقية  $\mu'$  بدلالة التردد لمادة البولي كربونات باستخدام برنامج CST

وبناءً على النتائج التي حصلنا عليها من حساب السماحية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية النسبيين يمكننا حساب قرينة الانكسار العقدية لمادة البولي كربونات فحصلنا على النتائج للجزء الحقيقي لقرينة الانكسار العقدية الموضحة بالجدول (٣).  
بناءً على هذه القيم الواردة في الجدول (٣) تم باستخدام الماتلاب دراسة تغيرات الجزء الحقيقي لقرينة الانكسار العقدية بدلالة التردد الذي يظهره الشكل (١٥):  
الجدول (٣)

$f(HZ) \times 10^9$	$n$
8.4	1.6563
8.5	1.6656
9	1.6559
9.5	1.6555
10	1.6655
10.3	1.6550
10.5	1.6549
10.7	1.6655
11	1.6655
11.5	1.6543
12	1.6654
12.5	1.6654



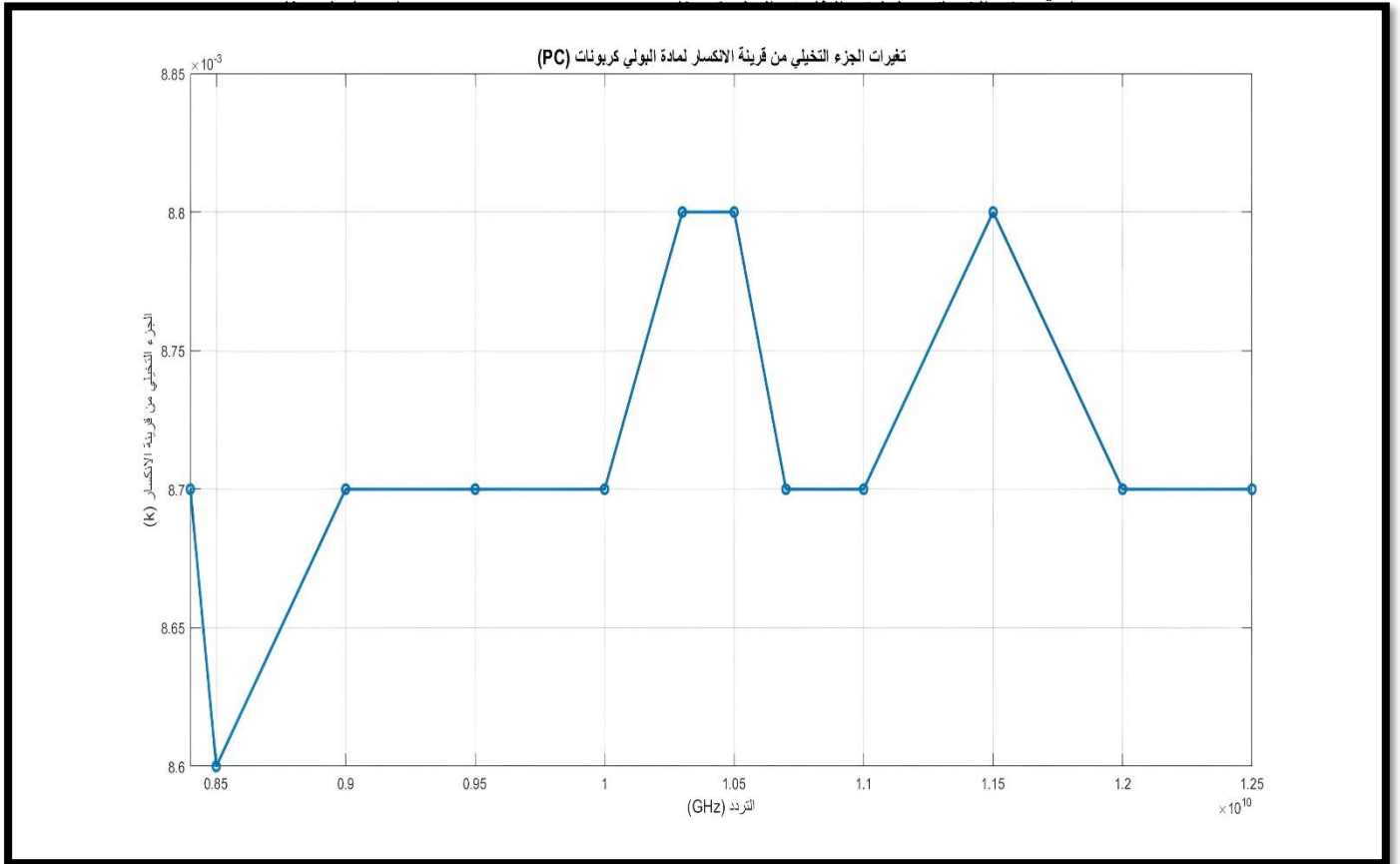
الشكل (١٥): تغيرات الجزء الحقيقي لقربة الانكسار العقدية بدلالة التردد لمادة البولي كربونات باستخدام برنامج *Matlab*

تتفاعل الموجات الكهرومغناطيسية بشكل مختلف مع الجزيئات المكونة للمادة بالتالي عند الترددات الرنينية تتغير بشكل ملحوظ الخصائص الكهرومغناطيسية لها مثل السماحية الكهربائية [9] وهذا ما توصلنا إليه في دراستنا لسماحية البولي كربونات وهذا ما يعكسه من تغيرات مختلفة بقربة الانكسار. إذاً هذه التذبذبات ناتجة عن الاهتزازات الجزيئية الداخلية التي تحدث بسبب التفاعلات بين المجالات الكهرومغناطيسية وجزيئات البولي كربونات التي تتكون من سلاسل بوليمرية ذات بنية معقدة وتحتوي على روابط كيميائية يمكن أن تهتز عند تعرضها لترددات معينة فعندما يتطابق التردد الخارجي للموجة الكهرومغناطيسية مع التردد الطبيعي للاهتزازات الجزيئية يحدث الرنين.

وهذا بدوره يزيد من التوهين كما هو موضح بالجدول (٤) ويؤدي إلى فقدان الإشارة وتشويهها وهذا ما يؤكد الرسم البياني لتغيرات الجزء التخيلي لقربة انكسار مادة البولي كربونات بدلالة التردد في الشكل (١٦):

الجدول (٤)

$f(HZ) \times 10^9$	$k$
8.4	0.0087
8.5	0.0086
9	0.0087
9.5	0.0087
10	0.0087
10.3	0.0088
10.5	0.0088
10.7	0.0087
11	0.0087
11.5	0.0088
12	0.0087
12.5	0.0087



الشكل (١٦): تغيرات الجزء التخيلي لقرينة انكسار مادة البولي كربونات بدلالة التردد باستخدام برنامج *Matlab*

نلاحظ أن القيم الظاهرة عند الترددات حوالي  $10.5 \text{ GHz}$  و  $11.5 \text{ GHz}$  تعكس وجود ظواهر رنينية داخل المادة. عند هذه الترددات تتفاعل الموجات الكهرومغناطيسية بشكل أكبر مع جزيئات البولي كربونات، مما يؤدي إلى زيادة الامتصاص وتغير في قيمة الجزء التخيلي من قرينة الانكسار وتشير الانخفاضات الحادة في بعض الترددات عند  $8.5 \text{ GHz}$  إلى أن المادة تكون أقل قدرة على امتصاص الطاقة عند هذه الترددات بسبب ضعف التفاعل بين الموجة الكهرومغناطيسية وجزيئات المادة عند هذه الترددات مما يقلل من عملية الامتصاص.

### المناقشة والاستنتاجات:

بالنسبة لمادة التفلون أظهرت هذه المادة تغير طفيفاً في السماحية الكهربائية وتميزت بسماحية كهربائية حقيقية  $\epsilon' \cong 2.1$  في المجال المدروس وتمتعها بخسائر كهربائية منخفضة جداً تكاد تكون معدومة وهذا ما أظهرته نتائج حساب الجزء التخيلي من السماحية الكهربائية  $\epsilon''$ ، وكما أظهر بأنه مادة غير مغناطيسية بالتالي نفاذيته المغناطيسية الحقيقية تكون قريبة من الواحد  $\mu' = 1$  ولم تُظهر أي خسائر مغناطيسية  $\mu'' = 0$  وتبين لنا أن للتفلون معامل فقد كهربائي منخفض جداً بلغت  $\tan(\delta) = 0.0002$

أما بالنسبة لمادة البولي كربونات فتميزت بسماحية كهربائية حقيقية أعلى من التفلون بلغت  $\epsilon' \cong 2.7$  وبخسائر كبيرة نسبياً مقارنةً بنظيره وبلغت  $\epsilon'' = 0.029$  واتفقت هذه المادة مع التفلون بكونها مادة غير مغناطيسية ولها معامل فقد كهربائي يزيد عن معامل فقد التفلون حيث بلغت أكبر قيمة له  $\tan(\delta) =$

**0.01058**

إذاً من حيث السماحية الكهربائية فإن التفلون أفضل من البولي كربونات بسبب السماحية المنخفضة والخسائر الكهربائية الأقل، مما يجعله أكثر كفاءة في نقل الإشارات الكهربائية دون فقد، أما من حيث النفاذية المغناطيسية كلتا المادتين تظهران سلوكاً غير مغناطيسي مع  $\mu' = 1$  و  $\mu'' = 0$  مما يجعلهما متساويتين من حيث الخصائص المغناطيسية ومن أجل معامل الفقد للتفلون لديه معامل فقد كهربائي ومغناطيسي أقل من البولي كربونات، مما يعني أنه أكثر فعالية في التطبيقات التي تتطلب خسائر منخفضة.

#### بالنسبة لقرائن الانكسار للتفلون:

فإن الجزء الحقيقي من قرينة الانكسار يبقى ثابتاً عند حوالي  $n' = 1.449$  في مجال الترددات المدروسة وهذا يشير إلى أن التفلون يمتلك ثابت عزل منخفض وثابت عبر نطاق الترددات وهذا ما يجعله مادة جيدة لتمرير الموجات الكهرومغناطيسية عبرها دون حدوث تغير كبير في الطور أو الانعكاس أما بالنسبة للجزء التخيلي  $k$  فهذه قيمة قريبة جداً من الصفر، مما يعني أن التفلون يمتلك خسائر منخفضة جداً عند الترددات الميكروويف بالتالي يضمن هذا الأداء المثالي للتفلون في تقليل امتصاص الطاقة مما يقلل من الخسائر الحرارية ويزيد من كفاءة نقل الإشارة.

بالمقارنة مع قرينة انكسار مادة البولي كربونات فتملك قرينة انكسار حقيقية أعلى تبلغ  $n' \cong 1.6$  بسبب امتلاكه لثابت عزل كهربائي أعلى وهذا ما يؤدي إلى زيادة الانعكاسات وتقليل سرعة الانتشار مقابل ذلك تمتلك البولي كربونات قيمة أكبر نسبياً لـ معامل التوهين  $k$  مقارنةً بالتفلون مما يعني خسائر أكبر ومنه نستنتج أن التفلون يتفوق بشكل كبير على البولي كربونات فيما يخص الخسائر الكهرومغناطيسية عند الترددات  $X - Band$  (الترددات المايكرويفية) مما يجعله المادة المفضلة لتقليل الامتصاص الحراري والحفاظ على نقاء الإشارة أكثر من البولي كربونات.

تمت مقارنة هذه النتائج التي حصلنا عليها لمادة التفلون مع النتائج التي حصل عليها Hassan Elmajid [11] حيث أظهرت القيم تقارباً كبيراً في السماحية الكهربائية، فقد كانت في دراسته  $\epsilon' = 2.08$  و  $\epsilon'' = 0.002$  أما النفوذية المغناطيسية  $\mu' = 1$  و  $\mu'' = 0.001$  وتُعزى هذه الاختلافات الطفيفة إلى طرق القياس المختلفة حيث استخدم في دراسته جهاز تحليل الشبكات Network Analyser الذي يعتمد على قياسات مباشرة لمعاملات التشتت (S-Parameters) بالإضافة إلى ذلك، تمت مقارنة قرينة الانكسار العقديّة مع النتائج التي حصل عليها Kevin [12] وكانت  $\tilde{n} = 1.783 - 0.001i$  وأيضاً تعود الاختلافات الطفيفة بسبب الطريقة المتبعة في القياس فهو قد استخدم تقنية المجال الحر المعدلة Modified Free – Space Technique، تُشير هذه الفروقات الطفيفة إلى أن الطريقة الحاسوبية (Computational Simulation) التي تم استخدامها في هذه الدراسة، والتي تعتمد على المحاكاة في برنامج CST، توفر دقة أعلى من الطرق العملية، حيث يمكن الحد من تأثير العوامل الخارجية مثل درجة الحرارة، التشتت، الشوائب في العينة، وأخطاء القياس التجريبية، بناءً على هذه النتائج، يمكن الاستنتاج بأن تقنيات القياس المختلفة قد تؤدي إلى فروقات طفيفة، لكن جميع الطرق تؤكد أن التفلون يتمتع بسماحية كهربائية مستقرة وخسائر منخفضة، مما يجعله مادة مثالية للتطبيقات الميكروية مثل الهوائيات والرادارات.

- [1] D.M.Pozar ,2005, “*Microwave Engineering*” John Wiley and Sons.
- [2] Karle S. Packard “*The Origin of Waveguides: A Case of Multiple Rediscovery*” *IEEE transactions on Microwave theory and techniques*, vol. mtt-32, no.9, september 1984.
- [3] Perregrini Y. Cassivi and P.Arcioni,2002 “*Dispersion Characteristics of Substrate Integrated Rectangular Waveguide*” *IEEE transaction of Microwave and Wireless components*,Vol 12,No.-9,page no.333-335.
- [4] A.Munir and Mohammad F.Y.Musthofa,”*Rectangular to Circular Waveguide Converter for Microwave Devices Characterization*”,*International Journal on Electrical Engineering and Informatics*,Vol.3,No.3,2011.
- [5] Richard L. Coren, *Basic Engineering Electromagnetics an Applied Approach*, Prentice – Hall International Inc., 1st ed., Englewood Cliffs, NJ (1989).
- [6] William H. Hayt Jr. and John A.Buck, *Engineering Electromagnetis* , 6th ed., McGraw Hill, New York (2001).
- [7] *JOURNAL OF ADVANCED DIELECTRICS* Vol. 4, No. 4 (2014)
- [8] I. Awai, Y. Maegawa and T. Ishizaki, *Measurement of effective material constants of artificial dielectrics made of spherical metal particles*, *Microwave Conf. (APMC) IEEE* (2009), pp. 1655–1658
- [9] mSCHOFF, C. A. and VON HEDENSTROM, H. A., *Ber.*, 35, 3431 (2001) .
- [10] S. Batista and M. El-Shenawee, "Free-Space Characterization of Radar Absorbing Non-Magnetic Materials in the W-Band," 2020 94<sup>th</sup> *ARFTG Microwave Measurement Symposium (ARFTG)*, San Antonio, TX, USA, pp. 1-4, 2020. DOI: 10.1109/ARFTG47584.2020.9071679  
» <https://doi.org/10.1109/ARFTG47584.2020.9071679>
- [11] Hassan Elmajid,Jaouad Terhzaz,Hassan Ammor,Mohamed Chaïbi,Angel Mediavilla, A New Method to Determine the Complex Permittivity and Complex Permeability of Dielectric Materials at X-Band Frequencies, *INTERNATIONAL JOURNAL OF MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY*,VOL.10, NO.1, JANUARY 2015.
- [12] Kevin M. Lambert,*Vantage Partners*, LLC,Brook Park, Ohio,Refractive Index of Polyaryletherketone (PEEK) at X- and W-Band, NASA/TM—2019.