

دراسة تأثير تقنيات التغذية على الهوائي الشرائحي المطبوع في مجال الاتصالات الخلوية للجيل الخامس 5G

د. محمد نصر *

م. لميس حسن **

(تاريخ الإيداع 1/ 10/ 2020. قُبل للنشر في 14/ 1/ 2021)

□ ملخص □

يحلل هذا العمل أداء تقنيات التغذية المختلفة للهوائي الشرائحي المطبوع مستطيل الشكل المستخدم في أنظمة اتصالات الجيل الخامس، حيث تمت مناقشة ثلاثة أنواع من تقنيات التغذية وهي: التغذية الداخلية وتغذية الحافة والتغذية بالفجوة المقترنة.

يعتمد أداء هذا الهوائي على أبعاد وخصائص عنصر الهوائي وعلى المادة المصنوعة منها طبقة الأساس بالإضافة إلى تقنية التغذية المستخدمة، وتتمثل الخصائص (البارامترات) الرئيسية المهمة هنا في عرض النطاق الترددي والرياح ومعامل الانعكاس والكفاءة الكلية وكفاءة الإشعاع و VSWR.

تم في هذا البحث تحليل الخصائص لكل تقنية تغذية عند التردد 28 GHz ومقارنتها مع تلك الخاصة بالتقنيات الأخرى، حيث يتيح ذلك لمصمم الهوائي إمكانية اختيار أفضل تقنية تغذية لتطبيقه، وتم استخدام برنامج CST studio suite في عمليات المحاكاة والتقييمات لمقاييس الأداء المختلفة.

الكلمات المفتاحية:الهوائي الشرائحي المطبوع، التغذية الداخلية، تغذية الحافة، التغذية بالفجوة المقترنة، عرض النطاق الترددي، الرياح، كفاءة الإشعاع، معامل الانعكاس، اتصالات الجيل الخامس.

* مدرس في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا

** طالبة ماجستير - كلية تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا.

Studying the Effects of Feeding Techniques on Microstrip Patch Antennas in 5G networks

Dr.MohammadNassr *

Eng.Lames Hasan **

(Received 1/10 /2020. Accepted 14/ 1/2021)

□ ABSTRACT □

This work analyze the performance of different feeding techniques for rectangular microstrip patch antennas used in 5G communications systems. Three types of feeding arrangements are discussed here; Inset feed, Edge feed, and Gap Coupled feed techniques.

The performance of this antenna system depends on the dimensions and characteristics of the antenna element and the material from which the substrate is made as well as the feed configuration employed. Here the principal characteristics (parameters) of interest are bandwidth, gain, S11, total efficiency, radiation efficiency and VSWR.

In this paper, we analyze these characteristics for each feed technique at 28GHz, and compare them with those of the other techniques. This enables the antenna designer to make well informed judgement on the best feeding arrangement for his application. CST studio suite program has been used for the simulations and evaluations of the various performance metrics.

Key Words: microstrip patch antenna, inset feed, Edge feed, Gap Coupled feed, Bandwidth, Gain, Radiation Efficiency, S11 parameter, 5G communications.

*Teacher, Communication Technology Engineering Department, Information and communication Technology Engineering, Tartous University, Syria .

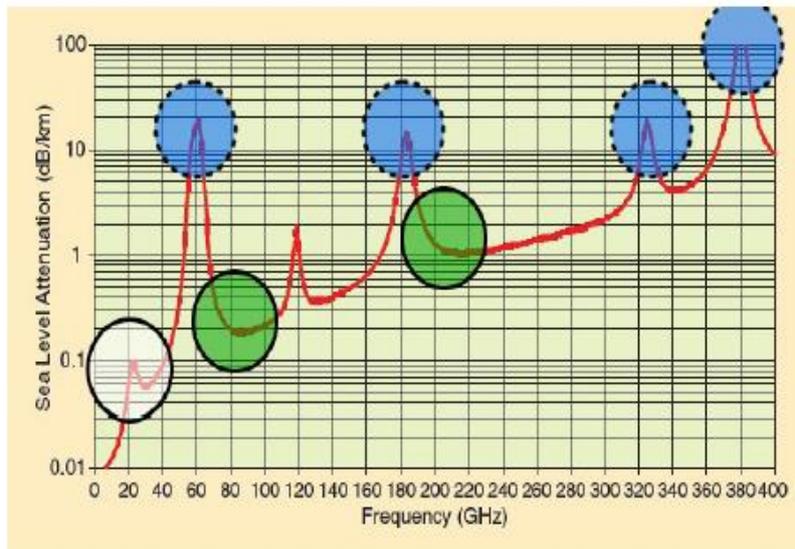
** Master Student_ Faculty of Information and Communication Technology _ University of Tartous _ Tartous _ Syria.

1-مقدمة:

يوفر الجيل الخامس من الاتصالات اللاسلكية الخلوية (5G) إمكانية العمل على عدة ترددات ومعدلات بيانات عالية، حيث يلعب الهوائي الشرائحي المطبوع دوراً حيوياً في قطاع الاتصالات اللاسلكية الأكثر نمواً، فاليوم لا يمكننا التفكير في أي تطور في الاتصال اللاسلكي دون ربطه بالتغيرات في تكنولوجيا الهوائيات الشرائحي، ولإنشاء اتصال بين الأجهزة اللاسلكية على نطاقات تردد أعلى مثل نطاق الموجات الملليمترية، نحتاج إلى هوائي صغير الحجم ورخيص التكلفة وسهل التصنيع، وهي سمات الهوائيات الشرائحية المطبوعة، لذلك يُفضل استخدام هذا النوع من الهوائيات [1].

يتكون الهوائي الشرائحي المطبوع من رقعة مسطحة (patch) من المعدن موضوعة فوق مادة عازلة تسمى طبقة الأساس، وهذه المادة العازلة مغطاة بمستوي أرضي معدني على جانبها الآخر [1].

توفر هذه الهوائيات مرونة في خط التغذية وإشعاع اتجاهي كما أنها تدعم كل من الاستقطاب الخطي والدائري، تم تصميم الهوائيات المطبوعة في هذا البحث عند تردد رنين 28 GHz حيث أن هذا التردد هو واحد من الترددات القياسية لاتصالات 5G وقد تم اختياره نظراً لأن التخماد الجوي عنده صغيراً جداً (حوالي 0.06 dB/km) مما يعطي إمكانية إنشاء اتصالات عند الموجات الملليمترية كما يوفر ظروفاً أفضل للانتشار مقارنة بالشبكات الخلوية الحالية وذلك مبيناً في الشكل (1) حيث تُظهر فيه الدائرة البيضاء التخماد الجوي عند 28 GHz، بينما تظهر الدوائر الخضراء تخامداً مشابهاً للتخماد في أنظمة الاتصالات الحالية، أما الدوائر الزرقاء فتشير إلى ترددات ذات تخامد عالٍ [2].



الشكل (1) التخماد الجوي عند مجالات تردد مختلفة

تلعب تقنيات التغذية دوراً مهماً في تحقيق المطابقة (matching)، والتي تزيد من إمكانية نقل القدرة إلى الهوائي.

تعتمد طبقة الأساس المستخدمة على تطبيق الهوائي، وقد تم في هذا العمل استخدام طبقة الأساس العازلة Rogers RT-duroid5880(lossy) في تصميم الهوائي الشرائحي المطبوع نظراً لأنها الأفضل

بالنسبة للموجات الملليمترية كما أنها تمتلك ثابت عزل منخفض ($\epsilon_r=2.2$) وخسارة منخفضة أيضاً ($\tan\delta = 0.0009$) حيث تمثل الخسارة لطبقة الأساس الضياعات المرتبطة بالمادة العازلة ويُعبر عنه بالعلاقة: [3]

$$\tan \delta = 1/Qd \quad (1)$$

حيث Qd: هو عامل الجودة المتعلق بضياعات العازل والذي يُعرف كنسبة الطاقة المخزنة إلى الطاقة الضائعة في مادة طبقة الأساس العازلة، ويُعطى بالمعادلة [3]:

$$Q_d = \frac{w_r * W_T}{P_d} \quad (2)$$

حيث w_r : هو تردد الرنين، و W_T هي الطاقة الكلية المخزنة عند تردد الرنين، و P_d هي الطاقة الضائعة في مادة طبقة الأساس العازلة. كما تم استخدام النحاس (copper) في الرقعة المعدنية والمستوي الأرضي.

2-هدف البحث:

يهدف البحث إلى تصميم ومحاكاة هوائي رقعة شرائحي ذو كفاءة عالية على تردد موجات الملليمتر لأنظمة اتصالات 5G بحيث يكون للهوائي عرض نطاق ترددي أكبر من 1 GHz مع مخططات إشعاع مستقرة.

3-مواد وطرق البحث:

اعتمد هذا البحث في تنفيذه على العديد من المراجع والدراسات الحديثة [4][5][6][7] والتي تبين أهمية الهوائيات الشرائحية المطبوعة في أنظمة اتصالات الجيل الخامس وكيفية تصميمها باستخدام تقنيات تغذية مختلفة، كما اعتمدنا في عملية المحاكاة على برنامج CST studio suite وهو برنامج متخصص بتصميم وتحليل الأنظمة والمكونات الكهرومغناطيسية بشكل ثلاثي الأبعاد وبأداء عالي وبالتالي فهو يُستخدم لتحليل أداء وكفاءة الهوائيات. يبدأ هذا البحث بتعريف نظرية الهوائيات وأهم البارامترات الأساسية للهوائيات ومن ثم تعريف الهوائي الشرائحي المطبوع وإجراءات تصميمه، ثم تصميم ومحاكاة single element أي هوائي منفرد وإعداد دراسة حدية لاختيار التصميم الأفضل وهذه الدراسة تضم بارامترات الهوائي الشرائحي مثل تقنية التغذية وثابت عزل طبقة الأساس وسماكتها... وفي النهاية نقوم بتصميم ومحاكاة antenna array أي هوائيات مصفوية خطية لتلبية متطلبات اتصالات الجيل الخامس 5G.

3-1أهم البارامترات الأساسية للهوائيات:

من أجل فهم أداء الهوائي، من الضروري وضع تعريفات للبارامترات المختلفة له والتي تُستخدم لوصف أدائه عند التصميم والقياس.

(1) S11: هو البارامتر الأكثر شيوعاً فيما يتعلق بالهوائيات حيث يمثل مقدار الطاقة المنعكسة من الهوائي لذا فهو يسمى بمعامل الانعكاس وعندما $S11= 0$ dB فهذا يعني بأن كل الطاقة تنعكس من الهوائي ولا يشع الهوائي أبداً، ويُرمز له بالرمز Γ [8].

(2) VSWR: هو مقياس لعدم تطابق الممانعة بين الهوائي ونظام التغذية، أي أنه كلما كانت قيمة VSWR أكبر، كان عدم التطابق أعلى. ويُحدد على أنه النسبة بين الحد الأعلى للجهد V_{max} إلى الحد الأدنى له V_{min} . ومن أجل تحقيق مطابقة مقبولة وجيدة للهوائي يجب أن تكون قيمة VSWR أقل من 2 وقيمة S11 أقل من -10dB. ويُعبر عنه بالعلاقة: [8]

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (3)$$

كما يمكن ربط VSWR بمعامل الانعكاس S11 عن طريق العلاقة: [8]

$$VSWR = \frac{1 + |S11|}{1 - |S11|} \quad (4)$$

(3) عرض النطاق الترددي (Bandwidth): هو مدى الترددات التي يمكنها للهوائي أن يشع أو

يستقبل الطاقة، ويكون فيها قيمة VSWR أقل من 2، ويُعطى بالعلاقة: [8]

$$BW = \frac{VSWR - 1}{Q\sqrt{VSWR}} \quad (5)$$

حيث Q: هو عامل الجودة للهوائي.

أما بالنسبة للهوائيات ضيقة الحزمة فيتم التعبير عن عرض النطاق لها كنسبة مئوية من فرق التردد (التردد الأعلى f_H مطروحاً منه التردد الأدنى f_L) على التردد المركزي (f_r) لعرض النطاق وهذا ما يسمى بعرض النطاق الكسري للهوائي (FBW) ويُعطى بالعلاقة: [8]

$$FBW = \frac{f_H - f_L}{f_r} = \frac{1}{Q} \quad (6)$$

ونلاحظ من العلاقة السابقة أن عامل الجودة للهوائي يتناسب عكسياً مع عرض النطاق الترددي.

(4) الاتجاهية (Directivity): هي بارامتر أساسي للهوائي وتُعرف كمقياس لمدى اتجاه مخطط

إشعاع الهوائي.

ويمكن كتابة مخطط الإشعاع المعياري للهوائي كدالة في الإحداثيات الكروية كالتالي: $F(\theta, \phi)$

أما رياضياً، فتم كتابتها معادلة الاتجاهية (D) على النحو الآتي: [8]

$$D = \frac{1}{\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |F(\theta, \phi)|^2 \sin\theta d\theta d\phi} \quad (7)$$

(5) ربح (كسب) الهوائي (Antenna Gain): هو مقياس لمدى كفاءة الهوائي ولتجهيته، أي نسبة

الأشعة الكهرومغناطيسية التي تنطلق في اتجاه معين بالنسبة للمجموع الكلي للأشعة المرسل. ويُعطى الربح

(G) بالمعادلة: [8]

$$G = 4\pi \left(\frac{\text{Radiation Intensity}}{\text{Antenna Input Power}} \right) \quad (8)$$

ويمكن ربط ربح الهوائي بالاتجاهية من خلال المعادلة: [8]

$$G = \epsilon_R \cdot D \quad (9)$$

حيث ϵ_R هو نسبة القدرة المشعة الكلية (Pr) على قدرة الدخل عند نقطة التغذية (Pin) ويُعطى

بالعلاقة: [8]

$$\epsilon_R = \frac{p_r}{p_{in}} \quad (10)$$

(6) كفاءة الهوائي (Antenna Efficiency) : هي مقياس القدرة التي يشعها الهوائي بالنسبة لقدرة دخل

الهوائي ويمكن كتابتها بالمعادلة: [8]

$$\varepsilon_R = \frac{P_{radiated}}{P_{input}} \quad (11)$$

والكفاءة هي رقم يتراوح بين 0 و 1 ، وبشكل عام يتم تحديد كفاءة الهوائي كنسبة مئوية. ويشار أحياناً إلى المعادلة (11)

بكفاءة إشعاع الهوائي، وهذا ما يميزها عن الكفاءة الكلية للهوائي والتي هي عبارة عن كفاءة الإشعاع مضروبة في خسارة عدم تطابق الممانعة للهوائي عند توصيله بخط نقل أو جهاز استقبال أو إرسال، ويمكن تلخيص ذلك في المعادلة [8]:

$$\varepsilon_T = M_L \cdot \varepsilon_R \quad (12)$$

حيث: ε_T هي الكفاءة الكلية للهوائي، و M_L هي خسارة الهوائي بسبب عدم تطابق الممانعة ، و ε_R هي كفاءة إشعاع الهوائي

2-3 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]

$$W = \frac{c}{2 f_r} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \quad (13)$$

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

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2 \sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \quad (14)$$

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 التزايدي (أو بما يسمى الطول الكهربائي) من المعادلة: [8]

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\varepsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\varepsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8\right)} \quad (15)$$

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

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (16)$$

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

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (17)$$

• أما بالنسبة لطول المستوي الأرضي فيُعطى بالعلاقة: [8]

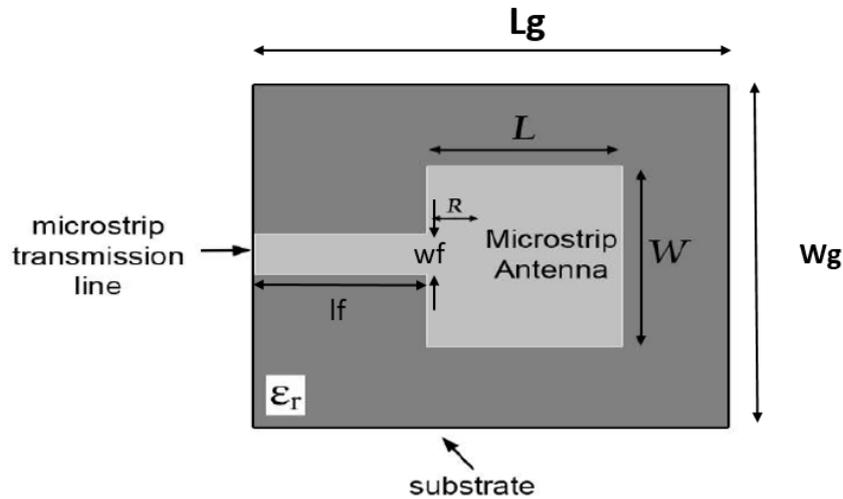
$$L_g = 6h + L \quad (18)$$

حيث L_g هي طول المستوي الأرضي، و L هي طول الرقعة.

• وعرض المستوي الأرضي يُعطى بالعلاقة: [8]

$$W_g = 6h + W \quad (19)$$

حيث W_g هي عرض المستوي الأرضي، و W هي عرض الرقعة.



الشكل (2) الهوائي الشرائحي المطبوع

3-3 تقنيات التغذية:

أهم تقنيات التغذية للهوائيات الشرائحية المطبوعة هي التي تُعرف بالتغذية باستخدام الخط الشرائحي وهي خيار طبيعي لتحريض الهوائي حيث يمكن اعتبار الرقعة (patch) كامتداد لخط التغذية، ومن السهل تصنيعهما على نفس المستوي في وقت واحد، عادة مايكون عرض خط التغذية أصغر بكثير من عرض الرقعة، والتغذية باستخدام الخط الشرائحي هي تغذية بسيطة لتحقيق المطابقة (matching) من خلال التحكم بالموقع الداخلي لخط التغذية إضافة إلى أن نمذجتها بسيطة إلى حد ما، وهي تُقسم إلى ثلاثة أنواع:

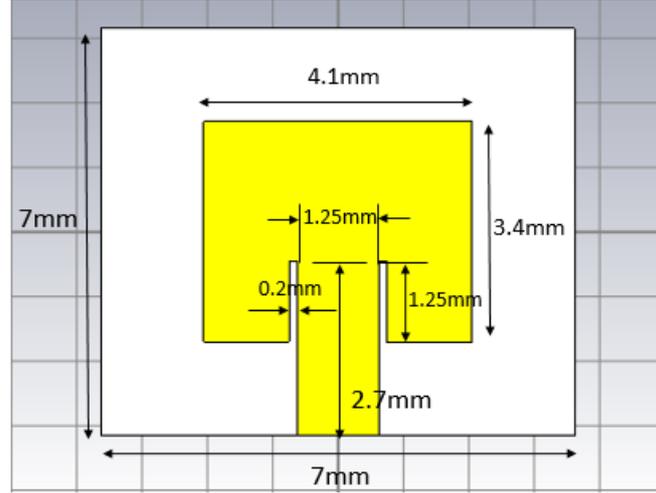
3-3-1- التغذية الداخلية (Inset feed):

تكون ممانعة الدخل للرقعة عند الحافة (150-300 أوم)، وفي حال توصيل المغذي على حافة الهوائي كما يوضح الشكل (2) سيحدث عدم تطابق للممانعة، لذلك يجب تعديل موقع المغذي.

ونظراً لأن التيار منخفض عند نهايات الرقعة ويزيد بالمقدار باتجاه المركز، فيمكن تقليل ممانعة الدخل التي تتناسب عكسياً مع التيار إذا تم تغذية الرقعة بالقرب من مركزها. والطريقة لفعل ذلك هي باستخدام التغذية الداخلية كما يوضح الشكل (3)، الطول الداخلي يمكن حسابه باستخدام المعادلة التالية: [9]

$$R_{in}(x = x_0) = R_{in}(x = 0) \cos^2 \left(\frac{\pi}{L} x_0 \right) \quad (20)$$

حيث: x_0 هي الطول الداخلي، $R_{in}(x=0)$ هي مقاومة الهوائي عند الحافة، L هي طول الهوائي. نعوض القيم المناسبة في المعادلة السابقة ونقوم بتصميم الهوائي وفق الأبعاد الموضحة على الشكل (3).



الشكل (3) هوائي الرقعة مع التغذية الداخلية

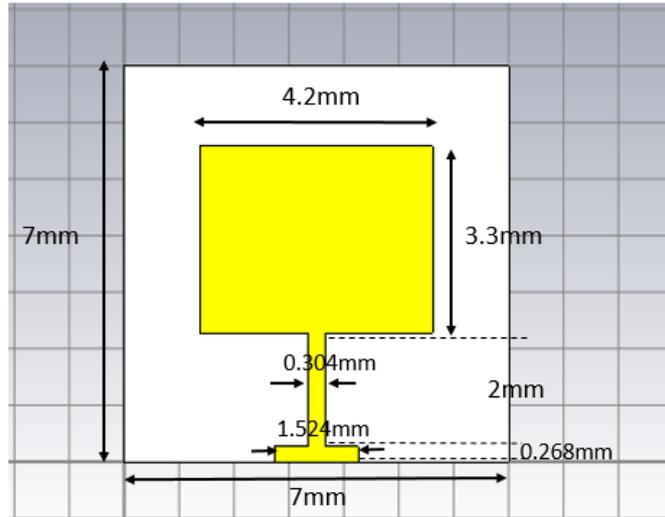
3-3-2- التغذية مع خط نقل بربع طول الموجة (Feed with a quarter - wavelength transmission line)

تُعرف هذه التقنية أيضاً باسم تغذية الحافة (Edge Feed) حيث يمكن استخدام خط نقل بربع الطول الموجي ذو ممانعة مميزة Z_1 لمطابقة هوائي microstrip مع خط النقل ذو الممانعة المميزة Z_0 ، ويمكن حساب الممانعة التي تم ملاحظتها من بداية خط ربع طول الموجة باستخدام الصيغ التالية: [10]

$$Z_{in} = Z_0 = \frac{Z_1^2}{Z_A} \quad (21)$$

$$Z_1 = \sqrt{(Z_0 * Z_A)} \quad (22)$$

حيث Z_0 هي الممانعة المميزة لخط التغذية، Z_1 هي الممانعة المميزة لخط النقل بربع الطول الموجي، Z_A هي الممانعة المميزة للهوائي. يبين الشكل (4) تقنية التغذية هذه.



الشكل (4) هوائي الرقعة مع تغذية الحافة

3-3-3- التغذية بالفجوة المقترنة (Gap Coupled Feed) :

تشابه هذه التقنية تقنية inset feed ولكن المغذي لا يلمس الهوائي أي أن التغذية هنا غير مباشرة تستخدم فجوة صغيرة جداً حيث أن الفجوة المحفورة تفصل منبع التغذية (منبع التحريض) عن الهوائي الشراحي، كما يوضح الشكل (5) ، لذلك تنتقل الطاقة من المغذي إلى الهوائي بشكل غير مباشر عن طريق الاقتران، وتتطلب هذه الطريقة عرضاً ضيقاً للفجوة من أجل الاقتران الفعال للطاقة. ميزة تغذية Gap Coupled أنها توفر عرض نطاق ترددي جيد، والدارة المكافئة لهذا النوع موضحة بالشكل (6) حيث أن الحمل السعوي هو لزيادة عرض النطاق الترددي للهوائي ليكون أكبر من 1.1GHz [11]. لا يوجد صيغة لحساب عرض الفجوة حول خط التغذية لذلك تم إعداد دراسة حدية للحصول على أفضل النتائج.

الجدول (1) : دراسة حدية لعرض الفجوة والطول الداخلي للهوائي

gap = 0.1 mm	Impedance matching absolute bandwidth (MHz)	Fractional bandwidth (%)	Antenna radiation Efficiency (%) at 28 GHz
d = 0.9	1040	3.7	90
d = 1.0	1110	3.96	91
d = 1.2	1245	4.44	92.33
d = 1.35	1234	4.4	91.8
d = 1.45	1226	4.38	91.9
d = 1.5	1216	4.34	91.8

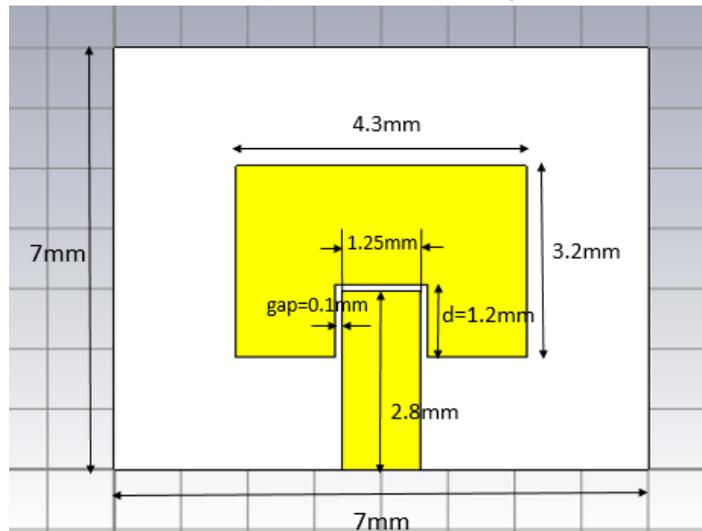
الجدول (2): دراسة حدية من أجل قيمة أخرى للفجوة تساوي 0.03 مع تغيير قيمة d [12]:

gap = 0.03 mm	Impedance matching absolute bandwidth (MHz)	Fractional bandwidth (%)	Antenna radiation Efficiency (%) at 28 GHz
d=0 (flat patch)	1285	4.58	91.3
d=0.07	1376	4.91	91.8
d=0.08	1396	4.98	91.8
d=0.09	1410	5.03	91.7
d=0.1	1416	5.06	91.6
d=0.2	1417	5.25	91.2
d=0.3	1485	5.3	90.1
d=0.4	1427	5.1	89.3

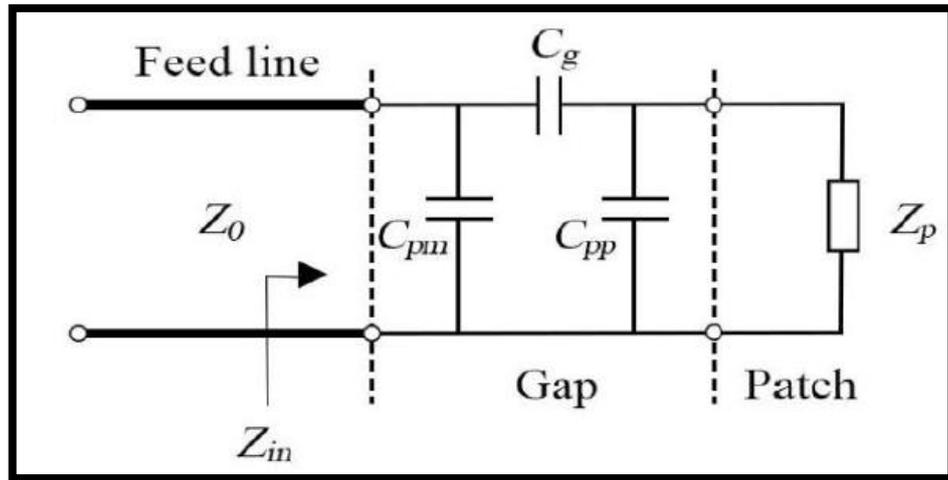
الجدول (3): دراسة حدية من أجل قيمة ثابتة ل d تساوي 1.13، ونعطي قيم مختلفة للفجوة [12]:

d=1.13m	Impedance matching absolute bandwidth (MHz)	Fractional bandwidth (%)	Antenna radiation Efficiency (%) at 28 GHz
gap=0.05	1267	4.5	88.8
gap=0.09	1274	4.55	91.9
gap=0.1	1215	4.34	91.6
gap=0.12	1089	3.89	90.6
gap=0.14	860	3.07	88.3
gap=0.19	440	1.57	83

بناءً على النتائج السابقة، تم اختيار تصميم واحد ليكون التصميم الأفضل وفقاً لعرض النطاق الترددي وقيمة كفاءة الإشعاع حيث يتضح لدينا أنه عندما الفجوة تساوي 0.1mm، و $d = 1.2\text{mm}$ ، يكون عرض النطاق الترددي مساوياً إلى 1.2 GHz، وقيمة كفاءة الإشعاع تساوي 92.33% والتي تمثل القيم الأفضل في هذا التصميم.



الشكل (5) هوائي الرقعة مع التغذية بالفجوة المقترنة



الشكل (6) الدارة المكافئة لهوائي شرائحي مطبوع مُغذى بواسطة فجوة واحدة

ولتفسير الشكل (6) سنقوم بتعريف جميع العناصر الموجودة فيه من خلال المعادلات التالية: [13]

$$C_g = 0.5 \times h \times Q_1 \times \exp\left(-1.86 \times \frac{d}{h}\right) \times \left[1 + 4.19 \times \left\{1 - \exp\left(0.785 \sqrt{\frac{h}{W_1}} \times \frac{W}{W_1}\right)\right\}\right] \quad (23)$$

$$C_{pm} = C_{L2} \times \left[\frac{Q_2 + Q_3}{Q_2 + 1}\right] \quad (24)$$

$$C_{pp} = C_{L1} \times \left[\frac{Q_2 + Q_4}{Q_2 + 1}\right] \quad (25)$$

حيث:

$$Q_1 = 0.04598 \left\{0.03 + \left(\frac{W_1}{h}\right)^{Q_5}\right\} (0.272 + \epsilon_r \times 0.07) \quad (26)$$

$$Q_2 = 0.107 \left(\frac{W_1}{h} + 9\right) \left(\frac{d}{h}\right)^{3.23} + 2.09 \left(\frac{d}{h}\right)^{1.05} \left[\frac{1.5 + 0.3\left(\frac{W_1}{h}\right)}{1 + 0.6\left(\frac{W_1}{h}\right)}\right] \quad (27)$$

$$Q_3 = \exp\left[-0.5978 \left(\frac{W_1}{W}\right)^{1.35}\right] - 0.55 \quad (28)$$

$$Q_4 = \exp\left[-0.5978 \left(\frac{W_1}{W}\right)^{1.35}\right] - 0.55 \quad (29)$$

$$Q_5 = \frac{1.23}{\left[1 + 0.12 \left\{\left(\frac{W}{W_1}\right) - 1\right\}^{0.9}\right]} \quad (30)$$

حيث: C_g هي سعة الاقتران (سعة الفجوة المقترنة)، و C_{pp} ، C_{pm} هي سعات لوحية، و W هي عرض

الرقعة ،

و W_1 هي عرض خط التغذية ، و d هي طول الفجوة ، و h هي سماكة طبقة الأساس ، و ϵ_r هو ثابت

العازلية الكهربائية، و C_{L1} ، C_{L2} هي السعات الطرفية للموصلات ذات الدارة المفتوحة.

من أجل نقطة تغذية (x, y) ، فإن ممانعة الدخل للرقعة (z_{in}) تُعطى بالعلاقة:

$$Z_{in} = \frac{-jk\eta \sum \Psi_{mn}^2(x, y)}{[k^2\{(1-j)/Q\} - k_{mn}]}$$
 (31)

حيث:

$$\Psi_{mn}(x, y) = \frac{\cos(m\pi x/a) \cos(n\pi y/b)}{\sqrt{ab/\epsilon_{0m}\epsilon_{0n}}}$$
 (32)

$$\epsilon_{0m}=1 \quad \text{for } m=0$$

$$=2 \quad \text{for } m>0$$

$$\epsilon_{0n}=1 \quad \text{for } n=0$$

$$=2 \quad \text{for } n>0$$

$$\eta = \eta_0(\mu_r/\epsilon_r)^{1/2}$$
 (33)

η وهي الممانعة الحقيقية (الفعالية) لطبقة الأساس.

Q هو عامل الجودة الفعال.

$$k_{mn} = [(m/a)^2 + (n/b)^2]$$
 (34)

k_{mn} هي الممانعة المميزة.

$$k = [2\pi f \mu_r \epsilon_r]^{1/2}/c$$
 (35)

K هو رقم الموجة.

أما بالنسبة للممانعة المكافئة للرقعة Z_p فتُعطى بالعلاقة:

$$Z_p = \left[\frac{1}{R_{mn}} = j(\omega C_{mn} - 1/\omega L_{mn}) \right]^{-1}$$
 (36)

حيث:

$$C_{mn} = \left[\frac{ch\eta \sum \Psi_{mn}(x, y)}{\sqrt{\epsilon_r}} \right]^{-1}$$
 (37)

$$L_{mn} = \frac{\epsilon_r}{C_{mn} k_{mn}^2 c^2}$$
 (38)

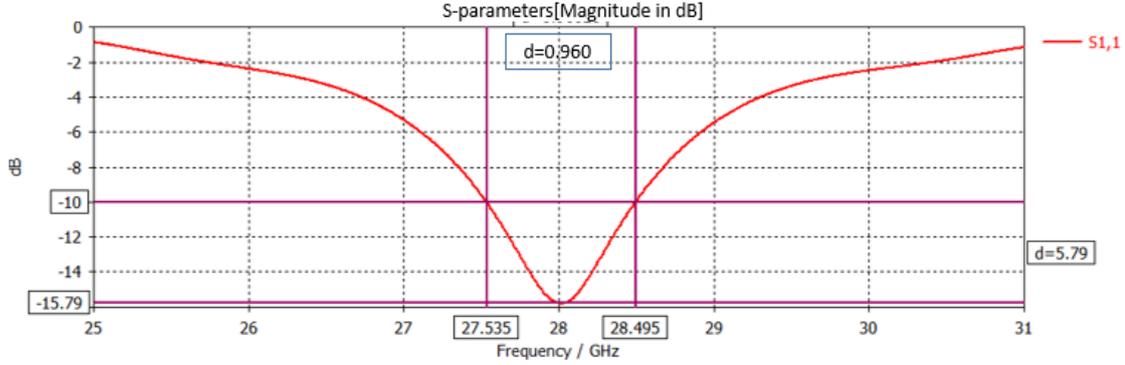
$$R_{mn} = \frac{Q}{C_{mn} \omega}$$
 (39)

4-النتائج والمناقشة:

تمت دراسة نتائج المحاكاة لتقنيات التغذية المذكورة سابقاً من أجل الحصول على أفضل تقنية، واعتمد اختبار تقنية التغذية على تطبيق الهوائي وبالتالي كانت أفضل تقنية تغذية هي وفقاً لكفاءة الاشعاع وعرض النطاق الترددي الواسع وسهولة الاستخدام في مصفوفات الهوائي وسهولة التصنيع. سماكة الركيزة وقيمة $\tan \delta$ لكل التصاميم هي 0.381mm، 0.0009 على التوالي. ممانعة دخل الهوائي يجب أن تتطابق مع ممانعة المصدر والتي تبلغ قيمتها 50Ω من أجل كل مصادر RF ومصادر microwave.

4-1 هوائي التغذية الداخلية (Inset feed antenna) :

بلغت قيمة معامل الانعكاس S_{11} parameter) -15.79 dB عند 28GHz، وتم تحقيق عرض نطاق ترددي مساوي 960 MHz أما الاتجاهية فكانت 7.7dBi، كما تم تحقيق ربح (كسب) 6.1dB، أما بالنسبة لكفاءة الإشعاع فقد كانت قيمتها 69%، وهذا كله موضح في نتائج المحاكاة التالية:

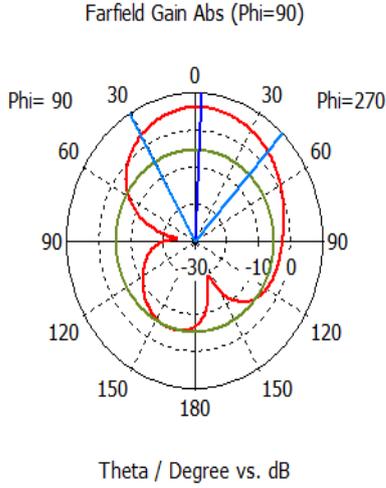


الشكل (7) معامل الانعكاس وعرض النطاق الترددي عند 28 GHz

يبين الشكل (7) بأن إشعاع الهوائي يكون الأفضل عن 28 GHz حيث تكون قيمة $S_{11} = -15.79$ dB، كما يمكن أيضاً حساب عرض النطاق الترددي من الشكل السابق حيث يُعرف بأنه نطاق التردد عندما $S_{11} < -10$ dB وبالتالي فإن عرض النطاق الترددي سيكون تقريباً مساوياً إلى 0.960 GHz حيث أن حدود نطاق التردد هي $f_L = 27.535$ GHz

GHz (الحد الأدنى)، و $f_H = 28.495$ GHz (الحد الأعلى)، وهما يحققان المعادلة: [13]

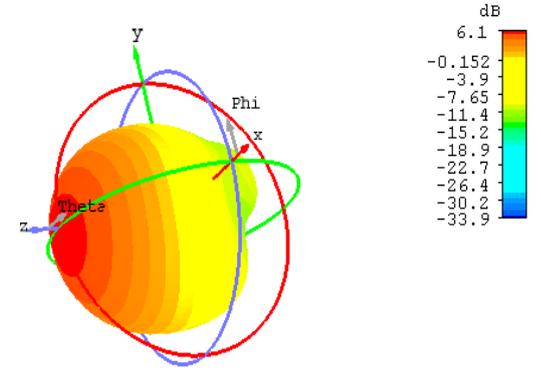
$$\sqrt{27.535 * 28.495} \cong 28 \text{GHz} \quad \text{حيث } f_r = \sqrt{f_L * f_H} = 28 \text{GHz}$$



(b)

— farfield (f=28) [1]

Frequency = 28 GHz
Main lobe magnitude = 6.11 dB
Main lobe direction = 3.0 deg.
Angular width (3 dB) = 73.8 deg.
Side lobe level = -11.4 dB

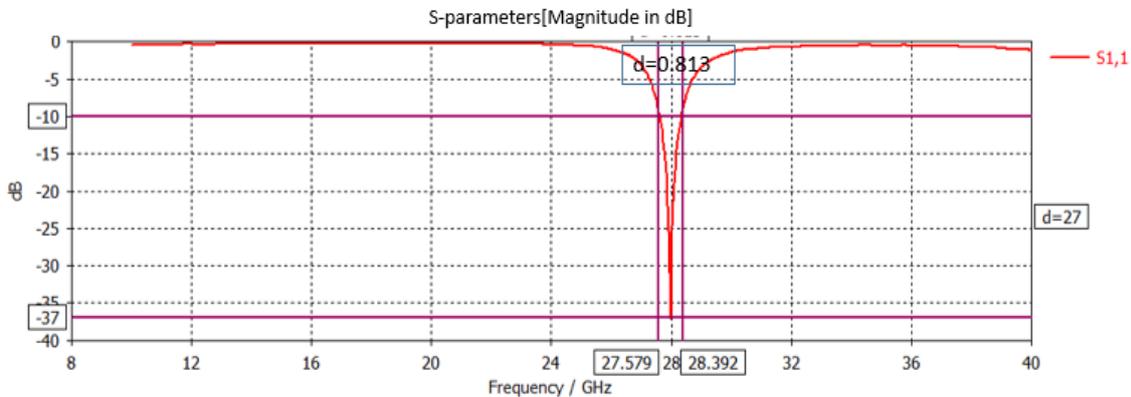


(a)

الشكل (8) مخطط الإشعاع، (a) يمثل مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد 3D، (b) يمثل مخطط الإشعاع القطبي. يبين الشكل (8) مخطط الإشعاع لهوائي التغذية الداخلية بالشكل ثلاثي الأبعاد وبالشكل القطبي، حيث يبين الشكل (8-a) بأن أعلى قيمة تم تحقيقها للربح هي 6.1 dB، بينما يبين الشكل (8-b) بأن إشعاع الهوائي اتجاهي عند التردد المطلوب (28 GHz) ويبلغ عرض الحزمة 73.8 deg، أما مستوى الفص الجانبي فيساوي -11.4 dB، أما بالنسبة للاتجاهية فتبلغ قيمتها 7.7 dBi

4-2- هوائي تغذية الحافة (edge feed antenna):

بلغت قيمة معامل الانعكاس (S11 parameter)-37dB عند 28GHz، وتم تحقيق عرض نطاق تردديساوي 813 MHz أما الاتجاهية فكانت 7.87dBi، كما تم تحقيق ربح (كسب) 7.22dB، أما بالنسبة لكفاءة الإشعاع فقد كانت قيمتها 86.21%، وهذا كله موضح في نتائج المحاكاة التالية:

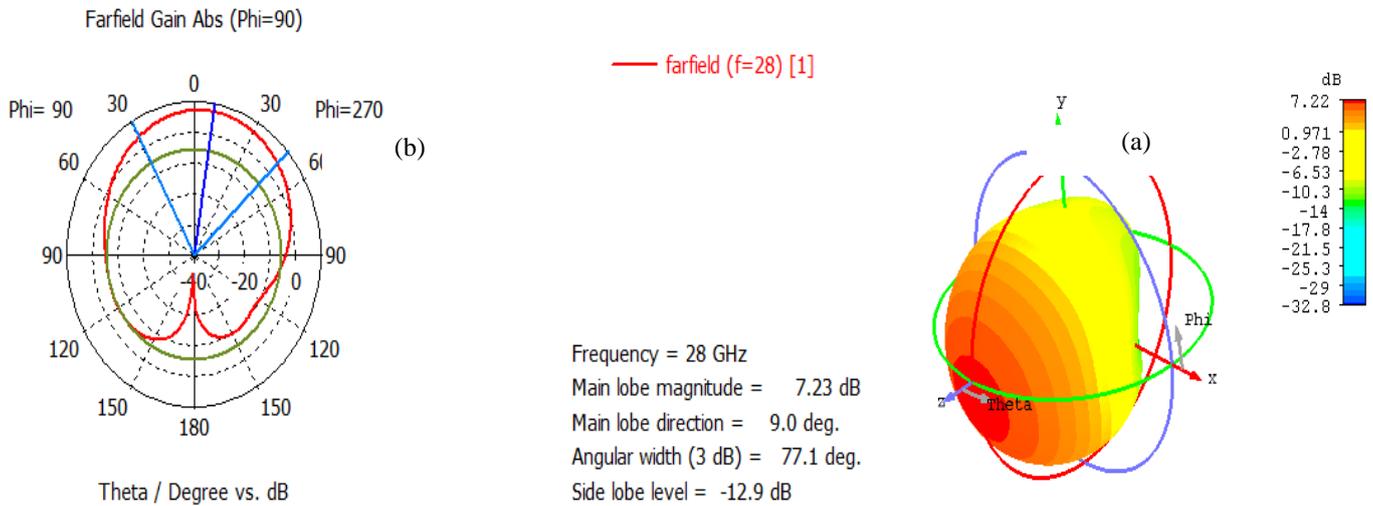


الشكل (9) معامل الانعكاس وعرض النطاق الترددي عند 28 GHz

يبين الشكل (9) بأن إشعاع الهوائي يكون الأفضل عند 28 GHz حيث تكون قيمة $S_{11} = -37\text{dB}$ ، 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 0.813 GHz حيث أن حدود نطاق التردد هي $f_L = 27.579$

$$\text{GHz (الحد الأدنى)}، و f_H = 28.392 \text{ GHz (الحد الأعلى)}، وهما يحققان المعادلة: [13]$$

$$f_r = \sqrt{f_L * f_H} = 28\text{GHz} \text{ حيث أن } \sqrt{27.579 * 28.392} \cong 28\text{GHz}$$



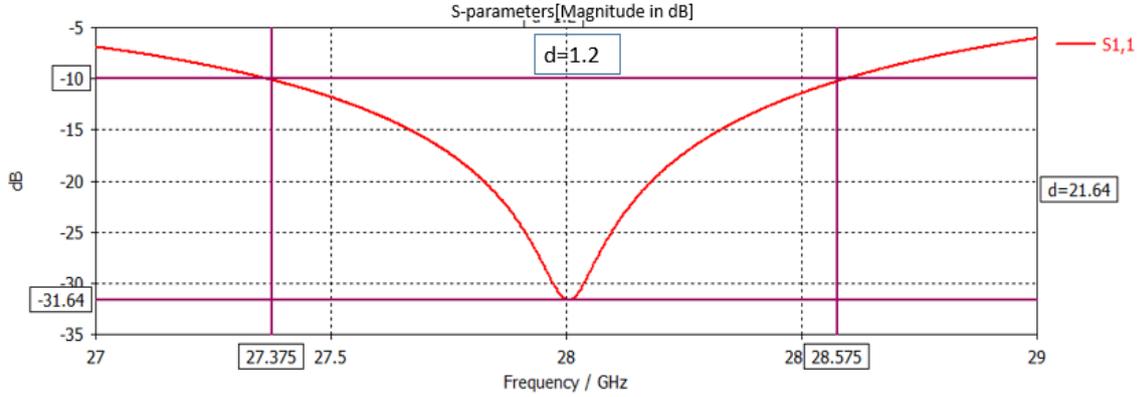
الشكل (10) مخطط الإشعاع، (a) يمثل مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد 3D، (b) يمثل مخطط الإشعاع القطبي

يبين الشكل (10) مخطط الإشعاع لهوائي تغذية الحافة بالشكل ثلاثي الأبعاد وبالشكل القطبي، حيث يبين الشكل (10-a) بأن أعلى قيمة للريح تم تحقيقها هي 7.22 dB، بينما يبين الشكل (10-b) بأن إشعاع الهوائي اتجاهاً عند التردد

المطلوب (28 GHz) ويبلغ عرض الحزمة 77.1 deg، أما مستوى الفص الجانبي فيساوي -12.9 dB، أما بالنسبة للاتجاهية فتبلغ قيمتها 7.87 dB

3-4 - هوائي التغذية بالفجوة المقترنة (Gap Coupled antenna):

بلغت قيمة معامل الانعكاس (S11 parameter)-31.64dB عند 28GHz، وتم تحقيق عرض نطاق ترددي مساوي 1.2GHz أما الاتجاهية فكانت 7.49dBi، كما تم تحقيق ربح (كسب) 7.15 dB، أما بالنسبة لكفاءة الإشعاع فقد كانت قيمتها 92.33%، وهذا كله موضح في نتائج المحاكاة التالية:

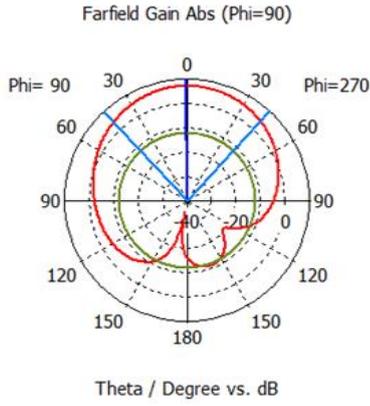


الشكل (11) معامل الانعكاس وعرض النطاق الترددي عند 28 GHz

يبين الشكل (11) بأن إشعاع الهوائي يكون الأفضل عن 28 GHz حيث تكون قيمة $S_{11} = -31.64\text{dB}$ ، 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 1.2 GHz حيث أن حدود نطاق التردد هي $f_L = 27.375\text{GHz}$

GHz (الحد الأدنى)، و $f_H = 28.575\text{GHz}$ (الحد الأعلى)، وهما يحققان المعادلة: [13]

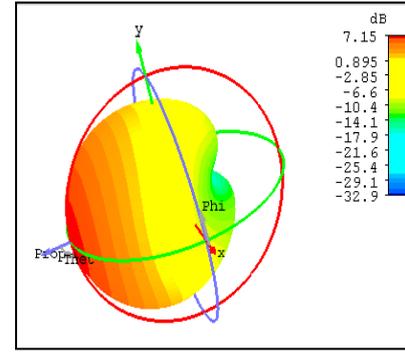
$$\sqrt{27.375 * 28.575} \cong 28\text{GHz} \quad \text{حيث } f_o = \sqrt{f_L * f_H} = 28\text{GHz}$$



(b)

— farfield (f=28) [1]

Frequency = 28 GHz
Main lobe magnitude = 7.15 dB
Main lobe direction = 1.0 deg.
Angular width (3 dB) = 84.9 deg.
Side lobe level = -19.0 dB



الشكل (12) مخطط الإشعاع، (a) يمثل مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد 3D، (b) يمثل مخطط الإشعاع القطبي

الشكل (12) مخطط الريح لهوائي التغذية بالفجوة المقترنة بالشكل ثلاثي الأبعاد وبالشكل القطبي، حيث

يبين الشكل (12-a) بأن أعلى قيمة للريح تم تحقيقها هي 7.15 dB وهي قيمة جيدة لهوائي الشرائحي

المطبوع مصمم لاتصالات 5G، بينما يبين الشكل (12-b) بأن إشعاع الهوائي اتجاهاً عند التردد المطلوب

(28 GHz) ويبلغ عرض الحزمة 84.9 deg، أما مستوى الفص الجانبي فيساوي -19 dB، أما بالنسبة

للاتجاهية فتبلغ قيمتها 7.49 dBi

تم حساب ومقارنة نتائج المحاكاة لتقنيات التغذية الثلاث المذكورة سابقاً لهوائي الشرائحي المطبوع في

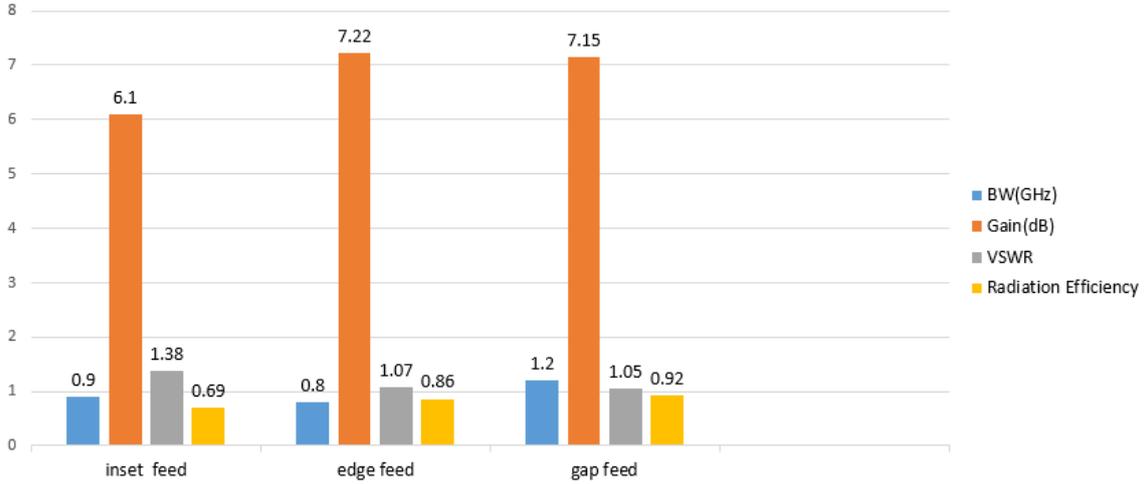
الجدول (4).

الجدول (4): مقارنة نتائج المحاكاة لتقنيات التغذية الثلاث

	Inset Feed	Edge Feed	Gap Coupled Feed
S11 parameter(dB)	-15.79	-37	-31.64
VSWR	1.38	1.07	1.05
Radiation Efficiency(%)	69	86.21	92.33
Total Efficiency(%)	67	86.11	92.27
Gain(dB)	6.1	7.22	7.15
Bandwidth	960 MHz	813 MHz	1.2 GHz
Beam width (deg)	73.8	77.1	84.9
Side lobe level(dB)	-11.4	-12.9	-19

يتضح من الجدول السابق ما يلي:

- يوفر الهوائي المقترن بالفجوة أكبر عرض نطاق ترددي، بينما يمتلك هوائي تغذية الحافة عرض النطاق الترددي الأصغر.
- نلاحظ أن هوائي التغذية الداخلية له معامل انعكاس أكثر نسبياً من الهوائيات الأخرى وهذا واضح بسبب الإشعاعات الجانبية من خط التغذية والتي تؤثر على الأداء الإشعاعي للهوائي.
- يمتلك الهوائي المقترن بالفجوة عرض الحزمة الأكبر، بينما يملك هوائي التغذية الداخلية عرض الحزمة الأقل.
- أما فيما يتعلق بالربح فيوفر هوائي تغذية الحافة أعلى قيمة للربح.
- وأخيراً يمتلك الهوائي المقترن بالفجوة قيمة $VSWR$ الأقل بالإضافة إلى أنه الهوائي ذو الأداء الإشعاعي الأفضل، كما انه يغطي عرض نطاق ترددي يتجاوز 1 GHz وهذا كله يجعله الهوائي الأكثر تأثيراً بين الهوائيات الثلاث حيث أنه يلبي متطلبات أنظمة اتصالات الجيل الخامس (5G).



الشكل (13) : مقارنة بين تقنيات التغذية

5- الاستنتاجات والتوصيات:

• يعد اختيار تقنية التغذية للهوائي الشرائحي المطبوع قراراً مهماً لأنه يؤثر على عرض النطاق الترددي والبارامترات الأخرى، حيث قمت في الدراسة السابقة باختبار ثلاثة أنماط من تقنيات التغذية على هوائي الشرائحي المطبوع ولاحظنا بأن كل تقنية تعطي نطاقاً ترددياً مختلفاً وكسباً مختلفاً وكفاءة مختلفة وما إلى ذلك. تُعتبر الهوائيات المقترنة بالفجوة هي الأفضل وذلك لأنها حققت متطلبات الجيل الخامس من الاتصالات حيث كان عرض النطاق الترددي لها أكبر من 1GHz وقيمة الكسب (الربح) أكبر من 6dB كما أن قيمة الكفاءة الإشعاعية لها كانت هي الأفضل.

- يمكن دراسة أداء الهوائي من أجل تقنيات تغذية أخرى ومقارنة أدائها.
- إنشاء فتحات (slots) في هوائي الشرائحي المطبوع وملاحظة مدى تأثيرها على بارامترات الهوائي المختلفة وخاصة عرض النطاق الترددي حيث أن الفتحات تعمل على زيادة عرض النطاق.
- اختيار أفضل تقنية تغذية للهوائي واعتمادها في تصميم مصفوفة هوائيات من أجل تحسين الربح.

6-المراجع:

- [1] S. Puri, K.Kaur and N. Kumar, "A Review of Antennas for Wireless Communication Devices", International Journal of Electronics & Electrical Engineering, vol. 2, no. 3, pp. 199-201, September 2014.
- [2] T. S. Rappaport, J. N. Murdock, and F. Gutierrez, "State of the Art in 60-GHz Integrated Circuits and Systems for Wireless Communications," Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 8, pp. 1390–1436, August 2011.
- [3] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna theory and design*, John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [4] S. Chen and J. Zhao, "The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication," in IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 5, pp. 36-43, May 2014.
- [5] T. Kiran, N. Mounisha, Ch. Mythily, D. Akhil, and K. T. v. B. Phani, "Design of Microstrip Patch Antenna for 5G Applications", IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE), vol. 13, no. 1, pp. 14 – 17, 2017.
- [6] غصنة، ف؛ الدنيا، ل، "التغطية اللاسلكية والتوزيع الأمثل للمحطات الميكروية". مجلة جامعة طرطوس، 2019.
- [7] غصنة، ف؛ علي، ل؛ إسماعيل، ل، "التكامل بين شبكات الجيل الخامس وشبكات IOT (إنترنت الأشياء) إمكانية التحقيق وجودة الأداء"، مجلة جامعة طرطوس، 2019.
- [8] A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, New Jersey, 2005.
- [9] P.Praheleka and R.Monika, "Inset Feed Compact Millimeter Wave Microstrip Patch Antenna at 28GHz for Future 5G Application", International Research Journal of Engineering and Technology, vol. 3, no. 4, pp. 180-190, 2019.
- [10] Pozar, D. M. *Microwave Engineering*. John Wiley & Sons, Inc, (2012).
- [11] G.Akanksha, D.Srivastava and J.Saini, "Theoretical Analysis of Gap Coupled Microstrip Patch Antenna", Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 2, no. 4, pp. 198-206, 2017.
- [12] H.Ahmed and H. Reja, "Study of Microstrip Feed Line Patch Antenna"; Eng& Tech Journal, vol. 27, no.2, 2009.
- [13] A.Asthana and R.Vishvakarma, "Analysis of gap-coupled microstrip antenna", International Journal of Electronics, vol. 88, no. 6, pp.707-718, November 2001.