

طريقة جديدة للتحليل العددي لمصفوفة الهوائيات السلكية ذات العدد الكبير من المشعات

د. م عبد المعين أحمد الرفاعي

أستاذ مساعد - كلية الهندسة - قسم الاتصالات - الجامعة الوطنية الخاصة

الملخص:

ترتبط النمذجة العددية لمصفوفة الهوائيات السلكية الكبيرة الحجم بالحاجة لاحتساب التأثير المتبادل بين المشعات في المصفوفة، الذي يؤدي إلى تغير كبير في ممانعة الدخل وفي المخطط الإشعاعي للمشع في المصفوفة مقارنةً بالمشع المعزول. تعتبر طريقة المعادلات التكاملية الطريقة الأكثر دقة للتحليل العددي للمشع السلكي، لكن إمكانيات هذه الطريقة مقيدة وبشكل كبير بالأبعاد الموجية الكبيرة للمشع أو لمصفوفة ذات عدد كبير من المشعات. تم في هذه المقالة استعراض طريقتين للتغلب على تلك القيود. تم في تلك الطريقتين تجزئة المصفوفة إلى عدد من الأجزاء المتماثلة. تراعي الطريقة المعروفة وبشكل تقريبي التأثير المتبادل بين المشعات. تسمح الطريقة المقترحة إضافة لما سبق باحتساب تأثير أثر الحافة بين أجزاء المصفوفة. أدى احتساب تأثير أثر الحافة في الطريقة المقترحة إلى دقة كبيرة في تحديد ممانعة دخل مشعات المصفوفة وهذا ما تفتقده الطريقة المعروفة.

الكلمات المفتاحية: الهوائي المصفوفي، مخطط الإشعاع، الريح، طريقة المعادلات التكاملية، أثر الحافة.

A new method for numerical analysis of wire antenna arrays with a large number of radiators

Dr. Eng. Abdoulmouen Ahmed Alrifai

Associate Professor - College of Engineering - Department of Communications – Al-Wataniya Private University

Abstract

Numerical modeling of a large-scale wire antenna array is associated with the need to account for the mutual influence between radiators in the array, which leads to a significant change in the input impedance and in the radiation pattern of the radiator in the array compared to the isolated radiator. The method of integral equations is considered the most accurate method for numerical analysis of a wire radiator, but the capabilities of this method are greatly limited by the large wave dimensions of the radiator or an array with a large number of radiators. This article discusses two methods to overcome these limitations. In these two methods, the array is divided into a number of identical parts. The well-known method roughly takes into account the mutual influence between the radiators. In addition to the above, the proposed method allows calculating the effect of the edge effect between parts of the array. Calculating the effect of the edge effect in the proposed method led to great accuracy in determining the input impedance of the array radiators, which is what the known method lacks.

Keywords: array antenna, radiation pattern, gain, integral equations method, edge effect.

1- مقدمة

تستخدم طريقة المعادلات التكاملية لحساب خصائص إشعاع الهوائيات المصفوفة السلكية ذات العدد الكبير من المشعات (العناصر). تستخدم معادلة بوكليينكتون كمعادلة تكاملية للتيار في النواقل الرفيعة، تم عند تحويل هذه المعادلة التكاملية إلى جملة من المعادلات الجبرية الخطية استخدام طريقة العزوم، حيث تستخدم التوابع النبضية كتوابع أساس ووزن [1,2,3,4,12]. إن امكانيات هذه الطريقة مقيدة بشكل كبير عند الأطوال الموجية الكبيرة لنواقل الهوائي [3,4].

تم في هذا البحث عرض طريقتين للتغلب على تلك القيود، الطريقة المعروفة التي تأخذ وبشكل تقريبي التأثير المتبادل للمشعات في المصفوفة [3,4,5,11]. حيث تتلخص هذه الطريقة في استخدام طريقة المعادلات التكاملية على جزء المصفوفة، حيث يتم تحريض المشع المركزي للجزء وبواسطة طريقة المعادلات التكاملية يتم تحديد ممانعة دخله ومخططه الإشعاعي. ثم يتم تحليل المصفوفة باستخدام نظرية ضارب المخطط الإشعاعي، حيث يعتبر المخطط الإشعاعي لعنصر المصفوفة هو المخطط الإشعاعي لجزء المصفوفة الذي تم تحديده سابقاً.

تقترح الطريقة المقترحة التي تحتسب تأثير الحافة (التأثير الكهرطيسي للحواف على بارامترات الهوائي "حيود الحواف") تقسيم المصفوفة إلى جزأين متماثلين. ويتم بطريقة المعادلات التكاملية تحديد توزيع التيار في مشعات أحد الجزأين وأيضاً حقله على الجزء الثاني (السلبى). وعن طريق هذا الحقل الغريب بالنسبة للجزء الثاني وحقل تحريض الجزء الثاني، يتم تحديد توزيع التيار في مشعات الجزء الثاني. وعن طريق توزيع التيار في مشعات المصفوفة الذي تم تحديده في الخطوتين السابقتين يتم تحديد خصائص

وبارامترات المصفوفة. سوف يتم تحليل كلتا الطريقتين على مثال مصفوفة من المشعات الديبولية [6,7].

2- الدراسات المرجعية:

على مدى السنوات القليلة الماضية تم نشر الكثير من الدراسات والمقالات حول إمكانية التحليل العددي للهوائيات ذات العدد الكبير من المشعات، حيث تم في البحث [3] تقديم تصميم مقترح لهوائي سلبي ثنائي المخروط يتميز بالبساطة في التصميم ويتمتع بأفضل الخصائص الكهربائية. كما تم عرض دراسة تأثير البارامترات الهندسية المختلفة للهوائي على خواصه الكهربائية. تم إجراء عمليات محاكاة عددية لمخطط الإشعاع، وممانعة الدخل، ونسبة الموجة الدائمة (SWR) للهوائي المقترح كعنصر واحد وأيضاً عند استخدامه كمشع ضمن مجموعة حلقة من هذه المشعات. تم إجراء التحليل العددي باستخدام طريقة المعادلة التكاملية، حيث تم استخدام معادلة بوكلينجتون التكاملية. وعند حلها تم استخدام التتابع النبضية كتتابع أساس ووزن، تم استخدام برنامج المحاكاة MMANA. بينت النتائج أن الهوائي المقترح يعمل على مدى ترددي عريض للغاية (30-1450) MHz وفق معيار عدم تجاوز SWR القيمة 2 في خط تغذية ذو ممانعة موجية محددة. لوحظ أيضاً أن التأثير المتبادل بين الهوائيات ثنائية المخروط داخل مصفوفة الهوائي الحلقي يؤدي إلى تشويه مخطط إشعاع كل مشع في المستويين E و H وإلى تدهور في الموافقة. كما تم في البحث [4] تقديم نتائج المحاكاة العددية للهوائيات المصفوفة القوسية الشكل المكونة من مشعات ياغي. تمت دراسة المحددات الحاكمة للتأثير المتبادل بين المشعات على مخطط إشعاع وعلى توجيهية المصفوفة وعلى ممانعة دخل المشعات وذلك عند استخدام توزيعات مطالية وطورية مختلفة

لتحريض المشعات. تم في التحليل استخدام طريقة المعادلات المتكاملة. تم في البحث [5] اقتراح طريقة تحسين فعالة لإلغاء تأثيرات الحافة في مصفوفة الهوائي ذات النطاق العريض للغاية. يتم تحليل تأثير تأثيرات الحافة على نسبة الموجة الواقة للجهد (VSWR). ويهدف إلغاء تأثيرات الحافة داخل نطاق تشغيل النطاق فائق العرض، تم إنشاء مسألة تحسين غير محدبة لتأسيس مصفوفة ديبلوية، حيث يلبي ربح المصفوفة عند زوايا المسح والترددات المدروسة أقصى قدر من VSWR. يتم تحويل المشكلة غير المحدبة إلى مشكلة تحسين محدبة تكرارية عن طريق استخدام طريقة تكرارية، ويتم حل إثارات المطال والطور بكفاءة بواسطة خوارزمية التحسين المحدبة. من خلال المقارنة مع طريقة المطال الموحدة التقليدية وإثارة الطور التقدمي. تُظهر نتائج المحاكاة والقياس للنطاق فائق العرض أن الطريقة المقترحة يمكن أن تحسن ربح المصفوفة بشكل طفيف في معظم الترددات، في حين يتم إلغاء VSWRs إلى 3 على 10:1 عرض النطاق الترددي عند المسح حتى 45 درجة. كما تم في البحث [8] اقتراح علاقات جديدة للممانعة الذاتية باستخدام طريقة العزوم مع إجراء موافقة النقاط وتوابع الأساس الثابتة والخطية المقطعية في تكوينات مختلفة، مما يسمح بتوفير وقت الحوسبة لحل الهوائيات السلكية ذات الأشكال الهندسية المعقدة. العلاقات الجديدة لها تعقيد مع أخطاء نظرية محددة بشكل جيد. وتمت مقارنتها مع التكامل العددي التكراري. تم الحصول على دقة تتراوح بين 7 و 16 رقمًا اعتمادًا على تابع الأساس المختار والتجزئة المستخدمة. الى جانب ذلك، تم تقييم وقت الحوسبة المتضمن في حساب حدود الممانعة الذاتية ومقارنتها بالوقت الذي يتطلبه حل التكامل التريبيعي التكراري لنفس المشكلة. تتميز العلاقات بزمن تشغيل يتراوح بين 50 إلى 200 مرة أسرع من التكامل الرقمي التكراري. أما في البحث [9] فقد تم فحص مصفوفة الهوائيات ذات المقاييس الكبيرة لتطبيقات مختلفة بما في ذلك تقنية 5G. للحصول على معدل بيانات أفضل أو وصلة موثوقة، تم استخدام عدد كبير

من مصفوفات الهوائي لتوفير أرباح تعدد إرسال كبيرة بالإضافة إلى أرباح مصفوفة ذات اتجاهية عالية. تم في هذا البحث استخدام تقنية تنفيذ بسيطة ولكنها فعالة لاستخدام المصفوفات الجزئية لتحسين المصفوفات الموحدة كبيرة الحجم. يمكن من خلال تكرار المصفوفة الجزئية الصغيرة عدة مرات تصميم مصفوفات كبيرة. يؤدي هذا التأثير الناتج عن استخدام مصفوفة صغيرة إلى تبسيط تصميم مصفوفة أكبر مما يسمح للمصمم بالتركيز على المصفوفة الجزئية الأصغر قبل تجميع المصفوفات الأكبر. لذلك، من خلال دراسة المصفوفات الجزئية، يمكن توقع الأداء وخصائص الإشعاع للمصفوفات الكبيرة. تم تحليل معامل المصفوفة لمصفوفة جزئية مستوية مكونة من 2×2 (4 مشعات) باستخدام برنامج Matlab ومن ثم تم تشكيل مصفوفة كبيرة عن طريق وضع تكوينات مختلفة للمصفوفة الجزئية 2×2 في ترتيبات مستطيلة حتى الوصول إلى مصفوفة مستوية 8×8 وبعد ذلك تم التحقق من صحة النتائج من خلال نتائج محاكاة برنامج CST. وبهذه الطريقة يتم تحليل معاملات المصفوفة، والتوجيهات، وHPBWs، والفصوص الجانبية للمصفوفات الكبيرة المبنية وربطها بالمصفوفة الفرعية الصغيرة. كما تم في [10]، الحساب التحليلي لتوزيع التيار لمصفوفة الهوائي عند وجود اقتران متبادل عن طريق حل معادلة بوكلينجتون التكاملية. تم استخدام التوابع النبضية وغاليرغن للحل العددي لمعادلة بوكلينجتون التكاملية. يمكن هذا البحث، تحقيق توزيع التيار السطحي لمصفوفة هوائيات في وضع الاستقبال، مع أي بنية عشوائية وذات أعداد مختلفة من المشعات. حاول الباحثون في جميع الأعمال السابقة، حل معادلة بوكلينجتون المتكاملة لهوائي ديبولي واحد في وضع الإرسال. من الصعب إلى حد ما التعامل مع معادلة بوكلينجتون بسبب التقرد ووجود قمة حادة لقيمة صغيرة من نصف قطر السلك. من أجل حساب توزيع التيار السطحي، بالنسبة للأسلاك الرفيعة، يتم استخراج جزء التقرد من النواة بالتكامل المذكور. وبالتالي، تتحلل النواة إلى أجزاء مفردة وغير مفردة. يُفترض في هذه

الحالة وجود تأثير اقتران متبادل بين العناصر بين عناصر المصفوفة والاقتران الذاتي لكل عنصر. تم اختبار صحة المنهجية المقترحة من خلال نتائج المحاكاة العددية. تم تقييم دقة الطريقة المقترحة من خلال خوارزمية تصنيف الإشارات المتعددة (MUSIC) لسيناريوهات مختلفة لتقدير اتجاه الوصول (DOA).

3- هدف البحث:

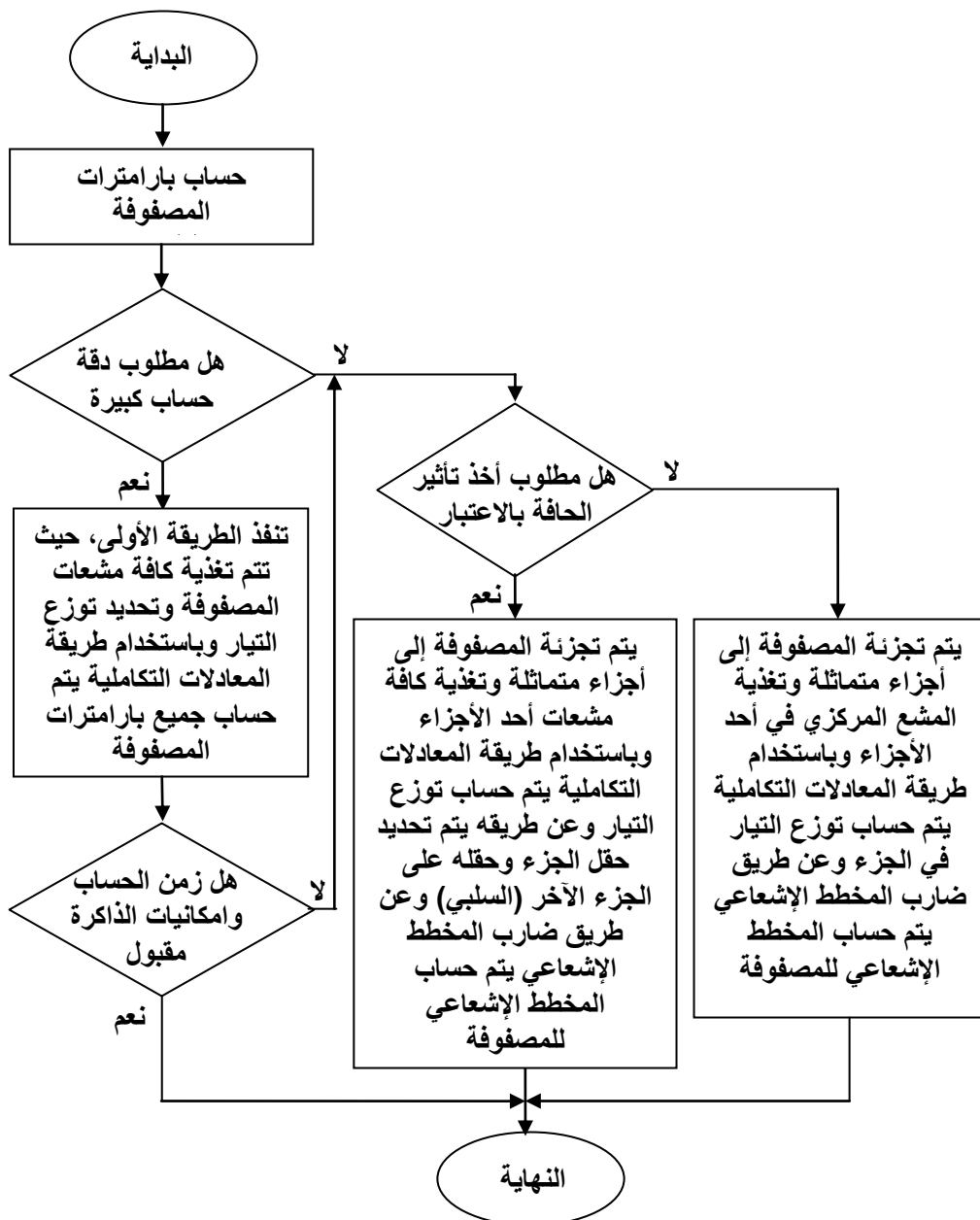
يهدف هذا البحث إلى اقتراح طريقة جديدة لتحليل الهوائيات المصفوفة ذات العدد الكبير من المشعات (ذات الطول الموجي الكبير)، والتي تتميز بزمن حساب صغير مقارنة بالطريقة التقليدية ودقة كبيرة في تحليل خصائص وبارامترات الهوائي مع احتساب أثر الحافة بين أجزاء المصفوفة.

4- مواد وطرق البحث

4-1 المحاكاة العددية

لتنفيذ المحاكاة العددية تم تصميم برنامج يتم فيه تحديد توزع التيار في نواقل الهوائي من خلال الحل العددي لمعادلة بوكلينكتون التكاملية للتيار في الناقل الرفيع [4, 3]. تم استخدام طريقة غاليرغن مع توابع ثابتة متعددة التعريف كتوابع أساس ووزن وذلك عند تحويل المعادلة التكاملية إلى جملة من المعادلات الجبرية الخطية [1,2,3,4,5].

تنفذ المحاكاة العددية حسب المخطط التدفقي المبين بالشكل التالي:



الشكل -1- المخطط التدفقي للمحاكاة العددية

بالنسبة للطريقة المقترحة فإن خطوات التحليل هي كالتالي:

- 1- يتم تجزئة الهوائي المصفوفي إلى جزئين متماثلين.
- 2- يتم تغذية جميع مشعات أحد الجزئين من خط التغذية ويتم تحديد توزيع التيار في عناصر هذا الجزء وحقله على الجزء الثاني (السلبي).
- 3- يتم تحديد توزيع التيار في عناصر الجزء الثاني عن طرق الحقل الغريب بالنسبة للجزء الثاني وحقل تحريض الجزء الثاني.
- 4- عن طريق توزيع التيار المحسوب في الخطوتين السابقتين يتم تحديد توزيع التيار في عناصر المصفوفة وتحديد خصائصها وبارامتراتهما.

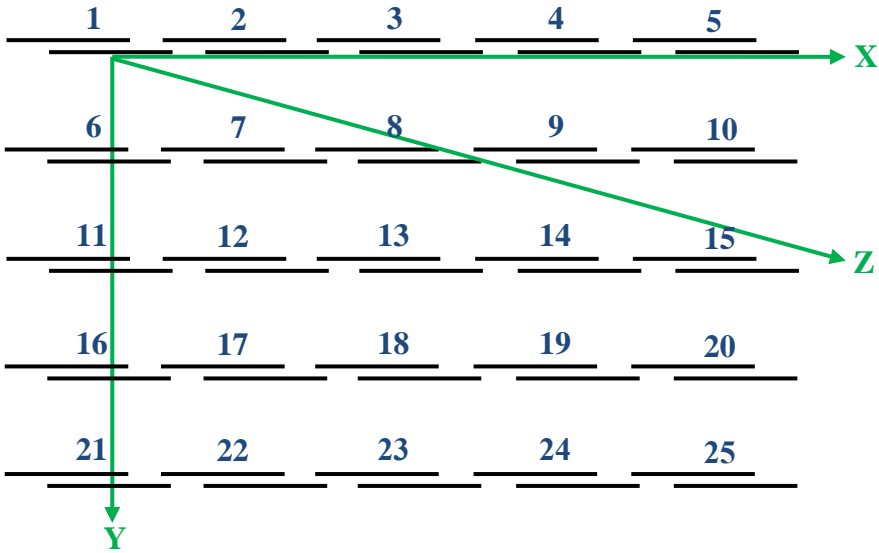
حيث كانت بارامترات المحاكاة كما هو مبين في الجدول التالي:

الجدول -1- بارامترات المحاكاة

0.236	طول الهوائي، L [m]
0.8	نصف قطر سلك الهوائي، d [mm]
600	التردد العامل، f [MHz]
5	عدد المشعات في المستوي X (N_x)
5	عدد المشعات في المستوي y (N_y)
0.7λ	المسافة بين المشعات في المستوي x (D_x)
0.7λ	المسافة بين المشعات في المستوي y (D_y)
$Z=75+0j$	ممانعة المشع المعزول (بالأوم)
20°	زاوية المسح θ (بالدرجات)

4-1-1 طريقة التجزئة

نستعرض مصفوفة من الهوائيات السلوكية. يبين الشكل (2) مصفوفة ذات بارامترات $N_x=N_y=5$ وأيضاً مبين على الشكل أرقام المشعات. الرموز في مصفوفة الهوائي هي كالتالي: N_x, N_y : عدد المشعات في المستويين E و H على الترتيب، D_x, D_y : المسافات بين المشعات المتجاورة في المستويين E و H على الترتيب.



الشكل -2- الهوائي المصفوفي

تم بواسطة معادلة بوكلينكتون التكاملية دراسة علاقة توزيع التيار في مشعات الهوائي والمركبتين الفعالة (R) والسلبية (X) لممانعة دخل المشع في المصفوفة ومخطط إشعاع

وربح المصفوفة بالنسبة لعدد المشعات N_x ، N_y في المصفوفة والمسافة بين المشعات Dx/λ ، Dy/λ .

تم تنفيذ التحليل بثلاثة طرق:

الطريقة الأولى (1): باستخدام طريقة المعادلات التكاملية على المصفوفة بأكملها.

الطريقة الثانية (2): باستخدام طريقة المعادلات التكاملية لجزء المصفوفة، الذي يتم تحريض المشع المركزي في الجزء من خط التغذية، أما بقية عناصر الجزء فيتم تحميلهم على أحمال موافقة.

الطريقة الثالثة (3): باستخدام طريقة المعادلات التكاملية لجزء المصفوفة، حيث يتم تحريض جميع المشعات في ذلك الجزء من خط التغذية.

في جميع الطرق الثلاثة أعلاه يتم بطريقة المعادلات التكاملية تحديد توزع التيار في مشعات المصفوفة (أو في جزء المصفوفة) وممانعة دخل المشع في المصفوفة. يتم تحديد المخطط الإشعاعي والربح في الطريقة الأولى عن طريق تيار المصفوفة بأكملها. أما في الطريقتين الثانية والثالثة، فيتم تحديد المخطط الإشعاعي والربح للمصفوفة بأكملها عن طريق حقل الجزء باستخدام نظرية ضارب المخطط الإشعاعي.

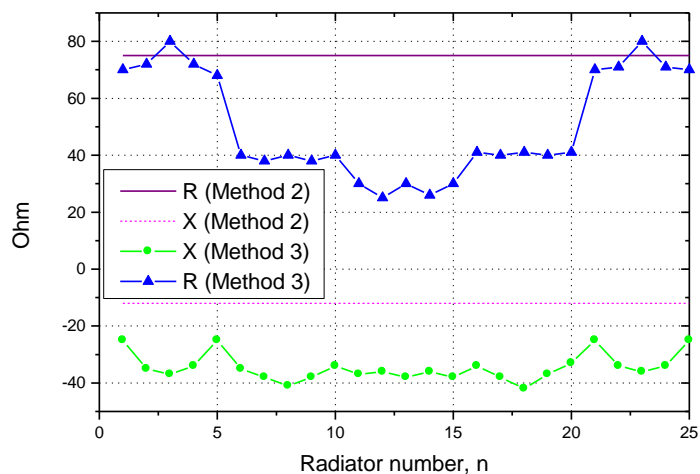
2-1-4 نتائج التحليل العددي

تم تنفيذ التحليل عند التردد المركزي f_0 ، عندما يكون الجزء السلبي من ممانعة الدخل للمشع المعزول يساوي الصفر ($X = 0$). وكمشع تم دراسة هوائي يودا-ياغي مؤلف من عاكس خطي و N_d موجه. تالياً سوف يتم تقديم نتائج محاكاة المصفوفة عندما $N_d=0$.

1-2-1-4 ممانعة دخل المشع في المصفوفة

يبين الشكل (3) علاقة المركبتين R و X بالنسبة لرقم المشع ضمن المصفوفة ذات البارامترات التالية: $N_x=N_y=5$ ، و $D_x/\lambda=D_y/\lambda=0.7$ وعند تحريض موحد بالطور وبالمطال لجميع المشعات. بالنسبة للمشع المعزول كانت $X=0$ ، $R=75 \Omega$.

تم على الشكل (3) تبيان قيم المركبتين R و X في نفس المصفوفة للحالة عندما يتم تحريض المشع المركزي (المشع رقم 13 في الشكل 2)، ويتم تحميل باقي المشعات بأحمال موافقة، وهذا مبين على الشكل (3) بخطوط مستقيمة (مستمرة ومنقطعة). توضح الأشكال تأثير أثر الحافة في مصفوفة الهوائي. إذا تم استخدام الطريقة الثانية فإن جميع مشعات المصفوفة، وبغض النظر عن رقمهم، سيكون لهم نفس ممانعة الدخل، ولن يتم حساب تأثير الحافة. إذا تم استخدام الطريقة الثالثة، فسيتم احتساب أثر الحافة عند حدود الأجزاء المتجاورة.

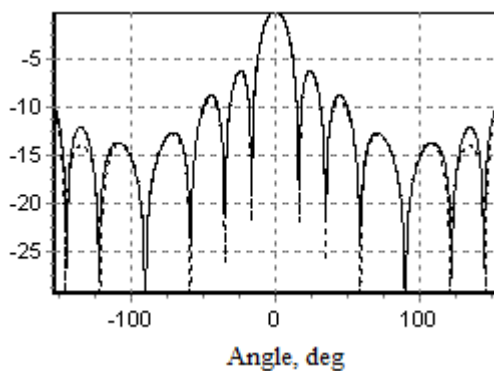


الشكل -3- ممانعة دخل مشعات المصفوفة

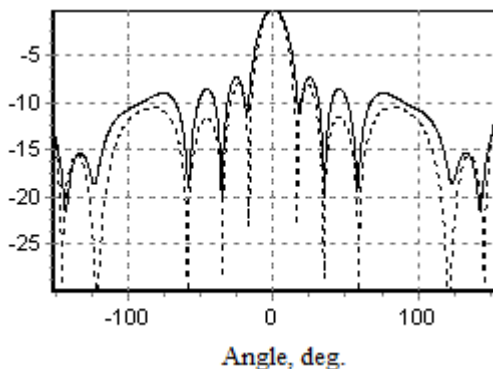
2-2-1-4 المخطط الإشعاعي والرياح

يوضح الشكل (4) المخطط الإشعاعي بالديسيبل في المستويين E و H لمصفوفة ذات نفس البارامترات السابقة، والمحسوب بالطريقتين الأولى والثانية. حيث الخط المتصل هو للطريقة الأولى والخط المنقطع هو للطريقة الثانية. عند الحساب بالطريقة الثانية، كان جزء المصفوفة هو المصفوفة بأكملها، حيث تم تحريض المشع المركزي وتحميل بقية المشعات بأحمال موافقة.

تم ملاحظة أن الاختلاف في الطريقتين يشاهد فقط في منطقة الوريقات الثانوية ويكون أكبر في المستوي H، وأقل في المستوي E. الريح لكلا الطريقتين، والمحسوب بالمخطط الإشعاعي هو نفسه.



(a)



(b)

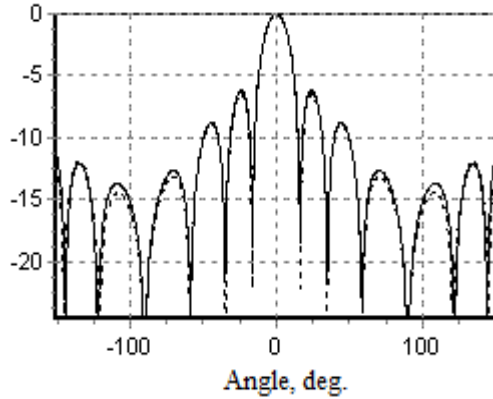
الشكل -4- المخططات الإشعاعية المحسوبة بالطريقتين الأولى والثانية.

(a) في المستوي E، (b) في المستوي H

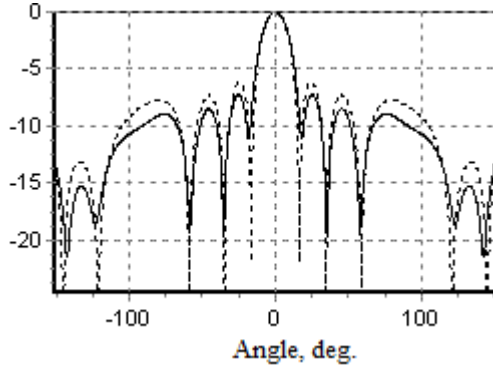
يبين الشكل (5) المخططات الإشعاعية في المستوي E، الذي تم حسابهم بالطريقتين الأولى والثالثة، حيث كان جزء المصفوفة عبارة عن مصفوفة ذات البارامترات: $N_x=1$ ، $N_y=5$ (عمود واحد).

الاختلاف بين الشكلين 4(a) و (5) ضئيل. لا يوجد فرق في المستوي H، نظرًا لأن الجزء والمصفوفة بأكملها لهما نفس عدد المشعات في المستوي H. يوضح الشكل (6) المخططات الإشعاعية في المستوي H، التي تم حسابهم بالطريقتين الأولى والثالثة، حيث كان جزء المصفوفة هو مصفوفة ذات البارامترات: $N_x=5$ و $N_y=1$ (سطر واحد). في هذه الحالة لا توجد اختلافات في المستوي E، ويمكن استخلاص الاستنتاج حول الاختلافات في المستوي H من المقارنة بين الشكل 4(b) والشكل (6).

كان زمن حل المسألة باستخدام الطريقة الأولى (باستخدام طريقة المعادلات التكاملية للمصفوفة بأكملها) 13 دقيقة، أما زمن الحل باستخدام الطريقة الثالثة فكان 12 ثانية.

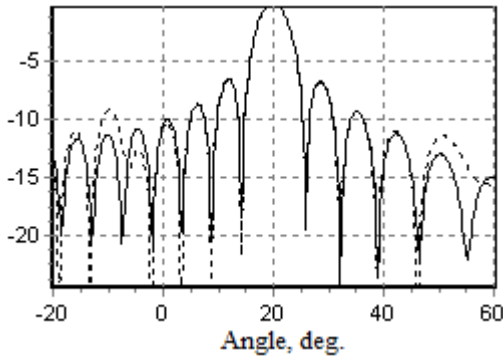


الشكل -5- المخططات الإشعاعية في المستوي E المحسوبة بالطريقتين الأولى والثالثة

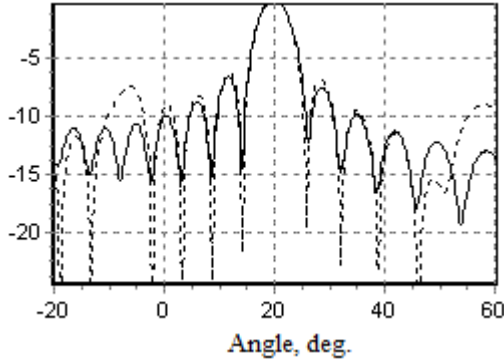


الشكل -6- المخططات الإشعاعية في المستوي H المحسوبة بالطريقتين الأولى والثالثة

تم دراسة الاختلاف بين الطريقتين الأولى والثالثة عند حساب المخططات الإشعاعية في مصفوفة المسح. يبين الشكل (7) المخططات الإشعاعية المحسوبة بالطريقتين الأولى والثالثة لمصفوفة خطية ذات البارامترات: $N_x=15$ ، $N_y=1$ ، حيث كانت زاوية المسح تساوي 20 درجة. وعلى الشكل (8) المخططات الإشعاعية لمصفوفة خطية ذات البارامترات: $N_x=1$ ، $N_y=15$. كانت المسافة الموجية بين المشعات المتجاورة هي 0.7λ . عند الحساب باستخدام الطريقة الثالثة، كان جزء المصفوفة عبارة عن مصفوفة خطية بالبارامترات: $N_x=3$ ، $N_y=1$. زمن حل المسألة باستخدام الطريقة الثالثة أقل بـ 125 مرة من الطريقة الأولى.



الشكل -7- المخططات الإشعاعية في المستوي E



الشكل 8- المخططات الإشعاعية في المستوى H

تم تحديد الريح (G) للمصفوفة بالطريقة الأولى بطريقة المعادلات التكاملية، أي من خلال كثافة تدفق الاستطاعة في الاتجاه الأعظمي للمخطط الإشعاعي وإجمالي الاستطاعة الإشعاعية. أما بالنسبة للطريقة الثالثة، فقد تم تحديد الريح بواسطة العلاقة التالية:

$$G = G_1 \cdot N_x \cdot N_y$$

حيث: G_1 - ربح جزء المصفوفة المحسوب بطريقة المعادلات التكاملية.

تم الحصول على القيم التالية للريح للمصفوفة الخطية، حيث تتوضع المشعات في المستوى H ($N_y=15$ ، $N_x=1$): وهو بالنسبة للطريقة الأولى $G=18.86$ dB، وللطريقة الثالثة $G=18.65$ dB. تم الحصول على نتائج متشابهة في مصفوفة خطية مع مشعات تتوضع في المستوى E ($N_y=1$ ، $N_x=15$).

4- النتائج ومناقشتها:

تم اقتراح طريقة للنمذجة العددية للهوائيات المصفوفة ذات المشعات السلكية الكثيرة العدد، والتي تسمح باحتساب أثر الحافة على بارامترات المصفوفة (الطريقة الثالثة). تعتمد الطريقة على تقسيم المصفوفة إلى أجزاء متماثلة مع تطبيق طريقة المعادلات التكاملية على جزء واحد ومن ثم تطبيق نظرية ضارب المخطط الإشعاعي على أجزاء المصفوفة. تقلل الطريقة المقترحة بشكل كبير من الزمن اللازم لحل مسألة النمذجة العددية للهوائي المصفوفي وتسمح بإمكانية تطبيق طريقة المعادلات التكاملية لتحليل خصائص وبارامترات الهوائيات المصفوفة ذات العدد الكبير من المشعات. تعطي الطريقة المقترحة نتائج مماثلة لحساب المخطط الإشعاعي والريح بالمقارنة مع الطريقة المعروفة التي تحتسب التأثير المتبادل بين كل مشع مع المشعات الموجودة بالقرب منه والمحتملة بأحمال موافقة، إضافة إلى أنها تتيح وبشكل تقريبي احتساب أثر الحافة.

بينت المحاكاة العددية لمصفوفة الهوائيات الديبولية أن أثر الحافة ليس له أي تأثير يذكر على بارامترات المخطط الإشعاعي والريح، ولكن تأثيره كبير على ممانعة دخل المشع في المصفوفة. عندما تتم إثارة جميع مشعات المصفوفة، فإن ممانعة الدخل تختلف بشكل كبير عن ممانعة دخل المشع الفعال المحاط بمشعات سلبية. تم وكمثال تنفيذ التحليل العددي للطريقة المقترحة على هوائي مصفوفي مؤلف من مشعات ياغي.

يبين الجدول التالي مقارنة لنتائج المحاكاة بين الطريقة المقترحة والطرق السابقة:

الجدول -2- مقارنة لنتائج المحاكاة بين الطريقة المقترحة والطرق السابقة

دقة حساب ممانعة الدخل	زمن الحساب	دقة الحساب	تأثير الحافة	طريقة تحديد بارامترات المصفوفة	التأثير المتبادل بين المشعات	تغذية المشعات	تجزئة المصفوفة	
دقيق	كبير جداً (أحياناً غير ممكناً)	ممتازة	لا يوجد	طريقة المعادلات التكاملية فقط	يؤخذ	تغذى جميعها	لا توجد	[3,4] الطريقة الأولى
غير دقيق	صغير	مقبولة	لا يؤخذ	طريقة المعادلات التكاملية وضارب المصفوفة	يؤخذ بشكل تقريبي	يغذى فقط المشع المركزي في أحد الأجزاء	توجد	[9] الطريقة الثانية
دقيق	صغير	جيدة	يؤخذ	طريقة المعادلات التكاملية ونظرية ضارب المخطط الإشعاعي	يؤخذ بشكل معقول	تغذى جميع مشعات الجزء	توجد	الطريقة المقترحة (الطريقة الثالثة)

4- المقترحات:

وبسبب أن الطريقة المقترحة تعطي نتائج جيدة مقارنة بالطريقة التقليدية الدقيقة (الطريقة الأولى) وزمن حساب صغير جداً فإنني أقترح استخدامها عند التحليل العددي لمصفوفة الهوائيات السلكية ذات العدد الكبير من المشعات عند تعذر استخدام طريقة التحليل التقليدية.

5- المراجع:

- [1] W, Chew, 2016 **Numerical Modeling in Antenna Engineering**. Handbook of Antenna Technologies. Springer, Singapore. pp 195.
- [2] S. Yang, S, J. Sykulski, Y. Qingxin and X. Cui , 2023, **Guest editorial: Progress on computational techniques for electromagnetic fields and applications**, COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 42 No. 1, pp. 1-1. <https://doi.org/10.1108/COMPEL-01-2023-604>
- [3] A. Alrifai, 2023, **Study of a Broadband Toroidal Array Antenna Composed of Bi-Conical Radiators for Radio Direction Finding**, International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP), Vol. 13, No. 4, pp.222–228.
- [4] A. Alrifai, 2023, **Study the mutual effect of radiators on properties arc array antennas with Uda-Uagi radiators**, Damascus University Journal for the Engineering Sciences, It was accepted on 4/4/2023 and is under publication, pp.15.

- [5] F. Yang, B. Wang, Y. Chen, S. Qu and S. Yang, 2022 **An Effective Optimization Methods for the Suppression of Edge Effects in Ultrawideband Tightly Coupled Antenna Arrays**, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 12, pp. 11639–11652.
- [6] C, A, Balanis, 2016 **Antenna theory: Analysis and Design**, 4th edition, John Wiley and Sons, pp. 1104.
- [7] J. Mailloux, 2022 **Phased Array Antenna Handbook**, Second Edition, , 2nd ed, 2005, ARTECH HOUSE, INC., P. 506.
- [8] C. Ivan, A. Fajardo, G. Perilla, 2021 **Closed-Form Expressions for Numerical Evaluation of Self-Impedance Terms Involved on Wire Antenna Analysis by the Method of Moments**, *Electronics 10*(11), 1316.
- [9] N.Mukit, M. Habaebi, 2020, **Designing large-scale antenna array using sub-array**, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 8, No. 3, pp. 906~915.
- [10] N. PARHIZGAR 2019, **Calculating surface current distribution in antenna array in the presence of mutual**

coupling by analytical solving of Pocklington's integral equation, Arch. Elect. Eng, VOL. 67(1), pp. 65–79.

[11] H. Fei, S. Yufa. 2019 **Efficient Solution of Electromagnetic Scattering From Dielectric Objects via Characteristic Basis Function Method Based on Large-Size Blocks With Multilevel Subdivision**. IEEE Access. PP. 1–1.

[12] Haythem, Abdallah, Esmat. 2012 **Method of Moments Analysis for Antenna Arrays with Optimum Memory and Time Consumption**.