تأثير الاستقطاب و خصائص العزل على تفاعل الحقل الكهرطيسي في الاوساط غير الايزوتروبية

م. نذير شورى[1] د. محمد موسى[2]

د. سلام محمود[3]

ملخص البحث

يتناول هذا البحث تأثير ثابت العازلية والاستقطاب في الاوساط غير الايزوتروبية على انتشار الامواج الكهرطيسية.

يمتاز الوسط غير الايزوتروبي بخصائص كهربائية ومغناطيسية مختلفة ومتباينة في كل محور من المحاور الاحداثية الثلاثة على حدى وهذا التباين سينعكس على خصائصه الكهربائية كالاستقطاب والعازلية وغيرها، مما يؤدي إلى صعوبات كبيرة في طرائق حلول معادلات ماكسويل لتحليل الظواهر الكهرطيسية وتفاعلاتها.

تلاقي مثل هذه الابحاث تطبيقات هندسية هامة باعتبار ان المواد النصف الناقلة والعناصر الحساسة وشاشات الاظهار أغلبها تشكل مواد غير ايزوتروبية. تفيد هذه المواد في مجالات التحكم و الاتمتة وخاصة في حالات المواد ذات ثوابت عازلية عالية والتي يمكن ان تستخدم كذلك في تخامد الموجة والتحجيب الكهرطيسي.

تمت متابعة هذا التفاعل بمساعدة البيئة البرمجية CST والمعتمدة على طريقة الفرق المتناهي في المجال الزمني FDTD في الفراغ والزمن.

الكلمات المفتاحية : الأوساط الايزوتروبية ، الأوساط غير الايزوتروبية ، الحقول الكهرطيسية، طريقة الفرق المتناهي في المجال الزمني FDTD ، البيئة البرمجية CST .

(1) مهندس / طالب دكتوراة –قسم هندسة الطاقة الكهربائية في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية–جامعة دمشق

(2) أستاذ –قسم هندسة الطاقة الكهربائية في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية–جامعة دمشق

(3) أستاذ مساعد–قسم هندسة الطاقة الكهربائية في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية–جامعة دمشق

Effect of polarization and insulation characteristics on EM interaction in anisotropic mediums

Nazir Shora(1) PhD.Mohamed mousa(2) PhD.Salam mahmoud(3)

Abstract

This research concentrate on the effect of dielectric constant and polarization in anisotropic mediums on electromagnetic waves propagation. The Anisotropic mediums particularized with different electrical and magnetic characteristics which varied in value from spatial direction to another in three dimensional coordinate system. This variation will be reflected on electrical characteristics such as polarization, insulation and others, which leads to huge difficulties in Maxwell's equations solution methods in EM Phenomena's analysis and interaction. Such researches are found in engineering applications because semiconductors, sensitive devices, display monitors, etc. are anisotropic materials in general. This materials are important in control, automation and Especially in materials with high anisotropic constants, which is used in wave attenuation or damping and EM Shielding. This interaction has been followed up by aid of advanced simulation environment (CST), which depend on finite difference time domain method "FDTD" in Space and time.

Key words: Anisotropic materials, Isotropic materials, electromagnetic Fields, Finite Difference Time Domain FDTD, CST software.

(1)Electrical Engineer/ PhD Student - Electrical Power Department- Faculty of Mechanical &Electrical Engineering-Damascus University

(2) Professor - Electrical Power Department- Faculty of Mechanical &Electrical Engineering-Damascus University

(3)Professor Assistant- Electrical Power Department- Faculty of Mechanical &Electrical Engineering-Damascus University

مقدمة

تنتشر الامواج الكهرطيسية المستوية المنتظمة في الخلاء بسرعة الضوء، بحيث تقع جبهة الموجة في مستويات عمودية على اتجاه الانتشار، وعند انتشارها في الأوساط المادية ستنخفض سرعتها نسبيا، يضاف إلى ذلك حدوث ظاهرة الاستقطاب الكهربائي. تختلف صورة التفاعل للموجة الكهرطيسية في الأوساط غير الايزوتروبية مثل المواد الكريستالية، عندئذ فإن هذه الأمواج ستتعرض لظواهر الانكسار والانعكاس وتغيير السرعة وطول الموجة من جانب ومن جانب آخر تكون الاستقطابات الكهربائية للمادة غير الايزوتروبية متباينة في الاتجاهات المختلفة بتأثير من الحقول الكهرطيسية.

يتم تطوير مواد وتراكيب صنعية بخصائص غير ايزوتروبية لاستخدامها في العديد من التطبيقات الهندسية مثل شاشات LCD وأجهزة الجوال الذكية وفي تقنيات الرادار وغيرها.

تجري حاليا العديد من الابحاث في مجال التفاعلات الكهرطيسية في المواد غير الايزوتروبية للاستفادة من نتائجها في مجال التحجيب الكهرطيسي وامتصاص الموجة وتبعثرها.

يتناول هذا البحث تحليل التفاعل للأمواج الكهرطيسية مع المواد غير الايزوتروبية، من خلال متابعة الاستقطاب في المناحي المختلفة كصورة لهذا التفاعل[8,10,11,19,20].

مشكلة البحث

يرافق انتشار الأمواج الكهرطيسية بترددات مختلفة عبر أوساط غير ايزوتروبية، مجموعة من الظواهر منها التبعثر والتخامد والانكسار والتقزح. يمكن أن تظهر تبعا للعلاقة التفاعلية مع هذه الأوساط خصائص جديدة قد يستفاد منها في التحجيب والتبعثر التام للموجة الكهرطيسية، يتوقف ذلك على قابليتها للاستقطاب والخصائص الاهتزازية لشبكتها البنيوية.

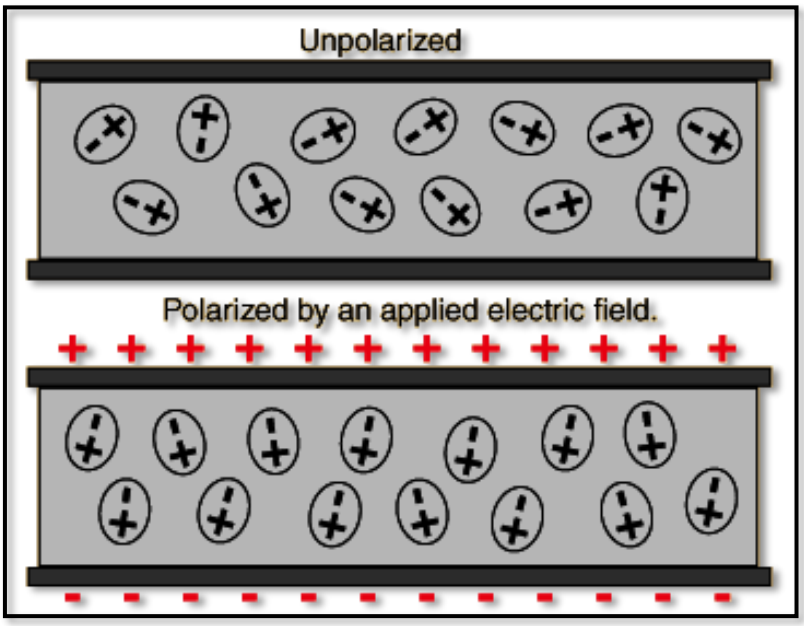
تتطلب هذه الظواهر دراسة الاستقطاب الكهربائي في المواد الايزوتروبية وغير الايزوتروبية والمعاملات المتعلقة بالحقول والأمواج الكهرطيسية.

تمتاز الأوساط غير الايزوتروبية بخصائص كهربائية مختلفة في الفراغ، ويعد تحليل الحقول هذه في عصرنا الراهن ذو أهمية بالغة وخاصة في التطبيقات الهندسية الحديثة النانوية والميكروية.

1- الاستقطاب الكهربائي في المواد الايزوتروبية وغير الايزوتروبية:

تحدث ظواهر مختلفة للأمواج الكهرطيسية في الأوساط غير الايزوتروبية كتغير خصائص الانتشار والانكسار والحيود والتقزح والتبعثر، تنعكس الخصائص غير الايزوتروبية في حدوث تفاعلات غير نمطية للأمواج الكهرطيسية. تحتاج دراسة وتحليل التفاعلات المعقدة والمركبة المشار إليها إلى تحديد التغيرات الدقيقة ومتابعة تحولاتها الزمنية من خلال ظاهرة الاستقطاب غير الايزوتروبي.

تتكون المواد العازلة الخالية من الشحنات الحرة، من ذرات معتدلة كهربائيا تضم إلكترونات سالبة وبروتونات موجبة مكافئة في النوى، وتتكون بعض المواد الأخرى في طبيعتها من ثنائيات أقطاب أو ديبولات (شحنة موجبة وسالبة مقيدتان اي بمراكز للشحنات غير متطابقة). عند تعرض النوع الأول ذي البنى الذرية إلى الحقول الكهربائية الخارجية تتشكل الديبولات، وتنزاح الشحنات الموجبة والسالبة ضمن غلاف الجزيء، وتدور حول محورها لتنتظم باتجاه خطوط الحقل، بينما في النوع الثاني تتوزع الديبولات عشوائيا بغياب الحقل وتنتظم عند تأثيره[3,19,20].



الشكل (1) الاستقطاب لوسط عازل قبل وبعد تطبيق الحقل الكهربائي

يدعى جداء شحنة الديبول والمسافة بين الشحنتين بعزم الديبول الكهربائي، ومجموعة هذه العزوم المنتظمة بتأثير من الحقل في واحدة الحجم تسمى بالاستقطاب الكهربائي (Polarization) كما مبين في الشكل (1)، وعندما يتساوى شعاع الاستقطاب الكهربائي في كل المناحي يكون العازل ايزوتروبيا. عند تعرض مثل هذه العوازل إلى الحقول الخارجية سينشأ إضافة إلى شعاع كثافة التدفق في الفراغ $(\mathbf{D_0})$، سينشأ شعاع استقطاب المادة. بعبارات أخرى سيظهر تأثير الحقل الخارجي على المادة في صورة شعاع الاستقطاب $(\mathbf{P})$ وفق العلاقات التالية[3,4,19,20]:

$$\mathbf{D}_o = \varepsilon_o \mathbf{E} \quad (1)$$

$$\mathbf{P} = \varepsilon_o X \mathbf{E} \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_o(1 + X)\mathbf{E} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_o \varepsilon_r \mathbf{E} = \varepsilon_o E + \boldsymbol{P} \quad (3)$$

حيث:

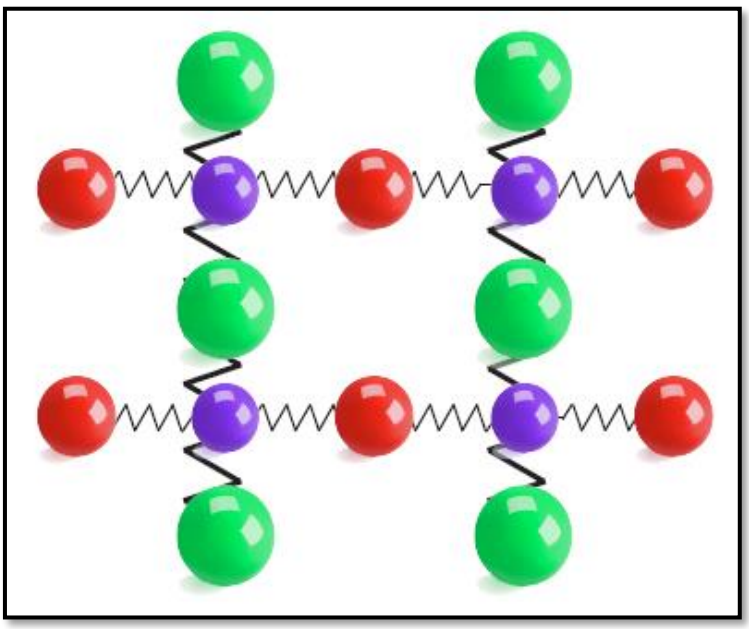
- $\boldsymbol{E}$ – شعاع شدة الحقل الكهربائي V/m
- $\mathbf{D}$ – كثافة التدفق الكهربائي (شعاع الإزاحة) C/m^2
- ε – السماحية الكهربائية F/m
- $\varepsilon_0 =$ السماحية الكهربائية للخلاء $F/m \quad 8.85 \times 10^{-12}$
- ε_r – السماحية الكهربائية النسبية (ثابت العازلية)
- $\boldsymbol{P}$ – الاستقطاب الكهربائي C/m^2
- X – تآثرية المادة Susceptibility للاستقطاب

يبين الجدول (1) [14] ثوابت العازلية الكهربائية لمجموعة من المواد.

Material	Relative Permittivity
Vacuum	1 (by definition)
Air	1.00058986
Polytetrafluoroethylene (PTFE, Teflon)	2.1
Paper	3.85
Diamond	5.5-10
Methanol	30
Water	80.1
Titanium dioxide (TiO_2)	86-173
Strontium titanate ($SrTiO_3$)	310
Barium titanate ($BaTiO_3$)	1,200 - 10,000
Calcium copper titanate ($CaCu_3Ti_4O_{12}$)	>250,000

الجدول (1) قيم ثابت العازلية لبعض المواد

تكون الأوساط غير الايزوتروبية بشعاع استقطاب يختلف تبعا للمناحي، أي أن استجابة المادة لتأثير الحقل الخارجي تتبع لاستقطابها وفق بناها وخصائصها. تشير العلاقة (3) إلى أن محصلة شعاع شدة الحقل الكهربائي لن تبقى مسايرة لشعاع كثافة التدفق الكهربائي **D** ، كما مبين في الشكل (2) [15] .



الشكل (2) الاستقطاب غير الايزوتروبي المتباين تبعا للمنحى لمادة عازلة عند تطبيق حقل كهربائي

سيختلف تفاعل المادة غير الايزوتروبية مع الموجة الواردة تبعا لاتجاهات شعاع الاستقطاب الكهربائي، حيث ستخضع الشحنات المقيدة أو الديبولات إلى تأثير قوى الحقل الكهربائي (الاستقطاب)، ويكون على محور ما مثل x اكبر منه على محور y أو z أو كليهما[3,16,18].

ستبدي تلك الشحنات أو الديبولات استجابة متباينة على المحاور الاحداثية، حيث تكون شديدة على أحد المحاور وضعيفة على الآخر، يتم تمثيل الروابط بنوابض بمرونة مختلفة، فمثلا تكون المرونة على المحور x أكبر منها على المحور y أو z أو كليهما. وهكذا فإن العلاقة بين شعاع كثافة التدفق الكهربائي و–شدة الحقل الكهربائي تصبح تنسورية–Tensors (وهي مصفوفة عددية تتحدد قيمها وفقا للاتجاه الفراغي أو المنحى ضمن المادة)، وتكتب الخصائص المصفوفية (التنسورية) لـ $[\boldsymbol{\varepsilon}]$ كما يلي [12,16,19,20]:

$$[\mathbf{D}] = [\boldsymbol{\varepsilon}].[\mathbf{E}] \tag{4}$$

$$[\mathbf{D}] = [\boldsymbol{\varepsilon}].[\mathbf{E}] = \varepsilon_o[\mathbf{E}] + [\mathbf{P}] \tag{5}$$

حيث:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{D_x} \\ \mathbf{D_y} \\ \mathbf{D_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{E_x} \\ \mathbf{E_y} \\ \mathbf{E_z} \end{bmatrix} \tag{6}$$

لا تستجيب الديبولات البنيوية آنيا لتأثير الحقل الكهربائي الخارجي، وتحتاج إلى فترة زمنية لانتظامها بسبب عزم عطالتها، وبعد انتظامها في الأوساط الايزوتروبية سيتطابق الشعاع **D** مع اتجاه شعاع الاستقطاب **P** . ستحدث صورة مختلفة أكثر تعقيدا للتفاعل في الأوساط غير الايزوتروبية، حيث سيتأخر الشعاع **D** في الوسط غير الايزوتروبي ولن يساير شدة الحقل الكهربائي **E** في الاتجاه، باعتبار أن شعاع الاستقطاب على كل محور يختلف عن المحور الآخر، فإن أشعة شدة الحقل الكهربائي **E** ستنزاح عن أشعة كثافة التدفق الكهربائي **D** تبعا للأبعاد الفراغية[3,20].

2- الانتشارات الكهرطيسية في الاوساط غير الايزوتروبية

عند انتشار الأمواج الكهرطيسية في الاوساط الايزوتروبية ، كما هو معروف فإن الموجة المستوية المنتظمة ستحافظ على استقطابيتها الكهربائية، وستعاني من الانكسار وتغيير سرعتها، حيث يتوقف ذلك على قيمة ε_r أو شعاع الاستقطاب الكهربائي، وتعطى قرينة الانكسار n بالعلاقة التالية [8]:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{1/\sqrt{\mu_0 . \varepsilon_0}}{1/\sqrt{\mu_0 . \varepsilon_0 . \varepsilon_r}} = \sqrt{\varepsilon_r} \qquad (7)$$

حيث:

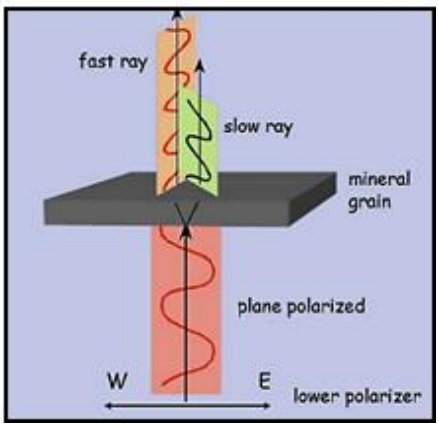
$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_o . \mu_o}}$ سرعة الموجة في الخلاء وتساوي سرعة الضوء m/s

$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_o . \mu_o . \varepsilon_r}}$ سرعة الموجة في الوسط غير الايزوتروبي

تصبح علاقة قرينة الانكسار عند الأخذ بالحسبان أن الوسط غير ايزوتروبي بخصائص ε_r مصفوفية (تنسورية)، كالتالي:

$$[n]^2 = [\varepsilon_r] \qquad (8)$$

يتضح من المعادلة (8) حدوث انكسارات متعددة ضمن المادة غير الايزوتروبية ويرافق ذلك اختلافات في السرعة الطورية للموجة في الاتجاهات المختلفة، وتتمثل بظاهرة التقزح، مما يؤدي إلى تحليل الشعاع الوارد للحقل إلى عدة مركبات [7,8]، كما مبين بالشكل (3).



الشكل (3) تحلل شعاع الحقل الكهرطيسي الوارد على وسط غير ايزوتروبي إلى عدة مركبات

تخضع الموجة الكهرطيسية عند ورودها بزاوية على سطح المادة إلى قانون سنيل في الانكسار والانعكاس [8] وفق العلاقة الآتية:

$$n_1 . \sin\theta_1 = n_2 . \sin\theta_2 \qquad (9)$$

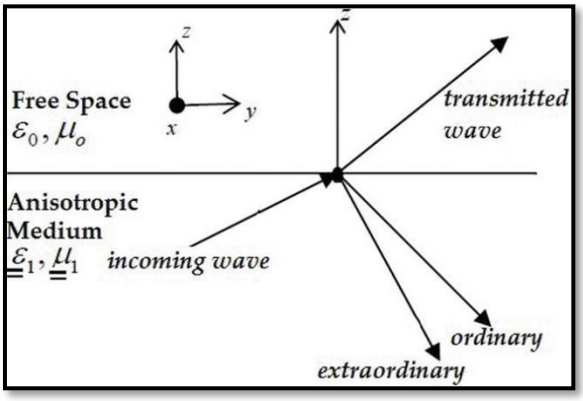
حيث :

θ_1:زاوية الورود

θ_2:زاوية الانكسار في الوسط الثاني.

ستتعرض الموجة الكهرطيسية عند انتشارها في وسط ما، ومواجهتها للحد البيني مع مادة أخرى إلى الانعكاس الجزئي بزوايا تختلف في الوسط غير الايزوتروبي عنها في الوسط الايزوتروبي [الشكل (4)]، وسيأخذ عندها قانون سنيل الصورة التنسورية التالية:

$$[n]_1 . \sin[\theta]_1 = [n]_2 . \sin[\theta]_2 \qquad (10)$$



الشكل (4) تباين زوايا الانعكاس على الحد الفاصل بين وسط غير ايزوتروبي ووسط آخر مثل الخلاء

حيث سيحدد تينسور tensor قرائن الانكسار سرعات الانتشار في الوسط غير الايزوتروبي وفق العلاقة التالية:

$$[\boldsymbol{v}]_{\emptyset} = \frac{c}{[n]} \qquad (11)$$

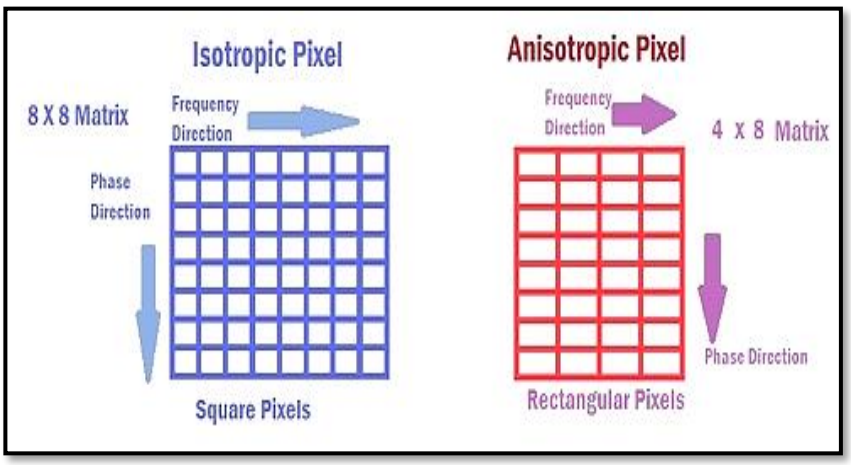
تشير هذه العلاقة إلى اختلاف سرعة انتشار الموجة في الوسط غير الايزوتروبي، اي ان الموجة ستنتشر بمركبات موجية لها سرعات مختلفة من محور لآخر في المحاور الفراغية

للمادة. ومن هنا وعند دراسة هذه الاوساط بالطرائق العددية، سنحتاج إلى ادخال تعديلات معينة إما في شبكة الحل (ستختلف ابعاد الشبكة الفراغية تبعا للاتجاه) أو بادخال تعديلات في خوارزمية حل هذه الطرائق كما سنوضح ذلك لاحقا.

تعد طريقة الفرق المتناهي في المجال الزمني FDTD – Finite Difference Time Domain في البيئة البرمجية CST الاساس لمتابعة تغيرات الحقول الكهربائية والمغناطيسية في الأوساط الايزوتروبية وغير الايزوتروبية التي تستند إلى معادلات ماكسويل وحلولها التقريبية. تعتمد النمذجة لفضاء الحل وفق هذه التقنية في الوسط غير الايزوتروبي على خلايا Yee مكعبة الشكل وتتيح حساب شدة الحقل في عقد الشبكة باستخدام قاعدة قفزة الضفدع Leap–Frog بخطوات زمنية وفراغية محددة [22,23].

تنشأ صعوبات في النمذجة والمحاكاة لانتشار الأمواج الكهرطيسية في الأوساط غير الايزوتروبية نظرا لخصائصها التينسورية،كما تشير العلاقة (11) والتي تؤكد على اختلاف سرعات الانتشار وفقا للمحاور الفراغية الثلاثة.

تنعكس الخصائص غير الايزوتروبية على تقطيع فضاء الحل إلى عناصر خلايا Yee غير منتظمة، وبالتالي لن تحافظ على شكلها المكعب المنتظم، بل ستصبح على شكل متوازي اضلاع فراغيا ومستطيلات في مستويات ببعدين [الشكل(5)].



الشكل (5) تأثير الخصائص غير الايزوتروبية على نمط خلية Yee مقارنة بالطريقة التقليدية

يتضح مما سبق ظهور صعوبات كبيرة جدا في تنفيذ النمذجة والمحاكاة وتشكيل شبكة الحل الفراغية بأبعاد مختلفة وفق المنحى وذلك عند مراعاة الخصائص التنسورية للوسط. تمت معالجة هذه المشكلة باتخاذ اجراءات مناسبة لمواءمة معادلات ماكسويل وحلولها من أجل الحفاظ على أبعاد متساوية لخلايا Yee في شبكة الحل للوسط غير الايزوتروبي ذو الخصائص التينسورية، وترتكز اجراءات المواءمة على متابعة شعاع كثافة التدفق الكهربائي **D** المستقل عن خصائص الوسط والمطابق في الاتجاه لشعاع الاستقطاب الكهربائي في حلول معادلات ماكسويل. نحصل على قيمة الحقل الكهربائي في أوجه خلية Yee من قيم شعاع كثافة التدفق الكهربائي **D** [العلاقة (6)]، والتي تعوض قيمه في العلاقة (12) لحساب مركبات الحقل الكهربائي دون الحاجة للتعديل في خلايا طريقة FDTD [1].

$$[\boldsymbol{E}] = [\varepsilon]^{-1}.[\boldsymbol{D}] \qquad (12)$$

وتحسب التغيرات الزمنية للحقول الكهرطيسية بفواصل زمنية Δt وفراغية ثابتة لشبكة أبعادها dzو dyو dx. يكون اختيار الخطوات الزمنية بأصغر ما يمكن لتحقيق دقة حلول النمذجة، بحيث يتحقق $\frac{\mathrm{dr}}{\mathrm{dt}} > v$ حيث v سرعة قطع الموجة لأبعاد الخلية $\mathrm{d}r$ على المحاور الثلاث في الوسط. يمكن التعبير عن ذلك من خلال اختيار التزايد الزمني Δt أصغر من زمن انتقال الموجة بين عقدتين متتاليتين في شبكة الحل، وبمراعاة دقة الحل تكون ابعاد الخلية الفراغية dzو dyو dx أصغر من عشر طول الموجة المطبقة، $(\mathrm{dx}, \mathrm{dy}, \mathrm{dz}) \leq \lambda/10$. تحتاج متابعة هذه الحسابات خبرة المصمم واتقانه لهذه التقنيات المحوسبة، والتمكن من تفاصيل استخدام البيئة البرمجية بمراعاة الشروط الحدية وتصميم النموذج الملائم الذي يحاكي التطبيق الهندسي المدروس [22,23].

3-تحليل نتائج تأثير الاستقطاب الكهربائي لعازل غير ايزوتروبي على انتشار الموجة الكهرطيسية

أجريت دراسات للحقول والأمواج الكهرطيسية في الأوساط بخصائص كهربائية ثابتة (ايزوتروبية) في مختلف المناحي داخل المادة، ولكن يؤكد الواقع العملي في الحقيقة أن الأوساط والمواد في مختلف التطبيقات تشكل في أغلبها موادا غير ايزوتروبية بخصائص

مصفوفية (تنسورية). يشكل الاستقطاب الأساس في تقييم تفاعل الوسط مع الموجة أو الحقل، ويختلف رد فعل المادة واستقطابها باختلاف المنحى في الأوساط غير الايزوتروبية في الفراغ ثلاثي الأبعاد وفقا لمحاور الاحداثيات.

اجريت النمذجة والمحاكاة للتفاعل الكهرطيسي في الأوساط بخصائص مصفوفية تنسورية استنادا إلى إلى تقنية Finite Difference Time Domain– FDTD في البيئة البرمجية CST باستخدام معادلات ماكسول التينسورية وحلولها التقريبية.

نطبق في النمذجة والمحاكاة موجة كهرطيسية مستوية منتظمة وباستقطابية خطية، على مادة ذات خصائص غير ايزوتروبية أحادية المحور– Uniaxial على المحور x. أشرنا إلى الدور الأساسي لاستقطاب الأوساط العازلة في التفاعل الكهرطيسي، سواء كانت ايزوتروبية أو غير ايزوتروبية. لا يتغير الاستقطاب من موضع إلى آخر في المواد الايزوتروبية وفق المناحي الفراغية. يقابل ذلك حدوث استقطاب للوسط غير الإيزوتروبي بقيم مختلفة وفق المنحى في المادة، وينعكس ذلك بانزياح شعاع الاستقطاب عن شعاع شدة الحقل الكهربائي، عندها لن يبق شعاع كثافة التدفق الكهربائي (الازاحة) **D** مسايرا لشعاع الحقل الكهربائي. تعد حلول معادلات ماكسويل الشعاعية معقدة، ويزيدها تعقيدا الخصائص غير الايزوتروبية باستقطابها المتباين في المناحي المختلفة، من هنا تم اختيار وسط بخصائص مصفوفية تنسورية أحادية المحور (على المحور x)، أي أن الخصائص ثابتة على المحورين y,z ومتغيرة على x $(\varepsilon_z = \varepsilon_y \neq \varepsilon_x)$ ، كما تبين المعادلة (13) [1,3,17,20].

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_y \end{bmatrix} \qquad (13)$$

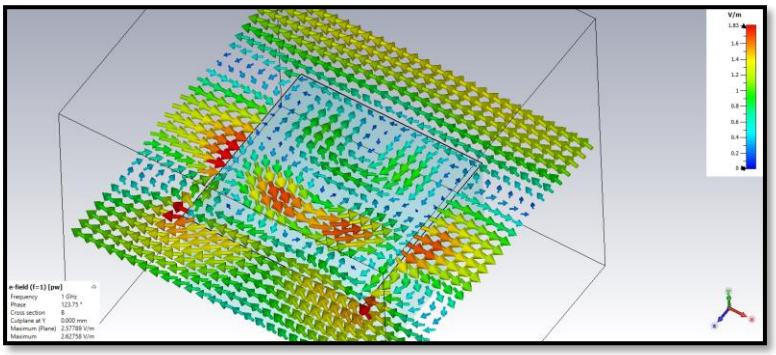
ستنعكس خصائص الاستقطاب على طول الموجة وقرينة الانكسار وسرعة الانتشار في الوسط، وتتعرض أيضا الموجة إلى الانكسار والانعكاس والتشتت، وستنخفض سرعة الانتشار بدرجات متباينة في المناحي المختلفة في المادة.

تمت متابعة التفاعل الكهرطيسي في الوسط غير الايزوتروبي بتطبيق موجة منبع منتظمة ومستوية بتردد 1GHz، وبمركبة كهربائية مستقطبة على المحور x (محور الخاصية غير الايزوتروبية ε_x)، وبمطال $1\ V/m$. أجريت الدراسة عند خصائص ثابت عازلية

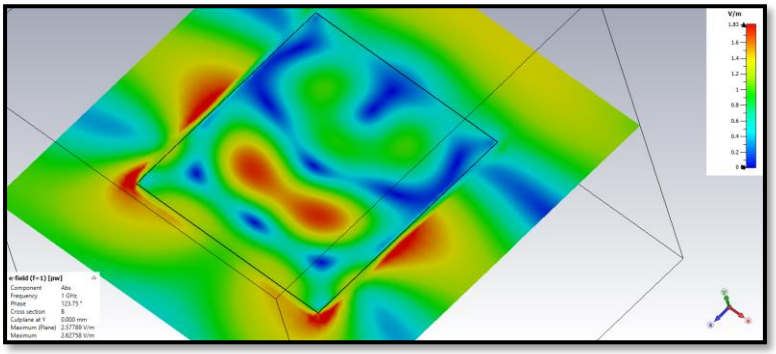
$\varepsilon_x = 10$ ثـم $\varepsilon_x = 50$ ثـم $\varepsilon_x = 100$ و $\varepsilon_x = 500$ علـى التـوالي، بينمـا كانـت خصائص ثابت العازلية على المحورين الآخرين $\varepsilon_y = \varepsilon_z = 2$ أو $\varepsilon_y = \varepsilon_z = 5$، علما أن أبعاد المادة المدروسة تساوي ضعفي طول الموجة.

حصلنا على نتائج النمذجة والمحاكاة في الوسط غير الايزوتروبي أحادي المحور عند $\varepsilon_x = 10$ و $\varepsilon_y = \varepsilon_z = 5$. يتم متابعة هذا التفاعل من خلال المركبة الكهربائية للموجة المنتشرة بتقنية الاظهار اللوني واللوني الشعاعي الفراغي. اخذت عينات بمقاطع افقية في فضاء الحل للمادة المدروسة، ومقاطع فراغية في الأبعاد الثلاثة، مبينة في الأشكال (6–a,b,c) على التوالي:

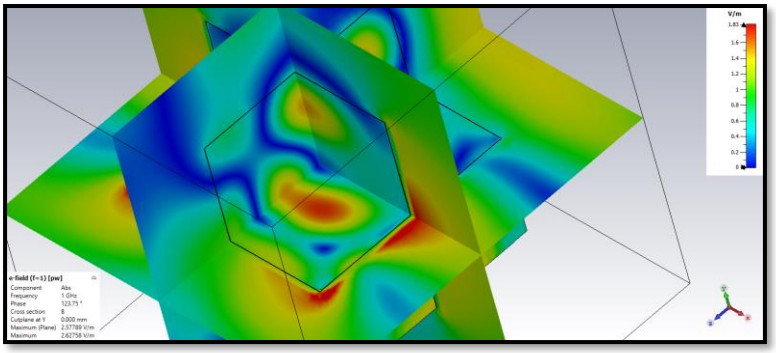
(a)



(b)



(c)



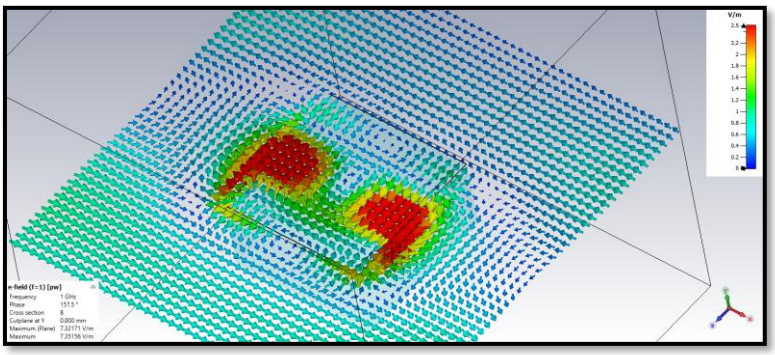
الشكل (6) تفاعل الحقل الكهربائي مع الوسط غير الايزوتروبي بخصائص
$\varepsilon_y = \varepsilon_z = 5$ و $\varepsilon_x = 10$

تبين النتائج لتوزع الحقل الكهربائي في المادة غير الايزوتروبية المدروسة تمركز طاقة الحقل داخل المادة في منطقة الخروج منها وعند حواف المادة وبقيمة أعظمية $2.4\ V/m$.

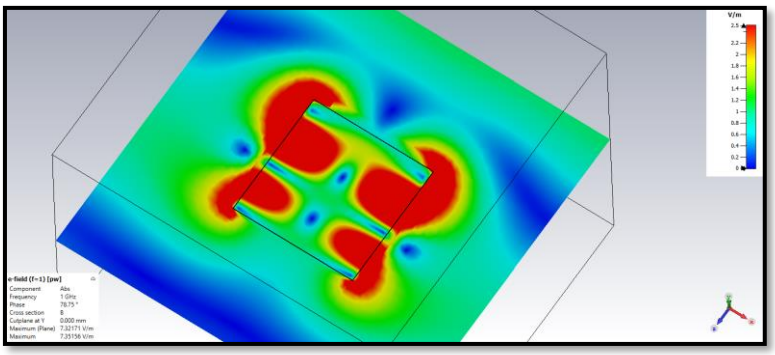
تحتاج متابعة التفاعل الكهرطيسي مع المادة غير الايزوتروبية إلى تغيير قيم ثابت العازلية للوسط مثل ε_x=50 و ε_y=$\varepsilon_z = 5$، مع الحفاظ على أبعاد الوسط وخصائص الموجة المطبقة كما أشرنا سابقا، تم الحصول على النتائج المبينة في الشكل (7) ، (a) الاظهار اللوني الشعاعي، (b) توزع الحقل في مستوي مع الاظهار بالتمييز اللوني ، (c)المقطع الفراغي ثلاثي الأبعاد في المادة المدروسة.

تبين النتائج ازدياد بؤر تمركز الحقل، وحدوث انزياح أكبر لهذه البؤر باتجاه حواف المادة بقيمة أعظمية $7.3\ V/m$ ، وظهور مجالات انخفاض شدة الحقل الكهربائي وتمركزها في المنتصف تقريبا.

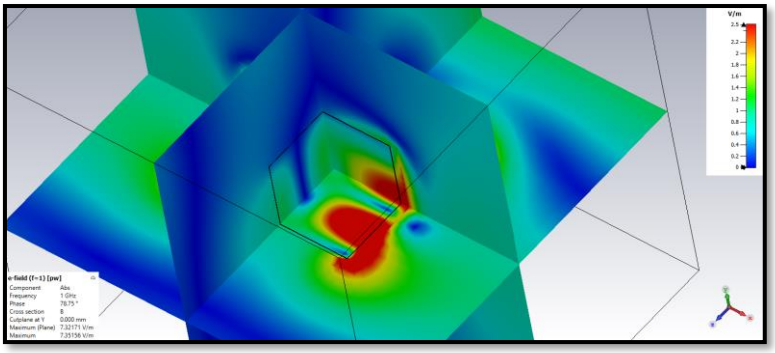
(a)



(b)



(c)

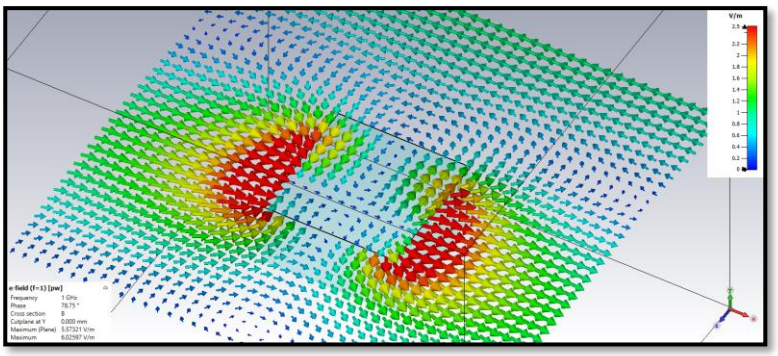


الشكل (7) تفاعل الحقل الكهربائي مع الوسط غير الايزوتروبي بخصائص

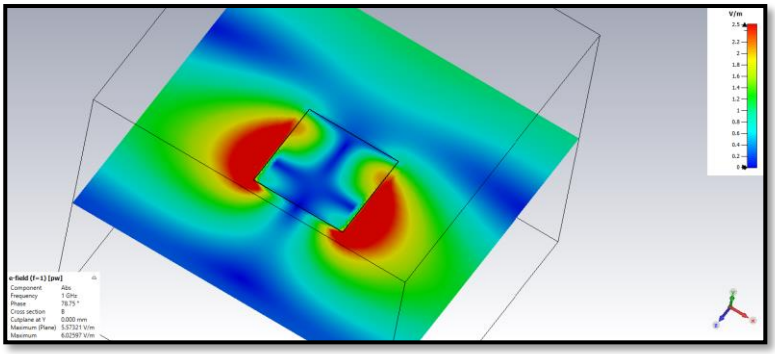
$\varepsilon_y = \varepsilon_z = 5$ و $\varepsilon_x = 50$

أعيدت الاجراءات عند ε_x=100 و ε_y=$\varepsilon_z = 5$، تم اظهار النتائج بتقنية الاظهار اللوني بالأشعة لمقطع مستوي في المادة، كما يبين الشكل(8,a)، ومقطع مستوي بالتمييز اللوني (b)، ومقطع في الفراغ ثلاثي الأبعاد في المادة المدروسة (c).

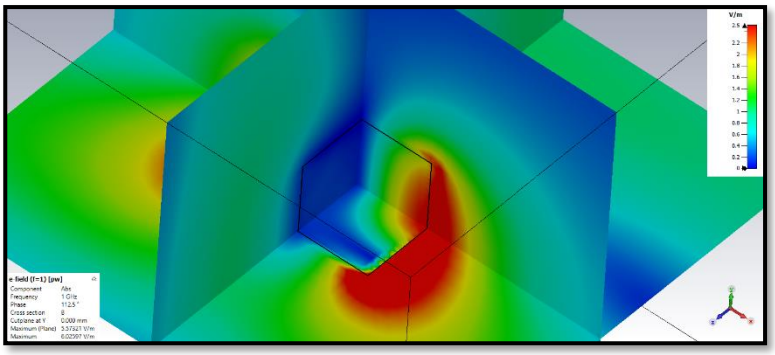
(a)



(b)



(c)



الشكل (8) تفاعل الحقل الكهربائي مع الوسط غير الايزوتروبي بخصائص

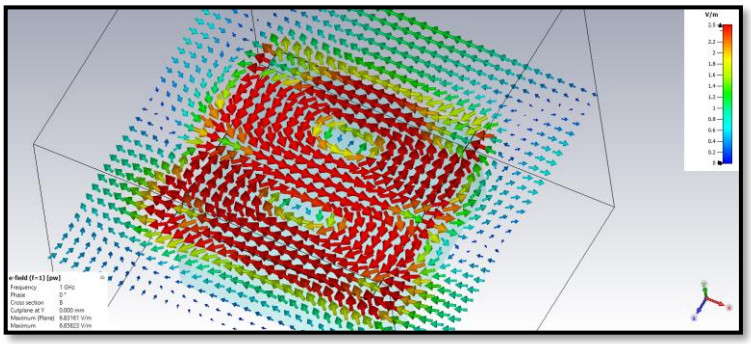
$\varepsilon_x = 100$ و $\varepsilon_y = \varepsilon_z = 5$

يتضح انخفاض تمركز الطاقة الكهربائية داخل المادة لقيم أدنى من $0.8\ V/m$، وانزياح شدة الحقل الأعظمية $6\ V/m$ نحو الحواف بشكل ملحوظ.

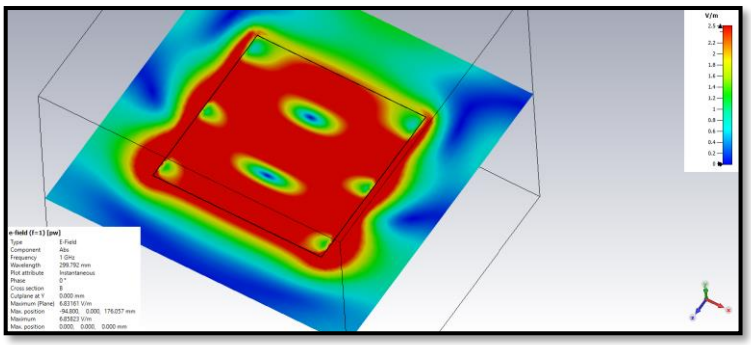
تم متابعة التفاعل الكهرطيسي في الوسط غير الايزوتروبي عند ذات القيم السابقة لـ ε_x وبتغيير خصائص الوسط باتجاه المحاور y وz إلى $\varepsilon_y=\varepsilon_z = 2$.

أظهرت نتائج تأثير الحقل من أجل $\varepsilon_x = 10$ و $\varepsilon_y=\varepsilon_z = 2$، والمبينة في الشكل (9) توزع المركبة الكهربائية للموجة الكهرطيسية بمقطع مستوي واستخدام تقنية التمييز اللوني بالأشعة (a)ومقطع مستوي بالتمييز اللوني (b) ومقطع فراغي (c,d) في الأبعاد الثلاث.

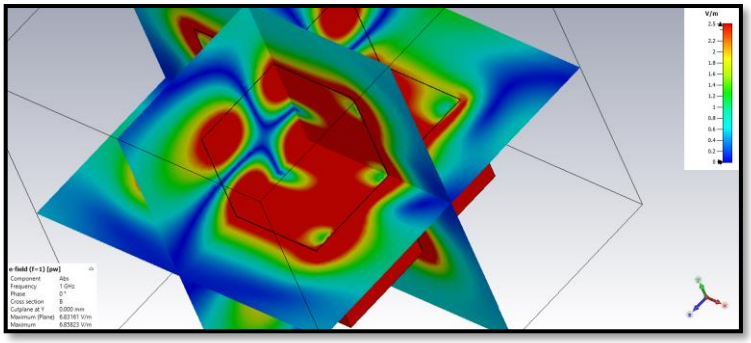
(a)



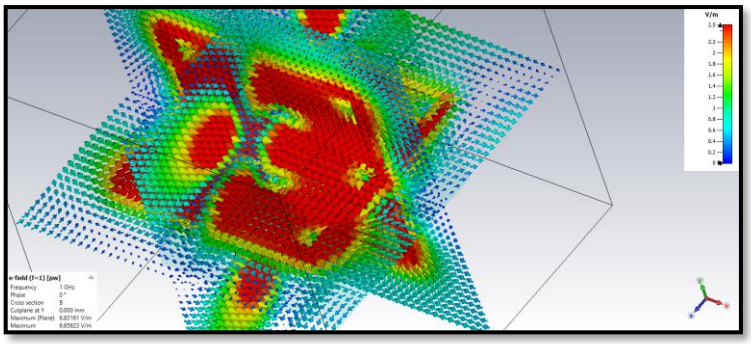
(b)



(c)



(d)



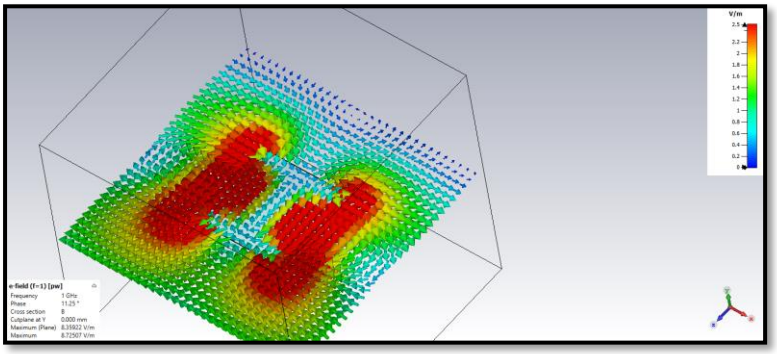
الشكل (9) تفاعل الحقل الكهربائي مع الوسط غير الايزوتروبي بخصائص

$\varepsilon_x = 10$ و $\varepsilon_y = \varepsilon_z = 2$

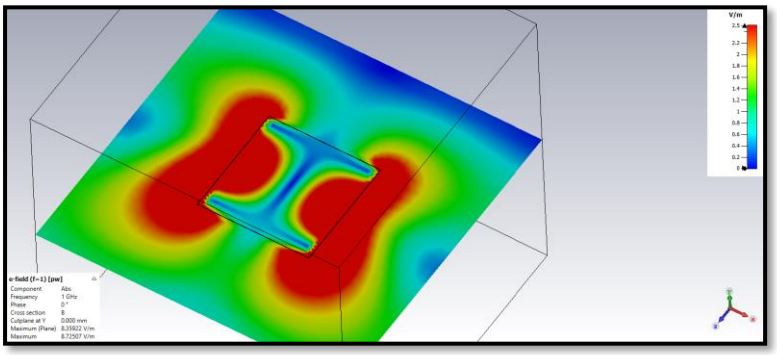
يتضح من الشكل(9) تمركز الطاقة الكهرطيسية ضمن المادة غير الايزوتروبية أحادية المحور حيث تجاوزت الشدة الأعظمية للحقل 6.8 V/m.

يبدأ تمركز الطاقة بالانخفاض بشكل ملحوظ في محاور مركز المادة المدروسة عندما تزداد ε_x إلى 50 والحفاظ على $\varepsilon_y=\varepsilon_z = 2$. تنزاح كثافة الطاقة نسبيا نحو الاطراف كما مبين في مقاطع الشكل(10)، تتوزع المركبات الكهربائية للموجة الكهرطيسية بمقطع مستوي عند استخدام تقنية التمييز اللوني للأشعة الكهرطيسية (شعاع شدة الحقل الكهربائي) كما في الشكل (10,a) وبتقنية التمييز اللوني المستوي المتواصل(b) وتمثيل فراغي لهذا التوزع (c).

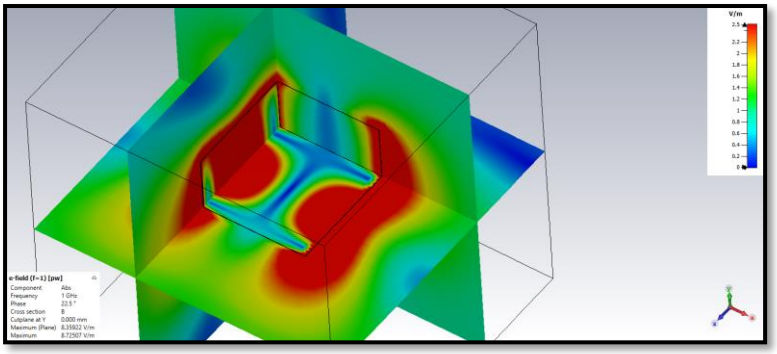
(a)



(b)



(c)



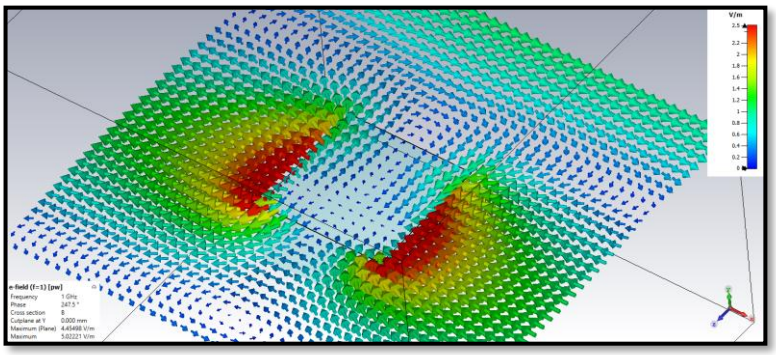
الشكل(10) تفاعل الحقل الكهربائي مع الوسط غير الايزوتروبي بخصائص

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = 2 \text{ و } \varepsilon_x = 50$$

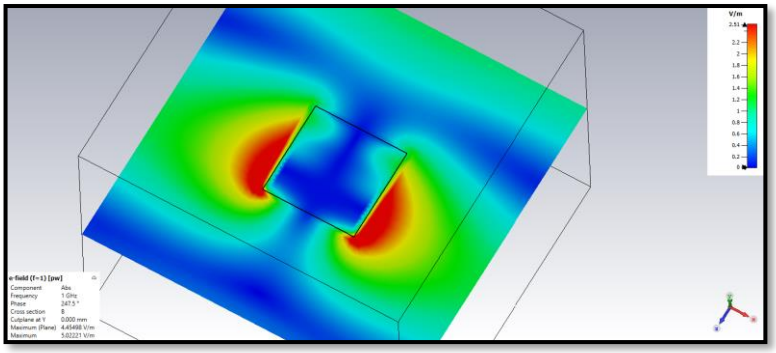
تبين نتائج التفاعل في الشكل(10) انخفاض قيم شدة الحقل الكهربائي على المحاور في مركز المادة وحدوث انزياح نسبي لكثافة طاقة الحقل نحو الأطراف وبشدة حقل أعظمية 8.7 V/m. اجريت الحسابات على وسط بثابت عازلية ε_x=100 و ε_y=ε_z = 2، وتم اظهار النتائج في مقطع مستوي بتقنية الاظهار اللوني والأشعة في الشكل (11–a)، ويبين الشكل (11–b) مقطعا مستويا لتوزيع شدة الحقل الكهربائي في المادة، ويظهر الشكل (11–c) مقطعا فراغيا لتوزع الحقل الكهربائي.

تبين النتائج على الشكل(11) في مقاطعه الثلاثة، انزياح الطاقة الكهرطيسية نحو الحواف الخارجية للمادة، وانخفاضها بشكل ملحوظ داخل المادة تصل قيمة شدة الحقل داخل المادة إلى أقل من 0.4 V/m.

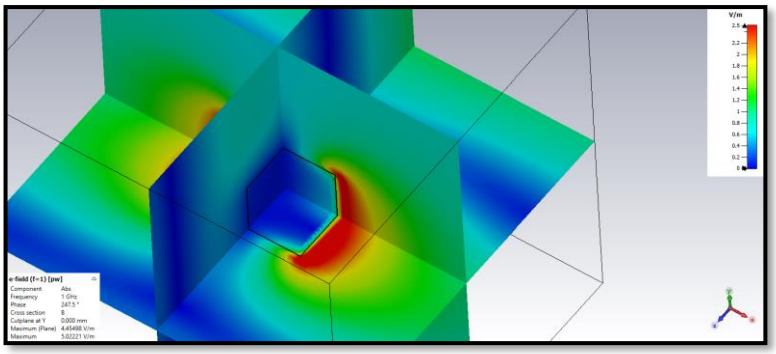
(a)



(b)



(C)



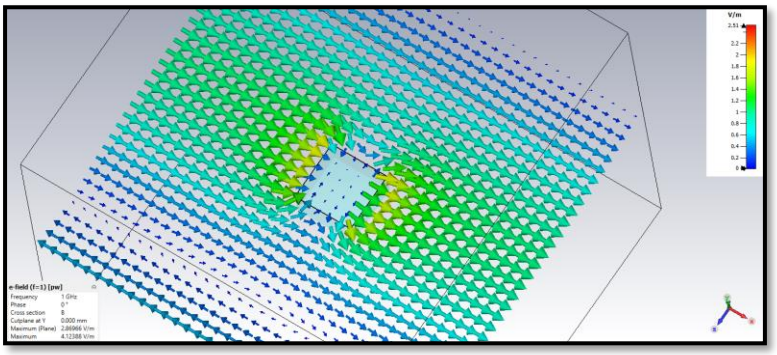
الشكل (11) تفاعل الحقل الكهربائي مع الوسط غير الايزوتروبي بخصائص

$\varepsilon_y = \varepsilon_z = 2$ و $\varepsilon_x = 100$

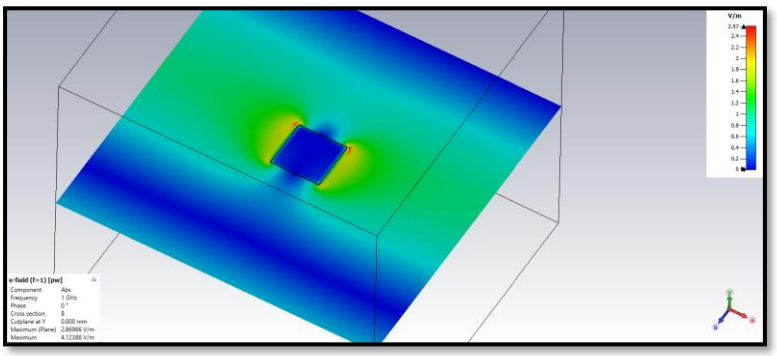
أشرنا إلى أهمية دراسة الخصائص غير الايزوتروبية للأوساط، والتي تمثل خصائص أغلب المواد في الواقع العملي ذات البنى البللورية الكريستالية، هذا من ناحية ومن ناحية أخرى هناك تراكيب جديدة لمواد وبنى في مختلف التطبيقات العملية. تحتل الدراسات الكهرطيسية لهذه المواد أهمية كبيرة. تم في هذا الصدد إجراء الحسابات وتكرارها على مواد عازلة غير ايزوتروبية مع تغير في قيم ε_x للتأكيد من النتائج السابقة، حيث اجريت الحسابات عند ε_x=500 ε_y=$\varepsilon_z = 2$ ، وتكرارها عند ε_y=$\varepsilon_z = 5$

يبين الشكلين (12) و(13) النتائج للحالتين المشار إليهما من خلال ثلاثة مقاطع للمجال المدروس في المستوي وفي الفراغ ثلاثي الأبعاد، حيث تظهر الأشكال توزع الطاقة الكهرطيسية في المادة وبجوارها.

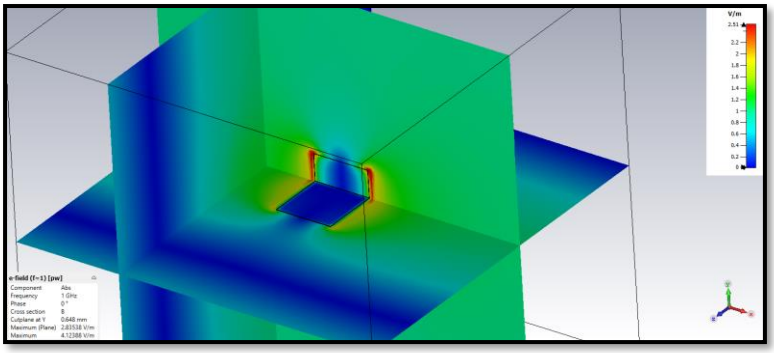
(a)



(b)



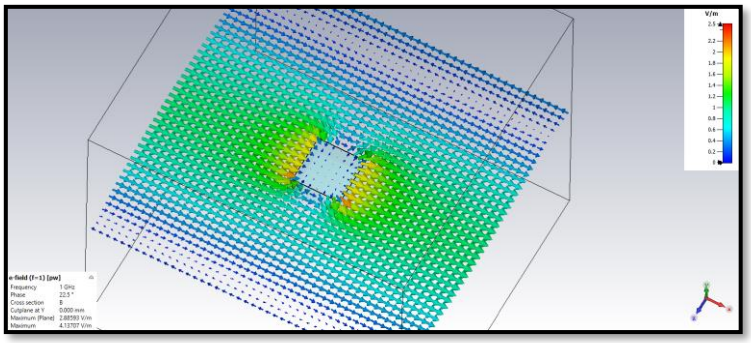
(c)



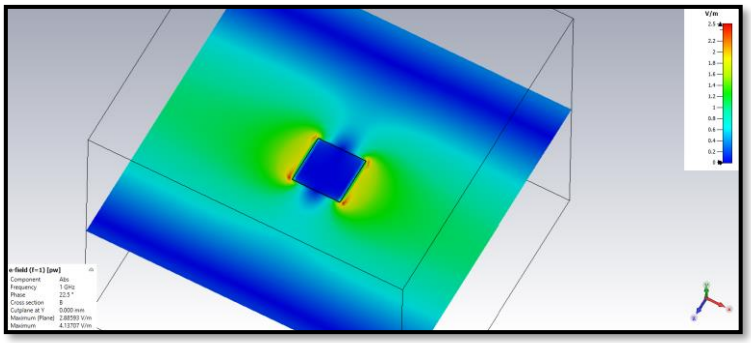
الشكل (12) تفاعل الحقل الكهربائي مع الوسط غير الايزوتروبي بخصائص

$\varepsilon_y = \varepsilon_z = 2$ و $\varepsilon_x = 500$

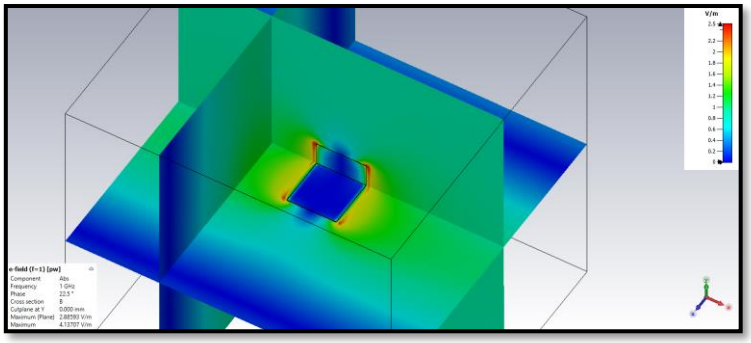
(a)



(b)



(c)



الشكل (13) تفاعل الحقل الكهربائي مع الوسط غير الايزوتروبي بخصائص

$\varepsilon_x = 500$ و $\varepsilon_y = \varepsilon_z = 5$

تبين النتائج على الشكل (12–a,b,c) بالمقاطع الثلاث في المادة المدروسة وبجوارها، انخفاض شدة الحقل عند الحواف وشبه تلاشي الحقل داخل المادة أقل من V/m 0.2 . تظهر النتائج اكتساب خاصية التحجيب التي تشكل أهم ما يميز المواد العازلة غير الايزوتروبية.

تماثل النتائج في الشكل (13) من أجل ε_x=500 و ε_y=ε_z = 5 تقريبا النتائج المشار إليها في الشكل (12).

مناقشة النتائج :

أجري هذا البحث على المواد غير الايزوتروبية بثوابت العازلية الكهربائية بغض النظر عن تركيبها و نمطها وعناصرها التركيبية ، حيث يمتاز الوقت الراهن بامكانيات تقنية لتصنيع مواد غير ايزوتروبية بللورية بمنحنيات خواص هندسية تخدم الهدف التصميمي منها ومجال استخدامها.

- تعد المواد الكريستالية الصنعية بنيويا غير ايزوتروبية أي أن قرائن الانكسار مختلفة باختلاف الاتجاه في المادة، ويمكن الاستفادة من هذه الخاصية للتحجيب في التطبيقات الهندسية الحديثة ومنها نظم القياس وغيرها.
- تشير النتائج السابقة إلى أنه كلما ازداد تباين الخاصية غير الايزوتروبية، رافقها انزياح أكبر للطاقة نحو حواف المادة وخارجها، بمعنى أنه سيؤثر تغير الاستقطاب غير الايزوتروبي عند التردد 1 GHz وابعاد المادة ضعفي طول الموجة سيؤثر على انزياح شدة الحقل الكهربائي والطاقة الكهرطيسية نحو الخارج. يعود ذلك إلى

الخصائص المكتسبة كالامتصاص والتخامد والانكسارات المتعددة العائدة إلى التفاعل بين الوسط غير الايزوتروبي واستقطابه بتأثير الموجة الكهرطيسية.

- يتضح أنه عندما ε_x=10 و ε_y=$\varepsilon_z = 2$ تتمركز الطاقة الكهرطيسية ضمن المادة، أي أنها تمتص الجزء الأكبر من طاقة الموجة وتختزنه في المادة.
- يؤدي ارتفاع شعاع الاستقطاب الكهربائي من أجل ε_x=500 و ε_y=$\varepsilon_z = const$ إلى انخفاض شدة الحقل وتلاشيه تقريبا داخل المادة. يمكن تفسير ذلك بسبب الاستقطابات العالية في العازل غير الايزوتروبي والمعاكس لشدة الحقل الكهربائي المؤثر كمركبة للموجة الكهرطيسية، وامتصاص طاقة الموجة في الديبولات المهتزة.
- تبين نتائج الدراسة من أجل ε_x=500 (عالية) أن التأثير شبه مستقل عن قيم ε_y وε_z .
- أظهرت النتائج وجود تأثير ملحوظ لقيم ε_z وε_y عند قيم صغيرة نسبيا لـ ε_x.

الخلاصة

تم انجاز هذا البحث بمحاكاة التفاعل الكهرطيسي في الوسط غير الايزوتروبي في البيئة البرمجية CST والتي تسمح بمتابعة التأثير المتبادل في الزمن الحقيقي بين الموجة وخصائص المادة، بينت النتائج أنه عند خصائص غير ايزوتروبية للعازل، يمكن أن تلعب دور تخزين طاقة الموجة وعدم انعكاسها وتبعثرها وعند قيم أخرى يمكن أن تلعب دور التحجيب للموجة الكهرطيسية.

تحتاج هذه الدراسات إلى مزيد من الأبحاث وتحليل النتائج والبحث في آفاق الاستفادة منها في مختلف مجالات التطبيقات الهندسية التقنية لامتصاص طاقة الموجة أو في التحجيب للتجهيزات والنظم

المراجع references

1- Dou, L., & Sebak, A. R. (2006). **3D FDTD method for arbitrary anisotropic materials**. *Microwave and Optical Technology Letters*, *48*(10), 2083-2090.

2- Fakhte, S., & Oraizi, H. (2016). **Analysis and design of rectangular uniaxial and biaxial anisotropic dielectric resonator antennas**. *Progress In Electromagnetics Research C*, *62*, 43-50.

3- Chakravorti, S. (2017). ***Electric field analysis***. CRC Press.

4- *Eroglu, A. (2010).* ***Wave propagation and radiation in gyrotropic and anisotropic media****. Springer Science & Business Media..*

5- Hong, S. Y., Kim, Y. C., Wang, M., Nam, J. D., & Suhr, J. (2020). **Anisotropic electromagnetic interference shielding properties of polymer-based composites with magnetically-responsive aligned Fe3O4 decorated reduced graphene oxide**. *European Polymer Journal*, *127*, 109595.

6- Hu, Y., Fang, Y., Wang, D., Zhong, Y., & Liu, Q. H. (2018). **Electromagnetic waves in multilayered generalized anisotropic media**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *56*(10), 5758-5766.

7- *Jayet, B. (2015).* ***Acousto-optic and photoacoustic imaging of scattering media using wavefront adaptive holography techniques in NdYO4*** *(Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI).*

8- Kasap, S O. (2013). ***Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics*** (pp. 274-283) Second edition. England: Pearson.

9- Komeylian, S., & Mohammadi, F. (2020). **Conical Swiss Roll Metamaterial Application for Slow-light Waveguides**. *Canadian journal of electrical and computer engineering*, *43*(3), 163-169

10- Lei, Q., Wang, J., & Shi, L. (2018). **Shielding Analysis of Uniaxial Anisotropic Multilayer Structure by Impedance**

Network Boundary Condition Method. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *67*(4), 2462-2469.

11- *Sadiku, M. N. (2005). **Elements of electromagnetics** (Vol. 428). New York: Oxford university press*

12- Mickelson, A. R. (1992). **Geometrical Optics. In *Physical Optics*** (pp. 171-225). Springer, Boston, MA.

13- Mencagli, M., Martini, E., & Maci, S. (2015). **Surface wave dispersion for anisotropic metasurfaces constituted by elliptical patches**. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *63*(7), 2992-3003.

14- *M Raja. Parvan, Barron. Andrew, **Electrical Permittivity Characterization of aqueous solutions** . **Chemistry libretexts. 31. 3. 2021. www.chem.libretexts.org***

15- *Peter .B, (2008) **Physics electro-optics** ,san Jose state University, (chapter4,physics 208)*

16- Pinho, P. (Ed.). (2018). ***Antennas and Wave Propagation***. BoD–Books on Demand.

17- *Roland H.Tarkhanyan, **Volume electromagnetic waves in anisotropic crystals with electronic plasma**,Willy-VCH,2006*

18- Tholin, F., Chemartin, L., & Lalande, P. (2017, September). **Simulation of the Lightning Arc Root Interaction with Anisotropic Materials**. In *ICOLSE 2017*

19- *Vladimir V. Mitin Dmitry I. Sementsov, **An Introduction to Applied Electromagnetics and Optics**,CRC press,2017*

20- Zhang, K., Li, D., Chang, K., Zhang, K., & Li, D. (2008). ***Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics*** (pp. 274-283) Second edition. Berlin: Springer.

21- Zhang, J., Fu, H., & Scales, W. (2018). **FDTD analysis of propagation and absorption in nonuniform anisotropic magnetized plasma slab**. *IEEE Transactions on Plasma Science*, *46*(6), 2146-2153.

22- Shora. N, Mahmoud. S, Moussa. M, (2011)- **Modeling & Simulation of Bio electromagnetics in FDTD**, Damascus university journal, Vol 27, In Arabic.

23-Shora. N, (2011)- **Using Numerical methods for EM analysis in three Dimensions**, Thesis. Power department. MEE engineering college. Damascus University. Damascus .Syria. P106.In Arabic