

تصميم مصفوفة هوائيات قابلة لإعادة تشكيل التردد لأنظمة اتصالات الجيل الخامس

م. لميس حسن *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٣/٣/١٣ . قُبل للنشر في ٢٠٢٣/٧/١٣)

□ ملخص □

الهدف من هذا العمل هو تصميم مصفوفة هوائيات قابلة لإعادة تشكيل التردد مناسبة لتطبيقات الموجات المليمترية، على وجه الخصوص، الرادار، وشبكة الجيل الخامس اللاسلكية، تتميز بأنها مضغوطة، وصغيرة الحجم، وسهلة التصنيع، مما يجعلها متوافقة مع التكامل في الدارات المصغرة. مصفوفة الهوائيات المقترحة تم تصميمها على ركيزة من النوع Rogers RT-5880 ذات ثابت العزل $\epsilon_r=2.2$ وبسماكة $hs=0.25\text{mm}$ والمصفوفة هي عبارة عن أربعة هوائيات رقعة شرائحية مصنوعة من النحاس، تم في هذا البحث إضافة 4 صمامات ثنائية PIN إليها بين هوائيات المصفوفة والعناصر الطفيلية وفي المرحلة التالية للتصميم تم إنشاء فتحات في عناصر المصفوفة. تظهر نتائج المحاكاة، أنه عند تشغيل الثنائيات يتغير تردد الرنين لمصفوفة الهوائيات من 28GHz إلى 30.2GHz مع عرض نطاق ترددي يساوي 1.5GHz ورياح يبلغ 10.5 dB، وبعد إنشاء الفتحات يتحول إلى 32GHz مع زيادة في قيمة عرض النطاق الترددي ليتجاوز 2.4GHz وتحسن في قيمة الرياح لتساوي 11.6 dB، مما يحقق خصائص الإشعاع القابلة لإعادة تشكيل التردد في نطاقات التردد المتعددة لتطبيقات الجيل الخامس كما يجعله مناسب للتطبيقات المختلفة في نطاق الموجات المليمترية، مع الحفاظ على متطلبات العملاء.

الكلمات المفتاحية: إعادة تشكيل التردد، مصفوفة هوائيات، اتصالات الجيل الخامس، عرض النطاق الترددي، معامل الانعكاس، الرياح.

Designing of Frequency Reconfigurable Antenna Array for 5G Communication Systems

Eng. Lames Hasan *

(Received 13/3/2023 . Accepted 13/7/2023)

□ ABSTRACT

This work aims to design a frequency reconfigurable antenna array suitable for millimeter wave applications, in particular, radar, and 5G wireless network, characterized by being compact, small in size, and easy to manufacture, making it compatible with microcircuit integration. The proposed array was designed on a Rogers RT-5880 substrate with a dielectric constant of $\epsilon_r = 2.2$ and a thickness of $h_s = 0.25$ mm. The array is four microstrip patch antennas made of copper. We added 4 PIN diodes to it between the array antennas and the parasitic elements. In the next stage for the design slots were created in the array elements. The simulation results show that when the diodes are turned on, the resonant frequency of the antenna array changes from 28GHz to 30.2GHz with BW = 1.5GHz and gain value is 10.5 dB and after creating the slots, it turns to 32GHz with BW = 2.4GHz and gain value is 11.6 dB, which achieves frequency reconfigurable radiation characteristics in multiple frequency bands for 5G applications and also makes it suitable for various applications in the millimeter wave range, with Maintain customer requirements.

key words: frequency reconfigurable, antenna array, 5G communications, bandwidth, S11, Gain.

* Engineer _ Faculty of Information and Communication Technology _ University of Tartous.

١ - المقدمة:

دفعت التطورات المتسارعة في السنوات الأخيرة إلى تقدم الأجهزة متعددة المعايير ومتعددة التطبيقات، مع الأخذ في الاعتبار، أن الهوائي الذي يتمتع بسمعة المرونة لمختلف التطبيقات والمبادئ المعقولة أمر حيوي. ونظرًا للصفات القوية والقدرة على تغيير الخصائص، على سبيل المثال، الاستقطاب ومخطط الإشعاع والتردد، جنبًا إلى جنب مع متطلبات الإطار الأساسية، فقد حظيت الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل مؤخرًا بالكثير من الاهتمام. علاوة على ذلك، فإن المتطلبات المتزايدة للأجهزة المدمجة والمطابقة والأدوات القابلة للارتداء قد جذبت انتباه الباحثين نحو هوائيات مرنة ومنخفضة وخفيفة الوزن [1-2]. وبالتالي، بالإضافة إلى إعادة التشكيل، تعد المرونة أيضًا خاصية مهمة تطلبها تطبيقات العصر الحديث. يوجد استخدام الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل على نطاق واسع في الأنظمة متعددة النطاقات بسبب إعادة هيكلة النطاق الديناميكي [3]. تغطي الهوائيات التقليدية نطاقًا واحدًا فقط، وهذا يعني حقًا أنه مع التوسع في إدارات المراسلات البعيدة، ستكون هناك حاجة إلى مزيد من الهوائيات، يؤدي هذا إلى استخدام أداة ضخمة وأجهزة معقدة ونقل بيانات مقيد. وهنا يأتي دور إعادة التشكيل. تتوقع الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل تقليل كمية الهوائيات في جهاز معين عن طريق تنسيق ترددات تلك الهوائيات في هوائي منفرد [4-5].

تقنية الهوائي القابل لإعادة التشكيل هو القدرة على التغيير التدريجي لبارامترات الهوائي للتكيف مع التقدم في متطلبات النظام. تتضمن بارامترات الهوائيات التي يمكن إعادة تشكيلها؛ التردد والاستقطاب ونمط الإشعاع [6].

(a) هوائيات قابلة لإعادة تشكيل التردد: تستخدم الهوائيات القابلة لإعادة تشكيل التردد مفاتيح التردد اللاسلكي للتبديل بين الترددات المختلفة حسب الطلب.

(b) الهوائيات القابلة لإعادة تشكيل نمط الإشعاع: يمكن للهوائيات التي يمكن إعادة تشكيلها بنمط الإشعاع تعديل مخطط إشعاعها مع الحفاظ على تردد تشغيل ثابت.

(c) الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل الاستقطاب: تتمتع هذه الهوائيات بالقدرة على تغيير اتجاه الاستقطاب مع الحفاظ على مخطط إشعاع وتردد ثابت.

(d) إعادة التكوين الهجين: يمكن للهوائيات الهجينة المعاد تشكيلها تعديل أكثر من خاصية واحدة في وقت واحد، على سبيل المثال نمط الإشعاع والاستقطاب لتحقيق تكوين مطلوب معين.

تقنيات إعادة التشكيل: Reconfigurable Techniques

مصمم الهوائي مسؤول عن اختيار تقنيات إعادة التكوين (وتسمى أيضًا تقنيات التحويل) بناءً على قيود التصميم [7].

تقنيات إعادة التكوين هي الوسائل التي يتم من خلالها تحقيق إعادة التشكيل في الهوائي.

(١) تقنية إعادة التهيئة الكهربائية: تُستخدم مفاتيح تبديل الترددات اللاسلكية لتغيير توزيع التيار السطحي في رقعة الهوائي والتي بدورها تغير خصائصها الأساسية مثل التردد والاستقطاب ومخطط الإشعاع.

تتضمن هذه المفاتيح؛ الثنائيات varactor، الثنائيات PIN و MEM-RF

(٢) تقنية إعادة التكوين البصري تُستخدم المفاتيح الموصلة للصور لإعادة التكوين البصري. عندما يتلامس ضوء الليزر مع سطح مادة شبه موصلة (السيليكون، زرنيخي الغايوم)، يتشكل مفتاح ضوئي. تتميز بسرعة تحويل عالية جدًا، وهي ميزة مرغوبة للهوائي القابل لإعادة التكوين.

(٣) تقنية إعادة التشكيل الميكانيكي ومع ذلك، تحد هذه الطريقة من مرونة الهوائي بالمقارنة مع طرق التحويل الأخرى.

(٤) تقنية إعادة تشكيل تغيير المواد يمكن استخدام المواد الذكية القابلة للضبط مثل الفرية والبلورات السائلة لتحقيق إعادة التكوين في الهوائيات لتطبيقات مختلفة.

وبالتالي هناك تحد كبير لاستخدام الطيف بكفاءة؛ في هذه الحالة، تعتبر الهوائيات المتقدمة التي تستجيب لاحتياجات الاتصالات العالمية مطلباً طبيعياً. هذا هو السبب في أن إعادة تشكيل الهوائي جاءت كحل لاستخدام هوائي لكل تردد تشغيل. الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل هي واحدة من التقنيات الحالية التي أصبحت مرغوبة للغاية في أنظمة الاتصالات اللاسلكية لتعدد استخداماتها وقدرتها. من أجل تغيير تردد الهوائيات والاستقطاب ونمط الإشعاع، نستخدم آلية داخلية تم دمجها داخل هيكل الهوائي، وهذه العناصر المتكاملة هي مفاتيح الصمام الثنائي PIN، أو المتغيرات، أو النظام الكهروميكانيكي الصغير (MEMS) أو المواد القابلة للضبط [8-10]. تُستخدم هذه التقنية بشكل أساسي لتحقيق أكبر قدر ممكن من أداء الهوائي القوي، في تغيير التطبيقات أو لتلبية التشغيل المتغير مثل الكسب، وخسارة العود، و VSWR [11].

ونظراً لأهمية الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل، فقد درس العديد من الباحثين هذا الموضوع باستخدام طرق مختلفة، ففي [12] قارن الباحثون تصميمات مختلفة للهوائيات القابلة لإعادة التشكيل للجيل الخامس، حيث تعمل هذه الهوائيات عند تردد يبلغ 60 GHz، وقد تم استخدام أحجام مختلفة للمستويات الأرضية والعناصر الإشعاعية لتصميمات الهوائيات المقترحة، كما تم استخدام الركييزة Rogers-RT5880 بسماكات مختلفة. أما في [13] فقد وصف الباحثون هوائياً موجهاً مستويًا على شكل حرف T قابل لإعادة التشكيل لشبكات الجيل الخامس، يتنوع فيه تردد الرنين للحصول على عرض النطاق الترددي لخسارة العود 10 dB في نطاق التردد من 23 GHz إلى 29 GHz من خلال دمج مقاومتين متغيرتين. وفي [14] تقترح الدراسة تصميماً مضغوطاً لمصفوفة هوائيات قابلة لإعادة تشكيل التردد، حيث يتم وضع ثمانية هوائيات ذات فتحات مدمجة على الجزء العلوي من لوحة الدارات المطبوعة للهاتف المحمول (PCB) لتشكيل مصفوفة قابلة للتوجيه باستخدام الحزمة، ويمكن إعادة تكوين استجابة التردد لمصفوفة الهوائيات للعمل إما عند 28 GHz أو 38 GHz، ويمكن تحقيق وظيفة إعادة التشكيل للتصميم المقترح من خلال تنفيذ وتحيز زوج من الثنائيات عبر كل عنصر من عناصر المصفوفة ذي الفتحة على شكل حرف T، وتم استخدام Rogers RT5880 كركيزة (طبقة الأساس) للهوائي المصفوفي.

٢ - هدف البحث:

يهدف البحث إلى تصميم ومحاكاة مصفوفة هوائيات قابلة لإعادة تشكيل التردد تعمل على تردد موجات المليمتر لأنظمة اتصالات 5G.

٣- مواد وطرق البحث:

يبدأ هذا البحث بتصميم مصفوفة هوائيات مكونة من أربعة عناصر تم الاعتماد عليها في تصميم مصفوفة هوائيات قابلة لإعادة تشكيل التردد وتحقق خصائص الجيل الخامس من الاتصالات، واعتمدنا في عملية المحاكاة على برنامج CST Microwave Studio (CST MWS) وهو برنامج متخصص بتصميم وتحليل الأنظمة والمكونات الكهرومغناطيسية عالية التردد بشكل ثلاثي الأبعاد، حيث يسمح بالتحليل السريع والدقيق للأجهزة عالية التردد مثل المرشحات والهوائيات والهياكل أحادية ومتعددة الطبقات، ويقدم برنامج CST MWS أداء لا مثيل له، مما يجعله الخيار الأول في أقسام البحث والتطوير الرائدة في مجال التكنولوجيا، فهو برنامج سهل الاستخدام ويوفر للمستخدم نظرة ثاقبة لسلوك تصاميم المكونات الكهرومغناطيسية عالية التردد.

٤- تصميم هوائي الرقعة الشرائحي:

يحتاج تصميم هوائي الرقعة الشرائحي إلى اختيار مادة طبقة الأساس بسماكة h ، وثابت عازلية كهربائية ϵ_r ، إضافة إلى تحديد تردد الرنين (المركزي) f_r بوحدة HZ ثم تحديد أبعاد الهوائي أي عرض الهوائي w ، وطول الهوائي L ، كل ما سبق يمكن حسابه باستخدام المعادلات وفق الخطوات التالية:

الخطوة 1: من أجل هوائي شرائحي فعال، نحسب العرض w من المعادلة: [8]

$$W = \frac{c}{2 f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

الخطوة 2: تحديد ثابت العازلية الكهربائية الفعال ϵ_{eff} من المعادلة: [8]

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12\frac{h}{W}}} \quad (2)$$

حيث: ϵ_{eff} هي ثابت العازلية الكهربائية الفعال، ϵ_r هي ثابت العازلية لطبقة الأساس، h هي ارتفاع طبقة الأساس العازلة، w هي عرض الرقعة.

الخطوة 3: تحديد الطول التزايدى (أو بما يسمى الطول الكهربائي) من المعادلة: [8]

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (3)$$

الخطوة 4: تحديد الطول الحقيقي L بالمعادلة: [8]

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (4)$$

حيث L_{eff} هو الطول الفعال للهوائي ويمثل ارتفاع مركز الهوائي فوق المستوي الأرضي ويُعطى بالعلاقة: [8]

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (5)$$

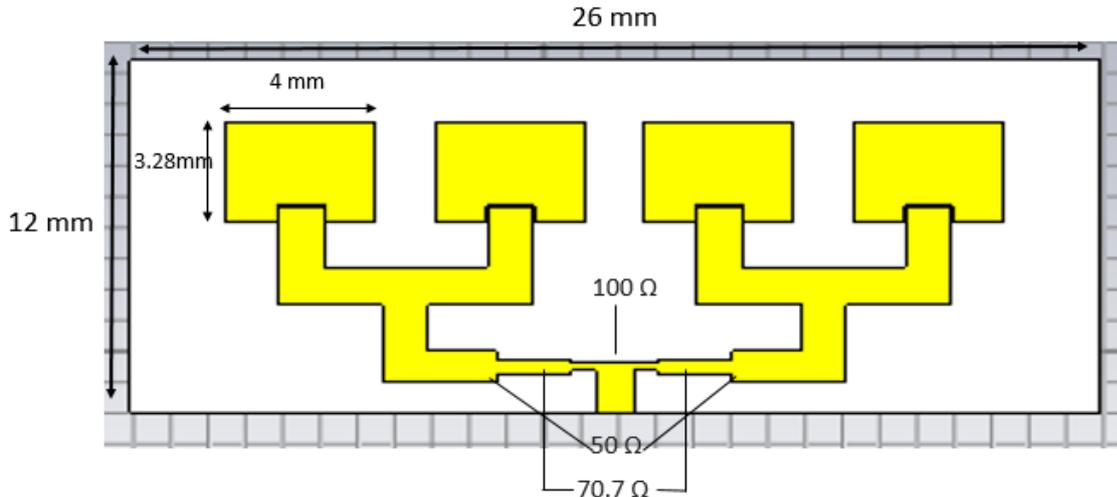
٥- تصميم مصفوفة هوائيات شرائحية قابلة لإعادة تشكيل التردد:

تم تصميم مصفوفة الهوائيات المطلوبة وفق ثلاث مراحل او حالات، ففي الحالة الأولى تم تصميم مصفوفة الهوائيات الأساسية التي تم الاعتماد عليها للحصول على مصفوفة الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل، أما في الحالة الثانية فتم إضافة عناصر طفيلية قمنا بربطها مع المصفوفة عن طريق صمامات ثنائية PIN، وفي الحالة الثالثة قمنا بإحداث فتحات slots في مصفوفة الهوائيات. وسيتم شرح المراحل الثلاث وفق الآتي:

1-5- تصميم مصفوفة هوائيات خطية مكونة من أربعة عناصر:

تم استخدام معدن النحاس عالي التوصيل في تصميم مصفوفة الهوائيات الشرائحية وشبكة التغذية والمستوي الأرضي، وقد تم تصميم الهوائي بطول $L_p=3.28\text{mm}$ وعرض $W_p=4\text{mm}$ على ركيزة من النوع Rogers RT-5880 ذات ثابت العزل $\epsilon_r=2.2$ وخسارة الظل $\tan \delta=0.0009$ ويبلغ سمك الركيزة $h_s=0.25\text{mm}$ وسمك النحاس $h_t=0.035\text{mm}$ حيث المسافة الفاصلة بين جميع العناصر هي $\lambda/2$ ، وقد تم تصميم التغذية المتوازية لعناصر هوائيات الرقعة الشرائحية بأكملها، باستخدام الشبكة T لتحقيق مطابقة الممانعة (impedance matching)، والشبكة T هي التكوين الأساسي لتصميم خط التغذية، وقد تم تصميم خطوط نقل بممانعات 100Ω ، 70.7Ω ، 50Ω وفقاً للمتطلبات.

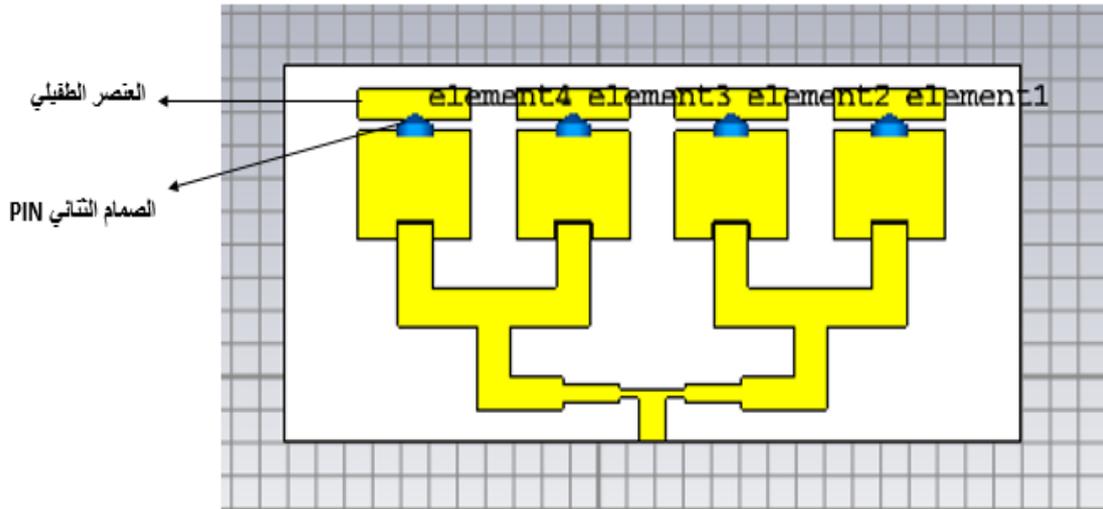
أما بالنسبة لطريقة التغذية فقد تم استخدام تقنية التغذية بالفجوة المقترنة (Gap Coupled Feed) وتشابه هذه التقنية تقنية التغذية الداخلية (inset feed) ولكن المغذي هنا لا يلمس الهوائي أي أن التغذية غير مباشرة تتم باستخدام فجوة صغيرة جداً حيث أن الفجوة المحفورة تفصل منبع التغذية (منبع التحريض) عن الهوائي الشرائحي [15]، كما يوضح الشكل (1)، لذلك تنتقل الطاقة من المغذي إلى الهوائي بشكل غير مباشر عن طريق الاقتران، وتتطلب هذه الطريقة عرضاً ضيقاً للفجوة من أجل الاقتران الفعال للطاقة [16]. ميزة التغذية بالفجوة المقترنة (Gap Coupled feed) أنها توفر عرض نطاق ترددي جيد. والشكل (1) يبين طريقة تصميم مصفوفة الهوائيات الخطية ذات العناصر الأربعة.



الشكل (1): مصفوفة هوائيات خطية مكونة من أربعة عناصر

5-2- إضافة عناصر طفيلية إلى مصفوفة الهوائيات:

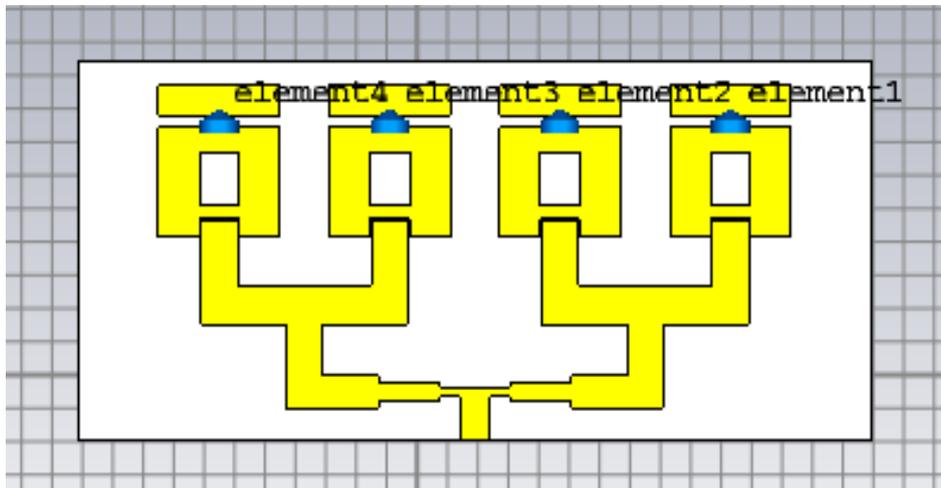
إن إضافة العناصر الطفيلية وربطها بهوائيات الرقعة الشرائحية باستخدام ثنائيات PIN يمكن ان يغير تردد الرنين. وفي تصميم مصفوفة الهوائيات القابلة لإعادة تشكيل التردد، تم دمج أربعة صمامات ثنائية PIN في أربعة هوائيات رقعية شرائحية كما يبين الشكل (2)، وعند تشغيل هذه الصمامات الثنائية يمكن ملاحظة أن تردد الرنين لمصفوفة الهوائيات قد انتقل إلى 30.2GHz وعرض النطاق الترددي هو 1.5GHz. والعنصر الطفيلي هو عنصر يعتمد على تغذية الآخرين، وليس لديه تغذية خاصة به. ويستخدم مثل هذا النوع من العناصر في زيادة الإشعاع بشكل غير مباشر حيث أنه يزيد من قوة الإشارة عن طريق زيادة اتجاهية الحزمة.



الشكل (2): مصفوفة الهوائيات الخطية بعد إضافة العناصر الطفيلية و PINs

5-3- إحداث الفتحات في مصفوفة الهوائيات:

لتحسين عرض النطاق الترددي وزيادة قيمة الريح ولتحويل التردد إلى تردد أعلى من 30GHz، يتم إنشاء فتحة في منتصف كل عنصر من عناصر مصفوفة الهوائيات كما يوضح الشكل (3) مما يؤدي إلى تحول تردد الرنين إلى 32GHz.



الشكل (3): مصفوفة الهوائيات الخطية بعد إحداث الفتحات فيها

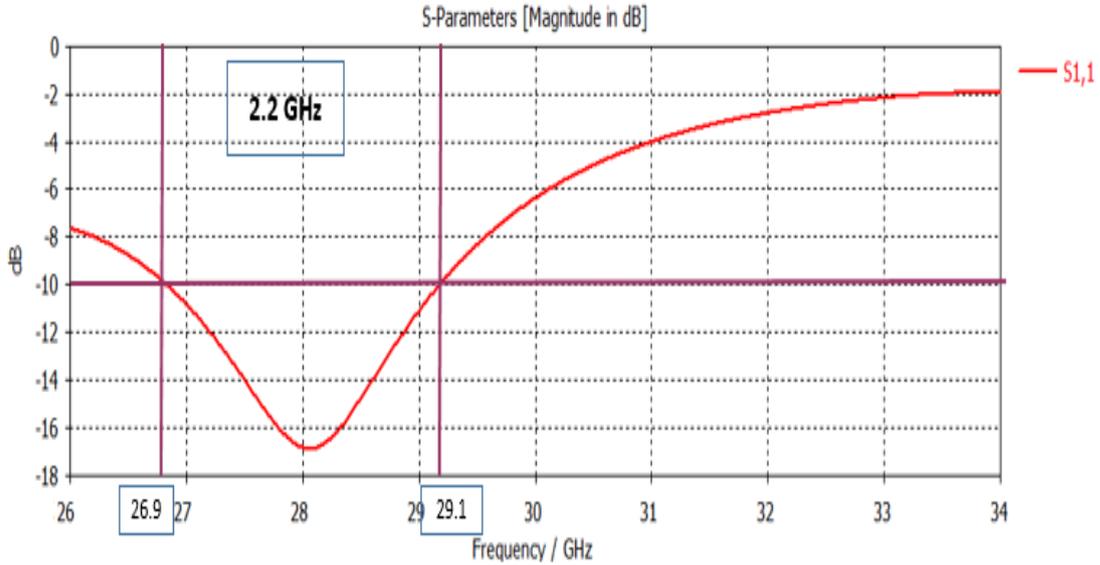
٦- النتائج والمناقشة:

تم إجراء محاكاة الحالات الثلاث لمصفوفات الهوائيات في برنامج المحاكاة الكهرومغناطيسية CST MWS حيث تم الحصول على البارامترات وتقييم سلوك كل من التصميم.

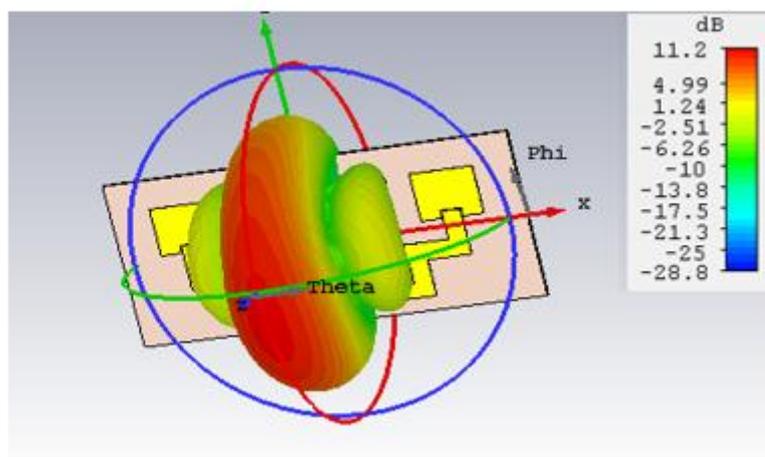
1-6- نتائج محاكاة مصفوفة الهوائيات الخطية ذات العناصر الأربعة:

يبين الشكل (4) بأن إشعاع الهوائي يكون الأفضل عند 28 GHz حيث تكون قيمة $S_{11} = -17\text{dB}$ ، كما يمكن أيضاً حساب عرض النطاق الترددي من الشكل السابق حيث يُعرف بأنه نطاق التردد عندما $S_{11} < -10\text{ dB}$ وبالتالي فإن عرض النطاق الترددي سيكون تقريباً مساوياً إلى 2.2 GHz حيث أن حدود نطاق التردد هي 26.9GHz $f_L =$

(الحد الأدنى) ، و $f_H = 29.1\text{GHz}$ (الحد الأعلى). ونعرف معامل الانعكاس S_{11} بأنه البارامتر الأكثر شيوعاً فيما يتعلق بالهوائيات حيث يمثل مقدار الطاقة المنعكسة من الهوائي لذا فهو يسمى بمعامل الانعكاس وعندما $S_{11} = 0\text{ dB}$ فهذا يعني بأن كل الطاقة تنعكس من الهوائي ولا يشع الهوائي أبداً، ويُرمز له بالرمز Γ . أما عرض النطاق الترددي (Bandwidth) فهو مدى الترددات التي يمكن فيها للهوائي أن يشع أو يستقبل الطاقة. وأيضاً تُظهر مخططات الإشعاع ثلاثية الأبعاد المحاكاة عند 28 GHz تحقيق كسب جيد يبلغ 11.2 dB كما هو موضح في الشكل (5). ويُعرف ربح (كسب) الهوائي (Antenna Gain) بأنه مقياس لمدى كفاءة الهوائي ولمتجهيته، أي نسبة الأشعة الكهرومغناطيسية التي تنطلق في اتجاه معين بالنسبة للمجموع الكلي للأشعة المرسل.



الشكل (4): معامل الانعكاس وعرض النطاق الترددي عند 28 GHz لمصفوفة الأربعة عناصر

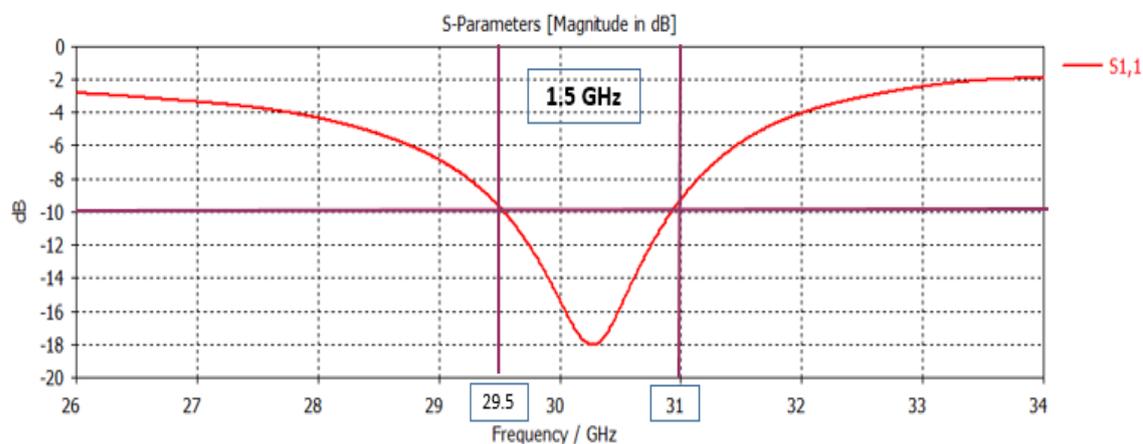


الشكل (5): مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد 3D لمصفوفة الأربعة عناصر

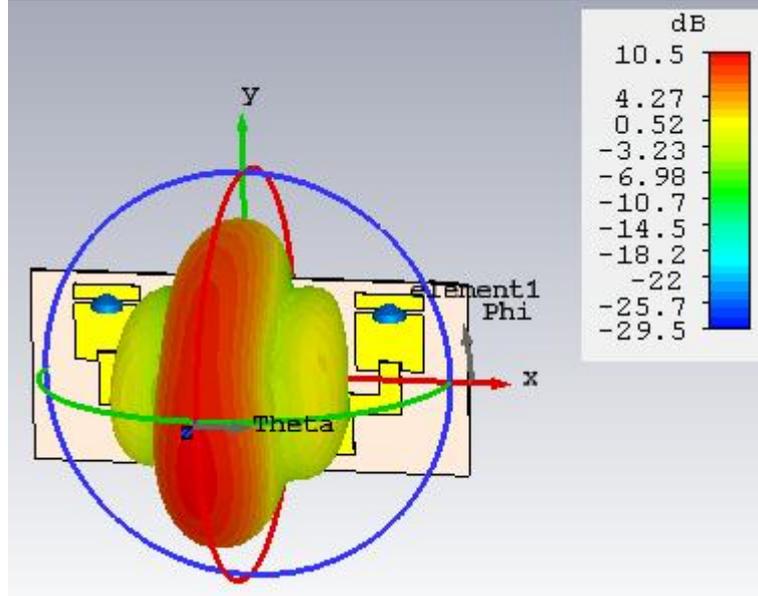
إن نتائج المحاكاة السابقة تُعتبر جيدة ومقبولة بالنسبة لمصفوفة هوائيات رقعية شرائحية مكونة من أربعة عناصر تعمل لأنظمة اتصالات الجيل الخامس.

6-2- نتائج محاكاة مصفوفة الهوائيات الخطية بعد إضافة العناصر الطفيلية:

تُظهر نتائج المحاكاة ل S_{11} مطابقة جيدة عند تردد الرنين وهي -18 dB عند 30.2 GHz، وعرض نطاق ترددي يتجاوز 1.5 GHz، كما هو موضح في الشكل (6)، وأيضاً تُظهر مخططات الإشعاع ثلاثية الأبعاد المحاكاة عند 30.2 GHz تحقيق كسب جيد يبلغ 10.5 dB كما هو موضح في الشكل (7).



الشكل (6): معامل الانعكاس وعرض النطاق الترددي عند 30 GHz لمصفوفة الهوائيات بعد إضافة العناصر الطفيلية

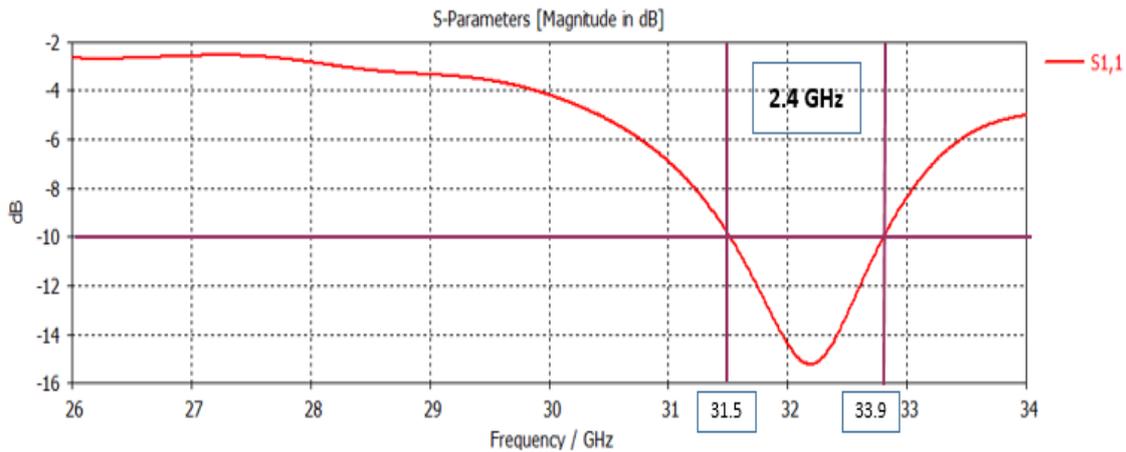


الشكل (7): مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد 3D لمصفوفة الهوائيات بعد إضافة العناصر الطفيلية

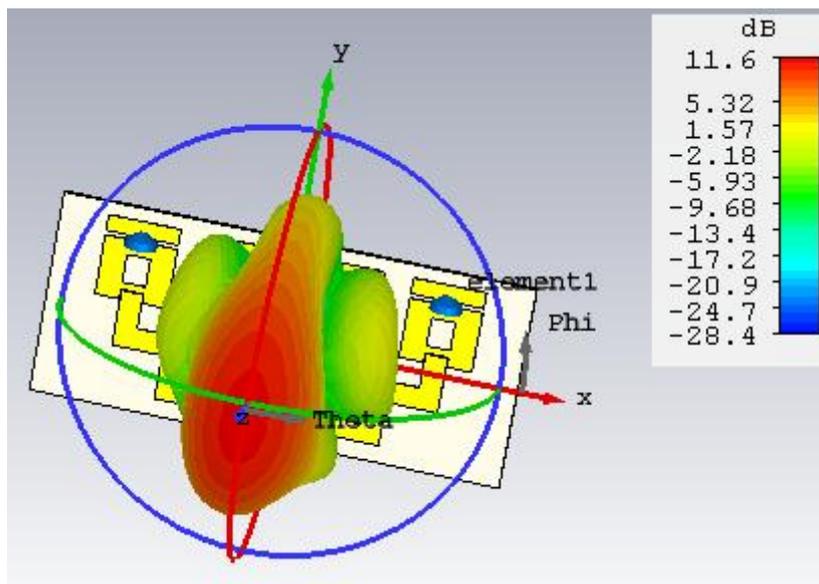
إن إضافة العناصر الطفيلية إلى مصفوفة الهوائيات ساهم في تحويل تردد الرنين إلى تردد أعلى وساعد في زيادة قيمة معامل الانعكاس، إلا أنه خفض من قيمة عرض النطاق الترددي والرياح، الأمر الذي قمنا بمعالجته عن طريق إنشاء فتحات في مصفوفة الهوائيات كما ستوضح نتائج المحاكاة القادمة

- نتائج محاكاة مصفوفة الهوائيات الخطية بعد إحداث الفتحات فيها: 3-6

تُظهر نتائج المحاكاة ل S_{11} مطابقة جيدة عند تردد الرنين وهي -15.5 dB عند 32 GHz، وعرض نطاق ترددي يبلغ 2.4 GHz، كما هو موضح في الشكل (8)، وأيضاً تُظهر مخططات الإشعاع ثلاثية الأبعاد المحاكاة عند 32 GHz تحقيق كسب جيد يبلغ 11.6 dB كما هو موضح في الشكل (9).



الشكل (8): معامل الانعكاس وعرض النطاق الترددي عند 32 GHz لمصفوفة الهوائيات بعد إحداث الفتحات فيها



الشكل (9): مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد 3D لمصفوفة الهوائيات بعد إحداث الفتحات فيها

إن إضافة الفتحات إلى مصفوفة الهوائيات يُحسن عرض النطاق الترددي مما يتيح سرعة في نقل البيانات، كما أن إضافة الفتحات يزيد من قيمة الريح مما يجعل هذه النتائج تلبي متطلبات الجيل الخامس من الاتصالات لأنها ستسمح بالتغلب على العقبات التي تفرضها موجات الانتشار في نطاقات الملليمتر، وأخيراً فإن الفتحات ساهمت بتحويل تردد الرنين إلى تردد أعلى.

يُظهر الجدول (1) مقارنة بين نتائج المحاكاة لمصفوفة الهوائيات بمراحلها الثلاث من حيث تردد الرنين (Resonant Frequency) ومعامل الانعكاس (S11) وعرض النطاق الترددي (BW) والريح (Gain) مع نتائج محاكاة مصفوفات أخرى قابلة لإعادة تشكيل التردد

جدول (1): مقارنة بين نتائج المحاكاة لمصفوفة الهوائيات بمراحلها الثلاث مع نتائج محاكاة مصفوفات أخرى

Reference number	Number of elements	Resonant Frequency	S11 (dB)	BW (GHz)	Gain (dB)
[17]	4	27.2	-19	1.06	5.2
	4	28.35	-23.2	1.15	6
	4	30	-16	1	5.9
[18]	10	25.3	-22	5	15
	10	31	-25	6.2	19.2
	10	33.8	-20	5.7	16.4
Proposed work	4	28	-17	2.2	11.2
	4	30.2	-18	1.5	10.5
	4	32	-15	2.4	11.6

نلاحظ من نتائج المقارنة السابقة أن مصفوفة الهوائيات المقترحة تمتلك عرض نطاق ترددي وريح أكبر من مصفوفة الهوائيات في [17] التي تمتلك نفس العدد من العناصر، حيث أنه في المصفوفة المقترحة تم استخدام أربعة صمامات ثنائية، أما في [17] تم استخدام اثنين من الصمامات الثنائية، مما يجعل العمل المقترح ملائم ومناسب لتطبيقات الجيل الخامس من الاتصالات.

نلاحظ من نتائج المقارنة السابقة أنه كلما زاد عدد عناصر مصفوفة الهوائيات كما في [18] ازدادت قيمة الريح وقيمة عرض النطاق الترددي ولكن بالمقابل تصبح طريقة التصميم والتصنيع معقدة أكثر وتزداد قيمة التكلفة.

٧- الاستنتاجات والتوصيات:

- إن إضافة العناصر الطفيلية يساعد في تصميم مصفوفة الهوائيات القابلة لإعادة تشكيل التردد عن طريق تغيير تردد الرنين عند ربط هذه العناصر بالمصفوفة عن طريق الصمامات الثنائية PINS كما تساعد في زيادة إشعاع المصفوفة.
- إنشاء فتحات (slots) في مصفوفة الهوائيات الشرائحية تؤثر على أداء بارامترات المصفوفة المختلفة وخاصة عرض النطاق الترددي حيث أن الفتحات تعمل على زيادة عرض النطاق.
- العمل على تصميم مصفوفات هوائيات قابلة لإعادة تشكيل نمط الإشعاع أو الاستقطاب أو تصميم مصفوفات الهوائيات القابلة لإعادة التكوين الهجينة.
- العمل على إنشاء فتحات بأشكال مختلفة ودراسة أداء الهوائي من أجل تقنيات تغذية أخرى ودراسة مدى تأثيرها على أداء الهوائي.

٨- المراجع:

- [1] B. Alekhya, N. Murugan, B. Madhav, and N. Kartheek, "Millimeter-Wave Reconfigurable Antenna for 5G Wireless Communications", Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 101, 107–115, 2021.
- [2] W.Awan, A.Ghaffar, B.Seet and N.Hussain, "Compact Multiband Frequency Reconfigurable Antenna for 5G Communications", 29th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC), 2019.
- [3] K.Saraswat and A.R.Harish, "Flexible dual-band dual-polarised CPW-fed monopole antenna with discrete-frequency reconfigurability"; IET Microw Antennas Propag. pp.2053–2060, 2019.

[4] W.A.Awan, A.Ghaffar and N.Hussain, "A frequency reconfigurable flexible antenna for multiple mobile applications", In Proceedings of the 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp. 813–815, December 2019.

[5] S.S.Bharadwaj, D.Sipal, D.Yadav and S.K.Koul, "A Compact Tri-Band Frequency Reconfigurable Antenna for LTE/Wi-Fi/ITS Application". Progress Electromagn, pp.59–67, 2020.

[6] A.Ghaffar, W.A.Awan and N.Hussain, "A Compact Multiband Multi-Mode Frequency Reconfigurable Antenna for Portable devices", In Proceedings of the 2020 International Conference on UK-China Emerging Technologies (UCET), Glasgow, UK, pp. 1–4, August 2020

[7] K.M.Shereen, I.M.Khattak and M.Al-Hasan, "A Frequency and Radiation Pattern Combo-Reconfigurable Novel Antenna for 5G Applications and Beyond", Electronics, 2020.

[8] Iqbal, A.; Smida, A.; Mallat, N.K.; Ghayoula, R.; Elfergani, I.; Rodriguez, J.; Kim, S. "Frequency and Pattern Reconfigurable Antenna for Emerging Wireless Communication Systems". Electronics 2019.

[9] K. M. Oumar and L. N. Shyan, "A compact reconfigurable slotted microstrip patch antenna using pin diode for wireless applications," J. Phys., Conf. Ser., vol. 1228, no. 1, May 2019.

[10] U. Venkateshkumar, S. Kiruthiga, H. Mihitha, K. Maheswari, and M. Nithiyasri, "Multiband patch antenna design for 5G applications," in Proc. 4th Int. Conf. Comput. Methodol. Commun. (ICCMC), pp. 528–534, May, 2020,

[11] Thanki, P. and F. Raval, "I-Shaped Frequency and Pattern Reconfigurable Antenna for WiMAX and WLAN Applications", Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 97, 149-156, 2021.

[12] M. Abbas, B. Sikandri, W. Shahjehan, and M. Kamran Shereen, "Millimeter wave Frequency Reconfigurable Antenna For 5G WLAN", IEEE, 2018.

[13] S. Jilani, S. Muzahir Abbas, K. P. Esselle, and A. Alomainy, "Millimeter-Wave Frequency Reconfigurable T-shaped Antenna for 5G Networks", IEEE, 2015.

[14] N. Ojaroudi , Y. Al-Yasir, A. Abdulkhaleq, I. Elfergani, A. Rayit et la, "Frequency Reconfigurable Antenna Array for MM-Wave 5G Mobile Handsets", 2023.

[١٥] نصر، م؛ حسن، ل، "دراسة تأثير تقنيات التغذية على الهوائي الشرائحي المطبوع في مجال الاتصالات الخلوية للجيل الخامس 5G"، مجلة جامعة طرطوس، ٢٠٢١.

[١٦] نصر، م؛ حسن، ل، " تصميم مصفوفة هوائيات تعمل عند ثلاثة ترددات لأنظمة اتصالات الجيل الخامس 5G"، مجلة جامعة طرطوس، ٢٠٢٢.

[17] E. Al Abbas, M. Mobashsher, "Polarization-Reconfigurable Antenna Array for millimeter-wave 5G" IEEE, 2019.

[18] A. Hassan, N. Fadlallah and M. Rammal. "Wideband Reconfigurable Millimeter-Wave Linear Array Antenna Using Liquid Crystal for 5G Networks" Wireless Engineering and Technology, Vol.12, No.1, 2021.