

تفاعل الحقول الكهرومغناطيسية في الوسط غير الإيزوتروبي

الدكتور محمد موسى*

الدكتور سلام محمود**

(تاريخ الإيداع 7 / 9 / 2014. قُبل للنشر في 21 / 12 / 2014)

□ ملخص □

يتناول هذا البحث دراسة التفاعلات الكهرومغناطيسية في الوسط غير الإيزوتروبي ، والذي يمتاز بخصائص كهربائية مختلفة في محاور الإحداثيات الثلاثة . يشكل تحليل الحقول الكهرومغناطيسية أهمية كبيرة في وقتنا الراهن نظراً لأهميتها التطبيقية الهندسية الحديثة وخاصة على المستوي المكروي والنانوي . تم نمذجة ومحاكاة هذا التفاعل المعقد والتوصل إلى بعض النتائج الهامة التي تؤكد خصائص الانتشار والانكسار المزدوج والانعكاس المتبعثر . وتؤكد النتائج إمكانية التحليل واستخلاص المعلومات من خلال متابعة سلوك الأمواج الكهرومغناطيسية في مثل هذه الأوساط فراغياً وزمناً .

الكلمات المفتاحية: الحقول الكهرومغناطيسية ، الأوساط غير الإيزوتروبية، البيئة البرمجية CST، طريقة النفاضات المنتهية في المجال الزمني.

* أستاذ - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.
** مدرسة - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

Electromagnetic Interaction in Anisotropic Medium

Dr. Mohammad Mosa*
Dr. Salam Mahmoud**

(Received 7 / 9 / 2014. Accepted 21 / 12 / 2014)

□ ABSTRACT □

This paper deals with electromagnetic(EM) interaction in anisotropic medium which is characterized by spatial different permittivity in (x,y,z)coordinates. The EM-analysis is a modern method in micro- and nano-scopic technology.

This interaction was modulated and simulated by CST software (Computational System Technology) that confirms the behavior of EM propagation and scattering in an isotropic medium.It could be also used in data transmission, device construction and scattering analysis.

Keywords : Anisotropic Materials;Electromagnetic Fields;CST Software; Finite Difference Time DomainFDTD.

*Professor; Department of Electrical Power Engineering; Faculty of Mechanical &Electrical Engineering; University of Damascus; Damascus, Syria.

**Assistant Professor; Department of Electrical Power Engineering; Faculty of Mechanical &Electrical Engineering; University of Damascus, Damascus, Syria.

مقدمة :

منذ أن وضع ماكسويل معادلاته عام 1873 تم التحقق من وجود الأمواج الكهرومغناطيسية في الأوساط الإيزوتروبية isotropic وأنجزت القوى الكهرومغناطيسية ثورة علمية فعلية على صعيد التقدم التقني العالمي. تعد القوة الكهرومغناطيسية إحدى القوى الأساسية الأربع ، والتي تشمل القوة النووية الشديدة الداخلية والقوة النووية الضعيفة الخارجية والقوة الكهرومغناطيسية وقوة الجاذبية. من الملفت أن ثلاثاً من القوى المذكورة ذات أساس كهرومغناطيسي وقوة الجاذبية مازال البحث قائماً في مجال خلفياتها ولن تتفاجأ إذا أكدت الأبحاث المستقبلية بأنها ذات جذور كهرومغناطيسية أيضاً . شكلت التفاعلات الكهرومغناطيسية مع مختلف المواد الجامدة والسائلة والغازية والحية أساساً في تطور العلوم النظرية والتطبيقات الهندسية . تناولت الانتشار الكهرومغناطيسية في البداية الأوساط الإيزوتروبية، ولكن تفاعلاتها وانتشاراتها في الأوساط غير الإيزوتروبية مازالت في أغلبها مجهولة مثل طبيعة الانعكاسات المتعددة والتبعثر الكهرومغناطيسي وسرعة انتشار كل مركبة منها واستقطاب الموجة والنمط الحيزي لهذه الأمواج [1,2] . تحتاج أبحاث دراسة التفاعلات الكهرومغناطيسية مع المواد مختلفة الخصائص إلى قياس القيم على المستوى المجهرى الدقيق ومتابعة تحولاتها الزمنية . إن مثل هذه التقنيات غير متوفرة ومن غير الممكن تنفيذ هذه الدراسات عملياً. لابد لمتابعة الأبحاث السابقة من اللجوء إلى عملية نمذجة التفاعل ومحاكاة الظاهرة التي تتيح متابعة القيم في الفراغ وملاحقتها في الزمن.

أهمية البحث وأهدافه :

تمتاز الأبحاث العلمية في هذا العصر والتي تشمل تفاعل الحقول الكهرومغناطيسية مع المواد بأهمية خاصة. استناداً إليها تحققت الثورة العلمية الأولى في القرن العشرين من خلال التفاعل بين أنصاف النواقل والحقول الكهرومغناطيسية. واليوم نحن أمام أن تأخذ هذه التفاعلات صورة أعمق مما كانت عليه لكي تشمل التفاعلات الكهرومغناطيسية مع جميع المواد الجامدة والغازية والسائلة والمادة الحية والبلازما. تمتاز المواد في بنيتها الكريستالية بخصائص كهربائية ومغناطيسية مختلفة ، يعود ذلك الى البنية الذرية والجزئية المتجزرة في الحياة للمواد ، بمعنى أن المواد في طبيعتها الحقيقية مواد غير إيزوتروبية. استندت التفاعلات الكهرومغناطيسية مع الأوساط الإيزوتروبية إلى معادلات ماكسويل العامة للحقل الكهرومغناطيسي بما فيها ظواهر الانتشار والانعكاس والانكسار . عند تطبيق هذه المعادلات على المواد غير الإيزوتروبية من المفترض الأخذ بالحسبان انعكاس هذه الخاصية على المعادلات . يتناول هذا البحث دراسة الحقول الكهرومغناطيسية مع المواد ذات البنى غير الإيزوتروبية ، لمتابعة انعكاسات تأثيرات البنى المذكورة سنعتبر أن الموجة الكهرومغناطيسية موجة مستوية منتظمة أحادية التردد (هذا يعني أن الموجة هي موجة كهرومغناطيسية لها مركبة واحدة لشدة الحقل الكهربائي موازي للمحور OX، ومركبة واحدة لشدة الحقل المغناطيسي موازي للمحور OY ومن ثم شعاع بوينتغ يكون منطبق على المحور OZ). تتطلب مثل هذه الدراسات كونها تخص التفاعل الكهرومغناطيسي مع البنى الميكروية للمادة تقنيات ميكروية دقيقة لنظم القياس، وهذا غير متوفر وغير ممكن القيام به ،

لذلك لا بد من نمذجة ومحاكاة التفاعل الكهربي مع البنى غير الإيزوتروبية بمساعدة تقنيات الكهربية الحاسوبية في بيئات برمجية مناسبة مثل CST.

إن معادلات ماكسويل التقليدية للأوساط الإيزوتروبية كما ذكرنا آنفاً والتي تدعى أحياناً بالكهربية التقليدية أصبحت غير كافية في شكلها التقليدي لدراسة ظاهرة شاملة من هذا النوع [5].

تجدد الإشارة إلى أن وجود المادة وتطورها في الحياة هو نتيجة لتفاعلاتها البنوية مع الحقل الكهربي، على سبيل المثال جميع الأحياء تحس وتشعر بما حولها بواسطة الموجة الضوئية الكهربية المنعكسة، وليس مستغرباً القول: إن أغلب نشاطات المادة وتطورها يستند إلى التفاعلات الكهربية مع كل ما يحيط بها.

إن مثل هذه الأبحاث والظواهر تشكل الآن حجر الزاوية في هذا القرن ويستند إليها تطور العلوم في القرن الحادي والعشرين، تشكل الهواتف والشاشات الذكية أحد تطبيقاتها الهندسية المنتشرة حالياً [1,2].

طرائق البحث ومواده :

يتكون الحقل الكهربي كموجة من حقلين متلازمين مقترنين الكهربي والمغناطيسي والتي تنتشر في الأوساط الإيزوتروبية وتتكسر وتنعكس في كل الاتجاهات بشكل منتظم تبعاً لخواص الوسط .

تحتاج دراسة تفاعل الحقول الكهربية مع الأوساط المادية إلى تحديد بعض المفاهيم التي تنظم خواص هذه الأوساط .

يقصد بالوسط الإيزوتروبي الوسط ذي الخواص الكهربية المستقلة عن تأثير شدة الحقل الكهربي في كافة الاتجاهات وبالمقابل فإن الوسط غير الإيزوتروبي (كما هو الحال في المواد الكريستالية والبلازما) فإن قيم النفاذية الكهربية والناقلية النوعية ستختلف تبعاً لاتجاهات تأثير شدة الحقل وقد تكون الخواص المغناطيسية بصورة مشابهة. تصيح في مثل هذه الحالات صورة تفاعل الحقل الكهربي معقدة جداً، يعود ذلك إلى محددات الحقل الكهربي والموجة الكهربية والتي في بحثنا اعتبرناها ثابتة (أي موجة مستوية منتظمة أحادية التردد) [7,4].

يصبح عندئذ عامل النفاذية على شكل مصفوفة وكذلك الأمر بالنسبة إلى الناقلية النوعية والنفاذية المغناطيسية كما تمت الإشارة آنفاً.

أي إن المعادلة الأساسية للحقل الكهربي كمركبة للموجة الكهربية $D = \epsilon E$ تأخذ الصيغة الآتية:

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

أثبتت التجربة والأبحاث العلمية أن أغلب المواد تكون بـ $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji}$ ومن ثم فإن مصفوفة $[\epsilon]$ ستكون قطرية، بتدوير الإحداثيات نتوصل إلى المصفوفة القطرية الآتية:

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

يكون الوسط إيزوتروپيا إذا كانت $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z$ وعندما يتساوى اثنان منهما ويختلفان عن الثالث يدعى الوسط أحادي المحور وإذا كانت جميعها مختلفة فيدعى الوسط ثنائي المحاور (وهي أنواع الأوساط غير الإيزوتروبية). تخضع العلاقة بين شدة الحقل وشعاع الإزاحة في الأوساط غير الإيزوتروبية لخواص الوسط في الاتجاهات المختلفة (شعاع الاستقطاب) وفقا للعلاقات الآتية:

$$D(r, t) = \varepsilon_0 E(r, t) + P(r, t) \quad (3)$$

$$H(r, t) = \frac{1}{\mu_0} B(r, t) - M(r, t) \quad (4)$$

حيث P شعاع الاستقطاب الكهربائي وهو لا يساوي الصفر في دراستنا. بينما M شعاع المغنطة وهو صغير يمكن اعتباره مساو للصفر. يتعين شعاع الإزاحة الكهربائية من حقيقة وجود $\varepsilon_0 E$ ورد فعل الوسط على تأثيره (شعاع الاستقطاب) ، لكن في الحقول الكهروستاتيكية المتغيرة في الزمن سيحرض الحقل الكهربائي المتغير في الزمن حقلاً مغناطيسياً حيزياً إحصارياً في نفس المكان ، الذي بدوره يولد حقلاً كهربائياً معاكساً لتأثير الأول ويتسبب أيضاً في الاستقطاب من جديد يتمثل ذلك بالعلاقات الآتية [6]:

*تم التعبير عن القيم الشعاعية بخط غامق

$$D = D(E, B) \quad (5)$$

$$H = H(E, B) \quad (6)$$

$$J = J(E, B) \quad (7)$$

حيث:

$-D$ كثافة التدفق الكهربائي (C/m^2) . $-E$ شدة الحقل الكهربائي (V/m) .
 B - كثافة التدفق المغناطيسي (T) . $-H$ شدة الحقل المغناطيسي (A/m) .
 $-J$ كثافة التيار الكهربائي (A/m^2) . $-\varepsilon$ النفاذية الكهربائية (F/m) . $-\mu$ النفاذية المغناطيسية (H/m)

وفيما يخص المعادلة (7) فإن كثافة التيار الكهربائي في الأوساط غير الإيزوتروبية تشكل تابعاً لشدة الحقل الكهربائي والمغناطيسي وخصائص المادة غير الإيزوتروبية. أشرفنا أنفاً إلى أن الموجة الكهروستاتيكية تمثل موجة منتظمة مستوية بتردد أحادي لتسهيل دراسة تفاعلاتها مع الأوساط غير الإيزوتروبية المعقدة.

يمكن أن تكون الأمواج المذكورة مستقطبة باتجاه (x) (أي شدة الحقل الكهربائي باتجاه المحور (x))، ويمكن أن تكون باستقطابية (y) . يخضع الحقل المشار إليه آنفاً للمعادلة الموجية:

$$\nabla^2 \mathbf{E}_s + \omega^2 \mu_0 \mathbf{D}_s = 0 \quad (8)$$

يجب ملائمة المعادلة الموجية في الأوساط غير الإيزوتروبية مع المحاور المشار إليها. إذا كان الانتشار باتجاه المحور (z) ستحسب مركبات الموجة على المحاور (x) و (y) وفق المعادلات الآتية:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \omega^2 \mu_0 \epsilon_x \right] \mathbf{E}_{sx} = 0 \quad (9)$$

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \omega^2 \mu_0 \epsilon_y \right] \mathbf{E}_{sy} = 0 \quad (10)$$

ستختلف سرعة انتشار الموجة عندما يكون $\epsilon_x \neq \epsilon_y$ لأن:

$$\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_x}} \neq \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_y}} \quad (11)$$

تحدث هنا ظاهرة الانتشار ثنائية المحاور، وينتج عن ذلك اختلاف في قرائن الانكسار n_1, n_2 أي عدم تطابق مستوي الورد و مستوي الانكسار. انطلاقاً من كون انتشار الموجة في الأوساط الإيزوتروبية باتجاه انتشار عمودي دوماً على جبهة الموجة ويتعين بالعلاقة المعروفة:

$$\mathbf{k} = \omega \cdot \frac{n}{c} \cdot \mathbf{u} \quad (12)$$

حيث:

\mathbf{k} شعاع العدد الموجي

n قرينة الانكسار

\mathbf{u} شعاع الواحد

تمتاز بعض الأوساط بالخاصية التفرجية (Dispersive)، التي تتمثل بإمكانية فصل المركبات القابلة للتمييز الطيفي، كما هو الحال عند الموشور (التمييز اللوني الترددي). تأخذ العلاقات الأساسية للحقول الكهرومغناطيسية الصيغ الآتية:

$$\mathbf{D}(t) = \epsilon_0 \int_{-\infty}^t \left[\epsilon_r(t-t') \right] \cdot \mathbf{E}(t') \cdot dt' \quad (13)$$

$$\mathbf{B}(t) = \mu_0 \int_{-\infty}^t \left[\mu_r(t-t') \right] \cdot \mathbf{H}(t') \cdot dt' \quad (14)$$

يتضح من المعادلات السابقة أن حالة الوسط لا تعتمد على الحقل في اللحظة الآتية فحسب بل على حالته في اللحظة السابقة أيضاً.

بشكل عام فإن النفاذية الكهربائية والمغناطيسية ستكون تابعة للتردد وفق العلاقات

$$\varepsilon_s(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) \quad (15)$$

$$\mu_s(\omega) = \mu'(\omega) - j\mu''(\omega) \quad (16)$$

تعتبر المركبات الحقيقية لمعاملات النفاذية الكهربائية والمغناطيسية عن إمكانات الأوساط على تخزين الطاقين الكهربائية والمغناطيسية، أما المركبات التخيلية فتعبر عن ضياعات الطاقة الكهربائية والمغناطيسية داخل المادة. لا يمكن دراسة التفاعل الكهربيسي مع المادة بشكل دقيق إلا بتوفر المعلومات الدقيقة حول قيم النفاذية الكهربائية والمغناطيسية.

سنعتمد في هذا البحث على الكهربيسية التقليدية، أي عند انتشار الموجة في الأوساط الإيزوتروبية مع مراعاة خواص الأوساط الكهربائية والمغناطيسية، ستصبح المعادلات الكهربيسية في الصيغة الآتية:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \nabla_t \mathbf{D} = -\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (17)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\nabla_t \mathbf{B} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (18)$$

$$\nabla_t [\mathbf{D}] = [\varepsilon] \nabla_t [\mathbf{E}] + [\sigma] [\mathbf{E}]$$

حيث :

$$\nabla_t \mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

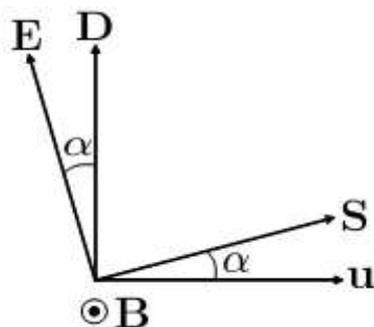
و

استناداً إلى هذه المعادلة يمكن بسهولة استنتاج معادلة الموجة أحادية التردد في الوسط غير الإيزوتروبي باعتبار أن كلا \mathbf{E}, \mathbf{D} غير متطابقة في الاتجاه في الأوساط غير الإيزوتروبية إضافة إلى أن شعاع بوينغ \mathbf{S} يتعين من $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$.

$$\mathbf{E} \times \mathbf{H} = |\mathbf{E}| \cdot |\mathbf{H}| \cdot \sin \alpha$$

يحدد الشعاع \mathbf{K} اتجاه انسياب القدرة الكهربيسية ولكن يبقى الشعاع الواحد \mathbf{u} يدل على اتجاه انتشار جبهة

الموجة الكهربيسية، وتتمثل هذه الحقائق على المخطط المبين في الشكل التالي:



يشير الشعاع \mathbf{u} الى اتجاه انتشار الموجة والشعاع \mathbf{S} يمثل شعاع بوينغ.

يتضح أن اتجاه انتشار الموجة لن يتطابق مع اتجاه انسياب تدفق القدرة الكهربيسية [6,5].

يشكل اختلاف قرينة الانكسار والسرعات وزوايا فرق الصفحة واتجاه تدفق الطاقة مصادراً للمعلومات لتحديد

خواص المواد وبنيتها وتراكيبها وسلوكيتها وغير ذلك، وتفتح الأبواب واسعة للأبحاث في هذه المجالات .

أجريت الدراسات والأبحاث حول تفاعل موجة كهربيسية مستوية منتظمة بتردد أحادي مع المواد الإيزوتروبية

كعازل مثالي أولاً، ومن ثم كمادة ناقلة لتوفير أسس للمقارنة بين العوامل المختلفة. ومن ثم تم دراسة التفاعل الكهربيسي

في الوسط غير الإيزوتروبي ثنائي المحاور بخواص $\epsilon_x \neq \epsilon_y \neq \epsilon_z$ ، وكذلك الناقلية النوعية باستخدام التقنية الحسابية - طريقة التفاضلات المنتهية في المجال الزمني (FDTD(Finite Difference Time Domain))، بمساعدة البيئة البرمجية Computational System Technology - CST. تسمح هذه البيئة البرمجية بإجراء الأبحاث في الأوساط الإيزوتروبية وكذلك في الأوساط غير الإيزوتروبية ولكن بعد موافقتها في المجال الترددي وعلى المستويات التفاضلية الدقيقة للمادة. يعطي إمكانات عالية جداً في مرونة التحكم بمعاملات المادة غير الإيزوتروبية والتي تشكل توابع للتردد وغيرها [4].

إضافة إلى كل ذلك فإن هذه البيئة البرمجية تتيح متابعة القيم حيزياً وزمنياً على المستويات التفاضلية الدقيقة، وذلك تبعاً لإمكانات وسعات وحوسيب المستخدمة. تكمن صعوبة استخدام هذه البيئة البرمجية في عملية النمذجة والمحاكاة للأوساط غير الإيزوتروبية وإدخال معاملاتها [6].

تعتمد تقنية التفاضلات المنتهية في المجال الزمني على تقطيع مركبات الحقل الكهربائي والمغناطيسي في الفراغ لتشكيل شبكة الحل، حيث يتم إدخال ثابت العازلية والتغيرات الزمنية Δt في المعادلات التقريبية للطريقة المشار إليها [3] وبمراعاة أن ثابت العازلية يصبح على صورة مصفوفة.

بفرض أن أبعاد الشبكة $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ، والتزايد الزمني Δt وثابت العازلية كمصفوفة ومن ثم نكتب معادلات الحقلين الكهربائي والمغناطيسي وفق العلاقات الحسابية الآتية:

$$E_x^{n+1}(i + \frac{1}{2}, j, k) = E_x^n(i + \frac{1}{2}, j, k) + \left(\frac{\Delta t}{|\epsilon|}\right) \{ [H_z^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) - H_z^{n+1/2}(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k)] / \Delta y + [H_y^{n+1/2}(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2}) - H_y^{n+1/2}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2})] / \Delta z \} \quad (19)$$

تكون المركبة المغناطيسية عند نفس الشروط وفق :

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) + \left(\frac{\Delta t}{\mu}\right) \{ [E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k + 1) - E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k)] / \Delta z + [E_z^n(i, j, k + \frac{1}{2}) - E_z^n(i, j + 1, k + \frac{1}{2})] / \Delta y \} \quad (20)$$

تمت الإشارة إلى أن ثابت العازلية الكهربائي $[\epsilon]$ يؤخذ كمصفوفة في خوارزمية Yee الحسابية مع مراعاة الشروط الحدية، ويجب أن تحسب الخطوة الزمنية بحيث:

$$\frac{\Delta r}{\Delta t} > v, \quad \Delta r = (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

تمثل n في المعادلات السابقة خطوة الحل وتبدأ عند n=0 وعند زيادتها تتقدم حلول E و H مع انتشار الموجة. ليتم تقادي تغيرات الحقل المفاجئة يجب أن لا تزيد Δr عن عشر طول الموجة $\frac{\lambda}{10}$ [3].

تحدد المعادلات الواردة أعلاه الحقول انطلاقاً من الحقل المعروف في المنطقة السابقة أو قبل لحظة زمنية. يتم استكمال الحل استناداً إلى معرفة الشروط الحدية والشروط الأولية.

تم نمذجة المادة غير الإيزوتروبية ذات الخصائص المتعددة عند كل حالة باستخدام البيئة البرمجية CST.

النتائج والمناقشة:

أجريت الدراسة على مسار الموجة الكهرومغناطيسية بتردد 9.5 GHz في الأوساط غير الإيزوتروبية من خلال ثلاث عينات:

1- تمثل الحالة الأولى : عازلاً مثالياً كقاعدة للمقارنة وتمثل العينة الثانية صفيحة نحاسية بناقلية عالية وتتخذ كقاعدة مرجعية للمواد الناقلة وتمثل الثالثة مادة لا إيزوتروبية بنفاذية كهربائية نسبية على شكل مصفوفة مختلفة العناصر وبناقلية نوعية على شكل مصفوفة مختلفة القيم أيضاً.

تبين الأشكال (1) و (2) و (3) مركبات شدة الحقل الكهربائي الوارد على المحاور الثلاث (x, y, z) ، يتضح أن المركبات الإشعاعية للموجة الكهرومغناطيسية تقريبا معدومة، بمعنى غياب الإشعاع باتجاه المحور (x) بينما الإشعاع الأعظمي كموجة كهرومغناطيسية يكون باتجاه المحور (z) ، وتتوثر المركبة الكهربائية في المحور (y) بصورة أساسية. تؤكد الأشكال (4) و (5) و (6) أن المركبة الأساية للحقل المغناطيسي على المحور (x) وضئيلة باتجاه المحورين (y) و (z) . علماً ان المحاور الاحداثية الثلاثة موجودة على يمين وأسفل كل شكل.

2- الحالة الثانية : استبدال الشريحة العازلة المثالية بشريحة من ناقل جيد -النحاس، وتم الحصول على تغيرات الحقول السابقة. حيث تبين الأشكال (7) و (8) و (9) مركبات الحقل الكهربائي (E_x, E_y, E_z) للموجة الكهرومغناطيسية، والتي تتراكب في حقل إجمالي يتطابق مع نتائج الدراسة النظرية في الكهرومغناطيسية المتعارف عليها بالنسبة إلى المواد الناقلة عموماً. تستكمل صورة الموجة النهائية من خلال مركباتها في (10) و (11) و (12) للحصول على الحقل الإجمالي المغناطيسي المتطابق مع الدراسة المتعارف عليها أيضاً في المواد الناقلة. باعتبار أن الصفيحة ناقل جيد (النحاس) تظهر بوضوح كثافة التيار الكهربائي (I_y) أو تغيرات كثافة التيار الكهربائي على قشرة المادة كما يبين الشكل (13).

3- الحالة الثالثة : المادة غير الإيزوتروبية ويمكن تجزئتها إلى حالتين:

a-3 - المادة غير الإيزوتروبية $(\epsilon_x \neq \epsilon_y \neq \epsilon_z)$ وغير الناقلة $(\sigma = 0)$ ، كعازل مثالي من أجل نفس الموجة السابقة. في هذه الحالة تم الحصول على النتائج كما يبينها الشكل (16) تبعثر الموجة الكهرومغناطيسية جزئياً من المادة، تبعاً لاختلافات ثوابت العازلية باتجاه المحاور المختلفة والتي تشكل مصفوفة قطرية كما تمت الإشارة آنفاً [المعادلة (2)].

يبين الشكل (14) تمثيلاً لتغيرات الحقل في الحيز الفراغي مع الزمن، ويبدو واضحاً تغيرات الموجة داخل المادة غير الإيزوتروبية.

يبين الشكل (15) تبعثر الموجة المنتشرة عند اصطدامها بالمادة غير الإيزوتروبية حيث أدت تغيرات ثوابت العازلية إلى تشعب انعكاسات الموجة باتجاهات مختلفة، وحدث تبعثر جزئي واجتاز الجزء المتبقي الشريحة منتشراً عبرها إلى الطرف الآخر. يؤكد الشكل (17) صحة هذا الاستنتاج حيث يمثل المركبة الاجمالية لشدة الحقل المغناطيسي.

يبين الشكل (20) تغيرات المركبة الأساسية للحقل المغناطيسي للموجة الكهرومغناطيسية الواردة والمنعكسة، الذي يطابق الشكل (16) للمركبة الكهربائية المرافقة.

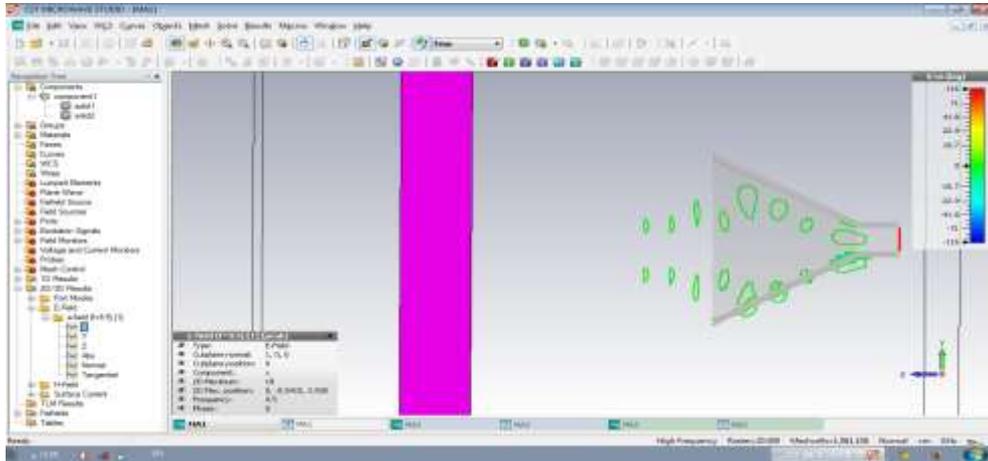
3-b- تم استخدام صفيحة غير إيزوتروبية بناقلية نوعية على شكل مصفوفة بحيث $(\sigma_x \neq \sigma_y \neq \sigma_z)$ وتعريضها للموجة السابقة، في هذه الحالة الشكل (18) يبين النتائج حيث الصفيحة تعكس الجزء الأكبر من الموجة الواردة من خلال تمثيله للحقل الإجمالي. ويؤكد الشكل (19) من خلال تغيرات شدة الحقل الكهربائي للموجة، وكذلك الشكل (23) من خلال تغيرات شدة الحقل المغناطيسي للموجة النتيجة السابقة. يبين الشكل (21) كثافة التيار الإجمالية في الشريحة، ويتضح أنه حتى في المواد غير الإيزوتروبية تسود الظاهرة القشرية، بمعنى أن كثافة التيار تتمركز على قشرة المادة بسماكة لا تتحدد وفقاً للعلاقات التقليدية السائدة في هذا المجال.

يتبين من الأشكال (22) و (23) و (24) أن كثافة التيار الكهربائي تتغير وفقاً لقيم $[\epsilon]$ و $[\sigma]$ ومركبات الحقل الكهربائي في الاتجاهات (x,y,z) تتبع هذه التغيرات لخصائص الوسط ومحددات الموجة الكهرومغناطيسية، حيث إن هذه الكثافة لا تتمركز على سماكة محدودة كما هو الحال في النواقل المعتادة. ينعكس ذلك على تغير المقاومة الكهربائية المكافئة والمحاكاة الذاتية وسيؤثر على أداء جميع توابع الدخل والخرج لجميع الأجهزة الكهربائية والإلكترونية.

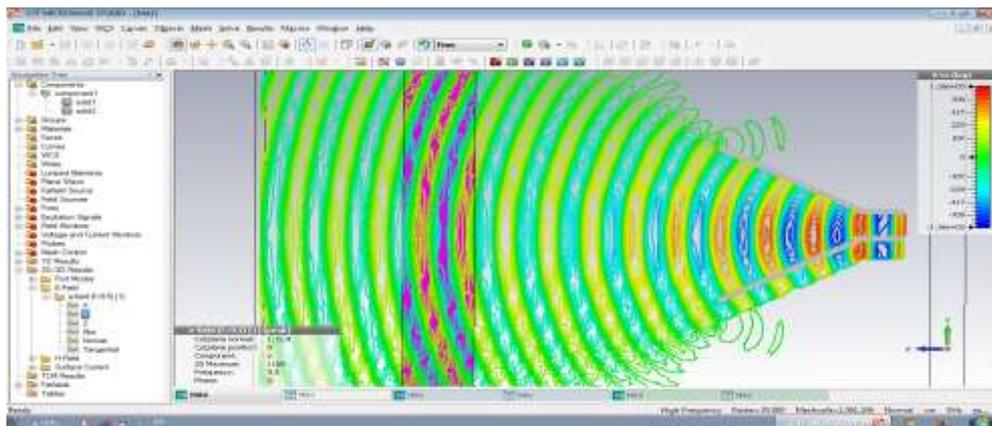
يتضح أن النمذجة والمحاكاة للتفاعلات الكهرومغناطيسية مع مختلف أنواع المواد تساعد في متابعة قيم التغيرات الحيزية والزمنية للمحددات الكهرومغناطيسية ذات الأهمية النظرية والتطبيقية الهندسية في المجالات المختلفة. تشكل هذه التفاعلات مواضيعاً للأبحاث العلمية المعمقة ذات الأهمية الكبيرة في التطبيقات الهندسية الحديثة في مختلف المجالات.

يتبين استناداً إلى النتائج السابقة ما يأتي:

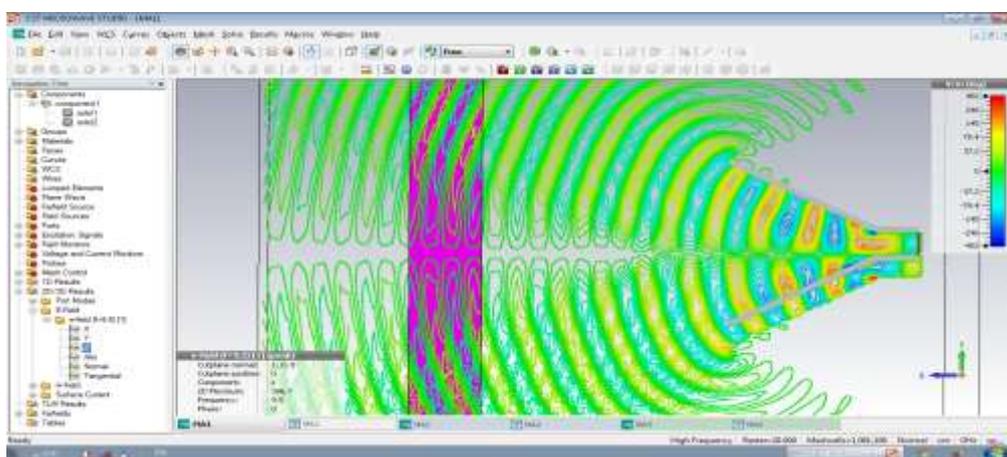
تتخادم الموجة الكهرومغناطيسية وتغير من سرعتها في الأوساط الناقلة كما هو شائع، ولكن تشير النتائج إلى مشاركة استقطاب الموجة في ذلك بسبب خصائص الوسط غير الإيزوتروبية في اتجاهات المحاور المختلفة. تدل النتائج على أن التفاعلات الكهرومغناطيسية تحدث على المستويات الميكروسكوبية في المادة غير الإيزوتروبية والتي تعطي توابع خرج مختلفة تبعاً للمحاور الإحداثية.



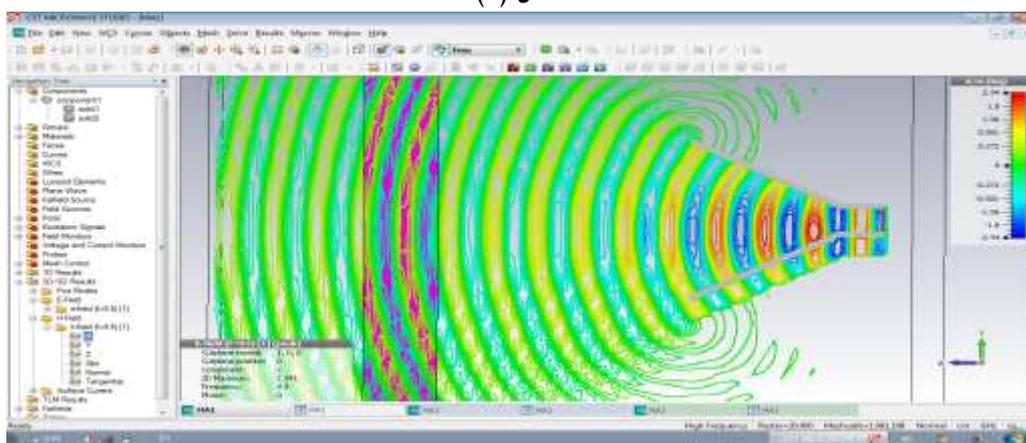
الشكل (1)



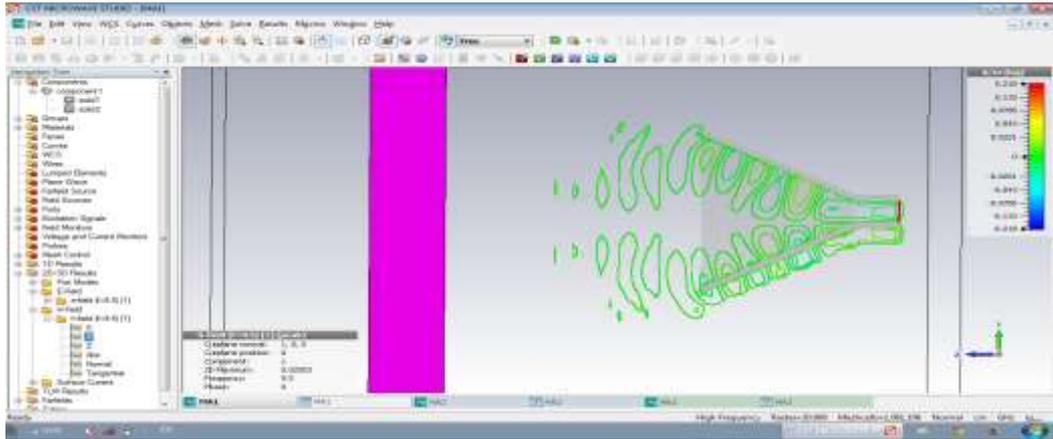
الشكل (2)



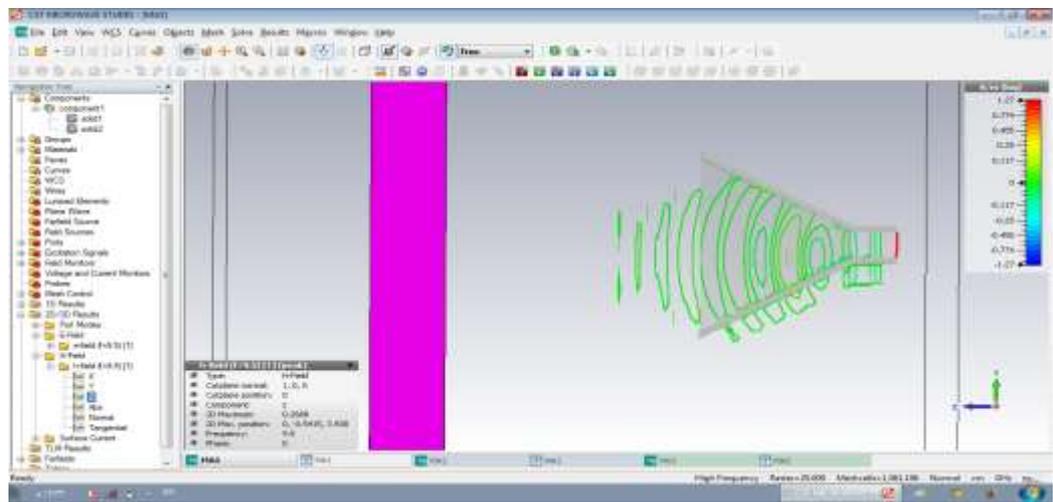
الشكل (3)



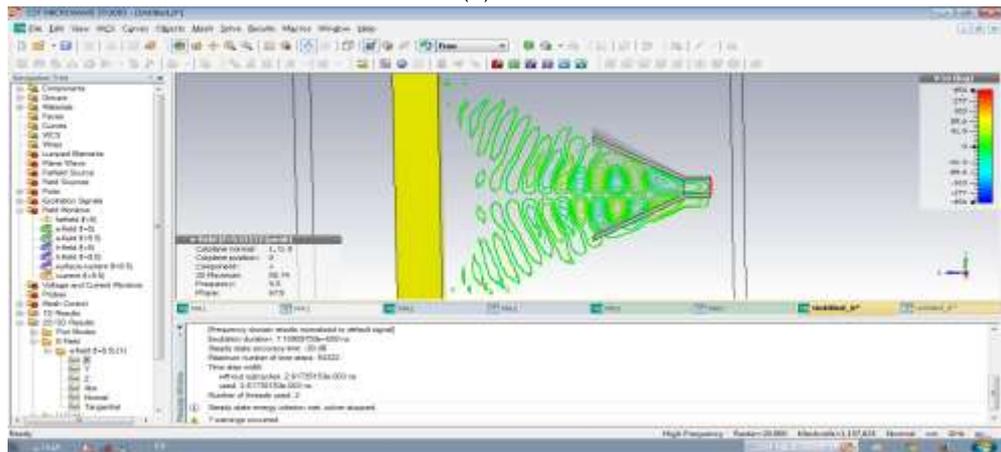
الشكل (4)



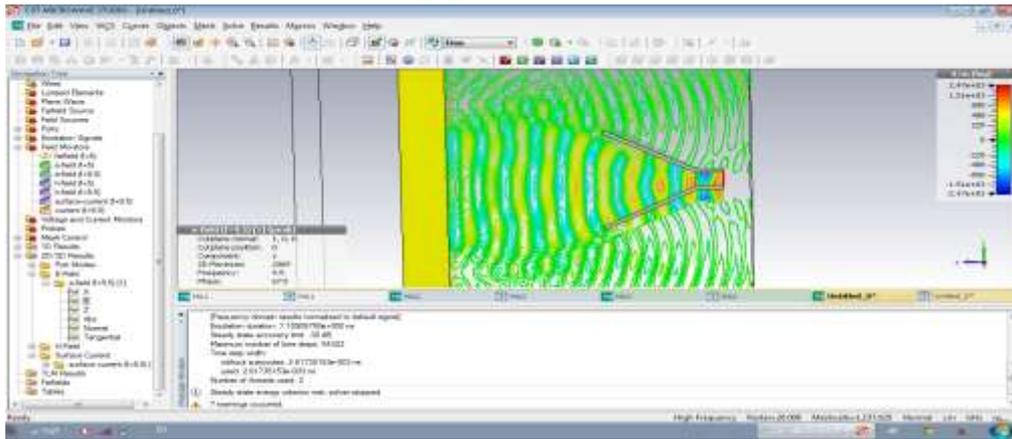
الشكل (5)



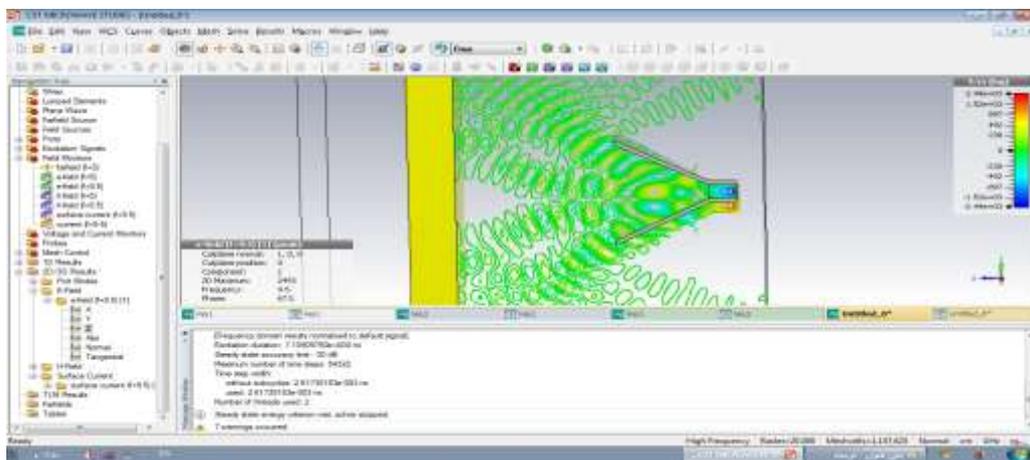
الشكل (6)



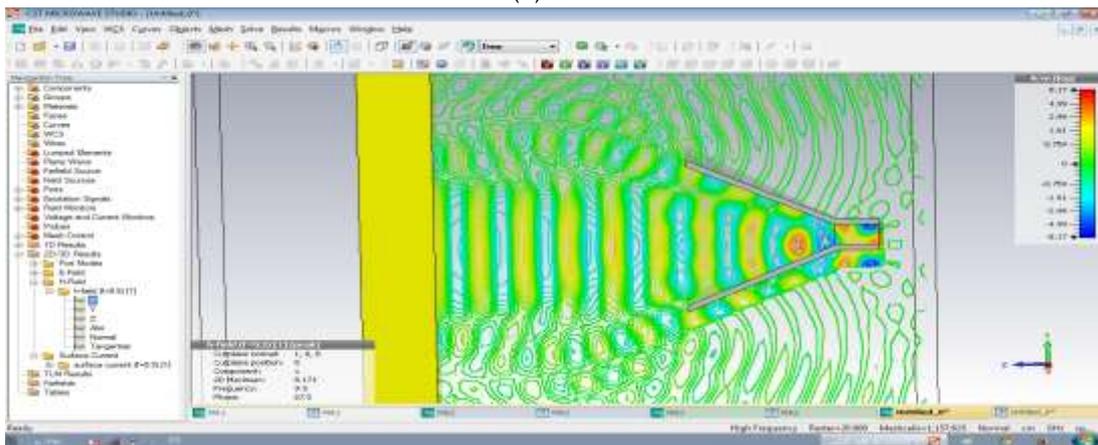
الشكل (7)



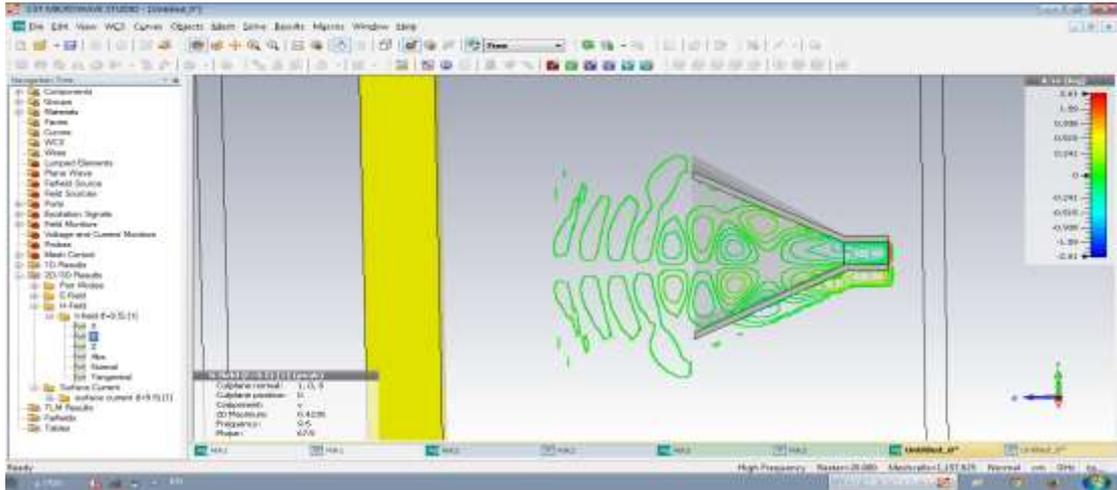
الشكل (8)



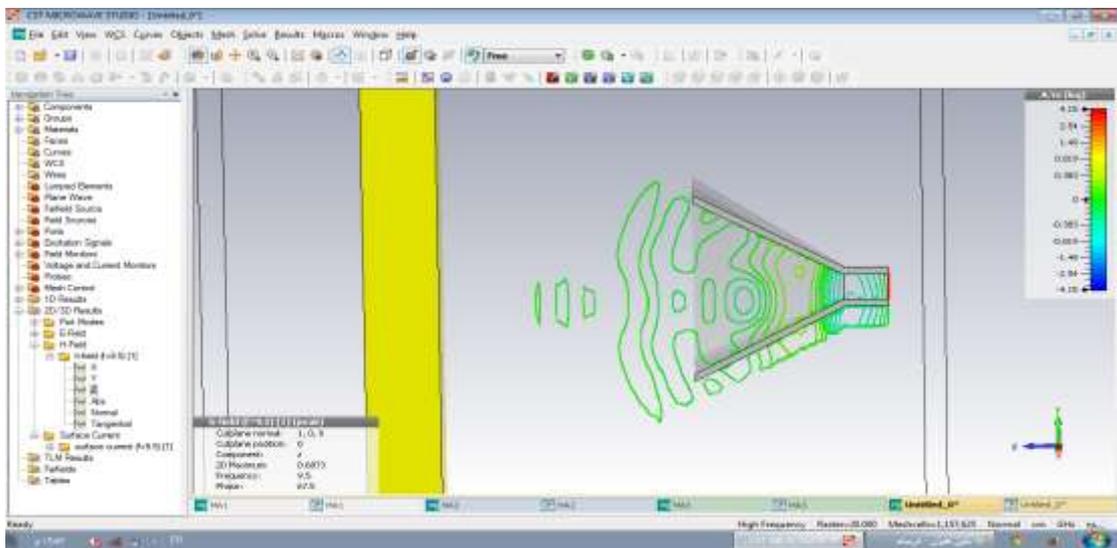
الشكل (9)



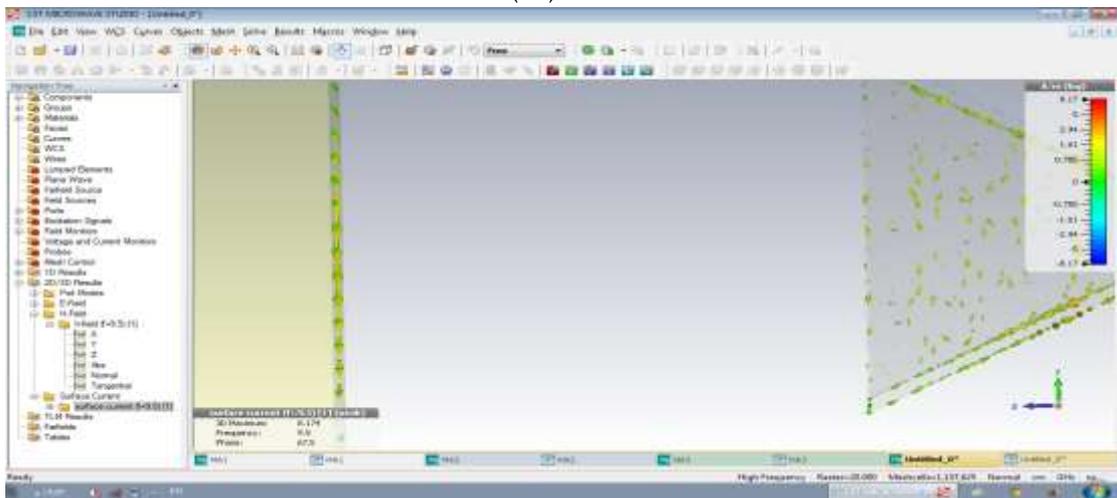
الشكل (10)



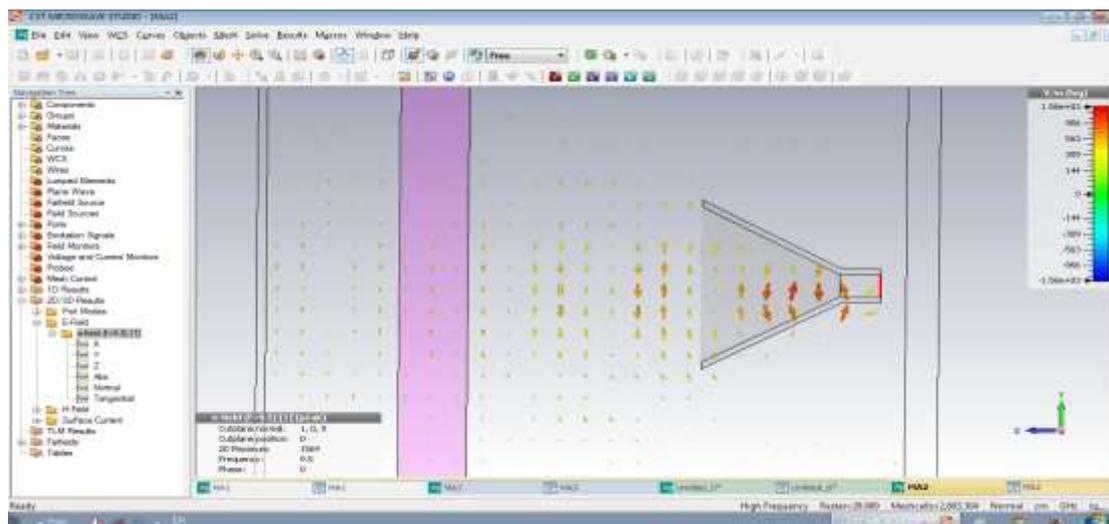
الشكل (11)



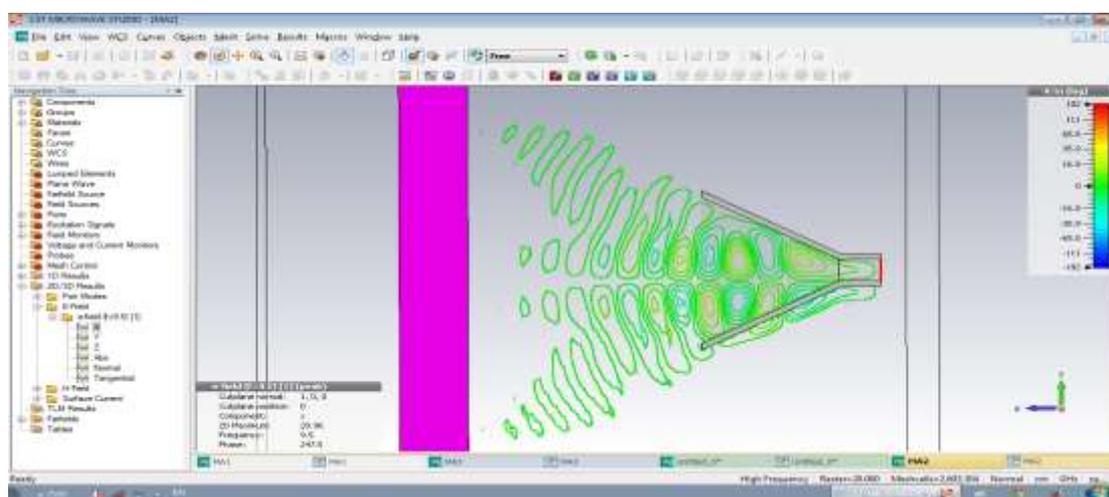
الشكل (12)



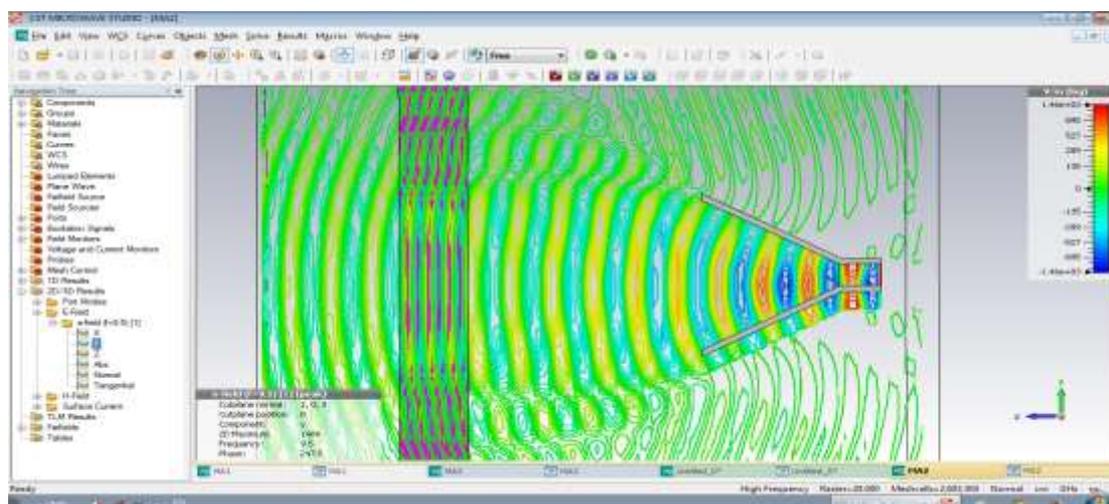
الشكل (13)



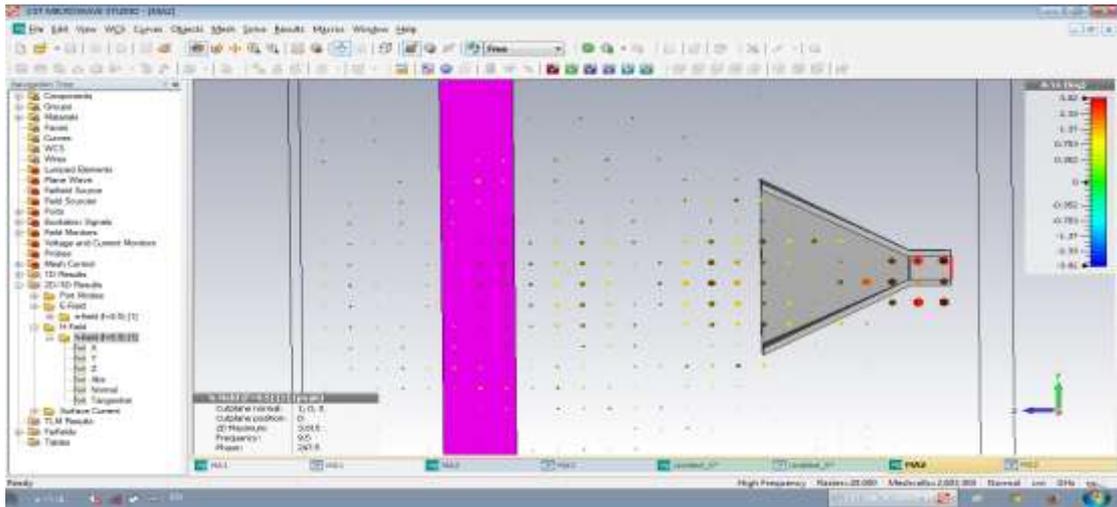
الشكل (14)



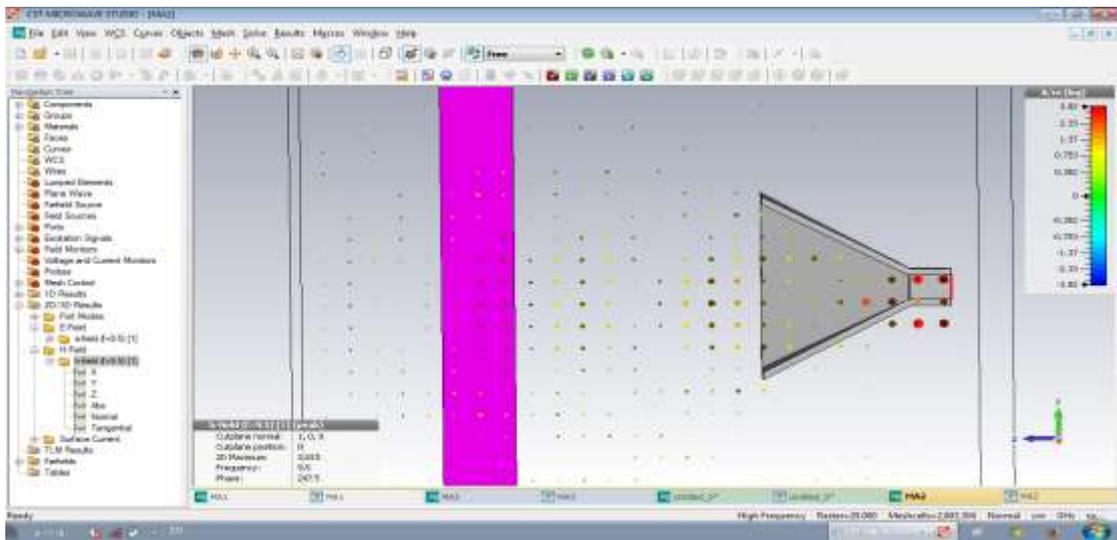
الشكل (15)



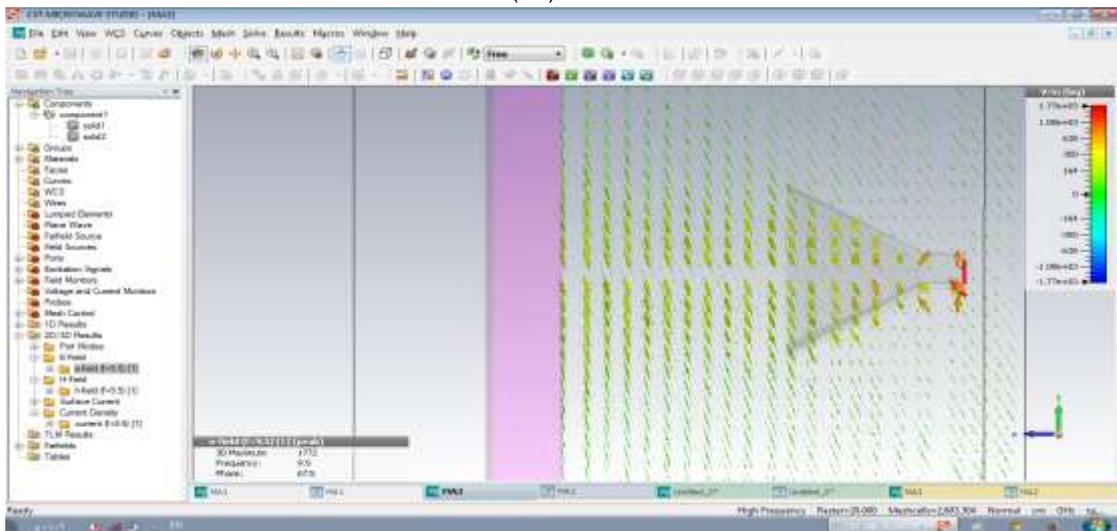
الشكل (16)



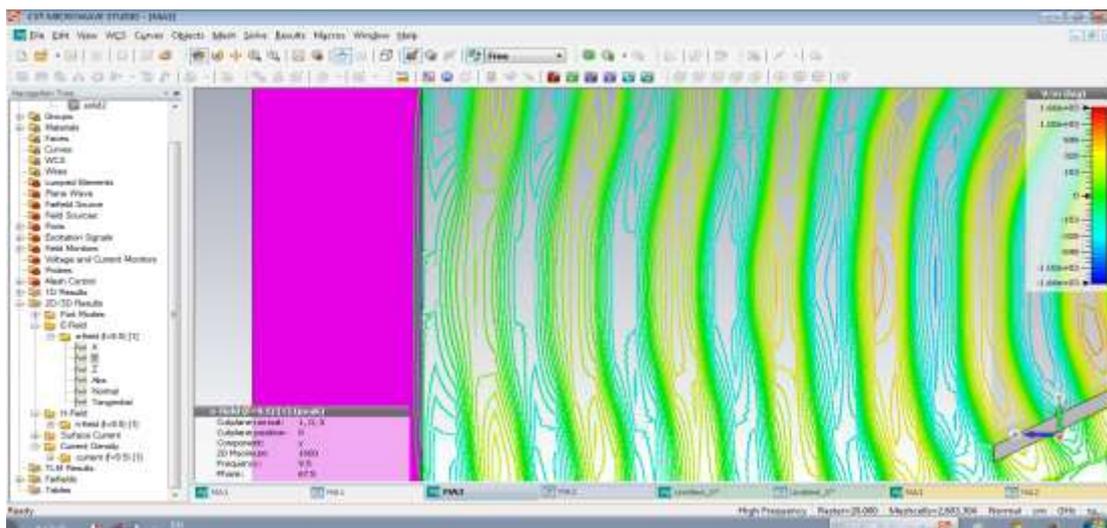
الشكل (17)



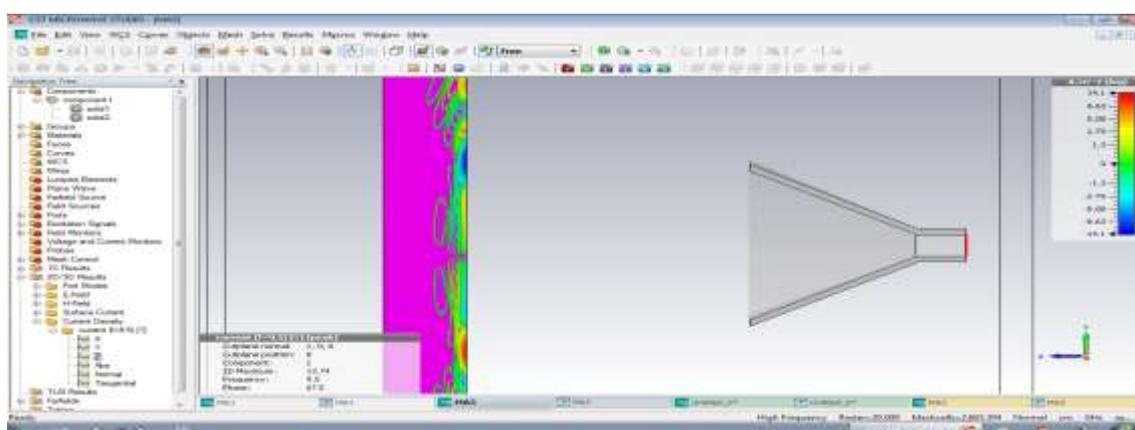
الشكل (18)



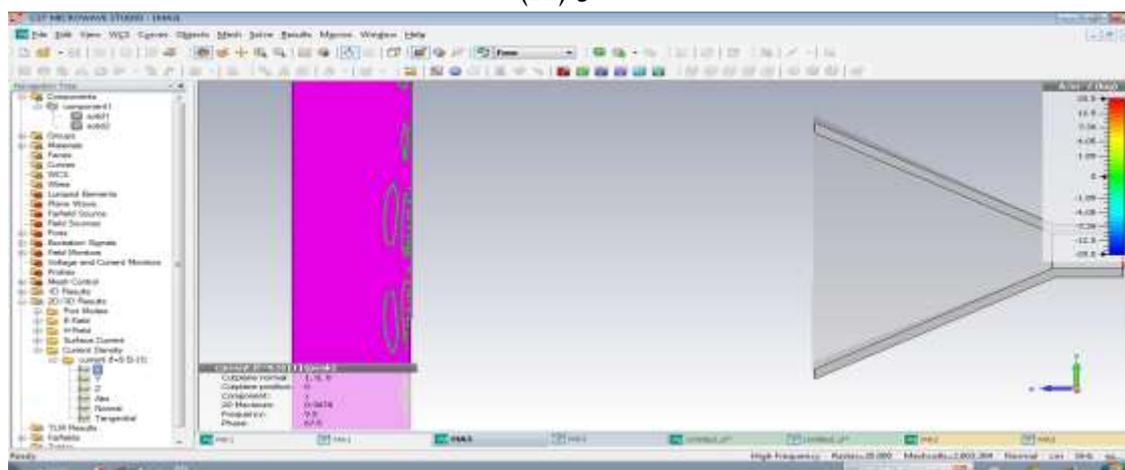
الشكل (19)



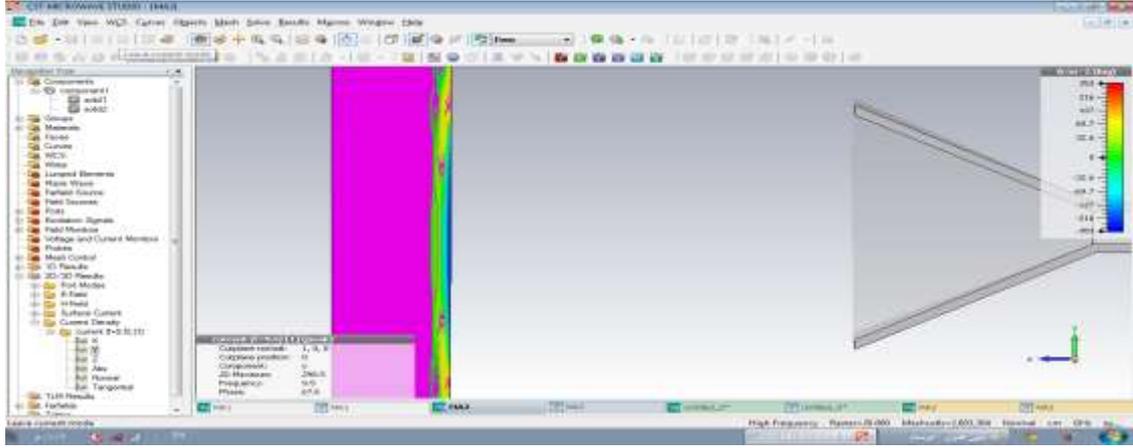
الشكل (20)



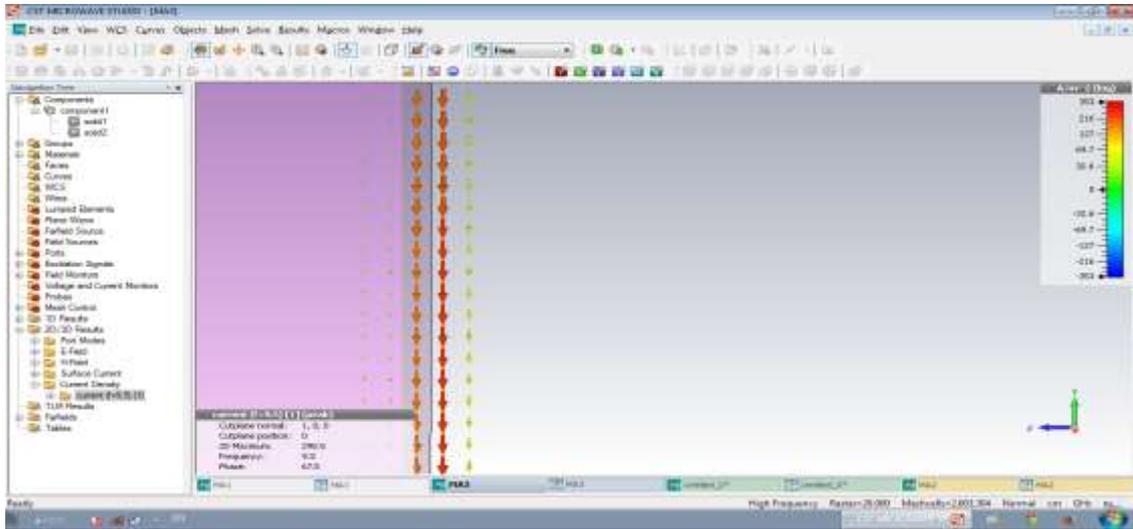
الشكل (21)



الشكل (22)



الشكل (23)



الشكل (24)

الاستنتاجات والتوصيات :

يرتكز التقدم العلمي في وقتنا الراهن على تفاعل الموجة الكهرومغناطيسية مع المادة، وقد ظهرت تراكيب للمواد الجديدة بنى كرسطالية غير إيزوتروبية تمتاز بخواص يمكن تحديدها في الاتجاهات الاحداثيات المختلفة في الفراغ. تستخدم مثل هذه المواد في العديد من التطبيقات الهندسية ومنها الهوائيات النقاله والحواشيب وغيرها. لا يمكن متابعة سلوك الأمواج الكهرومغناطيسية وتحديد خواص المواد بالطرائق التقليدية للدراسات، ولذلك كان لابد من الاستعانة ببيئات برمجية مناسبة مثل CST لمتابعة تفاعلات الحقول الكهرومغناطيسية مع المواد في الفراغ والزمن. تتضاعف صعوبات مثل هذه الدراسات في المواد ذات البنى الكرسطالية غير الإيزوتروبية .

تم التوصل إلى بعض النتائج من خلال هذا البحث ومن أهمها:

تم تنفيذ النمذجة والمحاكاة في الأوساط غيرالإيزوتروبية من خلال محدداتها المذكورة وإدخال الشروط الابتدائية والحدية، انطلاقا من المعادلات الكهرومغناطيسية للأوساط غير الإيزوتروبية للأوساط مع موامتها لشروط النمذجة والمحاكاة في البيئة البرمجية CST .

- 1- تبين نتائج الدراسة بناءً على المناقشة السابقة أن الموجة الكهرومغناطيسية تنتشر في مختلف الاتجاهات وتنتشر عبر المادة وفقاً لخصائصها وخصائص الموجة، وتبعاً لمصفوفة الناقلية النوعية ومصفوفة ثابت العازلية الكهربائية ومصفوفة النفاذية المغناطيسية.
 - 2- تشير النتائج بوضوح إلى تراكب مركبات الموجة الكهرومغناطيسية الواردة والمنعكسة والتي يمكن قياسها ومتابعتها وتقديرها بالتقنيات الحاسوبية الكهرومغناطيسية والبيئة البرمجية المناسبة كتلك المستخدمة في هذا البحث.
 - 3- يمكن استخدام التحليلي التبعثري لدراسة خصائص المواد وتحديد تركيبها والبنى الداخلية والعيوب فيها فمثلاً يمكن الاعتماد على دراسة الممانعات الموجية في كشف محاديات المادة وأبعادها الهندسية.
- تساعد ظاهرة التبعثر الكهرومغناطيسية وتحليلها في المواد غير الإيزوتروبية في إمكانية الكشف عن الخلل في خصائص المادة أو تحديد بنيتها أو حتى التنبؤ المسبق عن حدوث ظواهر فيزيائية معينة مثل البراكين والزلازل .
- يمكن الاستفادة من مثل هذه الدراسات في المجالات الطبية للكشف المبكر على الأمراض ...
- يمكن الاستفادة عملياً من تحديد سلوك الحقول الكهرومغناطيسية على المستوى المكرو سكوبي في المادة غير الإيزوتروبية، التي تعطي توابع خرج مختلفة تبعاً لمحاور الإحداثيات باستخدام ذلك في مجالات التحكم والإرسال والاستقبال.
- تشكل دراسات التفاعلات الكهرومغناطيسية مع المواد مختلفة البنى والخصائص مواضيعاً حيوية في وقتنا الراهن والمستقبل.

المراجع :

- 1- د.سلام محمود ،دراسة التداخل الكهربي باستخدام النمذجة والمحاكاة الكهربية الحاسوبية ، مجلة جامعة تشرين 2013.
- 2- د.محمد موسى و د.سلام محمود و م.نذير شوري ،النمذجة والمحاكاة الكهربية الحيوية بطريقة الفرق المتناهي في المجال الزمني ، مجلة جامعة دمشق المجلد 27 ، 2011.
- 3-JOHN D . KRAUS and DANIEL A.FLEISCH , Electromagnetics with applications, McGraw Hill,Boston 1999
- 4-William Hayt , john A.Buck engineering electromagnetics, McGraw Hill,New York, 2013
- 5-Christophe Peucheret , elements of electromagnetic theory anisotropic media , and light modulation by the linear electro-optic effect, Technical university of Denmark -2010
- 6-Roland H.Tarkhanyan, Volume electromagnetic waves in anisotropic crystals with electronic plasma,Willy-VCH,2006
- 7-Matthew N.Sadiku, elements of electromagnetics,Oxford University press ,2003