



قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية  
شُعبة الاتصالات  
مُقرر معمل تطبيقات الحاسوب والتصميم

---

اسم المشروع:

تصميم ومحاكاة هوائي رقعة ميكروستريب ثنائي النطاق عند الترددات ( 4.2GHz  
و6GHz ) باستخدام برنامج CST

عمل الطالبة : غادة عادل الشامي.  
رقم القيد: 062220014

تحت إشراف : د.حسن الديب

ربيع 2025-2026

## الملخص:

يهدف هذا المشروع إلى تقديم حل هندسي وعملي لتخطي عقبة هوائيات الرقعة التي تواجه قيوداً فيزيائية تتمثل في ضيق النطاق الترددي والاستجابة الترددية لتردد رنيني واحد من خلال تصميم ومحاكاة هوائي رقعة ميكروستريب مستطيل ثنائي النطاق (Dual-Band) يعمل بكفاءة عالية عند الترددات المستهدفتين (4.2GHz لتطبيقات النطاق الترددي C-Band و 6GHz لتطبيقات شبكات الواي فاي المتقدمة والاتصالات العريضة) باستخدام برنامج المحاكاة الكهرومغناطيسية CST Microwave Studio.

تعتمد المنهجية المتبعة لتوليد النطاق الترددي الثاني وتعديل مسارات التيارات السطحية على تقنية حفر شقوق جانبية متعددة الأجزاء (Slots) بأبعاد مناسبة بالإضافة إلى دمج حفرة مستطيلة مركزية مفرغة في منتصف الرقعة المشعة، حيث أن الركيزة العازلة من نوع (Rogers\ RT/duroid).

أظهرت نتائج المحاكاة الكهرومغناطيسية نجاحاً بارزاً في تحقيق استجابة رنين دقيقة ومتوازنة؛ حيث استقر التردد الفعلي الأول عند 4.185GHz بمعامل انعكاس ( $S_{11}$ ) قيمته -13.6dB، بينما استقر التردد الثاني بدقة عند 6.015GHz محققاً رنيناً أكثر عمقاً وصلاً إلى -15.29dB. كما أكدت منحنيات نسبة الموجة الواقفة توافقاً هندسياً مثالياً مع خط التغذية القياسي ( $VSWR < 2$ ) محققة 1.65 و1.66 عند الترددات على التوالي. وحافظ الهوائي على نمط إشعاعي توجيهي أمامي مستقر (Broadside Pattern) بكسب متميز بلغ 5.78dBi للنطاق الأول و 3.51dBi للنطاق الثاني، مع استقرار الكفاءة الإجمالية للنظام عند نسبة ممتازة تقارب 70% عبر النطاقين معاً. تُثبت هذه المخرجات كفاءة التصميم المقترح كحل اقتصادي فعال يقلل من تكديس الهوائيات ويسهم في دمج الخدمات اللاسلكية المتعددة داخل منصة فيزيائية موحدة.

## فهرس المحتويات

| رقم الصفحة | العنوان                                                      |       |
|------------|--------------------------------------------------------------|-------|
| 2          | الملخص                                                       |       |
| 3          | فهرس المحتويات                                               |       |
| 4          | فهرس الأشكال                                                 |       |
| 5          | فهرس الجداول                                                 |       |
| 6          | الفصل الأول : المقدمة والتمهيد                               | 1     |
| 7          | المقدمة                                                      | 1.1   |
| 8          | مشكلة البحث                                                  | 2.1   |
| 9          | أهداف المشروع                                                | 3.1   |
| 9          | أهمية المشروع والتطبيقات المستهدفة                           | 4.1   |
| 11         | الفصل الثاني: الجانب النظري والتعريف العام بالهوائي المستخدم | 2     |
| 12         | تمهيد وتعريف عام بهوائيات الرقعة الميكروستريب                | 1.2   |
| 12         | الهيكل الهندسي والطبقات الأساسية                             | 2.2   |
| 13         | نظرية عمل هوائيات الرقعة الميكروستريب                        | 3.2   |
| 14         | معايير اختيار الشكل الهندسي المستطيل الشكل                   | 4.2   |
| 15         | معايير اختيار المادة العازلة وخصائصها                        | 5.3   |
| 15         | تقنية حفر الشقوق وتوليد الرنين ثنائي النطاق                  | 6.3   |
| 17-16      | المعادلات الرياضية للتصميم وتأخير الحواف                     | 7.3   |
| 18         | الفصل الثالث : المنهجية والتصميم الهندسي                     | 3     |
| 19         | منهجية التصميم ومراحل العمل                                  | 1.3   |
| 21-20-19   | النموذج الهندسي المستخدم وأبعاد الهوائي                      | 1.1.3 |
| 22         | خصائص مادة الركيزة العازلة المعتمدة                          | 2.3   |
| 24-23      | إعدادات المحاكاة والدقة في برنامج CST                        | 3.3   |

|          |                                                                   |       |
|----------|-------------------------------------------------------------------|-------|
| 25       | الفصل الرابع: النتائج والمناقشة                                   | 4     |
| 26       | تمهيد                                                             | 1.4   |
| 27-26    | منحنى معامل الانعكاس $S_{11}$                                     | 2.4   |
| 28-27    | منحنى نسبة الموجة الواقفة VSWR                                    | 3.4   |
| 28       | نمط الإشعاع ومعاملات الإشعاع البعيد                               | 4.4   |
| 30-29-28 | نمط الإشعاع ومعاملات الإشعاع البعيد عند تردد التشغيل الأول 4.2GHz | 1.4.4 |
| 33-32-31 | نمط الإشعاع ومعاملات الإشعاع البعيد عند تردد التشغيل الأول 6GHz   | 2.4.4 |
| 34       | الاستنتاجات والتوصيات المستقبلية                                  | 5     |
| 35       | المراجع                                                           | 6     |

## فهرس الأشكال

| رقم الشكل | التعريف الشكل                                                           | رقم الصفحة |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1         | البنية الهندسية والطبقات الثلاث لهوائي الرقعة الميكروستريب التقليدي.    | 14         |
| 2         | الأشكال الهندسية لعناصر الإشعاع في هوائيات الرقعة الشريطية.             | 15         |
| 3         | النموذج الهندسي للشكل المستخدم موضحاً عليه الأبعاد لكل قطعة في الهوائي  | 22         |
| 4         | النموذج الهندسي الكامل للشكل النهائي الذي تم بناءه ببرنامج CST          | 22         |
| 5         | منحنى معامل الانعكاس ويظهر رنين الهوائي عند الترددين (4.2GHz) و (6GHz). | 25         |
| 6         | منحنى نسبة الإشارة الواقعة VSWR                                         | 26         |
| 7         | مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد والخصائص الإشعاعية للهوائي عند تردد 4.2GHz   | 28         |
| 8         | مؤشرات الكفاءة الإشعاعية والكلية للهوائي عند تردد 4.2GHz                | 29         |
| 9         | مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد والخصائص الإشعاعية للهوائي عند تردد 6GHz     | 30         |
| 10        | مؤشرات الكفاءة الإشعاعية والكلية للهوائي عند تردد 6GHz                  | 31         |

## فهرس الجداول

| رقم الصفحة | العنوان                                                     | رقم الجدول |
|------------|-------------------------------------------------------------|------------|
| 21         | أبعاد الهوائي وبارامترات التصميم باستخدام الحسابات النظرية. | 1          |
| 22         | أبعاد الهوائي وبارامترات التصميم.                           | 2          |

## الفصل الأول:

### المقدمة والتمهيد

## 1.1 المقدمة:

تواجه أنظمة الاتصالات اللاسلكية المعاصرة قفزات تكنولوجية متسارعة، فرضت حاجة ماسة لابتكار أجهزة اتصالات مدمجة البنية، خفيفة الوزن، وعالية الكفاءة، ولها القدرة على التمرير الترددي المتعدد في آنٍ واحد. وفي هذا السياق، يبرز الهوائي كعنصر سيادي ومحوري يشكل الواجهة الأمامية الأساسية لعمليات إرسال واستقبال الإشارات الكهرومغناطيسية [1]. ومن بين المنظومات الهوائية المتنوعة، اعتلت هوائيات الرقعة الميكروستريب (Microstrip Patch Antennas) مكانة ريادية كخيار تكنولوجي مفضل في التطبيقات المحمولة وأنظمة الاتصالات الفضائية؛ نظراً لجودها الاقتصادية المنخفضة، مرونة تصنيعها، وتوافقها الهيكلي العالي مع الدوائر المتكاملة للميكروويف [2].

في بنيتها الكلاسيكية المبسطة، يتألف الهوائي الميكروستريب من رقعة معدنية مشعة (Patch) مستقرة فوق طبقة عازلة وسطى (Substrate) مدعومة بطبقة أرضية معدنية سفلية (Ground Plane).

بالرغم من هذه المزايا الواعدة، تعاني التصميمات التقليدية من قيود فيزيائية جوهرية، أبرزها ضيق نطاق الحزمة الترددية (Narrow Bandwidth) والاستجابة لتردد رنيني أحادي فقط. ولتخطي هذه العقبات وتلبيةً لمتطلبات الأنظمة الحديثة التي تدمج خدمات اتصالات متعددة فوق منصة برمجية موحدة (مثل تطبيقات C-band وشبكات Wi-Fi العريضة)، بات توجه المهندسين نحو تصميم الهوائيات ثنائية النطاق (Dual-Band Antennas) خياراً استراتيجياً وحتماً. يسهم هذا التوجه في إلغاء الحاجة لدمج هوائيين مستقلين، مما يقلل بشكل قطعي من الحجم الفيزيائي الإجمالي للجهاز الترددي، ويحد من مفقودات الإشارة والتداخل الكهرومغناطيسي المتبادل [2],[3].

## 2.1 مشكلة البحث:

في بنيته الكلاسيكية المبسطة، يتألف هوائي الميكروستريب التقليدي من رقعة معدنية مشعة (Patch) مستقرة فوق طبقة عازلة وسطى تُعرف بالركيزة (Substrate) مدعومة بطبقة أرضية معدنية سفلية (Ground Plane). بالرغم من هذه المزايا الواعدة، تعاني التصميم الكلاسيكية التقليدية من قيود فيزيائية جوهرية تحد من استخدامها المباشر في الأنظمة الحديثة، وأبرز هذه القيود:

1. ضيق نطاق الحزمة الترددية (Narrow Bandwidth): حيث لا يتعدى نطاق التردد في

الهوائيات التقليدية بضعة نسب مئوية من التردد المركزي، بسبب طبيعة عمل الهوائي كتجويف رنيني عالي الجودة يقيد تمرير الإشارات واهتزازها الترددي [1]، [2].

2. الاستجابة لتردد رنيني أحادي فقط (Single Resonant Frequency): يرتبط تردد الرنين

بشكل صارم بالأبعاد الفيزيائية الخارجية للرقعة، مما يجعله غير قادر على الاستجابة إلا لحزمة ضيقة جداً حول التردد المحسوب سلفاً بناءً على النمط الكهرومغناطيسي المهيمن [1]، [3].

وللتغلب على هذه المعضلة وتلبية متطلبات الأنظمة الحديثة التي تدمج خدمات اتصالات متباعدة فوق منصة فيزيائية واحدة (مثل تطبيقات C-band وشبكات Wi-Fi العريضة)، أصبح تصميم الهوائيات ثنائية النطاق (Dual-Band Antennas) ضرورة هندسية وحتمية [3]. يساعد هذا التوجه في إلغاء الحاجة لدمج هوائيين مستقلين داخل الجهاز الواحد، مما يقلل بشكل قطعي من المساحة المحجوزة على لوحة الدائرة المطبوعة (PCB)، ويحد من مفقودات الإشارة والتداخل الكهرومغناطيسي المتبادل (Mutual Coupling) الذي يتلف جودة الاتصال ويسبب تدهور الأداء اللاسلكي [3]، [4].

### 3.1 أهداف المشروع:

يتمحور هذا المشروع حول تحقيق الأهداف الهندسية والتقنية التالية:

1. تصميم ونمذجة هوائي رقعة ميكروستريب مدمج البنية وله القدرة على العمل بكفاءة عالية كهوائي ثنائي النطاق (Dual-Band Antenna).
2. تحقيق رنين ترددات دقيق يستهدف النطاقين 4.2GHz و 6GHz لتلبية متطلبات أجهزة اتصالات الجيل الحديث والشبكات العريضة.
3. دراسة وتطبيق تقنيات حفر الشقوق (Slots) والحفرة المركزية على الرقعة المشعة لمعرفة مدى تأثيرها على تعديل مسارات التيارات السطحية وتوليد الرنين الثاني.
4. مطابقة ممانعة خط التغذية للهوائي هندسياً وبرمجياً لتستقر بدقة عند القيمة القياسية لتقليل معاملات الانعكاس وتصغير ارتداد الموجات.

### 4.1 أهمية المشروع والتطبيقات المستهدفة:

من أهمية هذا البحث في تقديم حل هندسي اقتصادي وعملي لمشكلة تكديس الهوائيات داخل الأجهزة اللاسلكية. فبدلاً من استخدام أنظمة مشعة متعددة، يوفر الهوائي المقترح نقطة تغذية واحدة قادرة على تشغيل نظامين لاسلكيين متباعدين بكفاءة إشعاعية عالية. وتتخلص التطبيقات العملية المستهدفة لهذا الهوائي في:

- **تطبيقات النطاق الترددي (C-Band):** عند تردد 4.2GHz، وهو النطاق الحيوي المستخدم في أنظمة الرادارات البحرية، الملاحة الجوية، وبعض الوصلات اللاسلكية للأقمار الصناعية.

- تطبيقات شبكات الواي فاي والاتصالات العريضة: عند تردد 6GHz، وهو التردد المعتمد حديثاً في بروتوكولات شبكات الاتصال اللاسلكي السريعة والمتقدمة لنقل البيانات بكثافة وعرض حزمة عريض.

## الفصل الثاني:

الجانب النظري والتعريف العام بالهوائي المستخدم

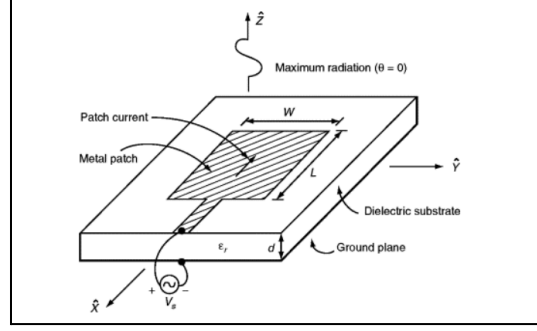
## 1.2 تمهيد وتعريف عام بهوائيات الرقعة الميكروستريب:

تُصنف هوائيات الرقعة الميكروستريب (Microstrip Patch Antennas) كواحدة من أهم الابتكارات التكنولوجية في هندسة الاتصالات اللاسلكية الحديثة، تتميز هذه الهوائيات ببنيتها اللوحية المستوية وخفة وزنها، مما يجعلها الخيار المثالي للتكامل مع الأنظمة المحمولة، الهواتف الذكية، الطائرات، والمنظومات الفضائية حيث تكون المساحة والوزن قيوداً حرجية للتصميم [1],[2].

## 2.2 الهيكل الهندسي والطبقات الأساسية:

يتكون الهوائي الميكروستريب في بنيته الكلاسيكية التقليدية من ثلاث طبقات رئيسية متكاملة كما هو موضح بالشكل (1) وهي [2], [3]:

- الرقعة المشعة العلوية (Radiating Patch): طبقة معدنية رقيقة جداً من مادة موصلة ممتازة (غالباً النحاس Copper)، ويمكن قصّها بأشكال هندسية مختلفة كالدائري أو المستطيل وهو الجزء المسؤول عن إرسال واستقبال الموجات.
- الركيزة العازلة الوسطى (Dielectric Substrate): طبقة تفصل بين الرقعة والأرض، وتتميز بثابت عزل كهربائي وسماكة محددة، وهي المادة التي اخترنا في مشروعنا أن تكون من نوع (Rogers RT/duroid).
- الطبقة الأرضية السفلية (Ground Plane): طبقة معدنية موصلة بالكامل تغطي الهيكل من الأسفل، وتعمل كمرآة عاكسة للمجالات الكهرومغناطيسية لمنع تسرب الموجات للخلف وتوجيه الإشعاع للأعلى.

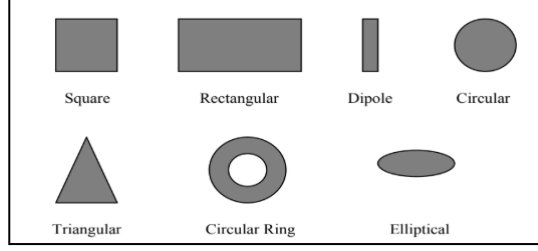


شكل (1): البنية الهندسية والطبقات الثلاث لهوائي الرقعة الميكروستريب التقليدي.

### 3.2 نظرية عمل هوائيات الرقعة الميكروستريب :

يعمل هوائي الرقعة كتجويف رنيني تتوزع فيه المجالات الكهربائية والمغناطيسية بين الرقعة المعدنية العلوية والطبقة الأرضية السفلية عبر المادة العازلة [1]. عند تغذية الهوائي بالطاقة، تتولد شحنات على أطراف الرقعة تؤدي إلى حدوث ظاهرة الإشعاع في الفضاء، وتعتمد كفاءة هذا الإشعاع وعرض النطاق بشكل مباشر على الخصائص الفيزيائية للركيزة العازلة المستعملة وسماكتها [2]..

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 - ب): الأشكال الهندسية لعناصر الإشعاع في الهوائيات الرقعية الشريطية.

#### 4.2 معايير اختيار الشكل الهندسي المستطيل:

تم اعتماد الشكل المستطيل (Rectangular Patch) كبنية أساسية للهوائي المشع بناءً على أسباب نظرية وهندسية جوهرية :

- سهولة التحليل الرياضي والفيزيائي: توزيع التيارات السطحية الكهرومغناطيسية يتبع مسارات خطية واضحة ومحددة، مما يسهل حساب أبعاد الهوائي بدقة مقارنة بالأشكال الدائرية أو المعقدة [1], [2].
- مرونة حفر الشقوق : وضوح مسارات التيار السطحي في الشكل المستطيل يسمح للمصمم بمعرفة المكان الدقيق لحفر الفتحة الداخلية (Slot) لقطع مسار تيار معين وإثارة تردد الرنين الثاني بنجاح [3].
- مطابقة الممانعة: يوفر الشكل المستطيل مرونة عالية جداً في التحكم بممانعة الإدخال وتسهيل خطة مطابقتها مع خط التغذية عند القيمة القياسية 50 أوم.

## 5.2 معايير اختيار المادة العازلة ( Rogers RT/duroid ) وخصائصها:

نظرياً، يؤثر اختيار المادة العازلة (Substrate) مباشرة على كسب الهوائي وكفاءته. تم اختيار مادة

Rogers RT/duroid بدلاً من مادة FR-4 التقليدية نظراً لمعالمها المتقدمة التالية [2], [4]:

- انخفاض عامل فقد المماسي ( $\tan\delta$ ): تمتاز بمفقودات كهرومغناطيسية ضئيلة جداً، مما يمنع

تشتت الطاقة كحرارة داخل الركيزة، ويؤدي مباشرة إلى رفع الكسب (Gain) وكفاءة الإشعاع عند

الترددات العالية [2].

- الاستقرار الترددي العالي: ثابت العزل ( $\epsilon_r$ ) لهذه المادة مستقر تماماً ولا يتغير بتغير التردد أو

درجة الحرارة، وهو عامل حاسم في الهوائيات ثنائية النطاق لضمان دقة الرنين عند الترددتين

المستهدفين ومنع إزاحة الترددات [3], [4].

## 6.2 تقنية حفر الشقوق وتوليد الرنين ثنائي النطاق:

إن إثارة نطاق ترددي ثانٍ (Dual-Band) أو متعدد النطاقات إلى جانب التردد الطبيعي الأول للهوائي

دون زيادة الحجم الفيزيائي الكلي - تعتمد بشكل أساسي على تقنية حفر الشقوق الهندسية.

عند حفر شق أو فتحة داخل الرقعة المشعة أو تعديل جزء منها، يطرأ تغير فيزيائي جوهري على السلوك

الكهرومغناطيسي للهوائي وفق الآليات التالية:

1. تعديل مسارات التيار السطحي : تتحرك التيارات السطحية كهرومغناطيسياً على طول الرقعة.

عند اصطدام هذه التيارات بالشق المحفور، فإنها لا تستطيع عبوره نظراً لخلوه من المادة

الموصلة، فتُجبر كهرومغناطيسياً على الالتفاف والانحراف حول حواف الشق. هذا الانحراف يزيد

من طول المسار الكهربائي الفعال، الذي تسلكه الشحنات. ونظراً لأن التردد يتناسب عكسياً مع طول المسار، فإن المسار الطويل الملتف يُنتج تردد رنين جديد أقل (التردد الأدنى).

2. تركيز التيارات الموضعية: في المقابل، تتركز تيارات أخرى ذات كثافة عالية حول الحواف القريبة والمباشرة للشق، متخذة مساراً كهربائياً قصيراً ومباشراً، وهو المسؤول عن إثارة وتوليد نمط الرنين ذي التردد الأعلى.

3. التحكم في الممانعة وعرض النطاق: تساهم الحفر والشقوق في إدخال ساعات كهربائية وحثية متوزعة مضافة إلى دائرة الهوائي المكافئة. يساعد هذا التأثير في تحسين مطابقة الممانعة عند الترددين معاً، كما يمكن استغلال الشقوق لدمج ترددتين متقاربتين، مما يؤدي إلى زيادة عرض النطاق الترددي الإجمالي.

## 7.2 المعادلات الرياضية للتصميم وتأثير الحواف:

يتم تحديد الأبعاد الفيزيائية النظرية للهوائي المستطيل المقترح بناءً على التردد المركزي المستهدف وثابت العزل للركيزة المستخدمة باستخدام المعادلات القياسية التالية [1], [2]:

1- حساب عرض الرقعة المشعة (W):

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

2- حساب ثابت العزل الفعال ( $\epsilon_{eff}$ ):

نظراً لتداخل المجال الكهربائي بين الركيزة والهواء المحيط (تأثير الحواف)، يتم حساب ثابت العزل الفعال

الذي تمر عبره الموجة كالتالي [1]:

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

3- حساب امتداد الطول الهامشي ( $\Delta L$ ):

نتيجة لتقوس خطوط المجال الكهربائي عند أطراف النحاس، يظهر امتداد وهمي في الطول يُحسب

رياضياً عبر المعادلة التالية:

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

حساب الطول الحقيقي للرقعة ( $L$ ): للحصول على الرنين الدقيق عند التردد المطلوب، يتم طرح الامتداد

الهامشي من الجانبين ( $2\Delta L$ ) من الطول الفعال [1], [2]:

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

## الفصل الثالث:

### المنهجية والتصميم الهندسي

### 1.3 منهجية التصميم ومراحل العمل:

للوصول إلى الهيكل النهائي للهوائي ثنائي النطاق، تم اتباع منهجية هندسية منظمة تعتمد على النمذجة والمحاكاة الكهرومغناطيسية عبر برنامج CST Microwave Studio. وتلخصت هذه المنهجية في مرحلتين أساسيتين متكاملتين [3]:

- المرحلة الأولى (التصميم الابتدائي والتغذية): تشمل حساب الأبعاد الفيزيائية الابتدائية للرقعة المستطيلة نظرياً باستخدام المعادلات الرياضية للتردد المستهدف، يليه بناء الهيكل الأساسي المصمت (الرقعة، الركيزة العازلة، والطبقة الأرضية) داخل بيئة البرنامج، وتحديد طريقة التغذية المناسبة عبر ضبط ممانعة خط التغذية عند القيمة القياسية 50 أوم.
- المرحلة الثانية (التطوير والأمثلة الرقمية): تشمل إدخال تقنية الشقوق الهندسية (Slots) والحفرة المركزية لتوليد النطاق الترددي الثاني، وتطبيق عملية التحسين الرقمي (Optimization) والمسح البارامتري لضبط رنين النطاقين معاً ومطابقة الممانعة بشكل مثالي لتصفير الانعكاسات [3], [4].

#### 1.1.3 النموذج الهندسي المستخدم وأبعاد الهوائي:

يتكون الهيكل الهندسي النهائي للهوائي المقترح ثنائي النطاق من رقعة مشعة مستطيلة الشكل (Rectangular Patch) مدمج بها حفرة مستطيلة مركزية وشقوق تغذية جانبية (Slots) لضمان تحقيق الرنين المطلوب عند الترددين ( 4.2GHz ) و (6GHz). تم بناء هذا النموذج على ركيزة عازلة من نوع Rogers RT/duroid مدعومة بطبقة أرضية كاملة (Full Ground Plane) من الأسفل [2], [3].

يوضح الجدول (1) القيم المحسوبة باستخدام القوانين التي سبق ذكرها أعلاه:

| الوصف                         | القيمة (mm) | الرمز |
|-------------------------------|-------------|-------|
| عرض الرقعة المشعة             | 23.41       | W     |
| طول الرقعة المشعة             | 18          | L     |
| عرض خط التغذية                | 4.84        | $W_f$ |
| عرض الفتحة المستطيلة الداخلية | 25          |       |
| طول الفتحة المستطيلة الداخلية | 20          |       |

الجدول (1): أبعاد الهوائي وبارامترات التصميم باستخدام الحسابات النظرية.

يعتمد بناء الهوائي المقترح كهرومغناطيسياً على دمج ترددي الرنين في مجسم واحد، حيث تم توزيع الأبعاد النظرية وفقاً للفلسفة الهندسية التالية:

1. أبعاد الهيكل الخارجي (الرقعة المشعة الكبرى - Patch): تم حساب الطول والعرض بالكامل بناءً على التردد الأقل 4.2GHz وذلك لأن التردد الأقل يملك طولاً موجياً أكبر، وبالتالي يتطلب حجماً فيزيائياً أكبر للرنين؛ لذلك تحكم أبعاد هذا التردد الهيكل الحاضن الأساسي للهوائي [2].
2. أبعاد التجويف الداخلي (الفتحة المستطيلة - Slot): تم حساب طول الفتحة وعرضها بناءً على التردد الأعلى (6GHz)، وذلك لأن التردد الأعلى يملك طولاً موجياً أقصر، وتعمل الفتحة المفرغة في المنتصف كـ "رنان مغناطيسي ثانٍ" (Slot Resonator) يجبر التيارات السطحية على الدوران حول حوافها، مما يحدث تردد الرنين الثاني دون التأثير على أبعاد النطاق الأول [4].

يوضح الجدول (2) المعالم الهندسية والأبعاد الفيزيائية الدقيقة بالمليمتر (mm) لكافة أجزاء الهوائي التي تم اعتمادها وضبطها داخل برنامج CST Microwave Studio للوصول إلى الأداء المثالي ومطابقة ممانعة التغذية عند القيمة العالمية (50 أوم).

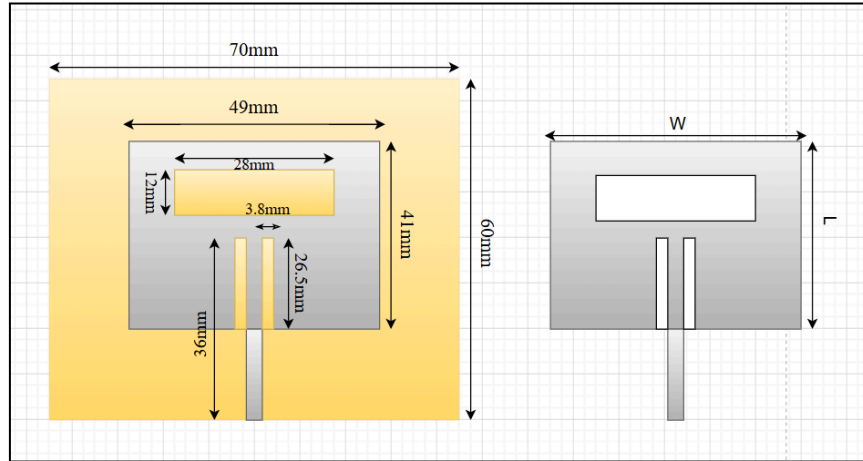
| الوصف                               | القيمة (mm) | الرمز |
|-------------------------------------|-------------|-------|
| عرض الرقعة المشعة                   | 49          | W     |
| طول الرقعة المشعة                   | 41          | L     |
| عرض الطبقة الأرضية والركيزة العازلة | 70          | $W_g$ |
| طول الطبقة الأرضية والركيزة العازلة | 60          | $L_g$ |
| عرض الشقوق الجانبية                 | 3.8         | $W_s$ |
| طول الشقوق الجانبية                 | 26.5        | $L_s$ |
| عرض خط التغذية                      | 2.4         | $W_f$ |
| طول خط التغذية                      | 36          | $L_f$ |
| عرض الفتحة المستطيلة الداخلية       | 28          |       |
| طول الفتحة المستطيلة الداخلية       | 12          |       |

الجدول (2): أبعاد الهوائي وبارامترات التصميم في برنامج CST.

تم تحديد الأبعاد النهائية للهوائي والموضحة في الجدول (2) بدقة داخل برنامج CST باستخدام أداة التحسين الرقمي (Optimization). ويَعُود السبب في تعديل هذه الأبعاد عن الحسابات النظرية التقليدية إلى عاملين أساسيين:

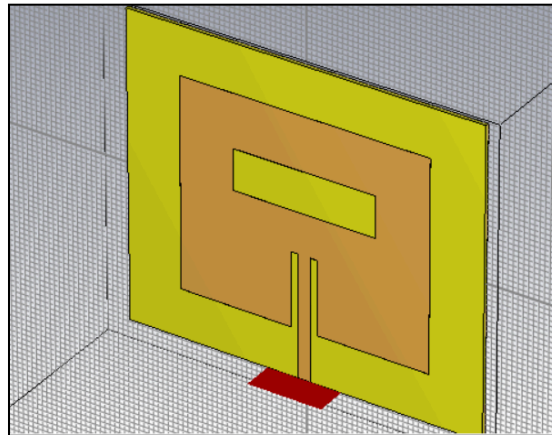
● **تأثير حواف النحاس:** تتصرف الموجات عند أطراف الرقعة النحاسية بطريقة تجعل الهوائي يبدو 'أطول' من حجمه الحقيقي كهرومغناطيسياً؛ لذلك قمنا بزيادة الطول  $L$  داخل البرنامج لكي نضمن خروج الترددات بدقة وبدون إزاحة.

● **إضافة الشقوق والحفرة الداخلية:** المعادلات الرياضية التقليدية مخصصة للهوائيات المصمتة (المغلقة). وبما أن تصميمنا يحتوي على حفرة في المنتصف وشقوق على الجوانب لتشغيل ترددتين معاً، فقد تسبب ذلك في تغيير مقاومة الهوائي. هذا التغيير فرض علينا تعديل الأبعاد برمجياً لضمان ضبط المقاومة عند القيمة القياسية 50 أوم ومنع ارتداد الإشارة.



الشكل (3): النموذج الهندسي للشكل المستخدم موضحا عليه الأبعاد لكل قطعة في الهوائي.

يوضح الشكل (4) التصميم النهائي الذي تم اعتماده:



الشكل (4): النموذج الهندسي الكامل للشكل النهائي الذي تم بناءه ببرنامج CST.

### 2.3 خصائص مادة الركيزة العازلة المعتمدة:

بناءً على معايير المفاضلة النظرية، تم اختيار ركيزة Rogers RT/duroid المتقدمة لتكون العازل الوسطي للهوائي المقترح [2]. وتم إدخال الخصائص الفيزيائية الدقيقة للمادة داخل برنامج CST بناءً على المعالم القياسية التالية [2], [4]:

- ثابت العزل الكهربائي  $\epsilon_r = 2.2$ .
- عامل فقد المماسي (منخفض جداً لضمان كسب عالٍ) وهو 0.0009.
- سمك الركيزة العازلة  $h = 1.575$

### 3.3 إعدادات المحاكاة والدقة في برنامج CST:

قمنا بضبط إعدادات برنامج المحاكاة (CST) لضمان خروج النتائج دقيقة وصحيحة بالخطوات التالية:

- ضبط المقاومة عند 50 أوم : قمنا بتفعيل هذا الخيار داخل البرنامج لإجبار الكمبيوتر على حساب النتائج بناءً على مقاومة ثابتة قيمتها 50 أوم. هذا الإجراء مهم جداً لأن جميع الكابلات والأجهزة الحقيقية في مختبرات الجامعة تعمل بمقاومة 50 أوم، وبالتالي تضمن هذه الخطوة أن نتائج البرنامج تطابق الواقع تماماً.
- تعديل دقة المحاكاة إلى -60 دي بي (Accuracy: -60 dB):  
البرنامج في العادة يشتغل على دقة -30 أو -40 دي بي، لكننا قمنا برفعها إلى -60 دي بي. المعنى البسيط لهذا هو أننا أمرنا البرنامج ألا ينهي المحاكاة بسرعة، بل يستمر في الحساب حتى تتلاشى الموجات تماماً داخل الهوائي، مما يضمن ظهور منحنيات التردد بشكل دقيق ونظيف وبدون أي أخطاء رقمية.

## الفصل الرابع:

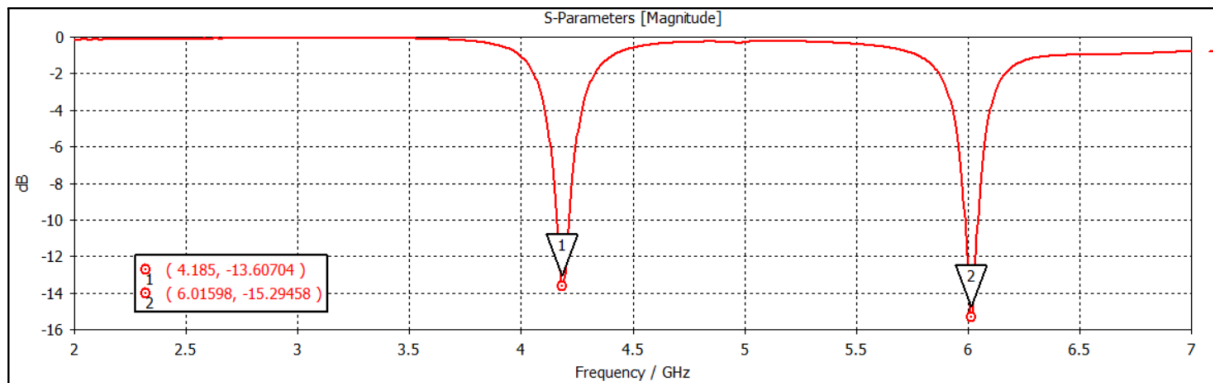
### النتائج والمناقشة

## 1.4 تمهيد:

يستعرض هذا الفصل نتائج المحاكاة الكهرومغناطيسية التي تم الحصول عليها بعد تشغيل البرنامج (Solver) للهوائي المقترح ثنائي النطاق. تشمل هذه النتائج تقييم أداء الهوائي من حيث كفاءة رنين الترددات، ومطابقة الممانعة، بالإضافة إلى شكل اتجاه الإشعاع في الفضاء عند ترددي التشغيل المستهدفين (4.2GHz و 6GHz).

## 2.4 منحنى معامل الانعكاس $S_{11}$ :

يعتبر منحنى  $S_{11}$  المقياس الأساسي لمعرفة الترددات الفعالة التي يعمل عندها الهوائي. لكي يشتغل الهوائي بنجاح عند أي تردد، يجب أن تنزل قيمة المنحنى تحت خط -10dB ، مما يعني أن الهوائي يمتص الطاقة ويرسلها ولا يعكسها.



الشكل (5): منحنى معامل الانعكاس ويظهر رنين الهوائي عند الترددين (4.2GHz و 6GHz).

من خلال قراءة المؤشرات (Markers) الموضحة على المنحنى، يتبين أن الهوائي نجح في تحقيق استجابة رنين ثنائية النطاق (Dual-Band) متميزة كالتالي:

1. النطاق الترددي الأول (المؤشر 1): استقر التردد الفعلي بدقة ممتازة عند 4.185GHz وهو

قريب جداً من التردد النظري المستهدف، حيث بلغت قيمة معامل الانعكاس عنده -13.6dB .

هذه القيمة ممتازة وتتجاوز شرط الـ -10dB ، مما يثبت نجاح أبعاد الرقعة المستطيلة الأساسية

في العمل كمنصة إشعاعية لهذا النطاق.

2. النطاق الترددي الثاني (المؤشر 2): استقر التردد الفعلي فيه عند 6.015GHz (وهو مطابق

تقريباً للتردد المستهدف )، محققاً رنيناً أكثر عمقاً وصلت قيمته إلى -15.29dB . يعكس هذا

العمق التوافقي النجاح الكبير لتقنية حفر الشقوق (Slots) والحفرة المركزية؛ حيث تمكنت من

توليد نمط رنين جديد بتردد أعلى ومواءمة مثالية مع خط التغذية، دون التأثير سلباً على كفاءة

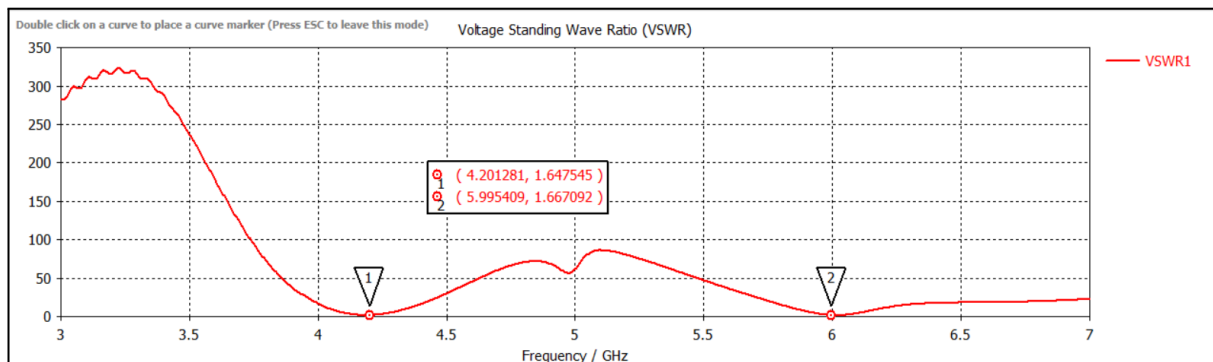
النطاق الأول وبدون زيادة الحجم الفيزيائي للهوائي.

### 3.4 منحنى نسبة الموجة الواقفة VSWR:

منحنى VSWR هو طريقة ثانية للتأكد من مدى مطابقة ممانعة الهوائي مع خط التغذية 50 أوم.

المقدار المثالي نظرياً لهذا المعامل هو (1)، ولكن مقصودنا في التصميم الهندسي أن تكون القيمة أقل

من 2 عند ترددات التشغيل لضمان عدم ضياع الطاقة.



الشكل (6): منحنى نسبة موجة الجهد الواقفة VSWR.

يتضح من المنحنى توافق الأداء بشكل كامل مع منحنى معامل الانعكاس ( $S_{11}$ )، حيث حقق التصميم قيمةً مثالية عند ترددي الرنين:

1. عند النطاق الأول (4.2GHz): ينزل المنحنى بشكل حاد ليصل إلى القيمة 1.65 القريبة جداً من القيمة المثالية (1)، مما يؤكد أن كامل الطاقة القادمة من مصدر التغذية تمر بسلسلة نحو الرقعة وتتحول إلى موجات مشعة.

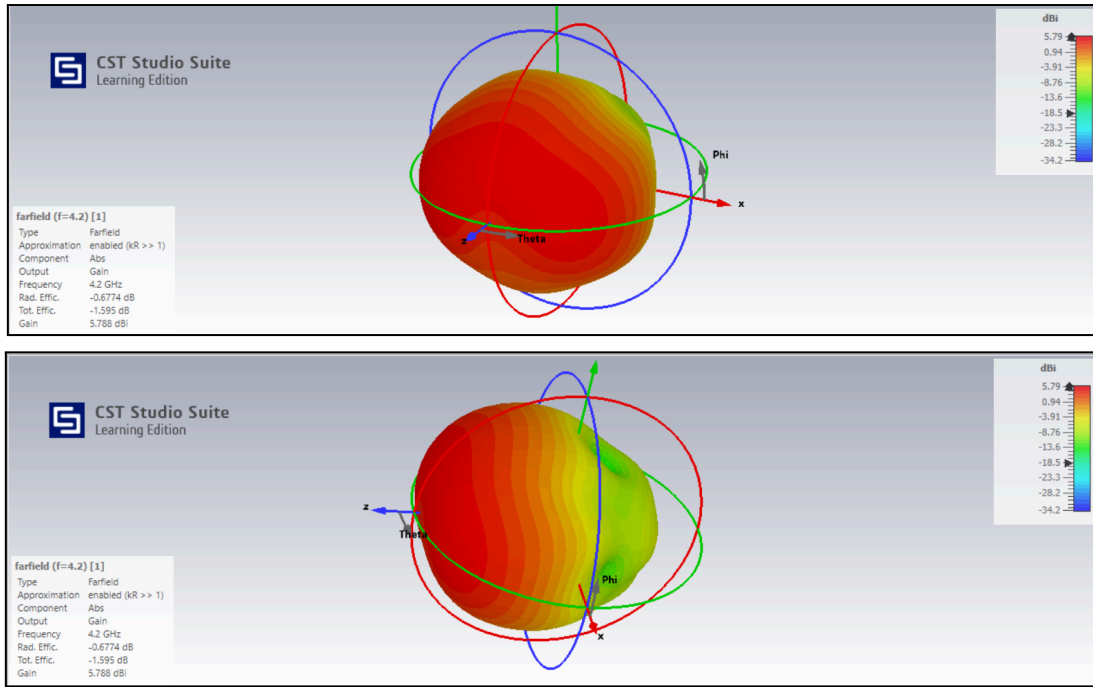
2. عند النطاق الثاني (6GHz): ينزل المنحنى مجدداً ليصل لقيمة 1.667 وبشكل دقيق ليقترّب من القيمة (1)، مما يثبت بشكل قاطع نجاح الشقوق (Slots) الجانبية والفتحة المركزية في توجيه ومطابقة التيارات السطحية عند التردد الأعلى، ومنع حدوث أي ارتداد للموجات الكهرومغناطيسية.

هذا الهبوط الحاد في المنحنى عند الترددين المحددين فقط، صعوداً إلى قيم عالية جداً في النطاقات غير المطلوبة (مثل الترددات بين النطاقين)، يوضح الانتقائية العالية للهوائي والكفاءة التشغيلية المتميزة للنظام ك هوائي ثنائي النطاق متوافق تماماً مع معيار الـ 50 أوم.

#### 4.4 نمط الإشعاع ومعاملات الإشعاع البعيد:

##### 1.4.4. نمط الإشعاع ومعاملات الإشعاع عند تردد التشغيل الأول (4.2GHz):

يوضح النمط الإشعاعي (Farfield Radiation Pattern) كيفية توزيع وانتشار الطاقة والموجات اللاسلكية في الفضاء الحر حول الهوائي. يعرض الشكل (7) مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد (3D) بالإضافة إلى المعاملات الفيزيائية المستخرجة من برنامج CST عند التردد التشغيلي الأول 4.2GHz :



الشكل (7): مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد والخصائص الإشعاعية للهوائي عند تردد 4.2GHz

يُلاحظ من المخطط ثلاثي الأبعاد أن شكل الإشعاع ليس كروياً متجانساً، بل يحتوي على انبعاجات جانبية وتناقص في شدة المجال (اللونين الأخضر والأزرق) عند بعض الزوايا. يعود هذا فيزيائياً إلى تأثير الحفرة المركزية والشقوق الجانبية (Slots) المحفورة في الرقعة؛ حيث تقوم هذه الشقوق بتوزيع غير منتظم للتيارات السطحية وتوليد إلغاء جزئي للموجات عند زوايا معينة، بينما تساهم الطبقة الأرضية الكاملة (Full Ground) في قمع الإشعاع الخلفي وتوجيهه كلياً نحو الأمام، مما يفسر المظهر المفطح والتوجيهي الفعال للهوائي.

من خلال تحليل البيانات في الشكل (7)، يمكن استخلاص النتائج الهندسية الحاسمة التالية عند تردد 4.2GHz:

طبيعة النمط الإشعاعي (Radiation Shape): يمتلك الهوائي نمط إشعاع توجيهي متناظر وثابت (Broadside Radiation Pattern)، حيث تتركز الطاقة في الفص الرئيسي العلوي المتجه نحو

الأعلى (باتجاه الفضاء الحر). ويعود الفضل في هذا التوجيه المثالي إلى الطبقة الأرضية السفلية (Ground Plane) التي عملت كمرآة عاكسة منعت تسرب الإشعاع نحو الخلف الفعلي للهوائي.

| farfield (f=4.2) [1] |                   |
|----------------------|-------------------|
| Type                 | Farfield          |
| Approximation        | enabled (kR >> 1) |
| Component            | Abs               |
| Output               | Gain              |
| Frequency            | 4.2 GHz           |
| Rad. Effic.          | -0.6774 dB        |
| Tot. Effic.          | -1.595 dB         |
| Gain                 | 5.788 dBi         |

| farfield (f=4.2) [1] |                   |
|----------------------|-------------------|
| Type                 | Farfield          |
| Approximation        | enabled (kR >> 1) |
| Component            | Abs               |
| Output               | Directivity       |
| Frequency            | 4.2 GHz           |
| Rad. Effic.          | -0.6774 dB        |
| Tot. Effic.          | -1.595 dB         |
| Dir.                 | 6.466 dBi         |

الشكل (8): مؤشرات الكفاءة الإشعاعية والكلية للهوائي عند تردد 4.2GHz

عند النظر للقيم الموجودة بالشكل (8) والتي هي قيم مؤشرات الكفاءة الإشعاعية والكلية للهوائي يمكننا تحليل النتائج كالتالي:

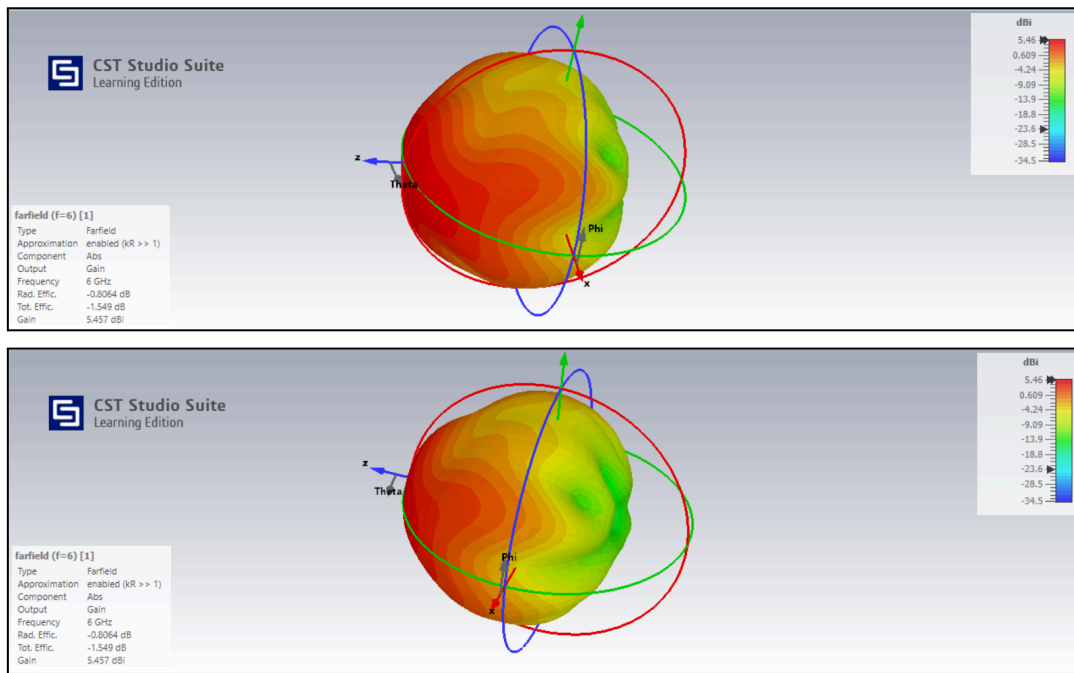
معامل الكسب (Antenna Gain): حقق الهوائي كسباً كبيراً وممتازاً بلغت قيمته 5.788dBi. وتعتبر هذه القيمة مرتفعة بالنسبة لهوائيات الرقعة التقليدية، مما يثبت الكفاءة العالية لركيزة Rogers RT/duroid في تقليص الضياعات العازلة والحرارية.

معامل الاتجاهية (Directivity): بلغت قيمة الاتجاهية القصوى للهوائي 6.466dBi، مما يؤكد قدرة التصميم العالية على تركيز الإشعاع اللاسلكي بدقة في الاتجاه المستهدف.

الكفاءة الإشعاعية والكلية (Efficiency): يوضح البرنامج أن كفاءة الإشعاع تبلغ  $-0.6774\text{dB}$  (أي ما يعادل تقريباً 85.5%)، والكفاءة الإجمالية تبلغ  $-1.595$  (أي ما يعادل 69.2%). هذه النسب التشغيلية تؤكد عملياً أن التصميم المقترح ناجح جداً في تحويل الطاقة المغذية له إلى موجات مشعة بأقل قدر ممكن من الفقد الكهرومغناطيسي.

#### 2.4.4. نمط الإشعاع ومعاملات الإشعاع عند تردد التشغيل الثاني (6GHz):

يوضح الشكل (9) مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد (3D) والمعاملات الفيزيائية المستخرجة من برنامج CST عند التردد التشغيلي الثاني:



الشكل (9): مخطط الإشعاع ثلاثي الأبعاد والخصائص الإشعاعية للهوائي عند تردد 6GHz

طبيعة النمط الإشعاعي (Radiation Shape): يحافظ الهوائي على نمط إشعاع توجيهي متميز نحو الأعلى (Broadside Pattern). ويلاحظ وجود انبعاجات طفيفة وتغير في توزيع الألوان (المنخفضات الجانبية باللون الأخضر) مقارنة بالتردد الأول؛ وهذا يعود هندسياً لكون التردد الأعلى يمتلك طولاً موجياً

أقصر، مما يجعله أكثر تأثراً وتفاعلاً مع حواف "الشقوق الجانبية والحفرة المركزية"، وهو أمر طبيعي جداً يؤكد توليد النطاق الثاني عبر هذه التقنية الطبوغرافية.

معامل الاتجاهية (Directivity): بلغت قيمة الاتجاهية القصوى 6.264dBi ، مما يثبت قدرة الهوائي العالية على تجميع الموجات وتركيزها في اتجاه الإرسال الرئيسي المستهدف بدقة متقاربة مع النطاق الأول.

معامل الكسب (Antenna Gain): استقرت قيمة الكسب الفعلي عند 3.513. بالرغم من أن الكسب أقل نسبياً من النطاق الأول (بسبب التشتت الطبيعي للمجال عند الترددات الأعلى وحفر الشقوق)، إلا أنه يظل رقماً جيداً وكافياً جداً لتلبية متطلبات الأنظمة اللاسلكية ثنائية النطاق.

| farfield (f=6) [1] |                   |
|--------------------|-------------------|
| Type               | Farfield          |
| Approximation      | enabled (kR >> 1) |
| Component          | Abs               |
| Output             | Directivity       |
| Frequency          | 6 GHz             |
| Rad. Effic.        | -0.8064 dB        |
| Tot. Effic.        | -1.549 dB         |
| Dir.               | 6.264 dBi         |

| farfield (f=6) [1] |                   |
|--------------------|-------------------|
| Type               | Farfield          |
| Approximation      | enabled (kR >> 1) |
| Component          | Abs               |
| Output             | Gain              |
| Frequency          | 6 GHz             |
| Rad. Effic.        | 0.8305            |
| Tot. Effic.        | 0.7000            |
| Gain               | 3.513             |

الشكل (10): مؤشرات الكفاءة الإشعاعية والكلية للهوائي عند تردد 6GHz

كفاءة الإشعاع (Radiation Efficiency): بلغت قيمتها -0.806dB ، وهي تعادل هندسياً نسبتها المئوية حوالي 83%. هذه النسبة تعني أن الهوائي لا يزال محافظاً على كفاءة إشعاعية مرتفعة وقدرة ممتازة على تحويل الطاقة عند التردد العالي دون ضياعها كحرارة داخل الركيزة العازلة.

الكفاءة الكلية للهوائي (Total Efficiency): بلغت قيمتها  $-1.549\text{dB}$  وهي تعادل هندسياً حوالي 70%. تطابق هذه النسبة الكلية مع كفاءة النطاق الأول (69.2%) يثبت نجاح عملية التحسين الرقمي (Optimization) والمواءمة الدقيقة لخط التغذية القياسي (50 أوم)، حيث استطاع الحفاظ على استقرار كفاءة النظام الإجمالية وتوازنها عبر النطاقين معاً

## الاستنتاجات:

يقدم هذا المشروع تصميماً ناجحاً ونمذجة هندسية متكاملة لهوائي رقعة ميكروستريب مستطيل ثنائي النطاق (Dual-Band Microstrip Patch Antenna) يعمل عند الترددات الحيوية 4.2GHz و 6Ghz باستخدام برنامج CST العالي الدقة. ومن خلال تحليل النتائج الكهرومغناطيسية، يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية:

- كفاءة الرنين: أثبتت تقنية حفر الحفرة المركزية والشقوق الجانبية المتعددة فاعلية فيزيائية فائقة في تعديل مسارات التيارات السطحية وتوليد النطاق الترددي الثاني بدقة متناهية، دون تضخيم الأبعاد الفيزيائية الخارجية للهوائي.
- مطابقة الممانعة والانتزان: أظهرت منحنيات معامل الانعكاس  $S_{11}$  هبوطاً حاداً وعميقاً تجاوز شرط الـ -10dB، مدعوماً بقيم توافقية ممتازة لمنحنى نسبة الموجة الواقفة أقل من 2، مما يثبت نجاح مواءمة خط التغذية المقترح مع المقاومة القياسية (50 أوم).
- الأداء الإشعاعي والكفاءة: حافظ الهوائي على نمط إشعاعي توجيهي أمامي مستقر (Broadside Pattern) بفضل دور الطبقة الأرضية الكاملة (Full Ground)، محققاً كسباً متميزاً عند النطاق الأول، مع استقرار الكفاءة الكلية الإجمالية للنظام عند نسبة ممتازة تقارب عبر النطاقين معاً، وهو ما يثبت تفوق ركيزة RT هندسياً.

## المراجع:

- [1] Balanis, C. A. (2016). Antenna Theory: Analysis and Design. 4th Edition, John Wiley & Sons.
- [2] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I., & Ittipiboon, A. (2001). Microstrip Antenna Design Handbook. Artech House.
- [3] Kumar, G., & Ray, K. P. (2003). Broadband Microstrip Antennas. Artech House.
- [4] Wong, K. L. (2002). Compact and Broad-Band Microstrip Antennas. John Wiley & Sons