

دراسة التداخل الكهرومغناطيسي باستخدام النمذجة والمحاكاة الكهرومغناطيسية الحاسوبية

الدكتورة سلام محمود*

(تاريخ الإيداع 21 / 7 / 2013. قُبِلَ للنشر في 28 / 11 / 2013)

▽ ملخص ▽

تعد ظاهرة التداخل الكهرومغناطيسي في العصر الحالي ظاهرة هامة من الناحية الفيزيائية والهندسية، وتشكل عاملاً أساسياً في تدني أداء الأجهزة الكهربائية والإلكترونية. تتسبب الانبعاثات الكهرومغناطيسية المرافقة لأداء التجهيزات المذكورة في إحداث تغييرات في البيئة الكهرومغناطيسية المحيطة، وما ينتج من تأثيرات في هذه البيئة وما فيها من تجهيزات ونظم ومواد مختلفة. تتمثل مشاكل التداخل الكهرومغناطيسي في تشابهه مع الأجهزة والنظم الإلكترونية والكهربائية ما قد يؤدي إلى تخفيض مستوى أدائها لوظائفها المصممة من أجلها وفعالية هذا الأداء، وقد يصل ذلك إلى حد العجز عن قيامها بذلك، ونشير إلى أن هذه المشاكل تشكل في الوقت الراهن مسألة هامة ومحوراً للأبحاث العلمية. تناول هذا البحث ظاهرة التداخل الكهرومغناطيسي التي تحدث بين الأجهزة المختلفة، وذلك باستخدام تقنيات الكهرومغناطيسية الحاسوبية وبمساعدة برمجيات مناسبة توفر إمكانية نمذجة مسائل التداخل ومتابعته حيزياً في الزمن الحي على المستوى المكروي الدقيق الذي تعجز عنه نظم الاختبار وأجهزة القياس المستخدمة.

الكلمات المفتاحية: التداخل الكهرومغناطيسي ، الكهرومغناطيسية الحاسوبية، بيئة برمجيات CST.

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

EMI–Investigation Using Computational Electromagnetic Simulation

Dr. Salam Mahmoud*

(Received 21 / 7 / 2013. Accepted 28 / 11 / 2013)

▽ ABSTRACT ▽

The Electromagnetic Interference and EMC are one important phenomenon, since the EMI causes degradation in the performance of electric and electronic instruments.

The EMI- problem may decrease effectiveness of sensitive devices and even may lead to a failure of its operation.

This paper studies EMI-problem between different systems by using convenient computer programs as CST, which provides modulation and simulation of this problem. This method provide ability to trace and evaluate EMI microscopically in space and real time.

Keywords: Electromagnetic Interference - EMI, Electromagnetic Compatibility – EMC, Computational System Technology - CST.

* Assistant Professor; Department of Electrical Engineering; Faculty of Mechanical and Electrical Engineering; University of Damascus; Damascus: Syria.

مقدمة:

تعمل جميع الأجهزة الكهربائية والإلكترونية وفقاً للمبادئ الكهربية ويرافق نظام عملها ظاهرة التداخل الكهربية، الذي يتمثل بتدني أداء النظام العائد إلى تأثير البيئة الكهربية المحيطة، وتبدأ مشاكلها بالإزعاج البسيط، إذ تزيد الكهرباء الساكنة من معدل الأخطاء في نظم الاتصالات وقد تصل إلى أعطال تقود إلى عجز الأجهزة عن القيام بوظائفها المصممة من أجلها. ترافق الإشعاعات الكهربية عمل جميع النظم والتجهيزات الكهربائية مثل: المرسلات، المولدات النبضية، الهزازات الإلكترونية، الدارات المنطقية الرقمية، قواطع التغذية، الريليات، المحركات الكهربائية (فصل ووصل) وغيرها.

يحتاج كل ذلك إلى قياسات التداخل الكهربي والتي تضم طرائق الاختبار المختلفة وتلك الضرورية لتحقيق المتطلبات، ومن الحاجة إلى التوافق والانسجام لمعالجة التداخل الناجم عن النظم المختلفة.

تصدر التجهيزات الكهربائية إشعاعات أو حقولاً كهربية إلى الوسط المحيط، تتفاعل مع البيئة المحيطة الجامدة والحيوية، ومن هنا تنشأ ضرورة إجراء اختبارات التوافق ويجب اختيار الأجهزة الملائمة والنظم التي تمكن من إجراء الاختبارات المناسبة والمطلوبة.

ظهرت في الآونة الأخيرة تقنيات علمية كهربية رائدة، نتيجة للتقدم العلمي في التكنولوجيات الدقيقة وأصبحت أغلب الأجهزة المنزلية تعتمد على التحكم عن بعد لاسلكياً بالأمواج الميكروية مثل أجهزة الهاتف الحديثة والأجهزة اللوحية وغيرها.

تتعرض الأجهزة المذكورة بسهولة للتداخل الكهربي ومن أهم مظاهره الضجيج والتشويش المتسبب في تدني أداء الجهاز وجودة المعلومات إضافة إلى احتمالات تشوه الإشارة الكهربية وتأثير نبضات كهربية خاصة قد تؤدي إلى حدوث عجز الأجهزة عن أداء وظائفها. من الأمثلة الشائعة عن هذه الظاهرة حدوث التداخل بين أجهزة الهواتف المكتبية اللاسلكية وموجهات الاتصال (Routers) بخطوط الاشتراك الرقمية غير المتناظرة Asymmetrical Digital Subscriber Lines -ADSL نتيجة تراكم مجالاتهما الترددية.

تجدر الإشارة إلى أنه يمكن دراسة التداخل الكهربي بتقنيات قياس حديثة مثل محلل الطيف لتحديد سويته، فيما يخص قياس نسبة الإشارة إلى الضجيج (Signal/Noise S/N) ولكن تعجز مثل هذه التقنيات في تحديد مستوى التأثير الناجم عن التداخل على المستوى الميكروي الدقيق.

لدراسة التداخل الكهربي على المستوى الميكروي الدقيق لابد من الاعتماد على نمذجتها ومحاكاة الظاهرة الكهربية باستخدام برمجيات حديثة ومتطورة مناسبة لمثل هذه الدراسات.

يتناول هذا البحث دراسة التداخل الكهربي من خلال محاكاة هذه الظاهرة ونمذجتها بطريقة الكهربية الحاسوبية بمساعدة برمجيات حاسوبية متطورة مثل Computational System Technology (CST) لملاحظة تغيرات الحقول الكهربية في الفراغ والزمن.

توفر النماذج الحاسوبية Computational models في دراسات التداخل الكهربي EMI الأساس لتطبيقات هندسية واسعة لأهداف البحث العلمي والتطبيقات الصناعية، ففي هذا العصر يشكل الحاسوب أداة مساعدة يومية للمهندسين والباحثين ولذلك، فإن هذه النماذج تتطور بشكل سريع وتسمح بنمذجة واسعة في هذا المجال لإيجاد الحلول المناسبة والتي تندرج تحت التوافق الكهربي.

تتزايد أهمية النماذج الحاسوبية يوماً بعد يوم وخاصة عند تطبيقها في المسائل والمشاكل التي يوجد صعوبة في معالجتها بالطرائق التجريبية مثل تحديد سلوك الحقول والأمواج الكهرومغناطيسية في داخل البنى الهندسية والمواد المختلفة ومنها على سبيل المثال دراسة تعرض الإنسان للحقول الكهرومغناطيسية [4,7,10], وقد شهدت السنوات الأخيرة تطوراً كبيراً في مجال نمذجة التداخل الكهرومغناطيسي وهي في تقدم مستمر.

أهمية البحث وأهدافه:

يعد التداخل الكهرومغناطيسي مشكلة هامة في التطبيقات الراديوية الحديثة مقارنة مع تلك التقليدية، وتشكل الأجهزة اللاسلكية وأجهزة البلوتوث (Bluetooth) ، والشاشات الرقمية التفاعلية والهواتف اللاسلكية ومرسلات الفيديو والأفران الميكروية مصدراً للتداخل الكهرومغناطيسي بترددات عالية.

تعد الدارات التكاملية المستخدمة في الأجهزة والنظم الكهربائية والإلكترونية مصدراً أساسياً للتداخل الكهرومغناطيسي إذ تقترب طاقاتها مع الكثير من الأجهزة المحيطة وتسيء إلى أدائها وقد تعيقها عن القيام بوظيفتها أو تعطلها.

يتم إتباع إجراءات ومتطلبات محددة في المراحل التصميمية للأجهزة والنظم ومنها ما بعد الإنتاج بإجراء اختبارات معينة لكبح التداخل الكهرومغناطيسي الناجم عنها وتخميده، ويتم تحقيق ذلك من خلال:

1) إخضاع الجهاز أو النظام مباشرة لاختبار المناعة (Immunity testing) بعد التصميم وذلك للتأكد من أن لا يكون ضحية للتداخل الكهرومغناطيسي ويحقق متطلبات التوافق الكهرومغناطيسي فيما يخص عدم انعكاس الحقول الكهرومغناطيسية الخارجية على فعالية أدائه (الحقول المولدة من المنابع في البيئة المحيطة). بعبارة أخرى إجراء اختبارات تدني الأداء بتأثير من الحقول البيئية.

2) إجراء اختبارات الانبعاث (Emission testing) بهدف تعيين سوية الحقول الكهرومغناطيسية الصادرة عن الجهاز المراقبة لنظام تشغيله وتحديد خواصه كمنبع للتداخل الكهرومغناطيسي مع النظم البيئية.

استخدمت طرائق الاختبار والقياس ومازالت لتقدير سويات التداخل، وصدرت كودات ومعايير عالمية في هذا الصدد للتوافق الكهرومغناطيسي Electromagnetic Compatibility (EMC) التي أصبحت إحدى المؤشرات الأساسية لصلاحية الجهاز وكفاءته.

تعقدت النظم الكهربائية والإلكترونية بنتيجة التقدم العلمي في مجال الاتصالات والحاسوب والأجهزة الطبية وما يرافقها من أنماط الحقول الكهرومغناطيسية وظهور تأثيرات التداخل الكهرومغناطيسي. ويمكن تقدير بعض جوانب هذه التأثيرات اختبارياً بالقياس، ولكن كما أشرنا آنفاً فإن التقنيات الحديثة أصبحت تقنيات دقيقة مما يشكل عوائق تقنية متعددة الأوجه في دراسة أدائها، وما يرافقه من حقول كهرومغناطيسية تصدرها إلى البيئة المحيطة من ناحية، وبالمقابل ما تتعرض له من حقول كهرومغناطيسية تؤثر بها البيئة الكهرومغناطيسية المحيطة فيها وفي أدائها، ومتابعة هذه التأثيرات وآلياتها ونتائجها.

انطلاقاً مما تمت الإشارة إليه توفر النمذجة والمحاكاة استناداً إلى الكهرومغناطيسية الحاسوبية إمكانية ملاحقة هذه الظواهر في الفراغ والزمن، وقدرتها على معالجة التفاعل الكهرومغناطيسي بين الأشكال والمواد المعقدة البنية من جهة وبين أنماط الحقول الكهرومغناطيسية من جهة ثانية بمساعدة برمجيات حديثة مثل Computational System Technology (CST) التي تشكل نمذجة الظواهر الكهرومغناطيسية أحد تطبيقاتها المتعددة.

يهدف هذا البحث لدراسة ظاهرة التداخل الكهرومغناطيسي بين الهاتف النقال Mobile phone وبين شاشات البلورات السائلة (LCD) Liquid Crystal Display، باستخدام طريقة الفرق المنتهي في المجال الزمني

Finite Difference Time Domain (FDTD) لتحقيق محاكاة المسألة المدروسة. يتم تحقيق ذلك من خلال حل معادلات ماكسويل للنموذج الرياضي الذي يحاكي التفاعل والتداخل الكهرومغناطيسي بمراعاة الشروط الحدية والأولية، ويتم الحصول على هذه الأخيرة بالقياس التجريبي مخبرياً.

طرائق البحث ومواده:

تتلخص طريقة البحث في النقاط التالية:

- دراسة نظرية لظاهرة التداخل الكهرومغناطيسي استناداً إلى معادلات مكسويل
- استخدام طريقة الفرق المنتهي في الزمن FDTD لمحاكاة التداخل الكهرومغناطيسي مع المواد والأجهزة والنظم الكهرومغناطية

- إجراء الاختبارات والقياسات الضرورية في مخبر الحقول والتوافق الكهرومغناطيسي . جامعة دمشق
- تطبيق تقنية FDTD بمساعدة البيئة البرمجية CST في جزئها الخاص لنمذجة الظواهر الكهرومغناطيسية لمحاكاة التفاعل الكهرومغناطيسي بين الهاتف النقال وشاشة LCD للأجهزة الحديثة لمتابعة قيم المتغيرات في الفراغ الثلاثي والزمن الفعلي الواقعي.

تقدم التقنية المذكورة الصور الحيزية للحقل من خلال توزيع خطوط قواه وسطوح سويات الكمون في الفراغ والزمن. يتم الاستناد إلى هذه المخططات للحصول على المعلومات عن توزيع كثافة الطاقة الكهرومغناطيسية في كل نقطة من الوسط موضع الاهتمام ودراسة آثار التداخل الكهرومغناطيسي ونتائجه المحتملة على أداء الأجهزة والنظم والأوساط بشكل عام.

تستند نمذجة ومحاكاة التداخل الكهرومغناطيسي إلى حل معادلات ماكسويل رياضياً التي تستوجب أشكالاً هندسية منتظمة ومتناظرة ومواد متجانسة وهذا نادر الحدوث في التطبيقات الهندسية ومن هنا لا بد من البحث عن الطرائق التقريبية الحسابية ذات الدقة والتميزية العاليتين، ومن أهم هذه الطرائق الحسابية التقريبية أو الطرائق العددية المستخدمة في حسابات الكهرومغناطيسية والتي تدعى كما ذكرنا بالكهرومغناطيسية الحسابية [2,4,6]:

1- طريقة الفرق المنتهي FDM-Finite Difference Method

2- طريقة العناصر المنتهية Finite Element Method - FEM

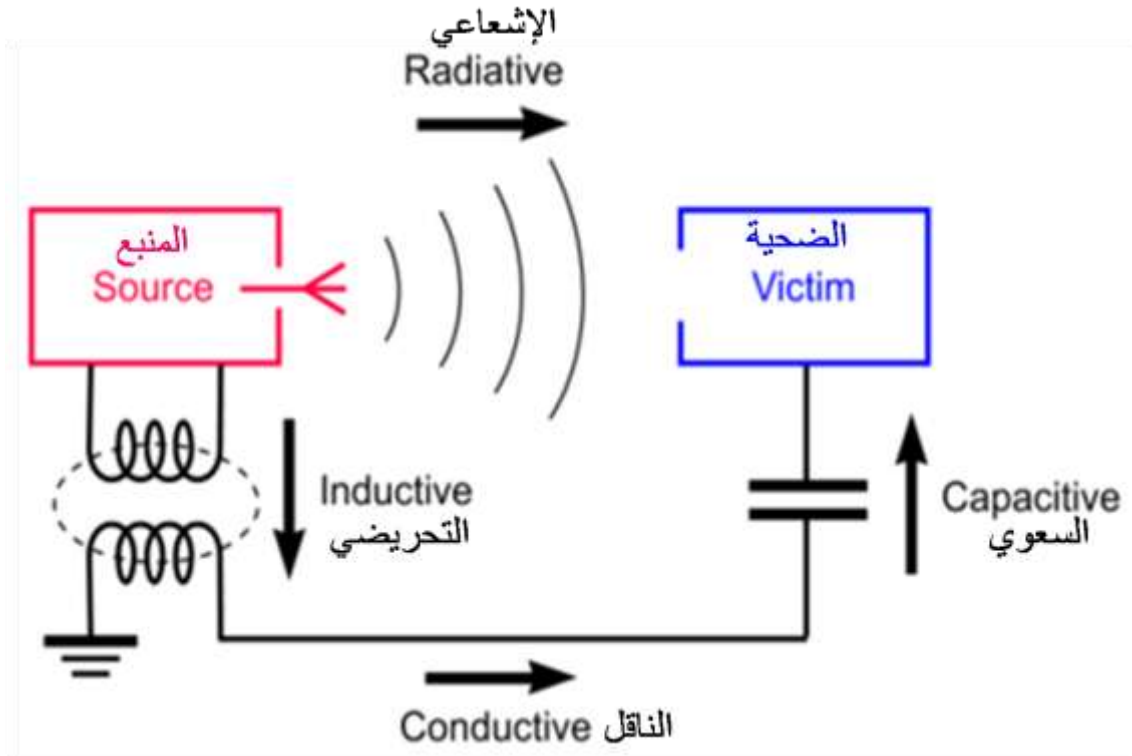
3- طريقة العزوم MOM - Method of Moments

ترك تطور تقنيات النمذجة التحليلية والعددية بصماته الهامة في مجال التداخل الكهرومغناطيسي EMI، فهي تستخدم في التصميم والتركيب والاختبارات المختلفة للبنى الكهرومغناطية والنظم، مثل النظم الإلكترونية الدفاعية، ونظم الاتصالات ونقل البيانات، وفي مجال مستهلكي القدرة الكهرومغناطية ومستهلكي الإلكترونيات. تعود أهمية الطرائق الحسابية إلى التالي:

تصلح نماذج EMI المحوسبة لتمثيل الظاهرة الكهرومغناطيسية عندما يتم إرفاقها بالقياسات العملية أو يتم مقارنة النتائج النظرية بالنماذج العددية المشار إليها.

- تمتاز الطرائق العددية (الحسابية) بقابلية تطبيقها في أغلب المسائل الهندسية ولكنها تقريبية وتقتصر على النماذج وعلى إمكانية التكميم Quantization في الفراغ والزمن.

- تتطلب النمذجة الكهرومغناطيسية إيجاد صورة مكافئة تحاكي تصرف الحقل الكهرومغناطيسي للنظام الكهربائي من أجل محددات عديدة، بما فيها الشروط الحدية والشروط الأولية وأنماط التحفيز (أو التهيج) والتشكيلات المختلفة للنظام بحد ذاته.
- تستطيع النمذجة الرياضية أن تحقق دراسة مسألة التداخل الكهرومغناطيسي خلال فترات زمنية قصيرة، وأقل بكثير من تلك التي تجري بواسطة الاختبارات الأساسية على النماذج الأصلية.
- توفر النمذجة الكهرومغناطيسية إمكانية محاكاة التصرف الكهرومغناطيسي للنظام الكهربائي بمحددات متغيرة في مجالات واسعة وتشمل شروطاً أولية وأخرى حدية ونماذج تحفيز مختلفة وتشكيلات متنوعة للنظام بحد ذاته.
- تكمّن أهم الصعوبات التي تواجه نمذجة التداخل الكهرومغناطيسي في الصعوبات الفيزيائية للنظام الكهربائي موضع الاهتمام، وفي الخواص الكهربائية له التي لا تسمح بتحديد عدد البارامترات المستقلة الضرورية لإنشاء نماذج التوافق الكهرومغناطيسي EMC المناسبة وفق الكودات لمعالجتها. تعتمد الطرائق التقريبية لنمذجة EMI على حلول المعادلات التفاضلية والتكاملية في المجال الزمني والترددية.
- تحقق النمذجة خلال فترات قصيرة مقارنة مع تلك الضرورية لإنشاء القاعدة الأساسية للاختبار والتجريب.
- يتمثل الهدف الأساسي للنماذج الحسابية للتداخل الكهرومغناطيسي في التنبؤ الوقائي لاستجابة أي جهاز أو نظام هندسي للحقول الخارجية المولدة من منابع محددة وموثوقة أو للحقول والأمواج الكهرومغناطيسية عموماً.
- تصنف منابع التداخل الكهرومغناطيسي EMI إلى منابع طبيعية مثل انفراغات البرق وإلى منابع صناعية، من ناحية أخرى يمكن تصنيف التداخل إلى نوع الاضطراب الناقل (Conducted disturbance) ويندرج تحته الجهود الزائدة المتحرضة وهبوطات الجهد وما يرافق عمليات الوصل والفصل ووجود التوافقيات Harmonics.
- يتمثل النوع الثاني من التداخل بالاضطراب الإشعاعي (Radiated disturbance) ويعود إلى الجهود المتحرضة من انفراغات البرق وإشعاعات الهوائيات وتداخل الاتصالات والتبادل السعوي cross-talk.
- يبين الشكل (1) تمثيلاً مبدئياً للنموذج الأساسي للتداخل الكهرومغناطيسي [7].



الشكل (1) المخطط المبدي لأنماط التداخل الكهرومغناطيسي ومساراته

يضم النموذج منبعاً للتداخل الكهرومغناطيسي EMI والضحية المعرضة له ومسارات التحفيز الكهرومغناطيسي بينهما. يمكن للمنبع أن يكون مرسلًا راديويًا أو هاتفًا جوالًا أو نبضة كهرومغناطيسية Electromagnetic pulse. تمثل الضحية أي جهاز كهربائي مستقبل، يمكن لمسارات الترابط بين المنبع والضحية أن تكون سلكية كترابط ناقل تحريضي أو سعوي ، كما يمكن أن يكون لاسلكيًا إشعاعيًا. يشكل المخطط المبدي المشار إليه النموذج الأساسي لدراسة التداخل الكهرومغناطيسي الذي يحاكي النظام موضع الاهتمام ويتكون مما يلي:

- 1- منبع التداخل الكهرومغناطيسي : مرسل راديوي أو هاتف خلوي أو ضربة الصاعقة أو أي جهاز كهربائي أو إلكتروني وبشكل عام أي نبضة كهرومغناطيسية Electromagnetic Pulse - EMP غير مرغوب بها.
- 2- مسار الاقتران وسمات الحقل الكهرومغناطيسي : نمط الحقل، استقطابيته، تردده، طول موجته وزاوية الورد وغيرها، إضافة إلى الخواص الفيزيائية لوسط الانتشار .
- 3- الضحية : خواصها الكهربائية وأبعادها الهندسية التي يمكن أن تكون أي جهاز كهربائي إلكتروني منزلي أو صناعي أو طبي كما يمكن أن يكون الإنسان بحد ذاته.
- 4- الشروط الحدية والأولية وشروط الامتصاص .

يقدم استخدام الطرائق المختلفة لحساب مسائل التداخل الكهرومغناطيسي ودراستها إمكانية :

- حساب مستوى استجابة الجهاز الخاضع للحقول الكهرومغناطيسية من البيئة المحيطة، وتقدير ذلك بالجرعة الكهرومغناطيسية المعرض لها Electromagnetic dosimetry.
- تحليل المعلومات وتقييم سلوكية التداخل الكهرومغناطيسي EMI.

-مقارنة نتائج الدراسات مع المعايير العالمية وإجراءات الحماية والأمان التي تدعى بمعايير التوافق الكهرومغناطيسي
Electromagnetic compatibility criterias - EMC.

أشرنا إلى وجود العديد من الطرائق الحاسوبية، ولكن برهنت التجربة العملية في الكهرومغناطيسية الحاسوبية أن طريقة الفرق المنتهي Finite Difference Time Domain (FDTD) تمتاز بأفضليات كبيرة وخاصة بعد ظهور الحواسيب السريعة [8,5,9] ومن أهمها :

• المرونة العالية في محاكاة المسائل الهندسية الكهرومغناطيسية بما فيها دراسة ظاهرة التفاعل مع المواد من أي نوع كانت سواءً الجامدة أو الحية.

• تتناسب طريقة الفرق المنتهي لدراسة التفاعل الكهرومغناطيسي ومتابعته في مستوى الترددات المنخفضة والعالية.

• يمكن بسهولة الحصول على درجة عالية لاستقرارية الحل وذلك بتصغير أبعاد الخلية.

• درجة الدقة والتمييزية العالية، وإمكاناتها في تصغير أبعاد الخلية الرياضية إلى قيم مكروية.

• متعددة الاستعمالات وتلائم دراسة الأجسام بأبعاد هندسية دقيقة أو كبيرة وبمستويات تعقيد مختلفة.

• السهولة النسبية في استنتاج المقاربات الرياضية واعتمادها على الخوارزمية الحاسوبية، مقارنةً مع التقنيات

الأخرى.

• تسمح بالمتابعة الحية للمتغيرات في الفراغ الثلاثي والزمن وتعدّ هذه الصفة ميزة خاصة لطريقة FDTD . كما

يمكن استخدامها في التطبيقات الطبية ودراسة التوافق الكهرومغناطيسي الحيوي.

تتنوع نماذج التداخل الكهرومغناطيسي تبعاً للتردد وطول الموجة وخصائص المادة، ولكن أكثر هذه النماذج استعمالاً

هي تلك التي تعتمد على مقارنة الموجة الكاملة آخذين بالحسبان الانبعاث الإشعاعي والانبعاث الناقل

[4,7,5]. Radiated & conducted emission.

النتائج والمناقشة:

توفر نمذجة الحقول الكهرومغناطيسية محاكاة تصرفها في نظام كهربائي من أجل تغييرات واسعة لبارامترات، بما فيها

الشروط الأولية والحدية ونماذج التحفيز والتشكيلات المختلفة للنظام بحد ذاته. تتكفل النمذجة بتمثيل الظواهر خلال

فترات زمنية قصيرة اقصر من تلك الضرورية لإجراء الاختبارات والقياسات العملية بواسطة النماذج الفيزيائية المكافئة

[6,3]

استخدمت طريقة الفروقات المنتهية في المجال الزمني من قبل تالفوف عام 2000 لحسابات توزع الحقول

الكهرومغناطيسية في الفراغ والزمن [7]، ومنذ ذلك الحين توسّع استخدامها في مجال التقنيات ودراسات التفاعلات

الكهرومغناطيسية .

تعتمد طريقة FDTD على الحلول التقريبية لمعادلات ماكسويل في المجال الزمني :

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \rho_v \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

حيث:

$$\begin{aligned} D &- \text{كثافة التدفق الكهربائي } (C/m^2) \cdot E - \text{شدة الحقل الكهربائي } (V/m) \cdot \\ B &- \text{كثافة التدفق المغناطيسي } (T) \cdot H - \text{شدة الحقل المغناطيسي } (A/m) \cdot \\ \sigma &- \text{الناقلية الكهربائية } (S/m) \cdot \varepsilon - \text{النفذية الكهربائية } (F/m) \cdot \mu - \text{النفذية المغناطيسية } (H/m) \cdot \\ \rho\rho_v &- \text{كثافة الشحنة الحجمية.} \end{aligned}$$

بنشر هذه المعادلات في المحاور (x,y,z) يمكن الحصول على ما يلي :

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad (6)$$

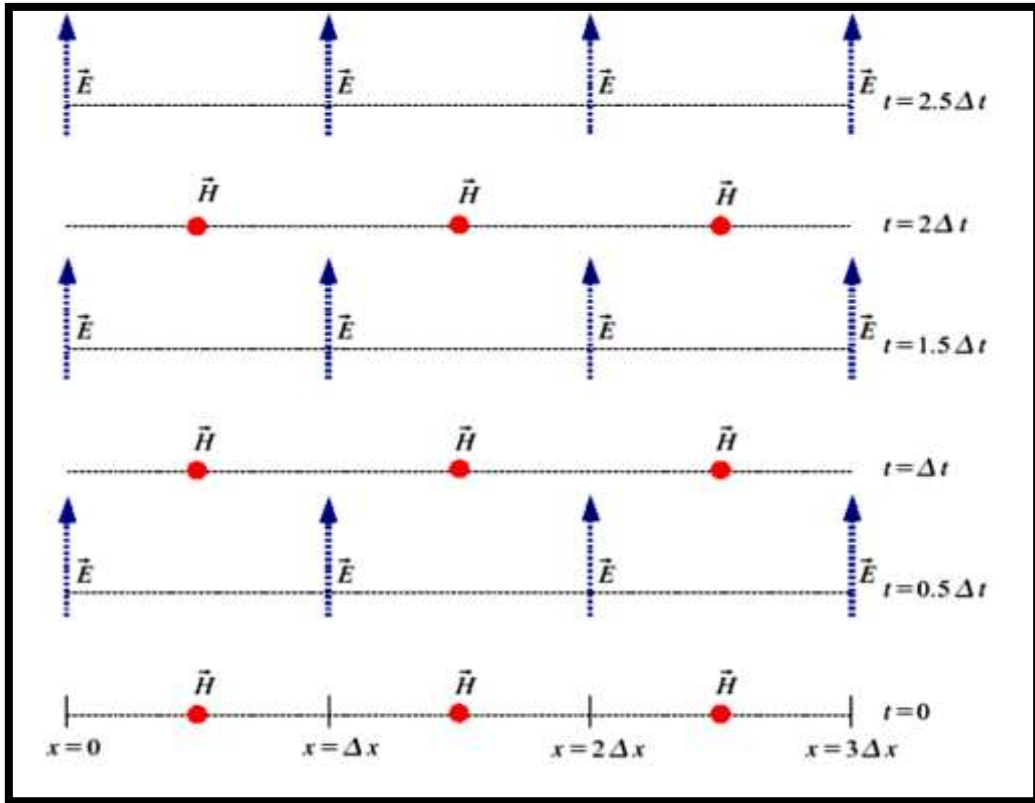
$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (8)$$

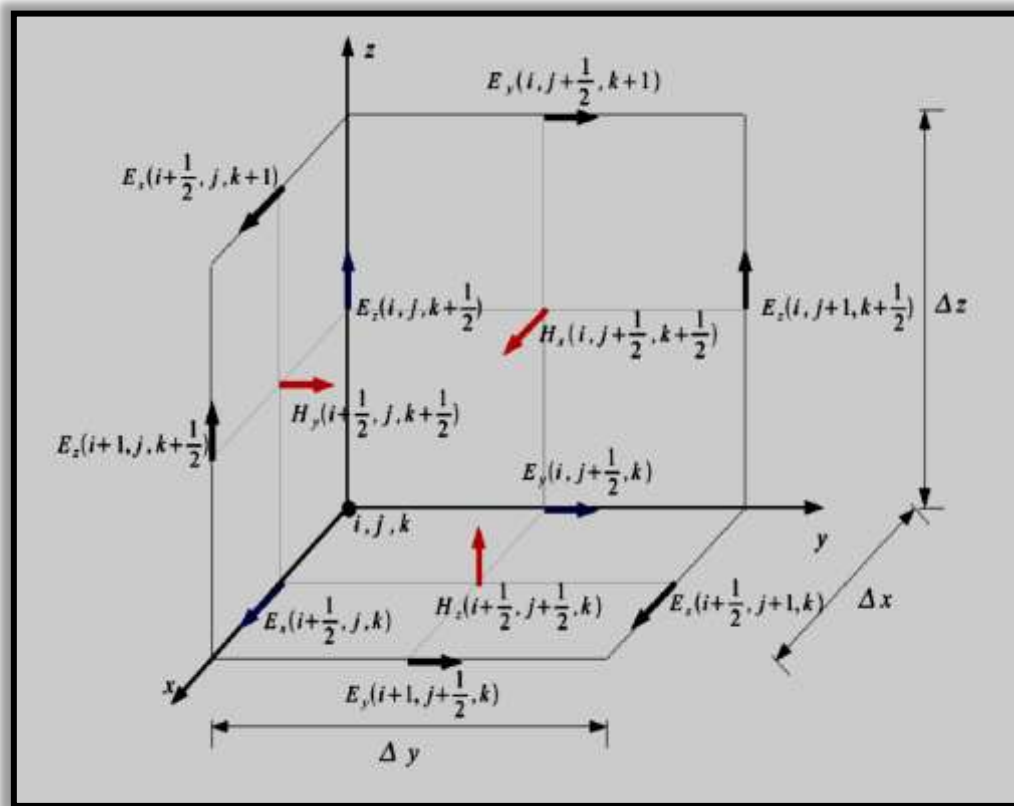
$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (9)$$

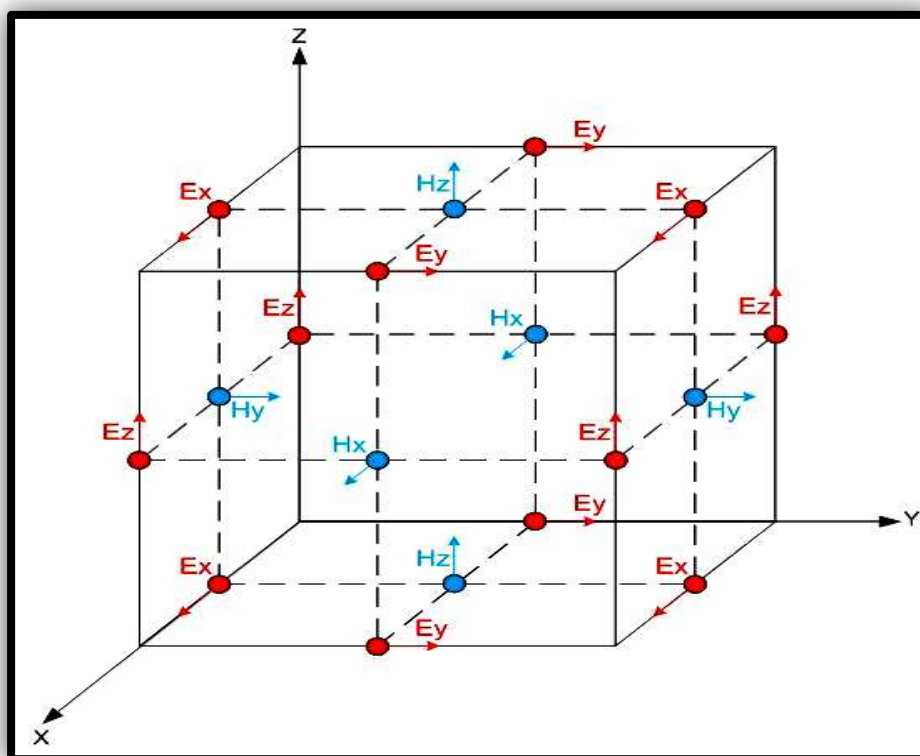
$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (10)$$

يتم تقسيم الحيز الفراغي وفق هذه التقنية إلى خلايا دقيقة مكعبة الشكل بأبعاد $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ بحيث تكون شدة الحقل على كل ضلع من الأوجه ثابتة وعمودية على الحقل المغناطيسي الملازم له وفقاً لماكسويل، كما يبين الشكل (3). يتم إدخال التبعية الزمنية لمركبات الموجة الكهربائية بمساعدة خوارزمية Yee، التي أصبحت أساساً علمياً لإيجاد الحلول التقريبية. تعتمد هذه الخوارزمية على معادلات ماكسويل، التي تؤكد أن المعدل الزمني لأي من مركباتي الحقل الكهربائي تحرض المركبة الأخرى ويتمثل ذلك بتقنية قفزة الضفدع الشكل (2).



الشكل (2) خوارزمية Kane Yee قفزة الضفدع (Leap Frog) خلال أنصاف خطوات فراغية وزمنية





الشكل (3): خلية Kane Yee الفراغية

تنص التقنية المذكورة على أن المعدل الزمني لتغير الحقل المغناطيسي يحرض حقلاً كهربائياً إحصارياً (دورانياً) - حيزياً. بفرض أن الخطوة الزمنية Δt تقابل $\Delta x = \Delta y = \Delta z$, عندئذ فإن الحقل المغناطيسي سيحرض حقلاً كهربائياً في نصفي خطوة مكانية سابقة ولاحقة حول موضع تغير الحقل المغناطيسي [1,3,9,11] كما يبين الشكل (2).

يقابل التزايد الفراغي $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ والتزايد الزمني Δt وعندها يكون الحقل F :

$$F(x, y, z, t) = F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) \equiv F^n(i, j, k) \quad (11)$$

تتسم خوارزمية Yee بالتبادل بين مركبتي الحقل الكهربائي E والمغناطيسي H كل نصف خطوة فراغية وزمنية, بحيث إنه عندما يكون الحقل الكهربائي هو شدة الحقل المؤثرة على أطراف الخلية فإن الحقل في مراكز وجوهها ستكون لشدة الحقل المغناطيسي والعكس بالعكس, وهذا ما يساعد في تسهيل عملية الحل التقريبي. باستخدام طريقة الفروق المركزية التقريبية نحصل على المعادلات التالية:

$$\frac{\partial F}{\partial x} \approx \frac{F^n(i + \frac{1}{2}, j, k) - F^n(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta x} \quad (12)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} \approx \frac{F^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - F^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k)}{\Delta t} \quad (13)$$

وبتعبير هذه الحلول التقريبية في معادلات ماكسويل وحلها بالنسبة للمركبات على المحور (z) مثلاً نتوصل إلى ما يلي :

$$E_z^n \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right) = \frac{1 - \frac{\sigma(i, j, k + \frac{1}{2}) \Delta t}{2\varepsilon(i, j, k + \frac{1}{2})}}{1 + \frac{\sigma(i, j, k + \frac{1}{2}) \Delta t}{2\varepsilon(i, j, k + \frac{1}{2})}} E_z^{n-1} \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i, j, k + \frac{1}{2})} \left[\frac{H_y^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) - H_y^{n-\frac{1}{2}} \left(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n-\frac{1}{2}} \left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) - H_x^{n-\frac{1}{2}} \left(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right)}{\Delta y} \right] \quad (14)$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) = H_z^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) + \frac{\Delta t}{\mu \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right)} \left[\frac{E_y^n \left(i + 1, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) - E_y^n \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right)}{\Delta x} - \frac{E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j + 1, k \right) - E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right)}{\Delta y} \right] \quad (15)$$

وبالمثل يمكن كتابة معادلات مماثلة للمركبات على x و y .

نستنتج مما سبق أن قيم كل من E و H عند كل خطوة زمنية تحسب عن طريق تحديث قيمها من الخطوة الزمنية السابقة. وهكذا فإن المعادلات التقريبية وفق خوارزمية Yee تعين الحقول في اللحظة الآتية وفقاً لقيم الحقول في اللحظة الزمنية السابقة.

لاستكمال الحل يجب مراعاة الشروط الحدية والشروط الأولية وشروط الامتصاص التام. سنستخدم حزمة البرمجيات CST المعتمدة على تقنية $FDTD$ في تحقيق حسابات التداخل الكهرطيسي.

تجدر الإشارة إلى أن تنفيذ النمذجة وإجراء الحسابات وفق البرمجيات المذكورة تتطلب تحقيق بعض الشروط الخاصة بالأبعاد الهندسية في المسألة المدروسة، وكذلك إجراءات التخميد والإنعكاس للمحاكاة الواقعية للمسألة. تم تنفيذ ذلك في مخبر الحقول والتوافق الكهرطيسي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

نظراً لأهمية دراسات التداخل الكهرطيسي التي تحتاج إلى تحديد توزيع الحقول الكهرطيسية في الفراغ الثلاثي والمتابعة الزمنية الديناميكية لتغيراتها في الحيز المدروس، فإنه من الصعوبة بمكان تنفيذ ذلك من خلال القياسات العملية نظراً لمحدوديتها. بناءً على ذلك تم أخذ القياسات الضرورية المذكورة آنفاً لتشكل قاعدة أساسية في استخدام تقنية $FDTD$ بمساعدة برمجيات CST [1,2,3,8,9] وبشكل ذلك هدفاً لهذا البحث.

تحتاج الدراسات المعمقة للتداخل الكهرطيسي إلى إجراء التجارب العملية والاختبارات الضرورية التي تشكل في الوقت الراهن القاعدة الأساسية ونقطة الانطلاق عملياً لدراسة التفاعلات الكهرطيسية على المستويات المكونة والتي يمكن تحقيقها بواسطة الطرائق الحسابية وخاصة طريقة الفروقات المتناهية في المجال الزمني لما تمتاز به من أفضليات في المتابعة الحية لتغيرات الحقول في الفراغ والزمن.

نختار من واقعا المعيش تطبيقاً عملياً إذ يصادف في كثير من الأحيان وجود الهاتف الخليوي بجوار شاشة تلفزيون *LCD* . نعلم بورود مكالمة من صوت ضجيج صادر عن التلفزيون ، وتشويش في الصورة وعدم وضوح ذلك قبل أن يرن جرس الهاتف.

ما حدث هو أحد تجليات ظاهرة التداخل الكهرطيسي بين الأجهزة المختلفة وهذه الظواهر شائعة الحدوث في المنازل والمعامل والسيارات ونظم القياس والتحكم والاستشعار عن بعد، إضافة إلى التداخل الكهرطيسي الحيوي.

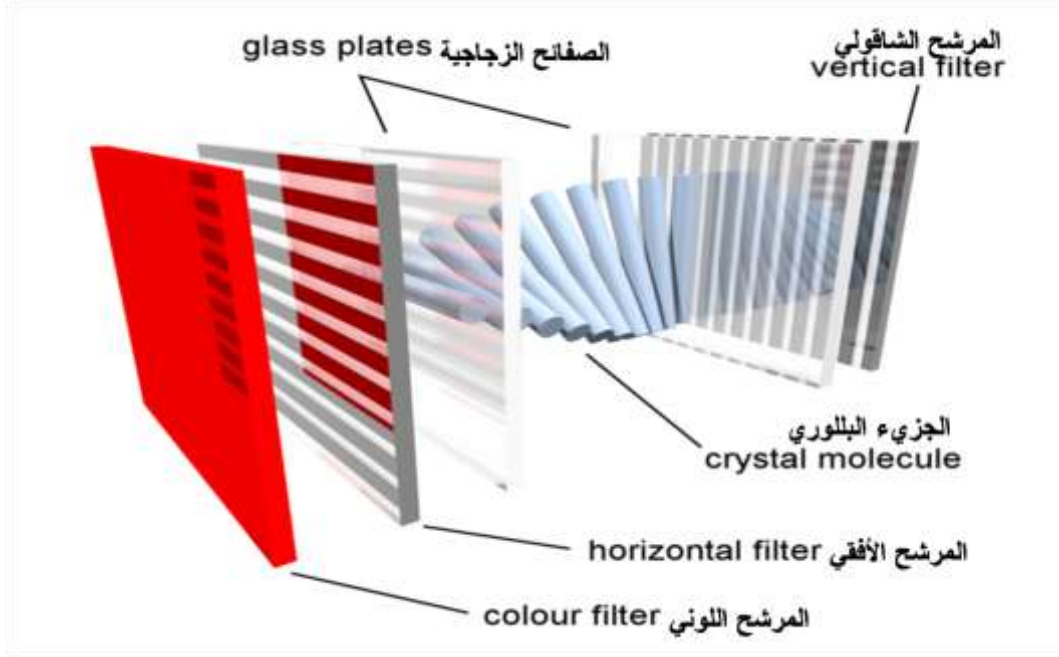
انطلاقاً مما سبق تم دراسة نموذج للتداخل الكهرطيسي بين الهاتف النقال وشاشات الـ *LCD* . أجريت الاختبارات والقياسات العملية لتحديد المعاملات الرئيسية للحقل المؤثر والمادة المعرضة، وشكلت نتائجها الشروط الأولية والحدية لدراسة التفاعلات الكهرطيسية على المستويات الدقيقة بواسطة طريقة الفرق المنتهي في الفراغ الثلاثي والزمن الحي (*FDTD*) بوصفها إحدى أفضل الطرائق الحسابية في هذا المجال .

يهدف هذا البحث لدراسة التداخل الكهرطيسي بين الحقل الكهرطيسي للهاتف النقال وبين الشاشات ذات البلورات المائعة (*LCD*) ، باستخدام تقنية *FDTD* لتحقيق المحاكاة للمسألة المدروسة .

تم الاستعانة ببيئة البرمجيات *CST* المعتمدة على تقنية *FDTD* لحل معادلات ماكسويل لنموذج رياضي يحاكي التفاعل والتداخل الكهرطيسي بمراعاة الشروط الحدية والأولية التي يتم الحصول عليها بالقياس.

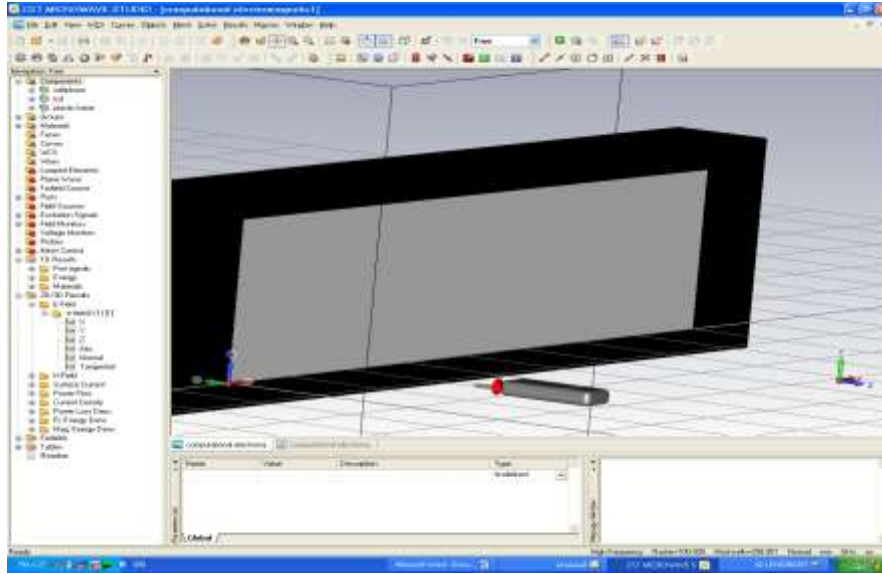
تستخدم تقنية *LCD* في الساعات الرقمية والهواتف الخليوية والحوايب المكتبية والمحمولة وأجهزة التلفاز وشاشات الإظهار وفي المقاييس الرقمية وفي النظم الإلكترونية المختلفة، وتمتاز بأفضليات جلية على تقنيات الإظهار الأخرى من ناحية الوزن الخفيف وصغر الحجم والاستهلاك المنخفض للطاقة .

تتمتع تقنيات *LCD* بخصائص كهربائية وضوئية خاصة لنوع من المواد تدعى بالبلورات المائعة، التي اكتشفها عالم النباتات فريدريك راينيتزر عام 1880م ، وتعتبر هذه البلورات مواد هجينة بين الصلبة والسائلة . تتكون بنية مواد *LCD* من خيوط ملتوية من البلورات الكريستالية ، وتميل جزيئاتها لتشكيل بنية حلزونية ملتفة عند وضعها في أبعاد ضيق بين مادة زجاجية ذات سطحين باتجاهين متعامدين، تصطف الجزيئات الملاصقة للسطوح الأخرى بشكل متوازٍ فيما بينها على طول الأبعاد ، كما في الشكل (4).



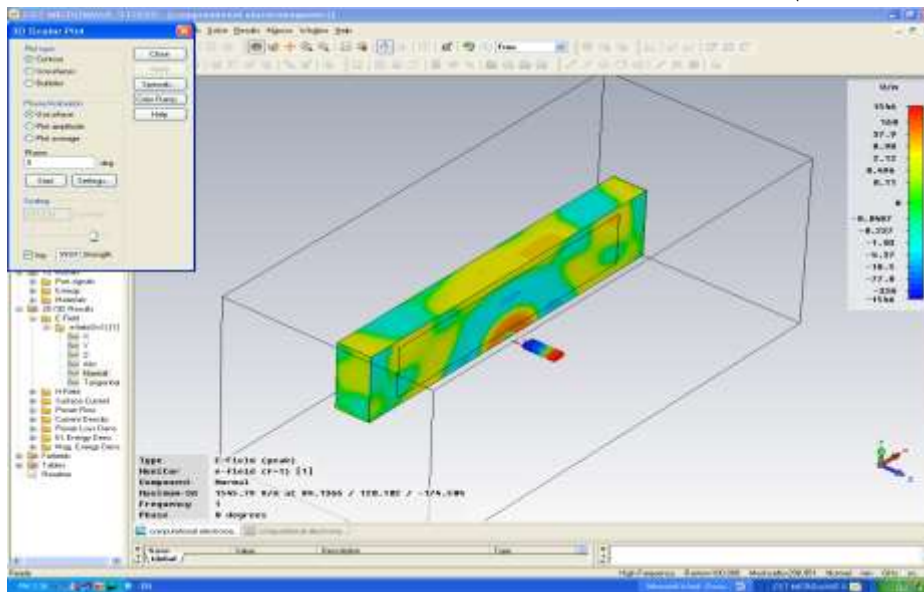
الشكل (4) بنية شاشة LCD

يجعل التشكيل الحلزوني البلورات تنصرف على شكل مستقطبات للموجة ، فالضوء الوارد سيتبع اتجاه الحلزون ويخرج من المادة وفق استقطابيتها ، حيث يكون اتجاه الحقل الكهربائي موازياً لاتجاه الأخدود. تتصف الجزيئات الخيطية للمادة البلورية بانحلال النفاها ولولبيتها تحت تأثير الحقل الكهربائي الناتج من فرق جهد عبر طبقتها وتتبع درجة الانحلال لشدة الحقل الكهربائي وعند ذلك لن يحدث استقطاب لموجة الضوء عند عبوره للمادة البلورية ويكون الإستقطاب عمودياً على المستقطب الخارجي ما يمنع الضوء من العبور أي يحدث الخلل. تم نمذجة التفاعل الكهرطيسي لموجة الهاتف النقال مع شاشة LCD ومحاكاتها بمساعدة بيئة برمجيات CST والتي تعتمد في الحسابات على طريقة الفروقات المتناهية لحل معادلات ماكسويل في الفراغ والزمن (الشكل 5). تجدر الإشارة إلى أنه تم استخدام نتائج القياسات العملية التي أجريت في مخبر الحقول والتوافق الكهرطيسي بوصفها شروطاً أولية وشروطاً حدية تشكل قاعدة البيانات اللازمة لعمل البيئة البرمجية CST . تعد برمجيات CST من أهم برامج محاكاة الحقول الكهرطيسية كما أشرنا، وتستخدمه العديد من مراكز الأبحاث لدراسة الحقول الكهرطيسية في نظم القدرة الكهرطيسية والاتصالات والآلات والنظم الطبية وفيزياء الجزيئات [7,8]. وتمتاز بقدرتها على محاكاة الحقول الكهرطيسية في الفراغ والمتابعة الحية لتغيراتها في الفراغ والزمن . وتتسم هذه البرمجيات بالاستجابة العالية في المجالات الترددية المنخفضة والعالية، وبمرونة حل المسائل الكهرطيسية المعقدة والمتنوعة ويتطلب ذلك مهارات عالية لضبط مفاصل تشغيلها خاصة في مجال البحث العلمي. تقدم تقنية FDTD وبمساعدة البرمجيات ومنها CST وسيلة مساعدة تتيح للباحثين إجراء الدراسات والأبحاث على مستويات دقيقة تتبع للأبعاد الهندسية المختارة لخلايا الحساب ويتحكم بذلك ساعات ذواكر الحواسيب وسرعتها في المعالجة.

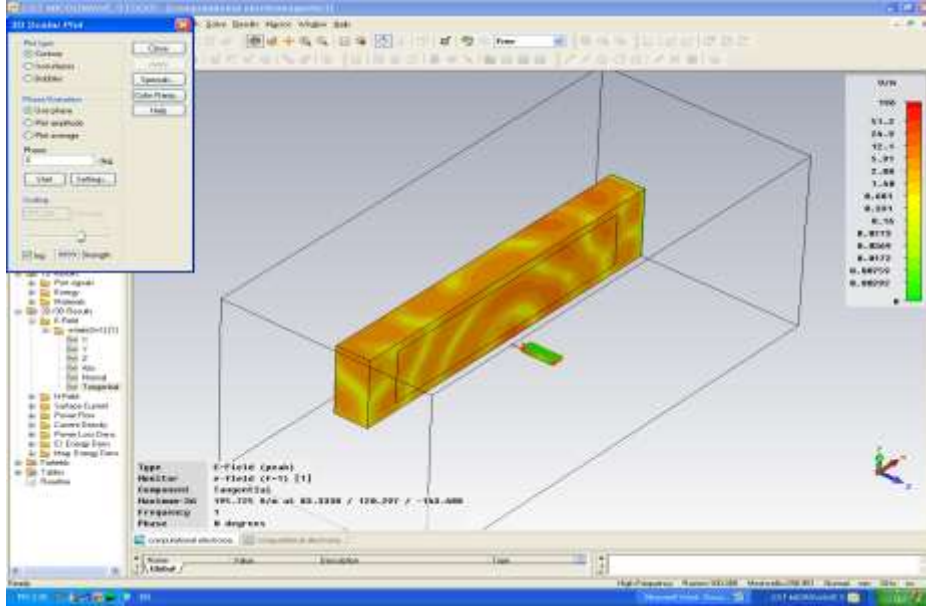


الشكل (5) : نموذج المسألة المدروسة والمكون من شاشة LCD والهاتف النقال

تم خلال عملية النمذجة مراعاة خواص المواد المكونة لكريستالات LCD ، بعدها تم الحل في المجال الزمني فكانت نتائج دراسة التداخل الكهرومغناطيسي كما في الأشكال التالية:
يبين الشكلان (6) و(7) توزيع الحقل الكهربائي فراغياً وزمناً في LCD من خلال مركباته المماسية والناظرية (Normal, Tangential).



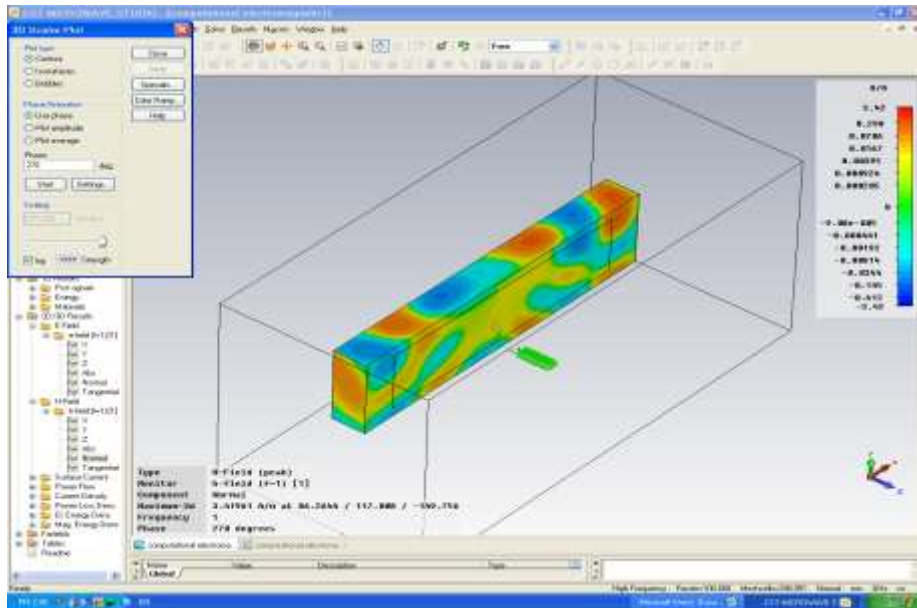
الشكل (6) : توزيع شدة الحقل الكهربائي بمركبته الناظرية



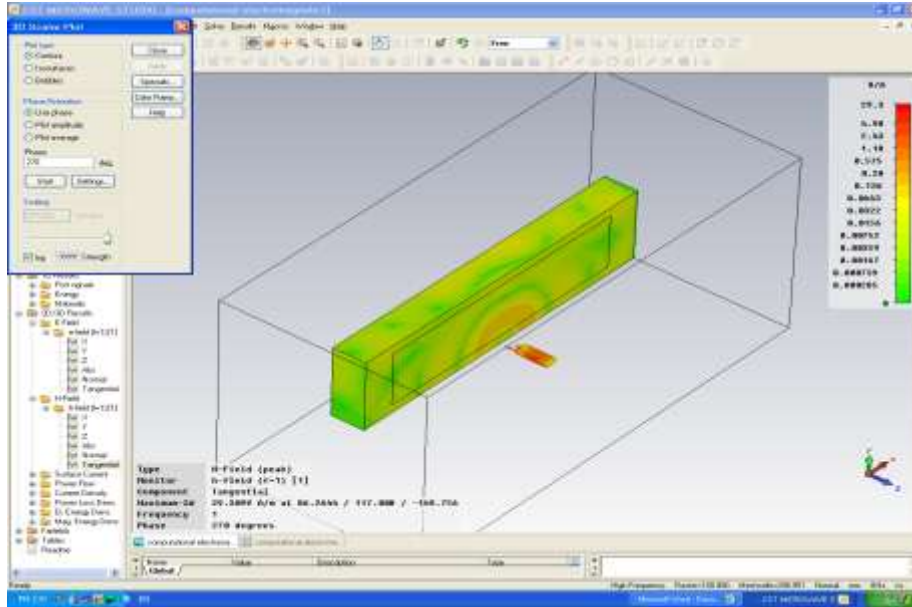
الشكل (7): توزيع شدة الحقل الكهربائي بمركبته المماسية

يتضح من الأشكال المشار إليها تغلغل الحقل الكهربائي إلى داخل المادة إضافة إلى تغيير شدة الحقل الكهربائي على سطح المادة ومن خلال نظام عمل مواد شاشات الـ LCD ، وتؤثر شدة الحقل مباشرة في استقطابية البلورات وينعكس ذلك على جودة الإظهار.

تبين الأشكال (8) و(9) توزيع الحقل المغناطيسي بمركباته الناطمية والمماسية (Normal, Tangential) ، حيث نلاحظ وجود بؤر تركز بسبب الخاصية الإعصارية ضمن المادة . مع مراعاة أن الحقل المغناطيسي يغير من زوايا دوران العزوم الكهربائية وهذا سينعكس أيضا على استقطابية البلورات وبالتالي على جودة الصورة.

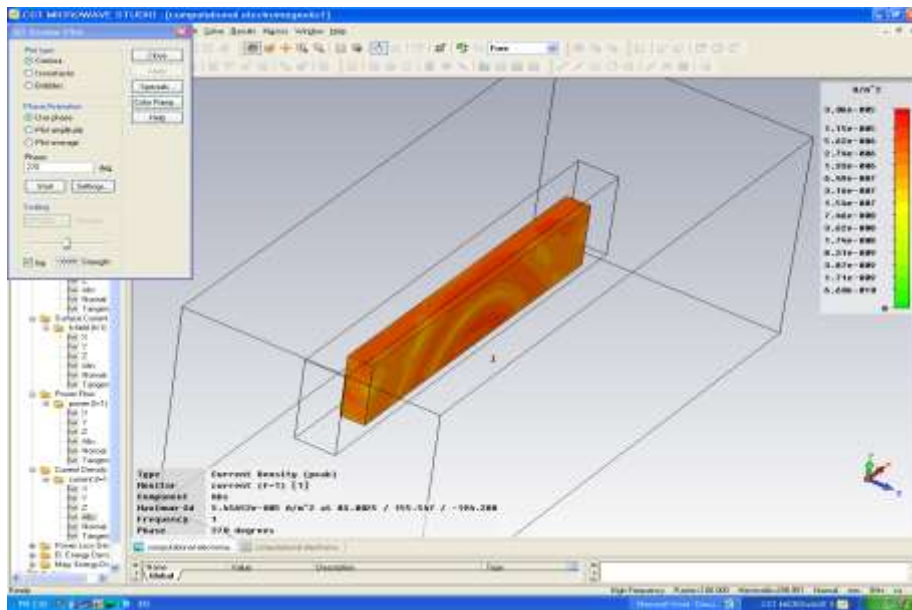


الشكل (8): توزيع شدة الحقل المغناطيسي بمركبته الناطمية

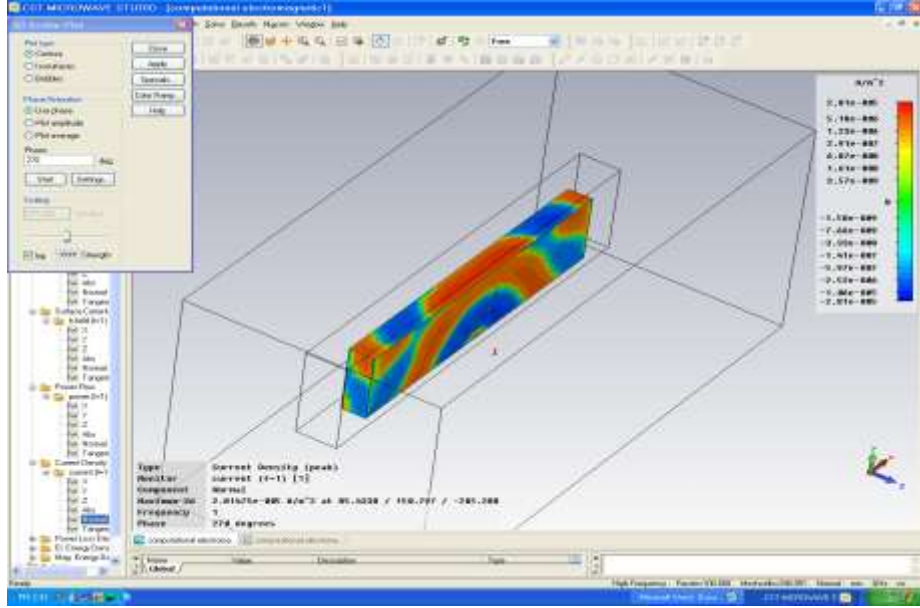


الشكل (9): توزيع شدة الحقل المغناطيسي بمركبته المماسية

يبين الشكلان (10) و(11) توزيع كثافة التيار الكهربائي ، حيث تتمركز كثافات عالية في بقع داخل المادة على شكل تيارات دوامة ستوثر في عدة خصائص منها الاستقطابية وزيادة درجة الحرارة وغيرها.

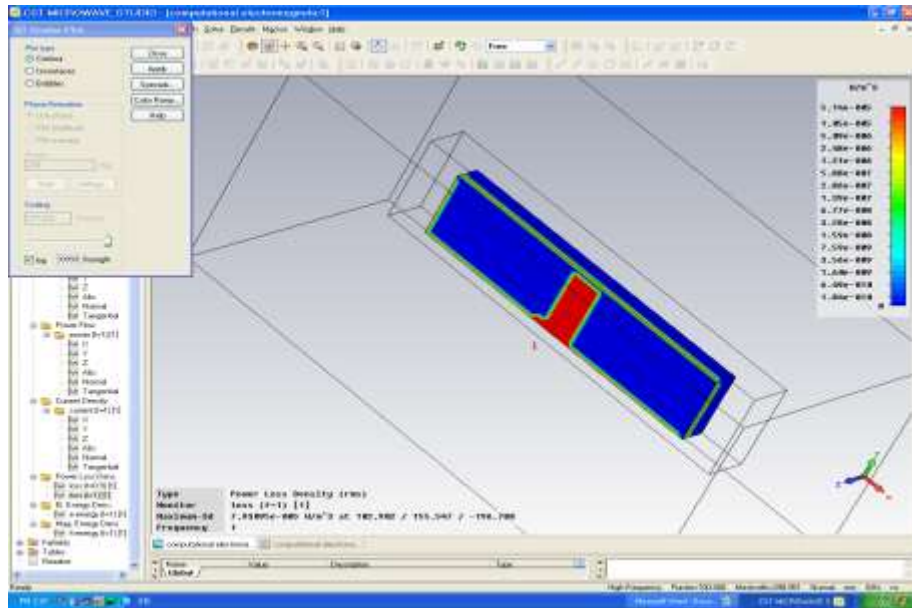


الشكل (10): توزيع المركبة المماسية لكثافة التيار



الشكل (11): توزيع المركبة الناظمية لكثافة التيار

يبين الشكل (12) تركز كثافة ضياعات القدرة الكهرومغناطيسية Power loss density التي يمكن أيضاً أن تتسبب بشكل واضح في تحطيم بعض الديودات، وتظهر عادة على شكل بقع سوداء عاتمة على شاشات الـ LCD.



الشكل (12): ضياعات القدرة الكهرومغناطيسية

الاستنتاجات والتوصيات:

- توفر تقنيات الكهرومغناطيسية الحاسوبية إمكانية الملاحظة المكانية والزمانية لتغيرات شدة الحقل الكهربائي والمغناطيسي في الوسط وذلك بمراعاة القياسات الأولية.

- يمكن الحصول على سويات الحقول الكهربائية والمغناطيسية في أي نقطة فراغية وفي لحظة زمنية ومقارنتها مع النظم المعيارية العالمية للتوافق الكهرومغناطيسي.
- تقدم النمذجة والمحاكاة مخططات توزع كثافة الطاقة الكهرومغناطيسية وبالتالي الجرعة الممتصة من قبل الوسط وكذلك كثافة التيار في الحيز الفراغي موضع الاهتمام.
- أظهرت الدراسة وجود بؤر تركز للطاقة الكهرومغناطيسية داخل المادة موضع الاهتمام بصورة متفاوتة تقود إلى تأثيرات متفاوتة مما ينعكس على جودة الصورة.
- تبين النتائج أن تقنيات النمذجة والمحاكاة الحاسوبية توفر للباحثين قاعدة علمية صلبة تتيح إمكانيات واسعة لإجراء أبحاث معمقة في المجالات المتعددة وخاصة بالنسبة لظواهر التداخل الكهرومغناطيسي.
- تتطلب تفاعلات الحقول والأمواج الكهرومغناطيسية مع بنى المادة على المستوى الميكروي إجراء القياسات الأساسية، التي توفر الخطوة الأولى لتحصيل المعلومات المتكاملة، وذلك لتقييم مشاكل التداخل الكهرومغناطيسي في المستوى الميكروي لبنية المادة كما تمت الإشارة. يتم ذلك بمساعدة حواسيب حديثة وبيئات برمجية مناسبة لمثل هذه الدراسات وطرائق حسابية من أهمها طريقة الفرق المنتهي في المجال الزمني FDTD. يتيح استخدام هذه الطريقة وبمساعدة البيئة البرمجية CST محاكاة الحقول الكهرومغناطيسية في الفراغ حيزياً، مع إمكانية المتابعة في الزمن الحي كما هي في الواقع، وذلك عند الترددات المنخفضة والعالية وبمرونة عالية في معالجة الشروط الحدية للمسائل الكهرومغناطيسية بما فيها الحيوية.
- تمتاز برمجيات CST بمرونة في تشكيل الشبكة الفراغية الحسابية لخلايا FDTD، وإدخال خواص الوسط المدروس إضافة إلى أنها توفر البيئة التفاعلية العالية المستوى في تشكيل المسألة المدروسة وحسابها. تستخدم البرمجيات المشار إليها في العديد من المجالات البحثية مثل الهندسة الطبية والآلات الكهربائية ودراسة البلازما وغيرها، حيث تتطلب تجهيزات خاصة، كونها قادرة على تحقيق المحاكاة للظواهر المدروسة في الفراغ والزمن (متابعة التغيرات الحيزية والملاحقة الزمنية كما في الواقع).

المراجع:

1. BANSAL R. , *Hand Book of Engineering Electromagnetics* , 1st.ed., Marcel Dekker , New York , 2004 ,689.
2. DAVIDSON D.B., *Computational Electromagnetics for RF & Microwave Engineering*, 1st.ed., Cambridge press , Cambridge, 2005 ,432.
3. POLJAK D., *Advanced Modeling in Computational Electromagnetic Compatibility*, 1st.ed., John Willey & Sons , Inc New York & London, 2007 ,492
4. SADIKU M.N , *Numerical techniques in Electromagnetics* ,2nd .ed., CRC press , New York , 2001 ,750.
5. SULLIVAN D.M. , *Electromagnetic Simulation Using The FDTD method*, IEEE press ,1st . ed., New York, 2000, 165.
6. SWASON D. & HOEFER W., *microwave circuit modeling using electromagnetic field simulation*, 1st.ed., Artech house , Boston & London , 2003 ,478
7. Taflove A. , *Computational Electrodynamics*, 1st.ed., Artech house , Boston & London , 1995 ,611.
8. TEAM CST, *CST studio suite 2009* , CST-Computer Software Technology company, Germany, 2009.
9. Al-Ali MAHMOUD , EM-Radiation dose of mobile- phone, Majalat Teshrin – Lel Olum Al-Handasya , Mujallad – 31 , 2009 .
10. Moussa M.,Dureii F. *Electromagnetic theory* , Damascus university, 1996.
11. Moussa M., Mahmoud S , Shoura , N , *Bioelectromagnetic modeling and simulation by FDTD* , Damascus university journal for the engineering sciences , n1 , 2011 .