



كلية الهندسة
قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية (شُعبة الاتصالات)
مُقرر معمل تطبيقات الحاسوب والتصميم

اسم المشروع:

تصميم ومحاكاة نظام هوائي (MIMO 4×4) مستطيل الشكل ذو
شقوق جانبية لتطبيقات الاتصالات اللاسلكية

عمل الطالبة : غادة عادل الشامي
رقم القيد: 062220014.

تحت إشراف : د.حسن الديب.

تاريخ العمل: 1- مُحَرَّم - 1448 هـ

الفصل الدراسي: ربيع 2025-2026

الملخص:

يقدم هذا المشروع تصميماً ومحاكاة هندسية متكاملة لنظام مصفوفة هوائيات متعددة المداخل والمخارج (4×4 MIMO) رقعية ومستطيلة الشكل، تم تطويرها خصيصاً لتطبيقات الاتصالات اللاسلكية الحديثة التي تتطلب معدلات نقل بيانات عالية وثباتاً في الاتصال. تم بناء النموذج ومحاكاته باستخدام برنامج التصميم الكهرومغناطيسي المتقدم CST Studio Suite عند تردد رنين مركزي مستهدف يقترب من 3GHz، وذلك بالاعتماد على ركيزة عازلة اقتصادية وشائعة من مادة (FR-4).

لمواجهة التحدي الهندسي الأكبر في المصفوفات المدمجة والمتمثل في التداخل والاقتران المتبادل الناتجة عن تقارب العناصر اللاسلكية، تبنى التصميم تقنية هيكلية مبتكرة تعتمد على حفر شقوق جانبية مستطيلة (Side Slots) محاذية لخطوط التغذية الشريطية ذات الممانعة القياسية (50 أوم). أظهرت نتائج المحاكاة كفاءة عالية لهذه الشقوق في كبح التيارات السطحية وتحقيق عزل كهرومغناطيسي ممتاز بين المنافذ يتجاوز حاجز 20dB- بالتوازي مع تسجيل معامل انعكاس عميق وهبوط حاد بلغ 23dB- عند تردد الرنين، وعرض نطاق ترددي محقق قيمته 111 ميغا هيرتز.

علاوة على ذلك، أظهرت مقاييس أداء التنوع لمنظومة الـ MIMO نتائج نموذجية ومطابقة للمعايير العالمية؛ حيث انخفض معامل الارتباط المغلف (ECC) ليقترُب من الصفر المطلق محققاً استقلالية تامة للقنوات اللاسلكية، في حين استقر منحني كسب التنوع (DG) بثبات كامل عند السقف المثالي بالقرب من القيمة (10). تبرهن هذه المؤشرات المشتركة نجاح المنظومة المقترحة في تقديم أداء إشعاعي مستقر، وتوجيهية ممتازة بلغت 5.96dBi مما يجعل التصميم خياراً واعداً وفعالاً للدمج في أجهزة الراوتر المحمولة، وشبكات الجيل الخامس، وتطبيقات إنترنت الأشياء المدمجة.

شكر وتقدير

أتقدم بخالص الشكر والتقدير وعظيم الامتنان إلى أستاذنا الفاضل د. **حسن الديب**، تالياً لما جاء في تفسير ابن عثيمين [1421 هجري] لهذه الآية العظيمة في سورة الكهف عندما سلّم موسى عليه السلام على عبد صالح وهو الخضر عليه السلام، طالباً منه الإذن ليتبعه ليعلمه ممّا أعطاه الله فقال: "قَالَ لَهُ مُوسَى هَلْ أَتَّبِعُكَ عَلَى أَنْ تُعَلِّمَ مِمَّا عُلِّمْتَ رُشْدًا؟" فكل إنسان أعطاه الله علماً في هذه الدنيا ينبغي أن يفرح بأن يؤخذ منه هذا العلم، ولأن العلم الذي يؤخذ من الإنسان في هذه الدار يُنتفع به بعد وفاته.

لقد رأينا أماناً قامّة أدّت الأمانة على أكمل وجه، فلم يبخل يوماً بمعروف، وأسدى ما عليه إسداءً كاملاً. وحتماً لا يُحصى فضله إلا من تلقى من فيضه، ولن يُقدّر أحد أمانته إلا من رأى صدق إخلاصه وعطائه. لقد كان مثلاً حياً للتميّز الساحق في العطاء، فجراه الله عنا خير الجزاء، ونسأل الله أن يزيده من العلم بسطة، وأن يجعل علمه ثقلاً في موازين حسناته، وأن يرزقنا أن نكون أمناء كما علّمنا.

فهرس المحتويات

رقم الصفحة	العنوان	
2	الملخص	
3	شكر وتقدير	
5-4	فهرس المحتويات	
6	فهرس الأشكال	
7	فهرس الجداول	
الفصل الأول : المقدمة والتمهيد		
10-9	المقدمة	1.1
11-10	مشكلة البحث	2.1
12-11	أهداف المشروع	3.1
12	أهمية المشروع والتطبيقات المستهدفة	4.1
الفصل الثاني: الخلفية النظرية والدراسات السابقة		
16-15-14	تعريف بتقنية MIMO	1.2
17-16	التوصيف الرياضي وسعة القناة لنظام MIMO	2.2
17-16	مصفوفة القناة اللاسلكية	1.2.2
18-17	آلية الارتباط عبر الوسط اللاسلكي (تعدد المسارات) في نظام MIMO	3.2
19-18	سعة القناة لنظام MIMO	4.2
21-20-19	الدراسات السابقة	5.2
الفصل الثالث : الجانب النظري والتعريف العام بنوع الهوائي المستخدم		
23	تمهيد وتعريف عام	1.3
23	الهيكل الهندسي ونظرية العمل	2.3
24	آلية التغذية المستخدمة	3.3
25-24	نظرية عمل هوائيات الرقعة الميكروستريب	4.3

26-25	معايير اختيار الشكل الهندسي المستطيل	5.3
26	معايير اختيار المادة العازلة وخصائصها	6.3
28-27	المعادلات الرياضية للتصميم	7.3
الفصل الرابع: منهجية التصميم الهندسي		
30	خطوات ومنهجية العمل	1.4
30	حساب الأبعاد الفيزيائية للهوائي وفق التردد المستهدف	2.4
31	بناء نموذج ثلاثي الأبعاد داخل بيئة برنامج CST	3.4
32	المبررات الهندسية لاختيار الأبعاد الفيزيائية والعملية للمصفوفة	4.4
الفصل الخامس: المحاكاة والنتائج التي تم الحصول عليها		
34	تمهيد	1.5
34	معاملات الإعاكس	1.1.5
35	معاملات الاقتران	2.1.5
36-35	نسبة الموجة الواقفة	3.1.5
38-37-36	نمط الشعاع والكسب والاتجاهية	4.1.5
39-38	معامل الارتباط ECC وكسب التنوع DG	5.1.5
39	عرض النطاق الترددي	6.1.5
40	الفصل السادس: الاستنتاجات والتوصيات	
44	المراجع	

فهرس الأشكال

الترسل	عنوان الشكل	رقم الصفحة
1.2	المخطط الكلي العام لنظام الاتصالات التقليدي أحادي المدخل والمخرج (SISO).	14
2.2	المخطط الكلي العام لنظام (MIMO) عند تطبيق مصفوفة (4 × 4)	15
2.2	مخطط ظاهرة تعدد المسارات اللاسلكية لنظام MIMO	18
1.3	البنية الهندسية والطبقات الثلاث لهوائي الرقعة الميكروستريب التقليدي	24
2.3	الأشكال الهندسية لعناصر الاشعاع في هوائيات الرقعة الشريطية	25
1.4	الأبعاد المختارة والمعتمدة داخل بيئة برنامج CST بعد التحسين	31
2.4	شكل الهوائي المعتمد داخل بيئة برنامج CST	31
1.5	منحنى معامل الانعكاس	34
2.5	معاملات الاقتران	35
3.5	منحنى VSWR	35
4.5	نمط الشعاع لكل من الهوائيات الأربع	36
5.5	منحنى معامل الارتباط ECC	38
6.5	منحنى كسب النوع DG	38
7.5	عرض النطاق الترددي	39

فهرس الجداول

رقم الصفحة	عنوان الجدول	التسلسل
30	الأبعاد التي تم حسابها من خلال المعادلات	1.4
37	قيم الكسب والاتجاهية	1.5
40	ملخص النتائج التي تم الحصول عليها	2.5

الفصل الأول:

المقدمة والتمهيد

1.1 المقدمة:

أدى التطور المتسارع في أنظمة الاتصالات اللاسلكية إلى زيادة هائلة في الطلب على معدلات نقل بيانات أعلى، وسعة قنوات أكبر، وجودة اتصال مستقرة دون الحاجة إلى استهلاك نطاقات ترددية إضافية [1]. تواجه أنظمة الهوائيات التقليدية أحادية المدخل والمخرج (SISO) عوائق كبيرة في بيئات الانتشار متعدد المسارات (Multipath Fading)، مما يتسبب في تدهور السعة الإجمالية للشبكة وجودة الخدمة [2]. لتجاوز هذه العقبات، ظهرت تقنية الهوائيات المتعددة المداخل والمخارج (MIMO) كركيزة أساسية في معماريات الاتصالات الحديثة، بما في ذلك الجيل الخامس (5G) وما بعده [1]، [3]. من خلال توظيف هوائيات متعددة عند الإرسال والاستقبال، تستغل تقنية MIMO ظاهرة تعدد المسارات لزيادة كمية البيانات المتدفقة عبر التعددية المكانية (Spatial Multiplexing) وتعزيز موثوقية الاتصال [3].

من بين خيارات الهوائيات المختلفة، تُفضل الهوائيات الرقعية الشريطية (Microstrip Patch Antennas) على نطاق واسع في الأجهزة المحمولة والطرفية نظراً لمميزاتها، مثل حجمها الصغير، ووزنها الخفيف، وتكلفتها المنخفضة، وسهولة دمجها [4]. يتكون الهوائي الرقعي القياسي من رقعة مشعة على أحد جانبي المادة العازلة (Substrate) ومستوى أرضي (Ground Plane) على الجانب الآخر [2]، [4].

ومع ذلك، فإن دمج عناصر هوائيات متعددة في مساحة صغيرة لإنشاء مصفوفة MIMO يفرز تحدياً هندسياً كبيراً يُعرف بـ الاقتران المتبادل [5]. فعندما توضع العناصر بالقرب من بعضها

البعض، تنتقل الموجات السطحية عبر المادة العازلة المشتركة والمستوى الأرضي، مما يسبب تداخلاً كهرومغناطيسياً بين المنافذ. يؤدي الاقتران المتبادل المرتفع إلى إضعاف كفاءة الإشعاع، وتشويه مخططات الإشعاع، ورفع معامل الارتباط الغلافي (ECC)، مما يلغي فوائد تنوع نظام الـ MIMO.

ولمواجهة هذه المشكلة، تم ابتكار تقنيات عزل مختلفة، وفي هذا التصميم، تم اعتماد أسلوب التعديل الهيكلي الهندسي من خلال حفر شقوق جانبية (Side Slots) بجانب خط التغذية الشريطي لمصفوفة الـ 4×4 تعمل هذه التقنية على تشتيت توزيع التيار الكهربائي في المنطقة القريبة وتقييد التيارات السطحية المتجهة نحو العناصر المجاورة، مما يسهم في رفع مستوى العزل وتحسين الأداء دون زيادة الحجم الفيزيائي الكلي لنظام الهوائي [5]، [7].

2.1 مشكلة البحث:

تكمن المشكلة الأساسية التي واجهت أنظمة الاتصالات اللاسلكية التقليدية في عزز الهوائيات المفردة (SISO) عن تلبية الطلب المتزايد على السرعات العالية وسعة البيانات الضخمة، وذلك بسبب محدودية الطيف الترددي وازدحامه وصعوبة الحصول على نطاقات جديدة [1]، [2]. بالإضافة إلى ذلك، تعاني الهوائيات التقليدية بشكل كبير من ظاهرة التلاشي متعدد المسارات (Multipath Fading)، حيث تصطدم الإشارة بالعوائق والمباني وتصل إلى المستقبل مشتتة ومتداخلة، مما يؤدي إلى ضياع البيانات وضعف جودة الاتصال [3].

ومن هنا برزت الحاجة الملحة للجوء إلى تصميم أنظمة الهوائيات المتعددة (MIMO)، والتي أحدثت ثورة هندسية من خلال استغلال هذه المسارات المنتشرة بدلاً من محاربتها [6]. تتيح تقنية الميمو إرسال واستقبال إشارات متعددة في نفس الوقت ومن خلال نفس التردد عبر أبعاد مكانية مختلفة، مما يضاعف سرعة نقل البيانات وسعة القناة بشكل كافٍ ودون الحاجة لاستهلاك أي طيف ترددي إضافي، مع ضمان استقرار الاتصال وحمايته من الانقطاع في حال تعرض أحد الهوائيات لعائق فيزيائي [3]، [6]. ومع ذلك، فإن هذه التقنية تفرض تحدياً إضافياً داخل المصفوفات المدمجة وهو التداخل والاقتران الكهرومغناطيسي المتبادل بين الهوائيات المتجاورة، مما يتطلب حلولاً هيكلية مبتكرة مثل الشقوق الجانبية لضمان العزل التام وتحسين الأداء المشترك [5]، [7].

3.1 أهداف المشروع:

يتحدد الهدف الرئيسي لهذا المشروع في تقديم دراسة تطبيقية وتصميم هندسي متكامل لنظام هوائي MIMO رباعي العناصر (4×4) عالي الكفاءة، مع التركيز على حل مشكلة الاقتران المتبادل التي تم استعراضها سابقاً. ولتحقيق هذا الهدف العام، يركز العمل على مجموعة من الأهداف الفرعية المتكاملة؛ حيث يبدأ المشروع بدراسة ونمذجة الهوائي الرقعي المستطيل الفردي، ومن ثم العمل على تكراره وتوزيعه هندسياً لبناء مصفوفة MIMO المطلوبة [6].

ويأتي في مقدمة الأهداف التطبيقية لهذا التصميم دمج تقنية حفر الشقوق الجانبية (Side Slots) ملاصقةً لخط التغذية الشريطي، واختبار مدى فاعليتها عملياً في كبح التيارات السطحية وتحسين مستويات العزل بين المنافذ دون المساس بالأبعاد الفيزيائية الكلية للهوائي [7]. علاوة على ذلك، يهدف المشروع إلى استخدام أداة المحاكاة الكهرومغناطيسية المتقدمة **CST Studio Suite** لاستخراج

وتحليل معاملات الأداء الأساسية للهوائي، والتي تشمل منحنيات معاملات التشتت (S-parameters) مثل معامل الانعكاس (S_{11}) ومعاملات الانتقال والعزل (S_{12}, S_{13}, S_{14})، بالإضافة إلى حساب الكسب (Gain) ورسم مخططات الإشعاع (Radiation Patterns) ثنائية وثلاثية الأبعاد [1].

وأخيراً، يهدف المشروع إلى تقييم كفاءة نظام MIMO من خلال حساب ومعاينة مقاييس التنوع الإشعاعي الأساسية، وتحديد معامل الارتباط الغلافي (ECC) وكسب التنوع (DG)، للتأكد من مطابقة التصميم المقترح للمواصفات القياسية المطلوبة في أنظمة الاتصالات اللاسلكية الحديثة [6].

4.1 أهمية المشروع والتطبيقات المستهدفة:

تكمّن أهمية هذا المشروع في تقديم حل هندسي ذكي وعملي لأكبر مشكلة تواجه شبكات الاتصالات الحديثة، وهي كيفية وضع عدة هوائيات في مساحة صغيرة دون أن تتداخل إشاراتهما وتضعف كفاءتهما. تظهر الأهمية التطبيقية في أن تقنية حفر الشقوق الجانبية التي تم اعتمادها في التصميم نجحت في حل هذه المشكلة وتوفير عزل ممتاز بين الهوائيات، مما يتيح للمصانع تقليل حجم الأجهزة اللاسلكية وتكلفتها مع الحفاظ على سرعة إنترنت فائقة وثبات في الاتصال [5], [6].

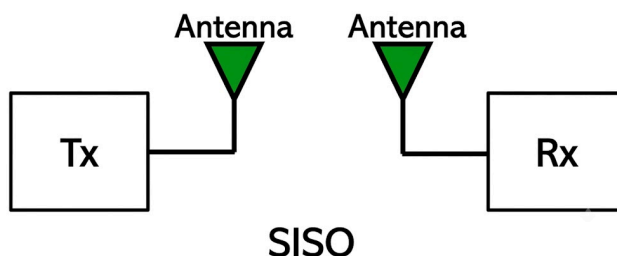
أما بالنسبة للتطبيقات المستهدفة، فإن هذا الهوائي مصمم خصيصاً لخدمة الأجهزة الحديثة والمدمجة التي تتطلب نقل كميات ضخمة من البيانات بشكل فوري، ومن أبرزها: هواتف ومحطات الجيل الخامس (5G) التي تحتاج لسرعات إنترنت عالية [6]، وأجهزة راوتر الواي فاي الحديثة (Wi-Fi 6/7) لتوفير اتصال مستقر وقوي داخل المنازل والمكاتب المزدهمة دون تأخير أو تقطيع [3]، بالإضافة إلى أجهزة إنترنت الأشياء (IoT) والأنظمة الذكية مثل المستشعرات والسيارات ذاتية القيادة والطائرات المسيرة (Drones) التي تتطلب تبادل بيانات مستمر وموثوق لحمايتها من انقطاع الاتصال [4].

الفصل الثاني:

الخلفية النظرية والدراسات السابقة

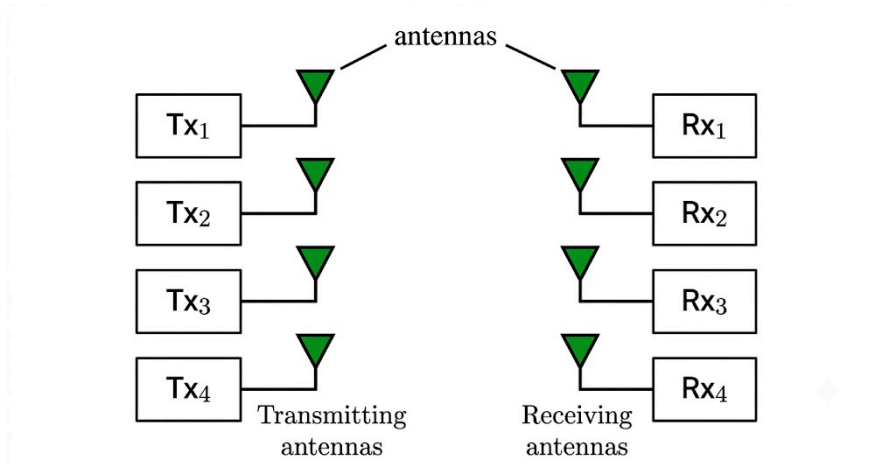
1.2 تعريف بتقنية MIMO:

تُعرف تقنية MIMO هندسياً بأنها توظيف لمصفوفة من العناصر الإشعاعية النشطة عند طرفي الإرسال والاستقبال لنفس رابط الاتصال وفي نفس النطاق الترددي [6]. جاءت هذه التقنية للتغلب على "محدودية سعة شانون" (Shannon Capacity Limit) التي قيدت الأنظمة التقليدية أحادية الهوائي المستعرضة في الشكل (2.1) ، حيث تتيح MIMO زيادة خطية في سعة القناة دون الحاجة إلى زيادة طاقة الإرسال الكلية أو استهلاك نطاق ترددي إضافي [3].



الشكل (1.2): المخطط الكتلي العام لنظام الاتصالات التقليدي أحادي المدخل والمخرج (SISO).

يوضح الشكل (2.1) المعمارية التقليدية لنظام الـ SISO، حيث يعتمد الرابط اللاسلكي على هوائي إرسال مفرد في طرف الإرسال (Tx) يقابله هوائي استقبال مفرد في طرف الاستقبال (Rx). هذا الاعتماد على مسار إشعاعي واحد يجعل النظام محدود السعة وعرضة لفقد الكامل للإشارة في حال تعرض هذا المسار لظاهرة التلاشي العميق. ولتجاوز هذه المحدودية، يتم الانتقال إلى معمارية الـ MIMO عبر مضاعفة عدد العناصر الإشعاعية في كلا الطرفين كما يظهر في الشكل (2.2).



الشكل (2.2): المخطط الكتلي العام لنظام (MIMO) عند تطبيق مصفوفة (4×4) .

يوضح الشكل (2.2) المعمارية الهندسية المتطورة لنظام الـ MIMO وتحديداً عند تطبيق (4×4) ، حيث ينقسم النظام إلى شقين أساسيين:

- طرف الإرسال (Tx - Transmitter): يحتوي على مصفوفة مكونة من عدد 4 من هوائيات الإرسال (Transmitting Antennas). يتم تغذية هذه الهوائيات بإشارات مستقلة تمر عبر قنوات لاسلكية متنوعة في الفراغ.
- طرف الاستقبال (Rx - Receiver): يحتوي على مصفوفة مكونة من عدد 4 من هوائيات الاستقبال (Receiving Antennas) التي التقطت الموجات الكهرومغناطيسية المشتتة عبر الفراغ، ليقوم نظام المعالجة الرقمية في الـ Rx بفك التداخل وإعادة تجميع البيانات الأصلية بدقة [6].

في هذا المشروع، تم تطبيق هذه المعمارية العامة على نموذج مصغر ومدمج متمثل في نظام (4×4) يعمل عند التردد المستهدف 3GHz، حيث يتم التركيز على تصميم عناصر مصفوفة الرقعة المستطيلة وحفر شقين بجانب خط التغذية لتقليل التداخل الكهرومغناطيسي المتبادل بينها لضمان عملها وفق هذا النموذج النظري بكفاءة عزل عالية.

وتعتمد التقنية على ثلاث آليات معالجة إشارات رئيسية:

1. **التعدد المكاني (Spatial Multiplexing):** في البيئات الغنية بالتشتت والانعكاسات

(High-scattering environments)، يتم تقسيم تدفق البيانات عالي السرعة إلى عدة

تدفقات فرعية منخفضة السرعة، ويتم إرسال كل تدفق فرعي عبر هوائي مستقل. تصبح هذه

المسارات المتعددة بمثابة قنوات متوازية مستقلة في الفراغ، مما يضاعف معدل نقل البيانات

الكلي (1) [Data Rate].

2. **التنوع المكاني (Spatial Diversity):** يُستخدم لتحسين موثوقية الرابط اللاسلكي (Link

Reliability) وتقليل معدل خطأ البتات (BER). يتم إرسال نفس المعلومة أو الشيفرة عبر

هوائيات مختلفة بمسارات فيزيائية متباعدة؛ فإذا عانت إحدى الإشارات من تلاشي عميق

(Deep Fading) نتيجة عائق فيزيائي، فإن الإشارات الأخرى القادمة من مسارات مختلفة

تضمن وصول المعلومة للطرف الآخر دون انقطاع [3].

3. **توجيه الحزمة (Beamforming):** تعديل الطور والسعة (Phase and Amplitude)

للإشارات المغذية لكل هوائي في المصفوفة، مما يؤدي إلى تداخل بناء في اتجاه المستخدم

المستهدف وتداخل هدام في الاتجاهات الأخرى، وهو ما يرفع من كفاءة الطاقة ويقلل التداخل

مع المستخدمين الآخرين [1].

2.2 التوصيف الرياضي وسعة القناة لنظام MIMO:

1.2.2 مصفوفة القناة اللاسلكية:

رياضياً، يتم التعبير عن العلاقة بين المتجهات المرسلّة والمستقبلة عبر القناة اللاسلكية بنموذج مصفوفي خطي يُكتب على النحو التالي:

$$y = Hx + n$$

حيث أن:

y : هو متجه الإشارات المستقبلية ذو الأبعاد $(N_r \times 1)$.

x : هو متجه الإشارات المستقبلية ذو الأبعاد $(N_t \times 1)$.

n : هو متجه الضوضاء البيضاء المضافة (AWGN).

H : هو مصفوفة القناة اللاسلكية ذات الأبعاد $(N_r \times N_t)$ وتمثل بمعاملات التلاشي:

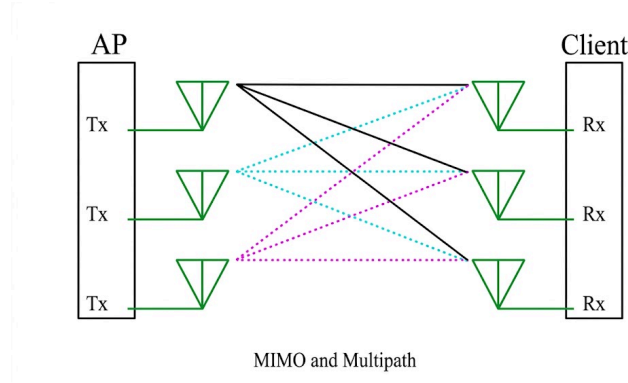
وفي حالة هذا المشروع حيث يتم تصميم نظام مصفوفة رباعية $(4 \times 4 MIMO)$ ، فإن الأبعاد

الفيزيائية تكون $(N_t = 4)$ و $(N_r = 4)$ ، وبالتالي تمثل مصفوفة القناة H رياضياً بشكلها الممتد

كالتالي:

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix}$$

3.2 آلية الارتباط عبر الوسط اللاسلكي (تعدد المسارات) في نظام MIMO:



الشكل (3.2): مخطط ظاهرة تعدد المسارات اللاسلكية (Multipath) لنظام MIMO

عند الانتقال إلى الواقع العملي للتطبيق، يوضح الشكل (3.2) كيف تتصرف الموجات الكهرومغناطيسية داخل القناة اللاسلكية (Wireless Channel). الإشارة المرسلة من أي هوائي إرسال منفرد في نقطة الوصول (AP) تنتشر وتتصادم بالعوائق لتصل إلى جميع هوائيات الاستقبال لدى العميل (Client) في نفس الوقت ولكن بأطوار (Phases) وأزمنة تأخير مختلفة (وهي الخطوط الملونة المتقاطعة).

يقوم نظام المعالجة الرقمية في طرف الاستقبال بحل المعادلات الرياضية للمصفوفة H لفك هذا التداخل، وعزل القنوات المتوازية، وإعادة تجميع البيانات الأصلية بدقة وثوقية عالية.

2.2.2 سعة القناة لنظام MIMO:

تكمن القوة الحقيقية لتقنية الـ MIMO في قدرتها على كسر قيود السعة الترددية التقليدية. رياضياً، يتم حساب سعة القناة (C) لنظام MIMO عندما تكون تفاصيل القناة غير معروفة عند طرف الإرسال باستخدام مصفوفة الوحدة (I) وفقاً لمعادلة شانون المعدلة [3]:

$$C = \log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{SNR}{N_t} H H^H \right)$$

حيث أن:

SNR : هو نسبة الإشارة إلى الضوضاء.

H (.) : يمثل مصفوفة هيرميتيان وهي منقول المصفوفة المرافق المُعقد.

det : هو محدد المصفوفة.

في نظام (4×4 MIMO) المستهدف في هذا المشروع ترتفع السعة النظرية إلى أربعة أضعاف سعة أنظمة SISO التقليدية عند نفس القدرة ونفس نطاق التردد.

3.2 الدراسات السابقة:

قام كل من الباحثين (Padire Mounika & T. Jaya) في عام 2025م بنشر دراسة هندسية بعنوان (Design of 4X4 Microstrip Patch Array Antenna for 5G mmWave Applications) تمحورت مشكلتها البحثية حول التحدي الكبير الذي يواجه أنظمة الاتصالات الحديثة في الموازنة بين توفير هوائيات مدمجة وصغيرة الحجم للأجهزة الطرفية، وفي الوقت ذاته تحقيق كسب إشعاعي عالٍ ونطاق ترددي عريض دون التضحية بكفاءة الأداء، وتحديدًا لتلبية متطلبات نقل البيانات الفائقة وتقليل زمن التأخير في تطبيقات الموجات المليمترية (mmWave) لشبكات الجيل الخامس (5G).

ولحل هذه المشكلة، استخدم الباحثون في منهجيتهم تصميمًا ومحاكاة كهرومغناطيسية متكاملة لمصفوفة هوائيات رقعية ميكروستريب برتبة رباعية في رباعية (4×4)؛ حيث تم بناؤها بالاعتماد على ركيزة عازلة متطورة من نوع (Rogers RT/duroid 5880) تم اختيارها بعناية نظراً لثابت عزلها الكهربائي المنخفض البالغ (2.2) وسماكتها المنخفضة جداً البالغة 0.7 mm ، وذلك لتقليل الفقد الناتج عن المواد السطحية والموصلات عند الترددات المرتفعة. كما استخدموا شبكة توزيع تغذية منتظمة ومحسنة عبر خطوط نقل ميكروستريب ذات مقاومة مدخلات قياسية تبلغ (50 أوم) لضمان استقرار

النمط الإشعاعي. وتمت كافة عمليات النمذجة والمحاكاة الكهرومغناطيسية ثنائية وثلاثية الأبعاد باستخدام برنامج (CST Microwave Studio).

وقد أسفرت هذه المنهجية المعتمدة في الورقة البحثية عن نتائج محاكاة متفوقة ودقيقة؛ حيث حقق الهوائي المقترح رنيناً عميقاً ومستقراً عند ترددات التشغيل المستهدفة تمثل في تسجيل معامل انعكاس (S_{11}) بقيمة ممتازة بلغت -26.71dB عند تردد الرنين مما يضمن كبحاً قوياً للإشارات المرتدة، وتوافق ذلك مع تسجيل قيمة مثالية لنسبة الموجة الواقفة الفولتية (VSWR) بلغت 1.23 وهي قيمة تقترب من الواحد الصحيح مما يعكس مواءمة ممتازة للمقاومة وتدفقاً كفوياً للطاقة عبر خطوط التغذية دون مفقودات تذكر.

كما نجح التصميم في تحقيق أداء إشعاعي عالي التوجيهية حيث وصل الكسب الأقصى للمصفوفة إلى 9.54dB بمقدار توجيهية 10.13dB وهو ما يضمن تركيز الإشارة وتوجيه الحزم الإشعاعية بدقة لمسافات طويلة، علاوة على ذلك نجح الهوائي في توفير عرض نطاق ترددي واسع وممتد يبلغ 2.52GHz يغطي كامل الحيز المستهدف للموجات المليمترية الذي يتراوح بين 24GHz إلى 40GHz ، لتصل الكفاءة الإشعاعية الإجمالية للمصفوفة الرباعية المقترحة إلى 86.82% نتيجة للحد من مفقودات الطاقة الكهرومغناطيسية السطحية، مما أثبت هندسياً نجاح التصميم في معالجة مشكلة البحث بكفاءة عالية [8].

وفي عام 2024 قام كلا من (Noora Salim, Mandeep J. Singh, & Amer T. Abed) بنشر ورقة بحثية بعنوان: "COMPACT CPW 4X4 MIMO ANTENNA FOR WI-FI 6 AND 5G(NR77/NR78/NR79) COMMUNICATIONS" (IEEE802.11.AX) AND 5G(NR77/NR78/NR79) COMMUNICATIONS

تمحورت مشكلتها البحثية حول التحدي الهندسي المتمثل في تصميم هوائيات مصفوفات (MIMO) مدمجة وشديدة الصغر لتغطي تطبيقات الاتصالات اللاسلكية عريضة النطاق للجيل الخامس ونظم الواي فاي الحديثة، مع مواجهة مشكلة الارتفاع الكبير في الاقتران المتبادل والتداخل الكهرومغناطيسي بين عناصر المصفوفة نتيجة لتقريبها الشديد داخل المساحة الفيزيائية الصغيرة للوحة.

ولحل هذه المشكلة، استخدم الباحثون في منهجيتهم تصميماً مدمجاً مكوناً من مصفوفة هوائيات رباعية المنافذ (4×4) تعتمد على آلية التغذية بدليل الموجة (CPW - Coplanar Waveguide)، وتم بناء هذا الهيكل بأبعاد فيزيائية كلية بلغت ($34 \times 32 \text{ mm}$) على ركيزة عازلة شائعة واقتصادية التكلفة من نوع (FR-4) بسماكة قدرها (1.6 mm). واعتمدت المنهجية بشكل رئيسي على معالجة هيكلية عبر حفر شقوق وثقوب هندسية مدروسة (Slots) داخل الجزء المشع وفي المستوى الأرضي للهوائي لتشتيت التيارات السطحية، وتمت عمليات التصميم بالكامل داخل بيئة برنامج المحاكاة الكهرومغناطيسية الكلاسيكي (CST).

وقد أسفرت هذه المنهجية عن نتائج محاكاة وقياسات عملية ممتازة؛ حيث نجح الهوائي في العمل بكفاءة وثبات عبر حيز ترددي واسع وممتد من (4.2GHz إلى 7GHz) ليغطي النطاقات المستهدفة للواي فاي 6 وشبكات الـ 5G الفرعية. وأثبتت النتائج نجاح تقنية حفر الشقوق في خفض الاقتران المتبادل (التداخل) بين الهوائيات المتجاورة والمتقابلة إلى أقل من -15dB ، وأقل من -25dB بين العناصر المتقاطعة قطرياً، مع تسجيل كسب إشعاعي جيد جداً يتراوح بين (3 إلى 6dBi) وكفاءة إشعاعية إجمالية مرتفعة تراوحت بين (60% إلى 80%) [9].

الفصل الثالث:

الجانب النظري والتعريف العام بنوع الهوائي المستخدم

1.3 تمهيد وتعريف عام:

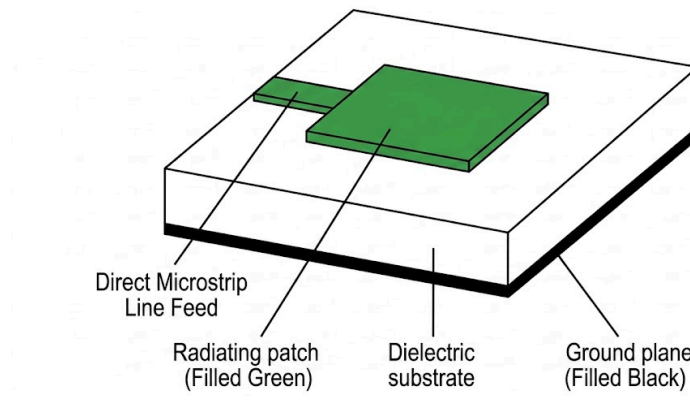
تُصنف هوائيات الرقعة الميكروستريب (Microstrip Patch Antennas) كواحدة من أهم الابتكارات التكنولوجية في هندسة الاتصالات اللاسلكية الحديثة. وتتميز هذه الهوائيات ببنيتها اللوحية المستوية، خفة وزنها، وتكلفتها المنخفضة، مما يجعلها الخيار المثالي للتكامل مع الأنظمة المدمجة ومصفوفات MIMO.

2.3 الهيكل الهندسي ونظرية العمل:

يتكون الهوائي الميكروستريب في بنيته الكلاسيكية التقليدية من ثلاث طبقات رئيسية متكاملة كما هو موضح بالشكل (1.3) وهي:

- 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 (FR-4).

- 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 [2].



شكل (1.3): البنية الهندسية والطبقات الثلاث لهوائي الرقعة الميكروستريب التقليدي.

3.3 آلية التغذية المستخدمة :

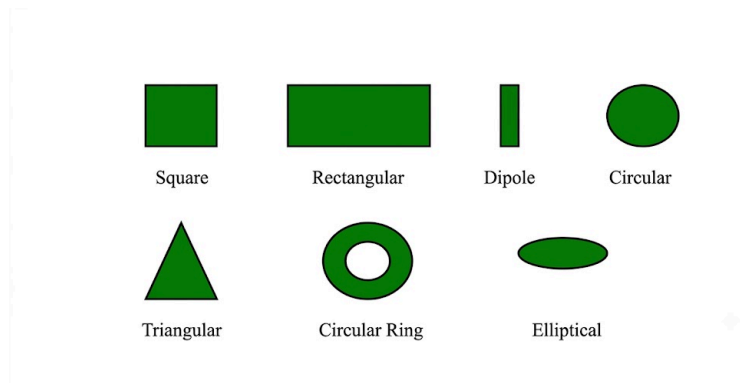
تم اعتماد طريقة التغذية بالخط الشريطي المباشر [2]. حيث يُطبع خط التغذية كامتداد معدني مباشر للرقعة المشعة في نفس الطبقة العلوية. تم اختيار هذه الآلية تسهيلاً لعملية التصنيع والنمذجة داخل برنامج CST دون الحاجة لحفر عمودي، مع مرونة كاملة عند ضبط عرض الخط للوصول إلى ممانعة التوافق القياسية (50 أوم) لمنع ارتداد الإشارة [1].

3.3 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 (2.3) التصاميم الهندسية 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 (2.3): الأشكال الهندسية لعناصر الإشعاع في الهوائيات الرقعية الشريطية.

4.3 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], [9].

- مطابقة الممانعة: يوفر الشكل المستطيل مرونة عالية جداً في التحكم بممانعة الإدخال وتسهيل خطة مطابقتها مع خط التغذية عند القيمة القياسية 50 أوم. [4]

5.3 معايير اختيار المادة العازلة (FR-4) وخصائصها:

يعود السبب الرئيسي وراء اعتماد مادة العازل الكهربائي من نوع (FR-4) في هذا التصميم إلى كونها المادة الأكثر انتشاراً واقتصادية في سوق تكنولوجيا تصنيع الدوائر الإلكترونية المطبوعة والهوائيات. فمن الناحية العملية، تتيح هذه المادة بناء هوائيات بتكلفة مالية منخفضة جداً مع توفرها التجاري الواسع، مما يجعلها الخيار المثالي للتطبيقات التجارية والإنتاج الكمي للأجهزة اللاسلكية.

بالإضافة إلى ذلك، توفر هذه الركيزة صلابة وهيكلًا فيزيائياً متيناً يحمل الأجزاء المعدنية للهوائي ويحميه من العوامل الميكانيكية الخارجية، وتتميز بأداء مستقر وفعال عند الترددات المتوسطة مثل تردد ثلاثة جيجاهرتز المستهدف في هذا المشروع، مما يحقق توازناً ممتازاً بين التكلفة المنخفضة والأداء الهندسي المطلوب لبناء مصفوفة هوائيات مدمجة.

7.3 المعادلات الرياضية للتصميم:

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 (ϵ_{eff}):

نظراً لتداخل المجال الكهربائي بين الركيزة والهواء المحيط (تأثير الحواف)، يتم حساب ثابت العزل الفعال الذي تمر عبره الموجة كالتالي [1]:

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

3- حساب امتداد الطول الهامشي (ΔL):

نتيجة لتقوس خطوط المجال الكهربائي عند أطراف النحاس، يظهر امتداد وهمي في الطول يُحسب رياضياً عبر المعادلة التالية:

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

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 الرابع:

منهجية التصميم الهندسي

1.4 خطوات ومنهجية العمل:

اعتمدت منهجية التصميم في هذا المشروع على تسلسل هندسي منظم يبدأ من الحسابات النظرية وينتهي بالمحاكاة الكاملة عبر برنامج CST Studio Suite، وتمت العملية وفق الخطوات التالية:

1. حساب الأبعاد الفيزيائية الابتدائية للهوائي الرقعي المستطيل الفردي رياضياً عند تردد 3GHz.
2. بناء النموذج ثلاثي الأبعاد للهوائي الفردي وتغذية الخط الشريطي بممانعة 50 أوم وإجراء عملية التحسين (Optimization) للأبعاد.
3. تكرار الهوائي لتشكيل مصفوفة ميمو رباعية العناصر (4 × 4) مدمجة الحجم.
4. دراسة مشكلة الاقتران المتبادل الناتجة وتحديد أماكن حفر الشقوق المستطيلة الجانبية (Side Slots) بجانب خطوط التغذية لرفع كفاءة العزل.
5. استخراج وتحليل المقاييس الكهرومغناطيسية ومعاملات التنوع للتأكد من مطابقة التصميم للمواصفات العالمية.

2.4 حساب الأبعاد الفيزيائية الابتدائية للهوائي وفق التردد المُستهدف :

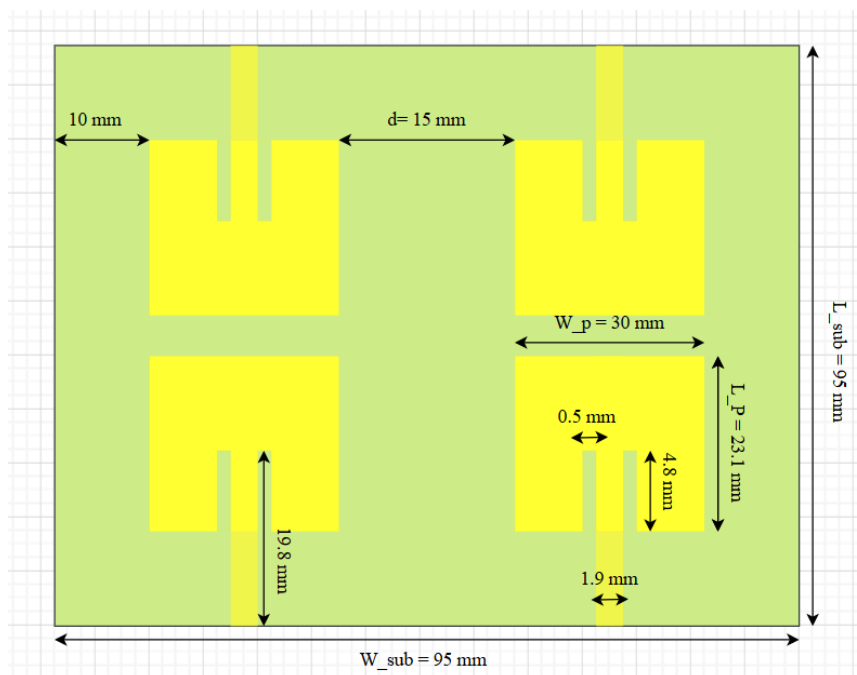
يوضح الجدول (1.4) الأبعاد التي تم الحصول عليها من خلال الحسابات وذلك عند 3GHz:

الوصف	القيمة (mm)	الرمز
سماعة الركيزة العازلة	1.6	h
سماعة طبقة النحاس	0.035	t
عرض الرقعة المشعة	30.43	W
طول الرقعة المشعة	23.44	L

جدول (1.4) الأبعاد التي تم حسابها من خلال المعادلات

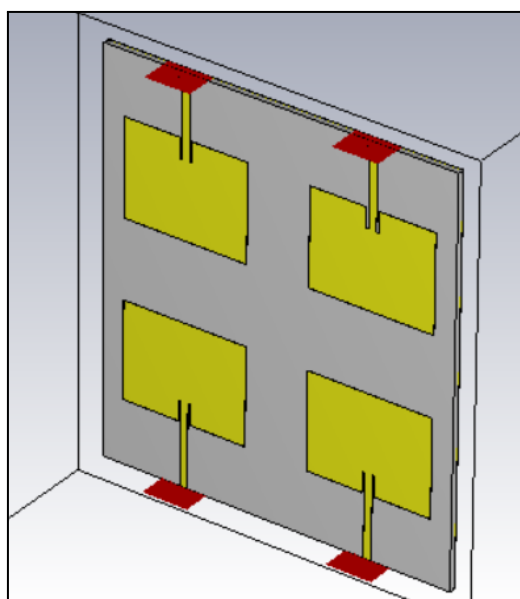
3.4 بناء نموذج ثلاثي الأبعاد داخل بيئة CST وتطبيق عملية التحسين للأبعاد:

يوضح الشكل (1.4) الأبعاد التي تم اختيارها داخل بيئة برنامج CST وذلك بعد تطبيق عملية التحسين:



الشكل (1.4) : الأبعاد المختارة والمُعتمدة داخل بيئة برنامج CST بعد التحسين

ويعرض الشكل (2.4) النموذج ثلاثي الأبعاد داخل بيئة البرنامج وذلك بعد تكرار الهوائي لتكوين مصفوفة (4 × 4):



الشكل (2.4) : شكل الهوائي المعتمد داخل بيئة برنامج CST.

4.4 المبررات الهندسية لاختيار الأبعاد الفيزيائية والعملية للمصفوفة:

- ◀ حجم اللوحة الكلي: تم اختيار حجم صغير ومدمج لمواكبة متطلبات الأجهزة المحمولة الحديثة، ويمثل هذا الحجم المساحة الدقيقة لاستيعاب العناصر وتوزيعها بشكل متناظر.
- ◀ تقليص المسافات البينية: بسبب صغر اللوحة، تم تقريب الهوائيات من بعضها، مما تسبب في زيادة التداخل الكهرومغناطيسي؛ هذا التقارب كان المبرر الأساسي وراء ابتكار وحفر الشقوق الجانبية (Slots) لقطع التيارات السطحية وتحقيق عزل ممتاز.
- ◀ عرض خط التغذية: تم ضبطه بدقة ليحقق ممانعة قدرها 50 أوم، وهي القيمة القياسية العالمية اللازمة لضمان نقل الإشارة بالكامل من المصدر إلى الهوائي دون ارتداد أو ضياع للقدرة.
- ◀ عمق حفر خط التغذية : ممانعة الهوائي عند أطرافه الخارجية تكون عالية جداً، ولتطابقها مع ممانعة خط التغذية المنخفضة، تم إدخال الخط مسافة معينة داخل جسم الهوائي للوصول إلى النقطة التي تتساوى فيها الممانعتان تماماً لضمان أقصى انتقال للتيار.

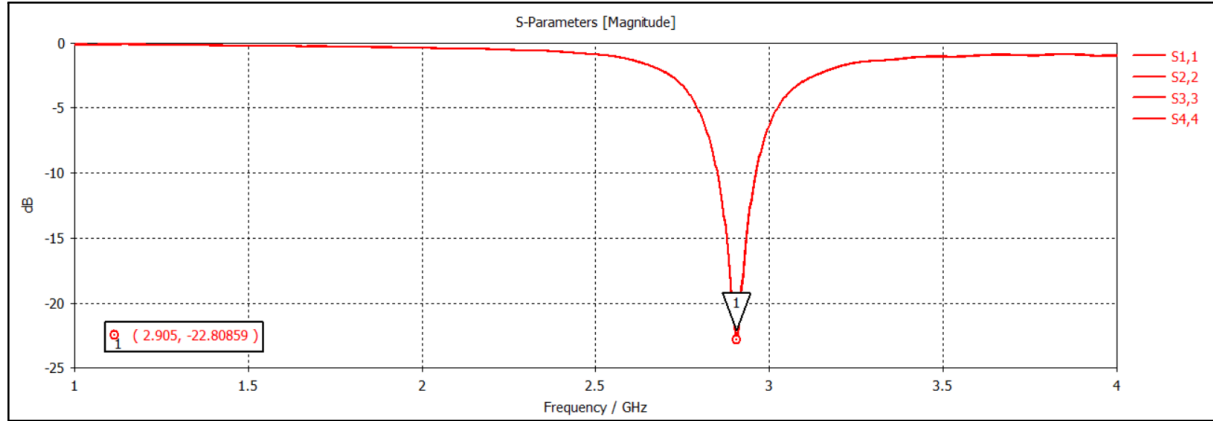
الفصل الخامس:

المحاكاة والنتائج التي تمّ الحصول عليها

1.5 تمهيد:

سيتم في هذا الفصل عرض ومناقشة أهم البارامترات المهمة التي تم الوصول لها من خلال المحاكاة:

1.1.5 معاملات الانعكاس:

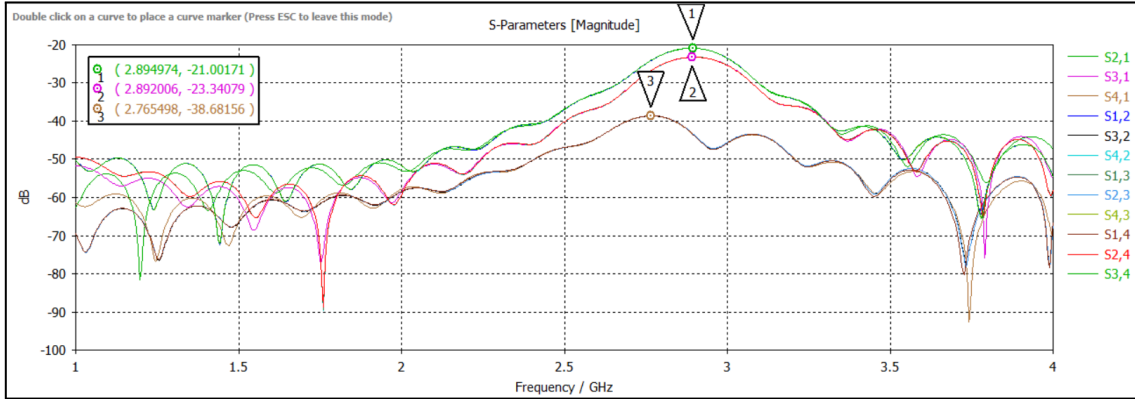


الشكل (1.5) : منحنى معامل الانعكاس.

يُلاحظ من الرسم البياني أن منحنيات معاملات الانعكاس لجميع المنافذ المغذية للهوائيات الأربعة متطابقة تماماً فوق بعضها البعض كمنحنى واحد. هذا التطابق التام يعكس الدقة العالية والتناظر الهندسي الصارم في توزيع عناصر المصفوفة وأبعادها داخل بيئة التصميم، مما يضمن أن كل هوائي يعمل بنفس الكفاءة المتوقعة دون أي انحراف بين العناصر.

يُظهر المنحنى هبوطاً حاداً وعميقاً متمركزاً بدقة شديدة عند منطقة التردد المستهدف للتشغيل وذلك عند -22.8dB، هذا الهبوط الحاد للأسفل يعني أن الهوائي نجح في تحقيق الرنين المثالي عند التردد المطلوب، متجاوزاً بكثير العتبة المطلوبة لقبول التصميم اللاسلكية.

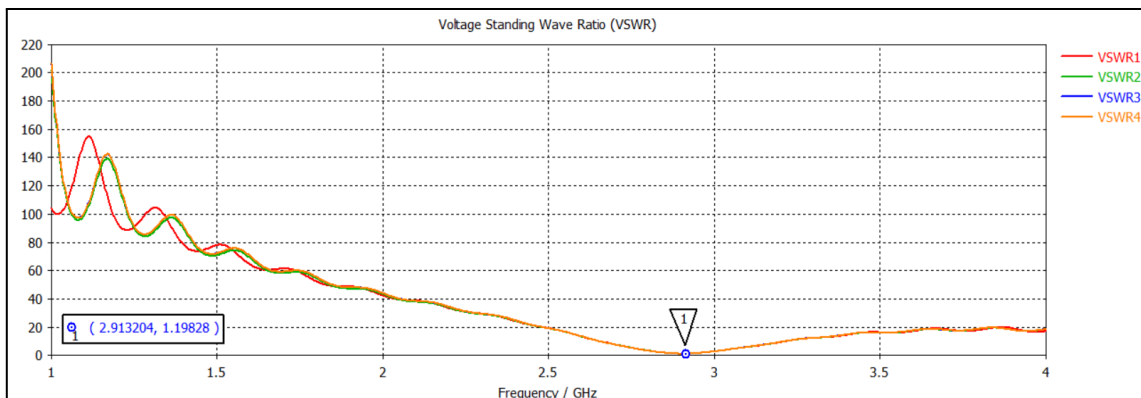
2.1.5 معاملات الاقتران:



الشكل (2.5): معاملات الاقتران

أعلى قمة في المنحنى عندك لم تتجاوز الخط الأحمر الهندسي -20dB بل ظلت تحته وهذا يثبت: نجاح تقنية تقليل الاقتران المتبادل التي تم تبنيها في هذا التصميم. فعلى الرغم من تقريب الهوائيات الأربعة بشكل كبير داخل المساحة المدمجة والصغيرة للغاية للوحة، إلا أن منحنيات معاملات الانتقال ظلت منخفضة جداً ومستقرة في الأسفل عند منطقة التردد المستهدف. هذا الهبوط الملحوظ يثبت كفاءة الشقوق الجانبية المحفورة وقدرتها العالية على قطع وتشتيت التيارات السطحية المارة عبر الركيزة العازلة. كما نلاحظ تحقيق عزل كهرومغناطيسي ممتاز واستقرار الإشارة.

3.1.5 نسبة الموجة الواقفة:

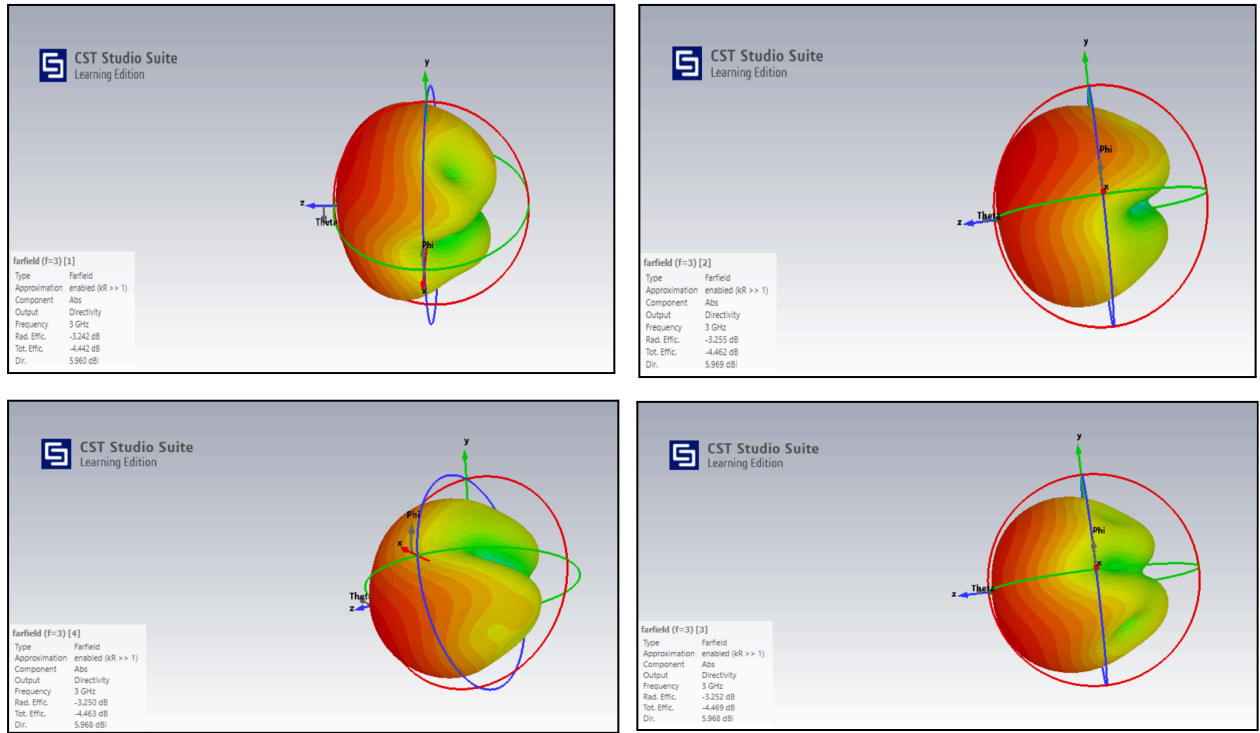


الشكل (3.5): منحنى VSWR.

توضح نتائج نسبة الموجة الموقوفة للجهد تطابقاً تاماً بين المنافذ الأربعة، حيث تقترب القيمة بشكل مثالي من الواحد الصحيح عند منطقة التردد المستهدف.

هذا الانخفاض يثبت هندسياً كفاءة التغذية المعتمدة وانتقال القدرة الكهرومغناطيسية بالكامل من المصدر إلى العناصر المشعة دون حدوث مفقودات أو ارتداد للإشارة.

3.1.5 نمط الشعاع والكسب والإتجاهية:



الشكل (4.5) : نمط الإشعاع لكل من الهوائيات الأربع.

نلاحظ وجود انبعاجات مختلفة في كرة نمط الإشعاع للهوائيات الأربع، حيث تظهر الانبعاجات في كل مرة بصورة مختلفة عن الأخرى، حيث أنه لا تتواجد الهوائيات الأربعة في نفس الظروف المحيطة على

اللوحة؛ فالهوائيات القريبة من أطراف وزوايا اللوحة ترى فراغاً خارجياً من جهات، بينما ترى امتداد اللوحة النحاسية من جهات أخرى. هذا الاختلاف الفيزيائي في المكان يتسبب في شد وجذب غير متساوٍ للمجالات الكهربائية عند الحواف، مما يؤدي إلى انبعاج الكرة الإشعاعية بشكل مختلف لكل هوائي بناءً على موقعه.

على الرغم من نجاح الشقوق في عزل الهوائيات وتقليل التداخل بينها بشكل ممتاز، إلا أنه لا وجود لعزل كامل في الواقع. فكل هوائي أثناء عمله يتأثر بوجود الهوائيات الثلاثة الأخرى المجاورة له، والتي تعمل مثل حواجز أو ظلال كهرومغناطيسية تؤثر على مسار الموجات الصادرة منه، مما يسبب انبعاجاً فريداً لكل كرة إشعاعية حسب زاوية رؤيتها لجيرانها.

الكسب	الاتجاهية
2.415dBi	5.969dBi

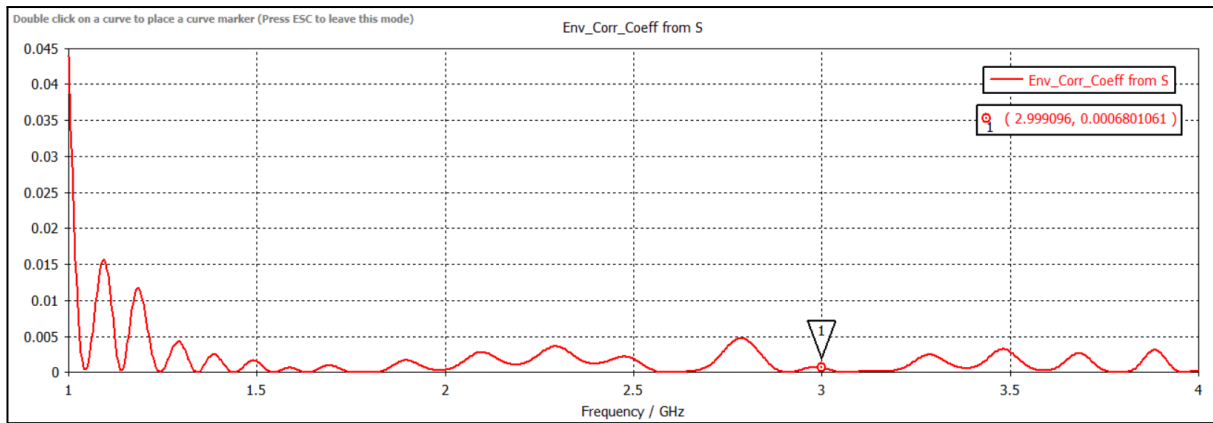
الجدول (1.5) : قيم الكسب والاتجاهية.

يوضح الجدول (1.5) قيم الكسب والاتجاهية المتحصل عليها وهي متطابقة لجميع الهوائيات تقريباً.

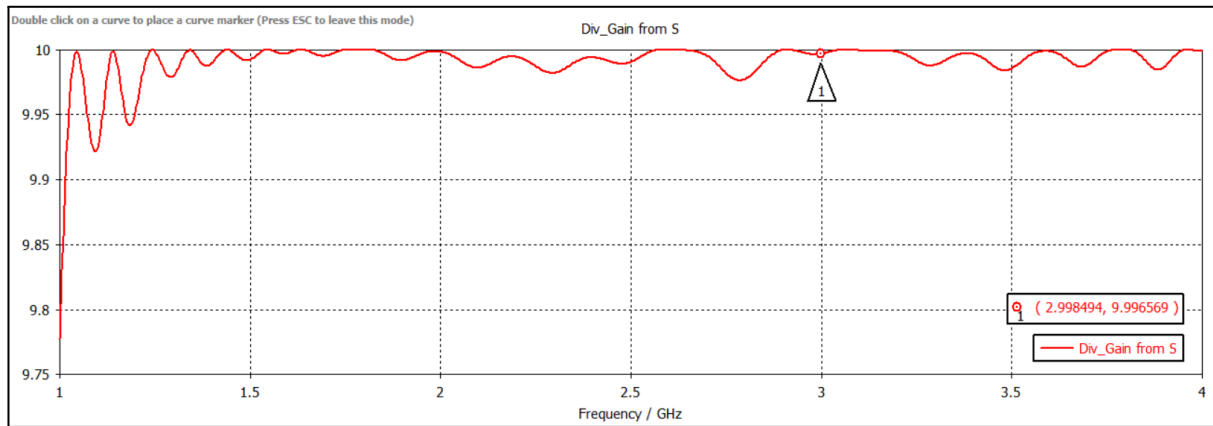
إن تقارب قيم الاتجاهية والكسب بشكل شبه متطابق بين الهوائيات الأربعة يُعد مؤشراً هندسياً ممتازاً يثبت التناظر الدقيق والكفاءة العالية للتصميم. هذا التشابه يضمن توافق القنوات الأربع واستقرار أداء المنظومة بالكامل، مما يتيح توزيعاً متوازناً لنقل واستقبال البيانات دون ضعف في أي منفذ.

الاتجاهية تُعتبر قيمة عالية وممتازة لهوائي رقعة مستطيل، وتثبت أن التصميم يركز الإشارة ويوجهها بقوة نحو الفضاء بدلاً من تشتيتها. بينما قيمة الكسب قيمة ليست جيدة بشكل كبير؛ لأن مادة FR-4 المستخدمة كعازل معروفة في عالم الاتصالات بأن مفقوداتها عالية وتستهلك جزءاً من الطاقة.

4.1.5 معامل الارتباط ECC وكسب النوع DG:



الشكل (5.5) : منحنى معامل الارتباط ECC.



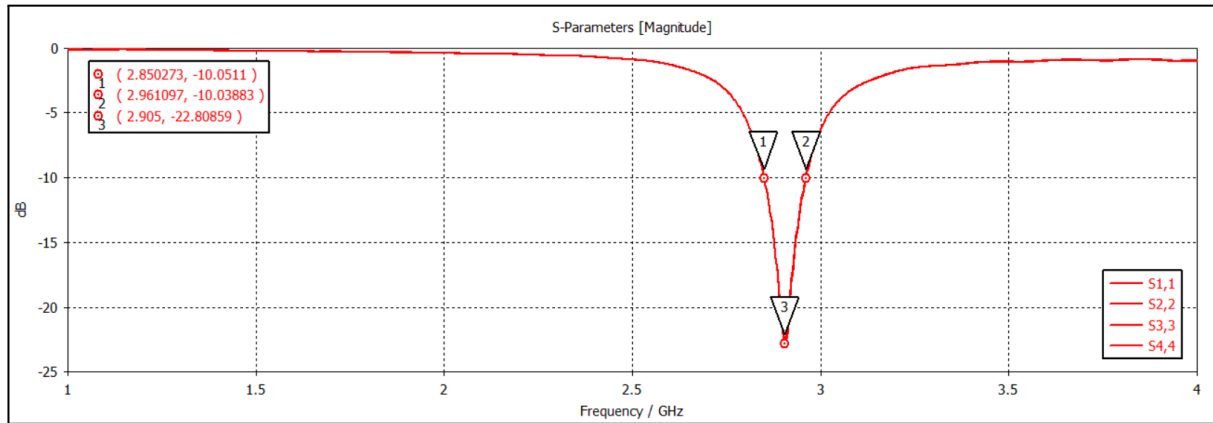
الشكل (6.5) : منحنى كسب النوع DG

تُثبت النتائج المستخرجة الكفاءة العالية للمصفوفة الرباعية كمنظومة MIMO متكاملة وذكية؛ حيث يوضح منحنى معامل الارتباط (ECC) انخفاضاً هائلاً يقترب من الصفر المطلق وهذا هو المطلوب،

وهو ما يقل بكثير عن الحد الأقصى المسموح به عالمياً هندسياً. هذا الانخفاض الرقمي يضمن استقلالية القنوات الأربع تماماً، مما يمنع حدوث أي تداخل أو ارتباط بين الإشارات اللاسلكية المارة عبر المنافذ.

وبالتوازي مع ذلك، يُظهر منحنى كسب التنوع (Diversity Gain) استقراراً تاماً وثباتاً شبه كامل عند السقف المثالي المحدد هندسياً (بالقرب من القيمة 10) على كامل نطاق التشغيل. هذا الثبات يؤكد نجاح دمج الهوائيات الأربعة في تحسين جودة واستقرار الإشارة الإجمالية وتقادي انقطاعها، مما يضمن توفير اتصال لاسلكي قوي، مستمر، وذو اعتمادية عالية في نقل البيانات.

5.1.5 عرض النطاق الترددي:



الشكل (7.5) : عرض النطاق الترددي

$$BW = f_H - f_L = 2.961 - 2.850 = 0.111 \text{ GHz} = 111 \text{ MHz}$$

حيث حقق النظام نطاق ترددي جيد بلغ 111 ميغا هيرتز.

يُلخص الجدول (2.5) النتائج التي تم الحصول عليها:

الجدول (2.5) : ملخص النتائج التي تم الوصول إليها.

البارامتر	القيمة المتحصل عليها	الحالة الهندسية
تردد الرنين المركزي	2.905GHz	متمركز بدقة عند التردد المستهدف للتشغيل.
معامل الانعكاس	-22.8dB	هبوط حاد وعميق يعكس رنيناً ممتازاً ومطابقة تامة للممانعة.
معاملات الاقتران	أقل من -20dB	عزل كهرومغناطيسي ممتاز بين المنافذ بفضل الشقوق الجانبية.
VSWR	1.19	انتقال كفاء للقدرة من خط التغذية إلى المشع دون مفقودات ارتدادية.
الاتجاهية	5.969dBi	قيمة عالية وممتازة تثبت تركيز الحزم الإشعاعية في الفضاء.
الكسب	2.415dBi	مقبول ومفيد بطبيعة الفقد المرتفع لمادة الركيزة العازلة (FR-4).
الكفاءة الإشعاعية	-3.255dB	تعكس بدقة تأثير المفقودات العازلة لركيزة الـ FR-4 على الأداء الإشعاعي الكلي.
عرض النطاق	111MHz	نطاق ترددي جيد جداً.
معامل الارتباط DCC	يقترّب من الصفر	استقلالية تامة وفصل كامل بين القنوات اللاسلكية الأربع.
كسب التنوع DG	10	استقراره يؤكد القدرة العالية للمنظومة على مواجهة ظاهرة التلاشي.

الفصل السادس:

الاستنتاجات والتوصيات

الاستنتاجات:

بناءً على مراحل التصميم والحسابات الرياضية ونتائج المحاكاة الكهرومغناطيسية التي تم الحصول عليها عبر برنامج المحاكاة لشبكة الهوائيات المتعددة المداخل والمخارج ذات الشقوق الجانبية، نستنتج نجاح تكتيك العزل الهيكلي المقترح؛ حيث أثبتت المحاكاة الكفاءة العالية جداً لتقنية حفر الشقوق الجانبية المستطيلة المحاذية لخطوط التغذية الشريطية في كبح والتيارات السطحية المارة عبر المادة العازلة المشتركة، وهو ما حقق عوازل كهرومغناطيسية ممتازة ومستقرة بين المنافذ رغم التقارب الشديد وعملية دمج العناصر الأربعة في مساحة فيزيائية صغيرة ومدمجة. كما أظهرت النتائج توافقاً هندسياً صارماً وتناظراً تاماً بين الهوائيات الأربعة من حيث جودة الرنين ومطابقة الممانعة، حيث سجل معامل الانعكاس هبوطاً حاداً وعميقاً متمركزاً بدقة عند التردد المستهدف للتشغيل، مدعوماً بقيم نموذجية لنسبة الموجة الواقفة الفولتية تقترب من الواحد الصحيح مما يؤكد الانتقال الكفاء للقدرة من المنافذ للمشعات دون مفقودات ارتدادية تذكر. ومن جانب الأداء الإشعاعي، حقق التصميم توجيهية ممتازة تعكس القدرة العالية للهوائي على تركيز الحزم الإشعاعية في الفضاء، في حين عكست قيم الكسب طبيعة مادة الركيزة المستخدمة والمعروفة بمفقوداتها العازلة المرتفعة، إلا أن التصميم حافظ على كفاءة إشعاعية وعرض نطاق ترددي محقق بشكل جيد جداً. وبرهنت مؤشرات أداء التنوع على نجاح المنظومة كشبكة ميمو ذكية، حيث انخفض معامل الارتباط المغلف ليقترّب من الصفر المطلق محققاً استقلالية تامة وفصلاً كاملاً بين القنوات اللاسلكية الأربع، بالتوازي مع ثبات كسب التنوع عند السقف المثالي المحدد هندسياً، مما يؤكد قدرة الهوائي على مواجهة ظاهرة التلاشي متعدد المسارات وتوفير اتصال مستقر وعالي السرعة.

التوصيات:

ولإستكمال هذا الجهد البحثي وتطوير الأداء الإشعاعي للمصفوفة المقترحة في أبحاث مستقبلية، يُوصى بتغيير مادة الركيزة العازلة ومحاكاة وتصنيع الهوائي باستخدام ركائز عازلة ذات مفقودات منخفضة جداً وثابت عزل متميز مثل عائلة روجرز، مما يسهم في رفع كفاءة الإشعاع الكلية والكسب بشكل ملحوظ. كما يوصى بتطوير تقنيات العزل واختبار آليات عزل إضافية مدمجة بجانب الشقوق الجانبية، مثل حفر هياكل خطوط الحظر الكهرومغناطيسي أو إدخال جدران معدنية قصيرة داخل المستوى الأرضي لدراسة مدى قدرتها على زيادة تعميق العزل ورفع النطاق الترددي. بالإضافة إلى ذلك، يُوصى كخطوة مستقبلية أساسية بتصنيع الهوائي عملياً باستخدام ماكينات الدوائر المطبوعة وقياس المعاملات الإشعاعية وعزل المنافذ عملياً باستخدام جهاز تحليل شبكات المتجهات داخل الغرفة اللاهوائية لمطابقة النتائج العملية بالنتائج التي تم الحصول عليها في المحاكاة، وأخيراً يوصى بإعادة ضبط أبعاد الهوائي وتصنيعها لتتوافق مع ترددات الموجات المليمترية العالية لخدمة تطبيقات محطات الجيل الخامس فائقة السرعة بشكل مباشر.

المصادر والمراجع

- [1] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2016.
- [2] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, Microstrip Antenna Design Handbook. Boston, MA, USA: Artech House, 2001.
- [3] A. Goldsmith, Wireless Communications. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
- [4] K. F. Lee and W. Chen, Advances in Microstrip and Printed Antennas. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1997.
- [5] Z. N. Chen and M. Y. W. Chia, Broadband Planar Antennas: Design and Applications. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2006.
- [6] M. S. Sharawi, Printed MIMO Antenna Systems for Mobile Terminals. Boston, MA, USA: Artech House, 2014.
- [7] J. R. James and P. S. Hall, Handbook of Microstrip Antennas, vol. 1. London, UK: Peter Peregrinus Ltd., 1989.
- [8] P. Mounika and T. Jaya, "Design of 4X4 Microstrip Patch Array Antenna for 5G mmWave Applications," International Journal of Electronics and Communication Engineering, vol. 12, no. 1, pp. 104-117, 2025.[Design of 4X4 Microstrip Patch](#)
- [9] N. Salim, M. J. Singh, and A. T. Abed, "Compact CPW 4x4 MIMO Antenna for Wi-Fi 6 (IEEE802.11.ax) and 5G (NR77/NR78/NR79) Communications," IIUM Engineering Journal, vol. 25, no. 1, pp. 225-236, 2024.[COMPACT CPW 4X4 MIMO ANTENNA FOR WI-FI 6](#)