



قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية
شعبة الاتصالات
مقرر معمل تطبيقات الحاسوب والتصميم

Project 2

Microstrip Patch Antenna Design at 5.8 GHz

▼ عمل: عَادة عادل الشَّامي

▼ رقم القيد : 062220014

22 - شوال - 1447 هجري

الملخص:

يهدف هذا المشروع إلى تصميم ومحاكاة هوائي رقعة ميكروستريب مستطيل الشكل يعمل عند تردد قدره 5.8 جيجا هيرتز باستخدام Rogers RT/duroid 5880 كركيزة عازلة. بدأت منهجية العمل بحساب الأبعاد الهندسية نظرياً ثم تنفيذها برمجياً عبر مرحلتين للمقارنة؛ المرحلة الأولى شملت التصميم التقليدي الذي أظهر فشلاً في التوافق بممانعة مفقودة ونسبة موجة واقفة مرتفعة بلغت 3.325. أما المرحلة الثانية فقد تضمنت التعديل باستخدام تقنية التغذية المشطوفة لتحقيق التوافق مع ممانعة 50 أوم، مما أدى لتحسن جذري ونزول معامل الانعكاس تحت مستوى سالب 10 ديسبل. حيث أدى المشروع إلى نجاح التصميم المعدل في تحقيق كسب قدره 6.639 ديسبل آيزوتروبيك وعرض نطاق ترددي يقدر بحوالي 79.1 ميغا هيرتز، مما يؤكد كفاءة التعديل الهندسي في تلبية متطلبات أنظمة الاتصالات الحديثة.

فهرس المحتويات

رقم الصفحة	العنوان	
2	الملخص	
3	فهرس المحتويات	
4	فهرس الأشكال	
5	فهرس الجداول	
6	الفصل الأول : التعريف بهوائي الرقعة الشريطية	1
7	المقدمة	1.1
7	التركيب الهيكلي للهوائي	2.1
8	آلية الإشعاع ومجالات الحافة	3.1
9	تقنيات التغذية وتوافق الممناعة	4.1
9	التغذية المباشرة عند الحافة	1.4.1
9	التغذية المشطوفة	2.4.1
10	مبدأ عمل الهوائي	5.1
11-10	التصميم الرياضي وأبعاد الهوائي	6.1
12	الفصل الثاني : الجزء العملي والمحاكاة	2
13	هيكلية الهوائي والأبعاد	1.2
14-13	محاكاة الحالة الأولى : التغذية المباشرة	2.2
16-15-14	التعليق والنتائج للحالة الأولى	1.2.2
18-17-16	محاكاة الحالة الثانية: التغذية المشطوفة	3.2
20-19-18	التعليق والنتائج للحالة الثانية	1.3.2
21-10	التعليق والمقارنة بين التصميمين	4.2
22	المراجع	

فهرس الأشكال

رقم الشكل	التعريف بالشكل	رقم الصفحة
الشكل 1	المخطط الهندسي العام لهوائي الرقعة الشريطية	7
الشكل 2	الأشكال الهندسية لعناصر الإشعاع في الهوائيات الرقعية الشريطية.	8
الشكل 3	الهيكل الأساسي لهوائي الرقعة الشريطية المستطيل.	8
الشكل 4	آلية الإشعاع في هوائي الرقعة الشريطية موضحة الشقوق الإشعاعية الفعالة وتوزيع المجال عند الحواف	9
الشكل 5	المخطط الهندسي للتصميم المعدل باستخدام خط التغذية المشطوف لتحسين توافق الممانعة.	9
الشكل 6	أبعاد المستوى الأرضي والركيزة العازلة والرقعة المشعة وخط التغذية على التوالي	13
الشكل 7	هيكل هوائي الرقعة بالتغذية المباشرة.	14
الشكل 8	منحنى معامل الانعكاس في التغذية المباشرة .	14
الشكل 9	منحنى معامل الانعكاس في التغذية المباشرة بصورة أقرب.	14
الشكل 10	منحنى معامل نسبة الموجة الواقفة في التغذية المباشرة .	15
الشكل 11	منحنى معامل نسبة الموجة الواقفة بصورة أقرب في التغذية المباشرة .	15
الشكل 12	نمط الإشعاع لهوائي الرقعة الشريطية باستخدام التغذية المباشرة.	15
الشكل 13	معلومات الهوائي منها الكسب والإتجاهية وبعض المعاومات الأخرى المهمة.	16
الشكل 14	أبعاد الشقوق التي تمّ اضافتها في حالة التعديل وهي حالة التغذية المشطوفة.	17
الشكل 15	تصميم الهوائي في حالة التغذية المشطوفة.	17
الشكل 16	توضيح الشقوق في الحالة المشطوفة.	17
الشكل 17	منحنى معامل الانعكاس في الحالة الثانية التغذية المشطوفة.	18
الشكل 18	منحنى معامل الانعكاس في الحالة الثانية التغذية المشطوفة بصورة أوضح.	18
الشكل 19	منحنى نسبة الموجة الواقفة في حالة التغذية المشطوفة.	19
الشكل 20	نمط الإشعاع في حالة التغذية المشطوفة.	19
الشكل 21	بعض البيانات المهمة الأخرى للهوائي منها الإتجاهية والكسب.	19
الشكل 22	توضيح للترددات التي تتقاطع مع -10 dB لكي يتم حساب عرض النطاق الترددي.	20

فهرس الجداول

رقم الصفحة	العنوان	رقم الجدول
13	معاملات ومواصفات المادة العازلة والأبعاد الفيزيائية لهوائي الرقعة المقترح.	1
20	مقارنة النتائج المتحصل عليها في الحالتين	2

الفصل الأول:

التعريف بهوائي الرقعة الشريطية

1.1. المقدمة:

تُعد هوائيات الشريحة الرقعية واحدة من أهم وأكثر أنواع الهوائيات انتشاراً في أنظمة الاتصالات اللاسلكية الحديثة. ظهر هذا النوع من الهوائيات لأول مرة في الخمسينيات، ولكن استخدامه الفعلي والتطوير عليه بدأ بشكل واسع في السبعينيات مع تطور تقنيات الدوائر المطبوعة (PCB). يتميز هذا الهوائي بشكله المسطح، مما يجعله مثالياً للتطبيقات التي تتطلب هوائيات مدمجة لا تبرز بشكل كبير عن سطح الأجهزة.

2.1. التركيب الهيكلي للهوائي:

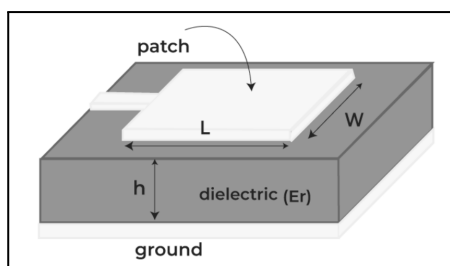
يتكون هوائي المايكروستريب بشكل أساسي من ثلاث طبقات رئيسية كما هو موضح في المراجع العلمية:

1- الرقعة الإشعاعية (Radiating Patch): وهي عبارة عن شريحة معدنية رقيقة (غالباً من النحاس أو الذهب) توضع في أعلى الهوائي. يمكن أن تأخذ هذه الرقعة أشكالاً هندسية مختلفة (مستطيل، مربع، دائرة، مثلث).

2- الركيزة العازلة (Dielectric Substrate): وهي الطبقة الوسطى التي تفصل بين الرقعة والمستوى الأرضي. تلعب خصائص هذه المادة (مثل السماحية الكهربائية والسك) دوراً حاسماً في تحديد حجم الهوائي وكفاءته وعرض النطاق الترددي الخاص به.

3- المستوى الأرضي (Ground Plane): طبقة معدنية تغطي الجزء السفلي بالكامل، وتعمل كسطح عاكس يوجه الإشعاع الكهرومغناطيسي إلى الأعلى.

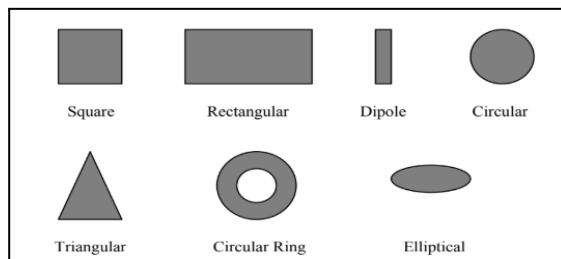
يوضح الشكل (1) المتغيرات الهندسية الأساسية لأي هوائي شريحة رقعية. حيث يمثل المتغير W العرض الكلي للرقعة، ويمثل L طولها الفعلي. يتم تحديد هذه الأبعاد بشكل رئيسي بناءً على تردد الرنين المستهدف للهوائي بالإضافة إلى الخصائص الكهربائية للركيزة العازلة مثل السماحية الكهربائية والسك، كما يوضح المخطط بشكل عام نقطة اتصال خط التغذية بالرقعة، وهي النقطة الحرجة التي تتطلب ضبطاً دقيقاً للممانعة لضمان انتقال الإشارة الكهرومغناطيسية بكفاءة عالية دون ارتداد.



الشكل (1): المخطط الهندسي العام يوضح الأبعاد الأساسية لهوائي الشريحة الرقعية.

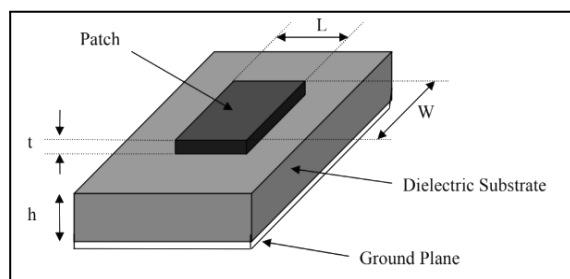
يوضح الشكل (2) التصميم الهندسي الشائعة لعناصر الإشعاع المستخدمة في بناء الهوائيات الرقعية تعتمد خصائص الهوائي الإشعاعية، مثل النطاق الترددي (Bandwidth)، والكسب (Gain)، ونمط الإشعاع (Radiation Pattern)، بشكل مباشر على الشكل الهندسي للعنصر المشع. فبينما يُعد الشكل المربع والمستطيل الأكثر شيوعاً لبساطة تصميمهما وتوافقهما مع تطبيقات الترددات المختلفة،

تُستخدم الأشكال الأخرى مثل الدائري، والحلقي، والإهليلجي لتلبية متطلبات تصميمية خاصة، كتقليل الحجم أو تحقيق خصائص إشعاعية محددة.



الشكل (2): الأشكال الهندسية لعناصر الإشعاع في الهوائيات الرقعية الشريطية.

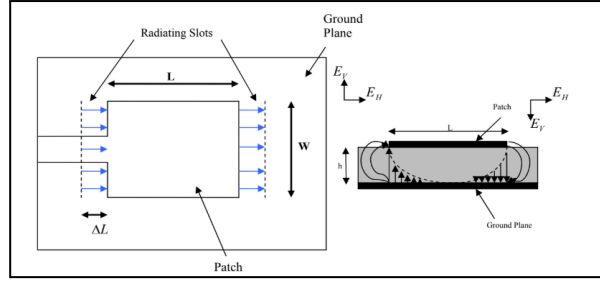
حيث ما سيتم تصميمه في هذا المشروع وتفصيله هو عنصر إشعاع مستطيل الشكل (3) يوضح الهيكل الأساسي لهوائي الرقعة الشريطية المستطيل.



الشكل (3): الهيكل الأساسي لهوائي الرقعة الشريطية المستطيل.

3.1. آلية الإشعاع ومجالات الحافة:

لا تشع الرقعة المعدنية الموجات الكهرومغناطيسية من سطحها الموصل، بل يحدث الإشعاع بشكل رئيسي عند حوافها. فعند تغذية الهوائي بإشارة عالية التردد، تتولد خطوط مجال كهربائي بين الرقعة والمستوى الأرضي. عند الحواف، لا تنتهي هذه الخطوط بشكل عمودي مباشر، بل تنحني وتنتشر في الفراغ المحيط قبل وصولها للمستوى الأرضي؛ وتُعرف هذه الظاهرة باسم "المجالات الهامشية". وبما أن هذه المجالات تمتد في الهواء والركيزة معاً، فإنها تجعل الرقعة تبدو كهربائياً أطول من أبعادها الفيزيائية، وهذه المجالات هي المسؤول الأول عن حدوث الإشعاع الكهرومغناطيسي الفعلي للهوائي والشكل (4) يوضح هذه الآلية.



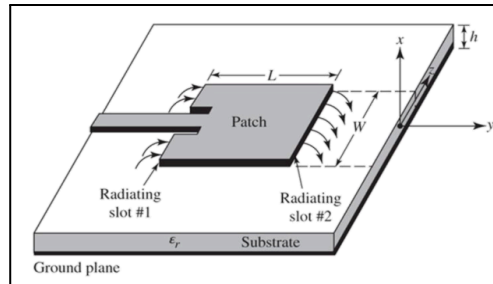
الشكل (4): آلية الإشعاع في هوائي الرقعة الشريطية موضحة الشقوق الإشعاعية الفعالة وتوزيع المجال عند الحواف.

4.1. تقنيات التغذية وتوافق الممانعة:

تعتبر طريقة تغذية الهوائي عاملاً حاسماً في كفاءته. الهدف الأساسي هو تحقيق "توافق الممانعة" بين خط التغذية (والذي يكون عادةً ذو ممانعة 50 أوم) والرقعة المشعة. في هذا المشروع، حيث سيتم دراسة تقنية التغذية المباشرة وتعديلها:

1.4.1. التغذية المباشرة عند الحافة: في هذا التصميم المبدئي، يتصل خط التغذية النحاسي مباشرة بحافة الرقعة المشعة الخارجية. العيب الرئيسي في هذه الطريقة هو أن ممانعة حافة الرقعة تكون عالية جداً مقارنة بخط التغذية، مما يؤدي إلى حدوث تغير مفاجئ في الممانعة. هذا التغير يسبب انعكاساً لجزء كبير من الإشارة وضعفاً في كفاءة الهوائي.

2.4.1. التغذية المشطوفة: للتغلب على مشكلة عدم التوافق، تم اللجوء إلى تعديل هندسي يُعرف بالتغذية المشطوفة. يعتمد هذا التعديل على إحداث شقين (فتحتين) في حافة الرقعة المشعة وإدخال خط التغذية مسافة معينة داخل الرقعة. علمياً، تقل الممانعة تدريجياً كلما اتجهنا من حافة الرقعة نحو مركزها. بالتالي، يتم حساب عمق هذه الشقوق بدقة للوصول إلى النقطة التي تكون عندها ممانعة الرقعة مساوية تماماً لممانعة خط التغذية (50 أوم). هذا التعديل يقلل الانعكاسات بشكل جذري ويحسن من قيمة معامل الانعكاس (S_{11}) ونسبة الموجة الموقوفة (VSWR).



الشكل (5): المخطط الهندسي للتصميم المعدل باستخدام خط التغذية المشطوف لتحسين توافق الممانعة.

5.1. مبدأ عمل الهوائي:

▼ في حالة التغذية المباشرة عند الحافة:

عندما نقوم بتغذية الهوائي بإشارة كهرومغناطيسية عبر خط النقل (الذي يمتلك ممانعة قياسية تساوي 50 أوم)، تصل الإشارة إلى حافة الرقعة المشعة. فيزيائياً، التيار الكهربائي يكون في أدنى مستوياته عند حواف الرقعة، بينما يكون الجهد في أعلى مستوياته، مما يعني أن الممانعة (Impedance) عند الحافة تكون عالية جداً (تتراوح عادة بين 150 إلى 300 أوم).

هذا الاختلاف الكبير بين ممانعة خط التغذية وممانعة حافة الرقعة يؤدي إلى حدوث ما يُعرف بـ "عدم توافق الممانعة" (Impedance Mismatch). نتيجه هي ارتداد (انعكاس) جزء كبير من طاقة الإشارة إلى المصدر وعدم إشعاعها في الفضاء، وهذا ما يفسر ضعف معامل الانعكاس قبل التعديل.

▼ في حالة التغذية المشطوفة:

ممانعة الرقعة ليست ثابتة؛ فهي تكون في أقصى قيمتها عند الحواف وتقل تدريجياً كلما اتجهنا نحو مركز الرقعة حتى تصل إلى الصفر في المنتصف.

بناءً على ذلك، يتم عمل شقين في الرقعة وإدخال خط التغذية إلى مسافة معينة للداخل الهدف من إدخال الخط هو الوصول إلى النقطة الدقيقة التي تنخفض فيها ممانعة الرقعة لتتساوى تماماً مع ممانعة خط التغذية (50 أوم). عند هذه النقطة، يحدث "التوافق التام"، وتنتقل الإشارة الكهرومغناطيسية بسلاسة تامة دون أي ارتداد، مما يؤدي إلى انخفاض حاد في منحنى (S_{11}) وزيادة كفاءة الإشعاع إلى أقصى حد.

7.1. التصميم الرياضي وأبعاد الهوائي:

يتم حساب الأبعاد المبدئية للهوائي باستخدام "نموذج خط النقل"، وتعتمد هذه الحسابات على ثلاثة مدخلات رئيسية:

- 1- تردد الرنين المستهدف.
- 2- السماحية الكهربائية لطبقة العازل.
- 3- سمك الركيزة العازلة.

▼ أولاً: حساب عرض الرقعة الإشعاعية (W):

يتم حسابه للحصول على كفاءة إشعاع جيدة باستخدام المعادلة التالية، حيث c هي سرعة الضوء في الفراغ، وتُعطى معادلته كالتالي:

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$
$$W = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 5.8 \times 10^8} \sqrt{\frac{2}{2.2 + 1}}$$
$$W = 0.02044m = 20.44 \text{ mm}$$

▼ ثانياً: حساب ثابت العزل الفعال (ϵ_{reff}):

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-0.5}$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{3.2}{2} + \frac{1.2}{2} \left(1 + 12 \frac{0.787}{20.44}\right)^{-0.5}$$

$$\epsilon_{reff} = 2.096$$

▼ ثالثاً: حساب الزيادة الوهمية في الطول (ΔL):

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

$$\Delta L = 0.412(0.787) \frac{(2.096 + 0.3)(25.97 + 0.264)}{(2.096 + 0.258)(25.97 + 0.8)}$$

$$\Delta L = 0.413 \text{ mm}$$

▼ رابعاً: حساب الطول الفعلي للرقعة (L):

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L$$

$$L = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 5.8 \times 10^9 \sqrt{2.096}} - 2(0.413 \times 10^{-3})$$

$$L = 17.04 \text{ mm}$$

▼ خامساً: حساب أبعاد الركيزة والمستوى الأرضي (L_g) و (W_g):

يتم إضافة ما لا يقل عن 6h للطول والعرض لضمان عمل الهوائي بكفاءة:

$$L_g = L + 6h = 17.04 + 6(0.787) = 21.76 \text{ mm}$$

$$W_g = W + 6h = 20.44 + 6(0.787) = 25.16 \text{ mm}$$

▼ سادساً: حساب عرض خط التغذية (W_f):

للوصول إلى ممانعة 50 أوم مع مادة Rogers 5880 ($\epsilon_r = 2.2$) المعادلة التقريبية تعطي النسبة:

$$\frac{W_f}{h} \approx 3.08$$

$$W_f = 3.08 \times 0.787 = 2.42 \text{ mm}$$

الفصل الثاني: الجانب العملي والمحاكاة

1.2. هيكليّة الهوائي والأبعاد:

حيث تمّ التصميم بالقيم الموضح بالجدول (1):

الجدول (1): معاملات ومواصفات المادة العازلة والأبعاد الفيزيائية لهوائي الرقعة المقترح.

البارامتر	الرمز	القيمة
التردد	f_r	5.8 GHz
ثابت العزل	ϵ_r	2.2
سمك العازل	h	0.787 mm
سمك الموصل	t	0.01 mm
ظل الفقد	$\tan\delta$	0.0009

2.2 محاكاة الحالة الأولى (حالة التغذية المباشرة):

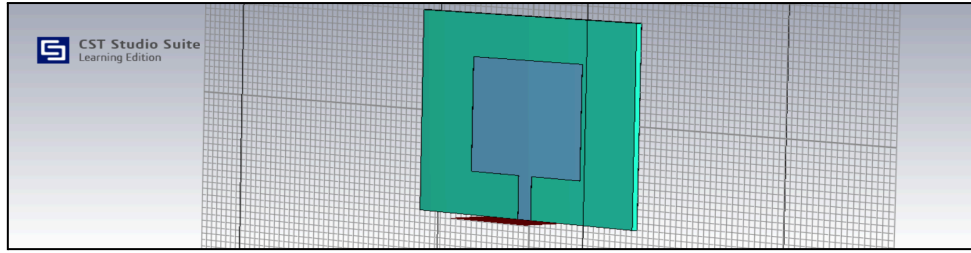
The figure shows four screenshots of a simulation software interface, likely for a microstrip antenna simulation. Each screenshot displays a grid of dimensions (Xmin, Xmax, Ymin, Ymax, Zmin, Zmax) and material selection (Component, Material). The settings vary across the four screenshots, representing different simulation configurations.

Parameter	Screenshot 1	Screenshot 2	Screenshot 3	Screenshot 4
Xmin	-1.2	-10.225	-20	-20
Xmax	1.2	10.225	20	20
Ymin	-15	-8.515	-15	-15
Ymax	-8.515	8.515	15	15
Zmin	0.797	0.797	0.01	0
Zmax	0.807	0.807	0.797	0.01
Component	component1	component1	component1	component1
Material	Copper (annealed)	Copper (annealed)	Rogers RT-duroid 5880 (lossy)	Copper (annealed)

الشكل (6): أبعاد المستوى الأرضي والركيزة العازلة والرقعة المُشعة وخط التغذية على التوالي.

توضّح الأشكال السابقة قيم الأبعاد التي تم ادخالها لكل من المستوى الأرضي والركيزة العازلة والرقعة المُشعة وخط التغذية على التوالي من اليمين إلى اليسار، حيث مادة كل عنصر موضحة بالشكل مع أبعاده، حيث تم اختيار مادة Rogers RT/Duroid 5880 نظراً لانخفاض قيمة ظل الفقد إلى 0.0009 وثبات سماحيّتها الكهربائيّة، مما يضمن تقليل الفقد الحراري والحصول على أقصى كفاءة إشعاعية ممكنة عند ترددات الـ 5 جيجا هيرتز.

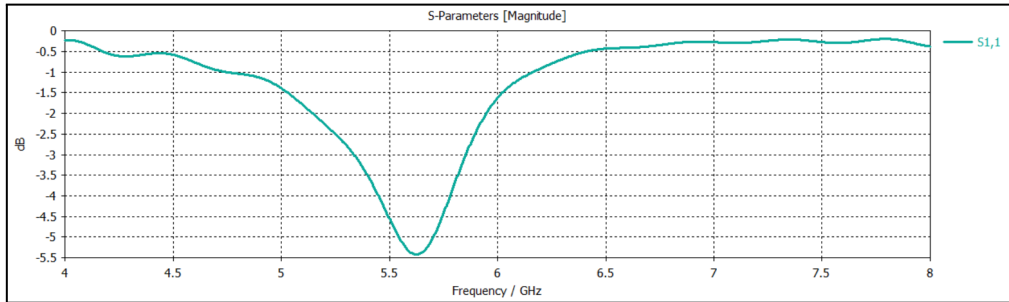
والشكل (7) يوضح شكل الهوائي الذي تمّ تصميمه :



الشكل (7): هيكل هوائي الرقعة بالتغذية المباشرة.

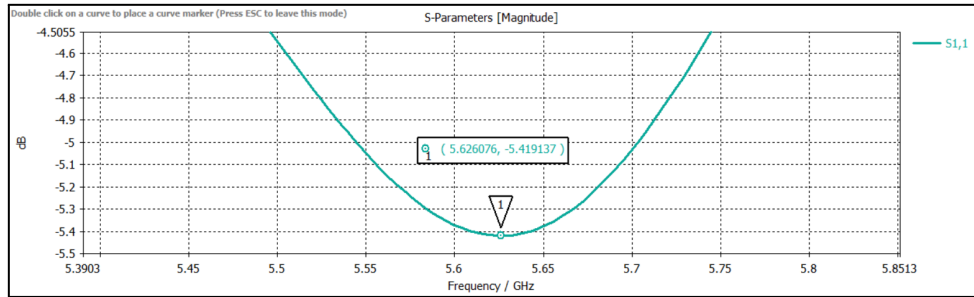
1.2.2. التعليق والنتائج:

- منحنى معامل الانعكاس S_{11} :



الشكل (8): منحنى معامل الانعكاس S_{11} في التغذية المباشرة .

وبشكل أقرب:



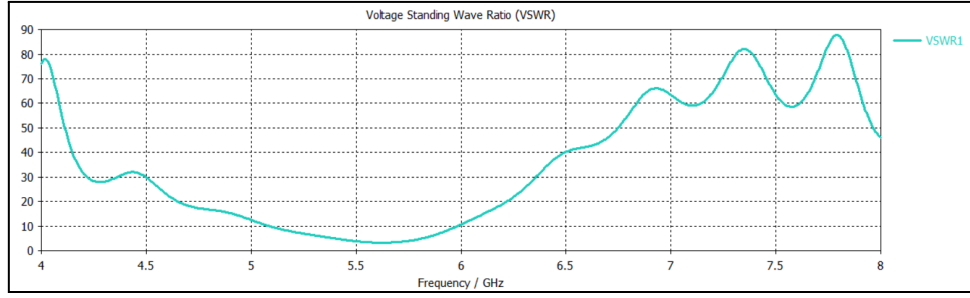
الشكل (9): منحنى معامل الانعكاس في التغذية المباشرة بصورة أقرب

▼ **ونلاحظ الآتي:**

ضعف التوافق حيث أنّ قيمة S_{11} وصلت فقط إلى حوالي -5.5dB عند التردد 5.62 جيجا هيرتز، فكما نعلم أنه يجب أن يكون S_{11} أقل من -10dB ليعتبر الهوائي شغالاً. وصوله إلى -5.5dB فقط يعني أن نسبة كبيرة جداً من الطاقة تنعكس ولا يتم إشعاعها.

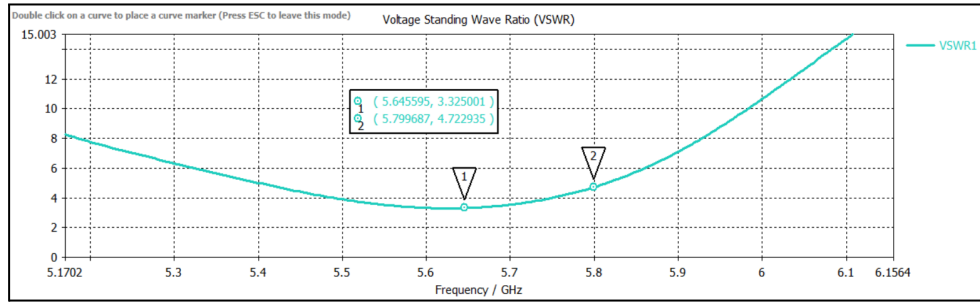
فهذا يثبت أن التصميم التقليدي يعاني من عدم توافق الممانعة بين خط التغذية والباتشا.

- منحنى معامل نسبة الموجة الواقفة (VSWR):



الشكل (10): منحنى معامل نسبة الموجة الواقفة في التغذية المباشرة .

وبشكل أوضح:

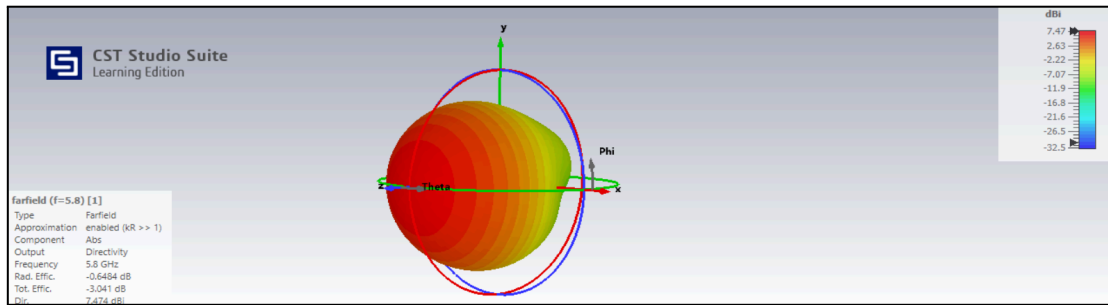


الشكل (11): منحنى معامل نسبة الموجة الواقفة بصورة أقرب في التغذية المباشرة .

▼ ونلاحظ الآتي:

نلاحظ من الصورة أن قيمة VSWR عند التردد 5.8 جيجا هيرتز مرتفعة جداً وتصل إلى 4.72. حيث أن في التصميم المثالي، يجب أن تكون قيمة VSWR أقل من 2. وصول القيمة إلى 4.72 يعني أن الهوائي يعاني من عدم توافق حاد في الممانعة، هذه القيمة العالية تؤدي إلى انعكاس جزء كبير من الطاقة إلى المصدر بدلاً من إشعاعها، وهو ما يفسر سوء قيمة S_{11} التي رأيناها سابقاً.

- نمط الإشعاع والكسب والإتجاهية:



الشكل (12): نمط الإشعاع لهوائي الرقعة الشريحية باستخدام التغذية المباشرة.

farfield (f=5.8) [1]	
Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs
Output	Gain
Frequency	5.8 GHz
Rad. Effic.	-0.6484 dB
Tot. Effic.	-3.041 dB
Gain	6.826 dBi

farfield (f=5.8) [1]	
Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs
Output	Directivity
Frequency	5.8 GHz
Rad. Effic.	-0.6484 dB
Tot. Effic.	-3.041 dB
Dir.	7.474 dBi

الشكل (13): معلومات الهوائي منها الكسب والاتجاهية وبعض المعلومات الأخرى المهمة.

▼ ونلاحظ الآتي:

- قيمة الاتجاهية جيدة جداً لهوائي رقعة، وهي تعبر عن قدرة الهوائي على تركيز الإشعاع في اتجاه معين (المحور Z الموجب كما يظهر في النمط ثلاثي الأبعاد). هذا يعني أن الهيكل الهندسي للباتشا يعمل بشكل صحيح من حيث توجيه الأمواج، لكن المشكلة تظل في كيفية إيصال الطاقة إليها.
- نلاحظ أن الكسب أقل من الاتجاهية بمقدار ملحوظ. الكسب يأخذ في الاعتبار "الفقد" (Losses). الفرق بين الاتجاهية والكسب هنا يعود جزئياً إلى كفاءة الإشعاع المتأثرة بعدم التوافق.
- هذه القيمة جيدة جداً كفاءة معدنية وعازلة (تساوي حوالي 86%)، مما يعني أن مادة Rogers 5880 التي اخترناها ممتازة جداً في تقليل الفقد الحراري.
- في التصميم هنا، المنحنى وصل فقط إلى -5.5dB أي أن لا نحسب عرض النطاق إلا للجزء من المنحنى الذي يقع تحت مستوى -10dB.

3.2. محاكاة الحالة الثانية (التغذية المشطوفة):

حيث تم استخدام نفس الأبعاد لكل من المستوى الأرضي والركيزة العازلة والرقعة المشعة وخط التغذية وتوضّح الأشكال أدناه قيم أبعاد الشقوق التي تم اضافتها:

Xmin:	Xmax:
-1.7	-1.2
Ymin:	Ymax:
-8.515	-4.015
Zmin:	Zmax:
0.797	0.807
Component:	
component1	
Material:	
Copper (annealed)	

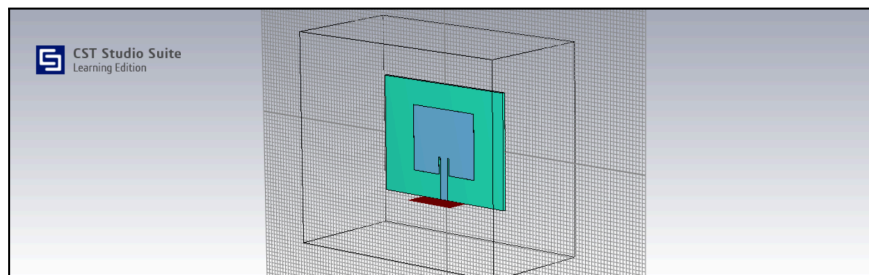
Xmin:	Xmax:
1.2	1.7
Ymin:	Ymax:
-8.515	-4.015
Zmin:	Zmax:
0.797	0.807
Component:	
component1	
Material:	
Copper (annealed)	

الشكل (14): أبعاد الشقوق التي تمّ اضافتها في حالة التعديل وهي حالة التغذية المشطوفة.

حيثُ لم نكتفِ بإيصال الخط للحافة، بل جعلناه "يخترق" جسم الرقعة لمسافة معينة (قمنا بتعديل الطول فقط) كالتالي:

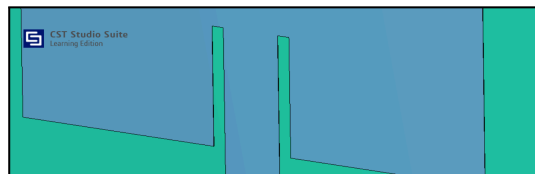
Xmin:	Xmax:
-1.2	1.2
Ymin:	Ymax:
-15	-4.015
Zmin:	Zmax:
0.797	0.807
Component:	
component1	
Material:	
Copper (annealed)	

حيثُ ما تمّ ملاحظته عند التصميم عندما كانت الشقوق "غير طويلة بما يكفي"، لم يصل خط التغذية إلى النقطة التي تتساوى فيها ممانعة الرقعة مع ممانعة الخط البالغة 50 أوم. هذا يعني أن الهوائي لا يزال يعمل في منطقة ذات ممانعة عالية نسبياً، مما أبقى قيمة معامل الانعكاس S_{11} أعلى من -10 ديسبل. تم الحصول على الشكل التالي:



الشكل (15): تصميم الهوائي في حالة التغذية المشطوفة.

والشكل أدناه يوضّح الشقوق بشكل أقرب:

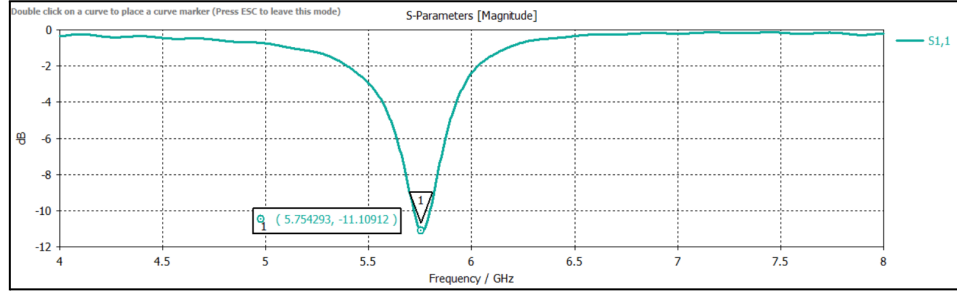


الشكل (16): توضيح الشقوق في الحالة المشطوفة.

نلاحظ في الصورة أن خط التغذية (Feed Line) لم يعد يتوقف عند حافة الرقعة (Patch)، بل "يدخل" لمسافة معينة داخلها عبر شقين جانبيين، حيث أن سبب التعديل أن ممانعة الرقعة عند الحافة تكون عالية جداً (تصل لـ 300-200 أوم)، بينما خط التغذية ممانعته 50 أوم. بالدخول إلى عمق الرقعة، نحن نبعد عن النقطة التي تكون فيها ممانعة الرقعة 50 أوم بالضبط لتحقيق أقصى نقل للطاقة.

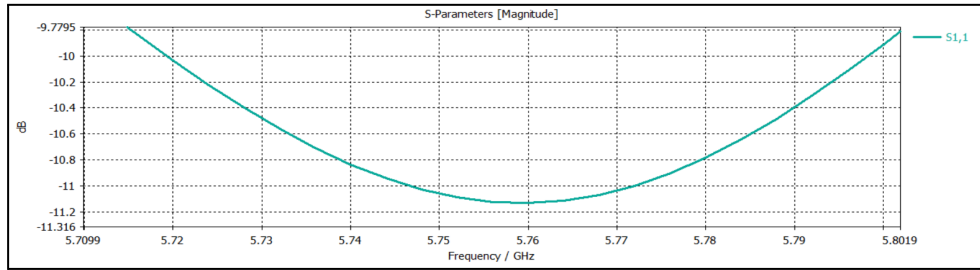
1.3.2. التعليق والنتائج:

- منحنى معامل الإنعكاس S_{11} :



الشكل (17): منحنى معامل الإنعكاس في الحالة الثانية التغذية المشطوفة.

وبشكل أقرب:

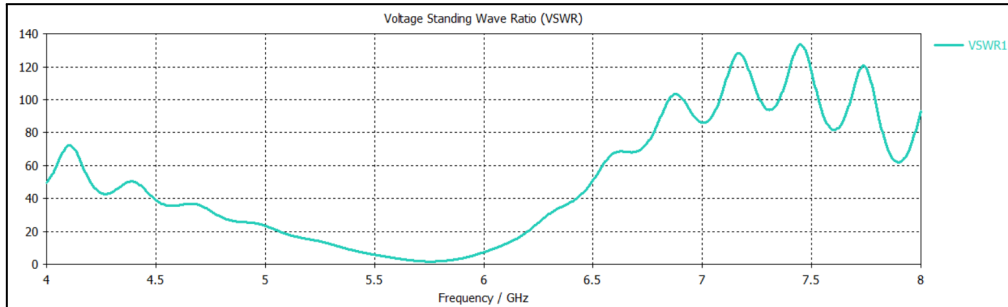


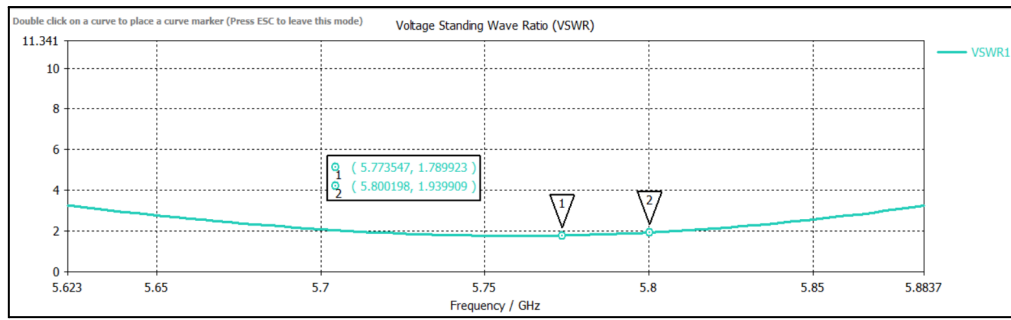
الشكل (18): منحنى معامل الإنعكاس في الحالة الثانية التغذية المشطوفة بصورة أوضح.

▼ ونلاحظ الآتي:

تحسناً هائلاً، حيث نزل المنحنى تحت مستوى -10dB ليصل إلى تردد الرنين بدقة عند 5.75 جيجا هيرتز هذا يعني أن الهوائي أصبح "متوافقاً" الآن، والطاقة تمر بسلاسة من الكيبل إلى الرقعة المشعة.

- منحنى معامل نسبة الموجة الواقفة (VSWR):



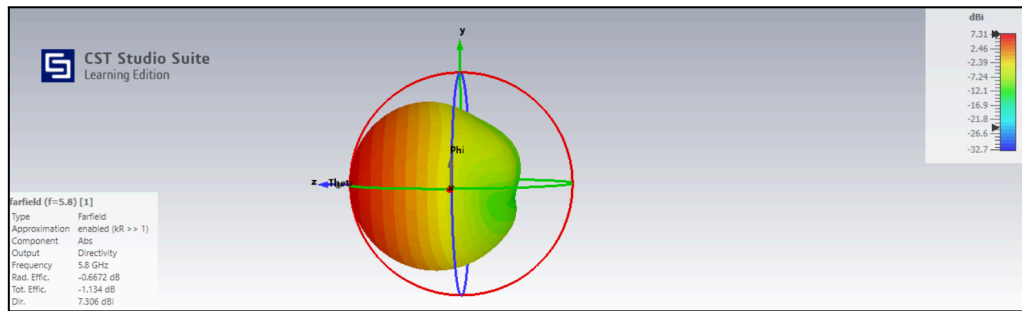


الشكل (19): منحني نسبة الموجة الواقفة في حالة التغذية المشطوفة.

▼ ونلاحظ الآتي:

من العلامة (Marker 1) أن القيمة انخفضت من 4.72 (قبل التعديل) لتصبح 1.71 عند التردد المطلوب، أي قيمة VSWR أقل من 2 تعتبر ناجحة جداً ومقبولة عالمياً في تصنيع الهوائيات. هذا يؤكد أن التعديل أتى بثماره.

- نمط الإشعاع والكسب والإتجاهية:



الشكل (20): نمط الإشعاع في حالة التغذية المشطوفة.

farfield (f=5.8) [1]	
Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs
Output	Gain
Frequency	5.8 GHz
Rad. Effic.	-0.6672 dB
Tot. Effic.	-1.134 dB
Gain	6.639 dBi

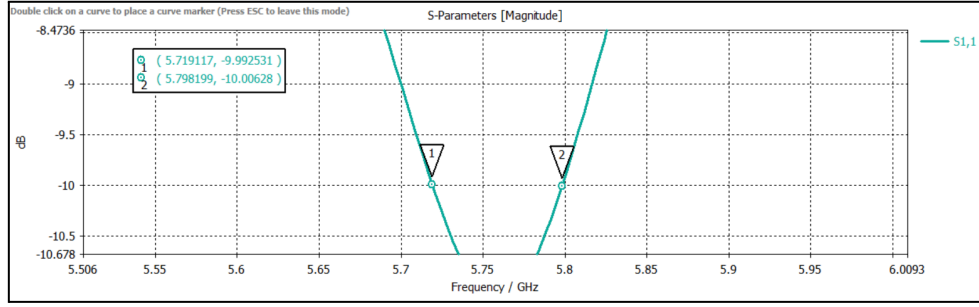
farfield (f=5.8) [1]	
Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs
Output	Directivity
Frequency	5.8 GHz
Rad. Effic.	-0.6672 dB
Tot. Effic.	-1.134 dB
Dir.	7.306 dBi

الشكل (21): بعض البيانات المهمة الأخرى للهوائي منها الإتجاهية والكسب.

▼ ونلاحظ الآتي:

ظهر الفص الرئيسي بوضوح باللون الأحمر في الاتجاه العمودي، حيث أن التعديل حافظ على خصائص التوجيه للهوائي بل وجعل توزيع الطاقة أكثر كفاءة، حيث تتركز الطاقة في الاتجاه المطلوب للاتصال.

- حساب عرض النطاق الترددي (BW):



الشكل (22): توضيح للترددات التي تتقاطع مع -10 dB لكي يتم حساب عرض النطاق الترددي.

$$BW = f_H - f_L = 5.7982 - 5.7191 = 0.0791 \text{ GHz} \approx 79.1 \text{ MHz}$$

حيث أن عرض النطاق النسبي:

$$BW\% = \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100 = 1.37\%$$

يظهر التصميم المعدل عرض نطاق ترددي تشغيلي يصل إلى 79.4 ميغا هيرتز عند مستوى -10dB. هذا النطاق كافٍ تماماً للتطبيقات المستهدفة، ويؤكد أن إراحة التغذية للداخل (Inset) قد نجحت في مواءمة ممانعة الهوائي عبر مدى ترددي مستقر حول 5.8 ميغا هيرتز.

4.2. التعليق والمقارنة بين التصميمين:

عند تحليل النتائج النهائية، نلاحظ فرقاً جوهرياً في الأداء بين التصميم التقليدي (قبل إضافة الشقوق) وتصميم التغذية المشطوفة (بعد إضافة الشقوق) والجدول (2) يوضح النتائج المتحصل عليها في الحالتين:

الجدول (2): مقارنة النتائج المتحصل عليها في الحالتين.

البارامتر	قبل إضافة الشقوق	بعد إضافة الشقوق
التردد الذي يعمل عنده الهوائي (GHz)	5.626 GHz	5.754 GHz
S_{11} (dB)	-5.42	-11.2
VSWR Frequency / (GHz)	3.325	1.789
الكسب (dBi)	6.826	6.639
الإتجاهية (dBi)	7.474	7.306
الكفاءة الكلية (dB) Tot. Eff	-3.041	-1.134

تُظهر النتائج المحاكاتية للهوائي المقترح تحسناً جوهرياً في الأداء بعد إدخال التعديل الهندسي المتمثل في إضافة الشقوق الإشعاعية، حيث تعكس البيانات الواردة في الجدول مقارنة دقيقة بين أداء الهوائي قبل وبعد هذا التعديل. فمن خلال فحص معامل الانعكاس نلاحظ انخفاضاً ملحوظاً من -5.42 ديسيبل إلى -11.2 ديسيبل، وهو مؤشر تقني قوي على حدوث تحسن كبير في توافق الممانعة داخل الهوائي، مما يقلل بشكل فعال من الطاقة المنعكسة ويزيد من كفاءة التغذية. ويتمشى هذا التحسن مع الانخفاض الذي طرأ على نسبة موجة الجهد الواقف (VSWR)، والتي تراجعت من قيمة 3.325 إلى 1.789، مقترية بذلك من النطاق المثالي الذي يضمن استقراراً أكبر في نقل الطاقة. وفي الوقت نفسه، حافظ الهوائي على كسب مستقر بلغ 6.639 ديسيبل، مما يؤكد أن إضافة الشقوق لم تؤثر سلباً على قدرة الهوائي الإشعاعية، بل ساهمت في تعزيز أدائه العام بشكل عام لتجعل منه تصميمًا أكثر كفاءة ومطابقة عند التردد التشغيلي المطلوب.

أما بالنسبة لعرض النطاق الترددي بين التصميمين تجدر الإشارة إلى أنه تم حساب عرض النطاق الترددي (BW) والعرض النسبي (%BW) للتصميم بعد إضافة الشقوق فقط، وذلك لأن التصميم قبل التعديل لم يحقق شرط التوافق المطلوب $S_{11} < -10\text{dB}$ ، مما يعني أن الهوائي في حالته الأولية كان يعاني من ضعف في مطابقة الممانعة وعدم كفاءة في الإشعاع ضمن النطاق المطلوب. بينما أدى تعديل الشقوق إلى تحقيق التوافق اللازم، مما سمح بتحديد عرض نطاق ترددي فعال يبلغ 79.1MHz ونسبة عرض نطاق قدرها 1.37%.

بالإضافة إلى تحسن معامل الانعكاس، كشفت نتائج المحاكاة عن تحسن ملموس في الكفاءة الكلية للهوائي (Total Efficiency) حيث أصبح "أكثر كفاءة" لأن الكفاءة الكلية ارتفعت من -3.041 إلى -1.134. هذا يعني أن طاقة أقل تضيع داخل الشقوق وطاقة أكثر تخرج منه.

.....

المراجع:

- U. A. Bakshi and A. V. Bakshi, Antennas and Wave Propagation, 1st ed. Pune, India: Technical Publications, 2009.
 - C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2016
-