

## Impact of Dielectric Substrate Material on the Performance of Microstrip Patch Antennas (MPAs), V-Band

Al-Zahraa H. Othman<sup>1,\*</sup>, Wasaq A. Hassan<sup>1</sup>, Fatimah A. Ahmed<sup>1</sup>, Rasim A. Ali<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Wadi Alshatti University, Brack, Libya

### ARTICLE HISTORY

Received 21 December 2025  
Revised 23 January 2026  
Accepted 30 January 2026  
Online 07 February 2026

### KEYWORDS

5G Applications;  
Dielectric constant;  
Microstrip patch antenna (MPA);  
Millimeter wave (mm Wave);  
Substrate material;  
V-Band.

### ABSTRACT

Microstrip Patch Antennas (MPAs) are pivotal components in modern communication systems due to their compact size and ease of fabrication; however, the shift toward the V-band necessitates designs that ensure high gain and efficiency despite challenges related to dielectric loss and narrow bandwidth. This paper analyzes the impact of substrate material properties—specifically dielectric constant and loss—on the performance of an MPA designed for a 55 GHz center frequency within the 50–60 GHz band. Using CST Microwave Studio, the antenna was simulated with uniform dimensions on three Rogers substrates of 0.127 mm thickness: RT/duroid 5880, RO3003, and RO4350B, evaluating gain, efficiency, reflection coefficient ( $S_{11}$ ), and bandwidth. Simulation results revealed distinct performance variations; the RT/duroid 5880 model (lowest permittivity) achieved the highest gain (6.16 dBi) and directivity (6.82 dBi), making it ideal for long-range applications, while the Rogers RO4350B recorded the highest radiation efficiency (89.6%). Conversely, the Rogers RO3003 model demonstrated the best impedance matching ( $S_{11}$  -19.8 dB) and the widest bandwidth (2.527 GHz). Consequently, the study concludes that optimal material selection depends on specific application priorities, recommending the RO3003 substrate as the premier choice for 5G applications requiring ultra-high data transfer rates due to its superior bandwidth performance.

## تأثير مادة الركيزة العازلة على أداء هوائي الشريحة الدقيقة (MPAs) في النطاق (V-Band)

الزهراء حسن عثمان<sup>1,\*</sup>، وسق عبدالسلام حسن<sup>1</sup>، فاطمة عبد النبي أحمد<sup>1</sup>، راسم عامر علي<sup>1</sup>

المملخص	الكلمات المفتاحية
<p>تعد هوائيات الشريحة الدقيقة (MPAs) Microstrip Patch Antennas عناصر محورية في أنظمة الاتصالات الحديثة بفضل صغر حجمها وسهولة تصنيعها. ومع التوجه المتزايد نحو استغلال النطاق V-band، تزداد الحاجة لتصميمات توفر كسباً وكفاءة عاليين، رغم تحديات الفقد العزلي وضيق النطاق الترددي المصاحبة لهذه الترددات. تهدف هذه الورقة إلى تحليل تأثير اختلاف مادة الركيزة (تحديداً ثابت العزل الكهربائي وخصائص الفقد) على أداء هوائي (MPAs) مصمم للعمل عند التردد المركزي 55GHz ضمن النطاق 50-60 GHz. تم تقييم مؤشرات الأداء الأساسية التي تشمل: الكسب، الكفاءة، معامل الانعكاس (<math>S_{11}</math>)، وعرض النطاق الترددي. لتحقيق ذلك، تم تصميم ومحاكاة هذا الهوائي بأبعاد موحدة باستخدام برنامج CST Microwave Studio، وتطبيقه على ثلاث ركائز مختلفة من عائلة Rogers بسمك موحدة (0.127 mm)، وهي: (Rogers RT/duroid 5880)، و (Rogers RO3003)، و (Rogers RO4350B). أظهرت نتائج المحاكاة تبايناً واضحاً في الأداء؛ حيث حقق النموذج المبني على مادة RT/duroid 5880 (الأقل عزلاً) أعلى كسب واتجاهية (Gain <math>\approx</math> 6.16 dBi, Directivity <math>\approx</math> 6.82 dBi)، مما يجعله مثالياً لتطبيقات المدى الطويل. في المقابل، تميز نموذج Rogers RO3003 بتحقيقه أفضل توافق في المعاوقة (<math>S_{11} \approx</math> -19.8 dB) وأعرض نطاق ترددي (BW <math>\approx</math> 2.527 GHz)، مما يجعله الخيار الأنسب لتطبيقات نقل البيانات عالية السرعة. بينما سجل نموذج Rogers RO4350B أعلى كفاءة إشعاعية (89.6%) رغم انخفاض كسبه قليلاً مقارنة بالبقية. ختاماً، توضح الورقة أن الأداء الأمثل يعتمد على أولوية التطبيق؛ إذ يوصى بركيزة 5880 لتعزيز مدى الإشارة (الكسب)، و بركيزة RO4350B للتصاميم المدمجة عالية الكفاءة. ومع ذلك، بالنسبة لتطبيقات الجيل الخامس التي تتطلب معدلات نقل بيانات فائقة، يبرز RO3003 كخيار مثالي بفضل تحقيقه لأعرض نطاق ترددي.</p>	<p>تطبيقات الجيل الخامس (5G) ثابت العزل الكهربائي هوائي الشريحة الدقيقة (MPA) الموجات المليمترية مادة الركيزة النطاق (V-Band)</p>

Antennas) الركيزة الأساسية في هندسة الهوائيات الحديثة؛ نظراً لخفة وزنها وبنيتها المستوية (Planar) وتوافقها مع الدوائر المتكاملة [2]. تتكون هذه الهوائيات من رقعة على أحد جانبي ركيزة عازلة، و سطح أرضي على الجانب الآخر [3]. وعلى الرغم من هذه المزايا، غالباً ما يواجه تصميم

### المقدمة

تعد الهوائيات مكونات أساسية في أنظمة الاتصالات اللاسلكية، حيث تعمل كمحولات بين الموجات الكهرومغناطيسية الموجهة والموجات في الفضاء الحر [1]. وقد أصبحت هوائيات الرقعة الشريطية الدقيقة (Microstrip Patch

\*Corresponding author

[https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1\\_14](https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_14)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).



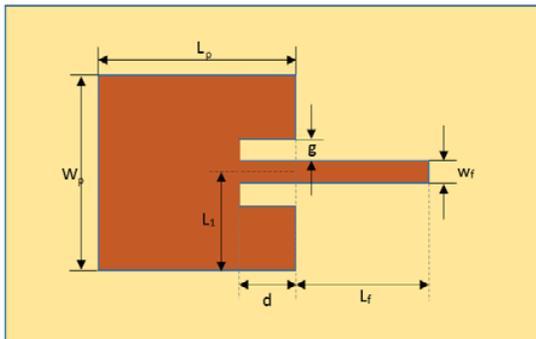
(55GHz) ضمن النطاق الترددي (50-60GHz). سيتم التركيز على تقييم ثلاث ركائز منخفضة الفقد من عائلة "Rogers"، وهي: (Rogers RO4350B)، و(Rogers RO3003)، و(Rogers RT-Duroid 5880)، وذلك نظرًا لاستقرار سماحيتهما النسبية وانخفاض معامل الفقد لديها. سيتم الاعتماد على برنامج CST Microwave Studio لإنشاء نموذج هندسي موحد، ومن ثم تحليل تأثير كل ركيزة على خصائص الإشعاع، بما في ذلك الكسب (Gain)، الكفاءة الإشعاعية، معامل الانعكاس ( $S_{11}$ )، ونسبة الموجة الواقفة (VSWR)، بهدف تحديد المادة الأمثل التي تحقق التوازن بين الأداء العالي والتغلب على تحديات الانتشار في هذا النطاق الحيوي.

### معادلات التصميم والشكل الهندسي

لفهم آلية عمل الهوائي وكيفية تأثير المواد المختلفة على ادائه، لا بد من استعراض بنيتها الهندسية أولاً؛ حيث يتكون هوائي الرقعة الشريطية الدقيقة (Microstrip Patch Antennas) هيكلياً من رقعة إشعاعية معدنية (Radiating Patch) رقيقة جداً، مثبتة فوق مستوى أرضي (Ground Plane) وتفصل بينهما طبقة من مادة عازلة كهربائياً تُعرف بالركيزة (Substrate) [14].

ولضمان كفاءة هذا الهيكل في نقل الطاقة الكهرومغناطيسية، يجب اختيار آلية "تغذية" مناسبة، حيث تتعدد المنهجيات الهندسية لتغذية هذا النوع من الهوائيات، ومن أكثرها شيوعاً: التغذية بالمجس المحوري (Coaxial Probe)، خط الشريحة الدقيقة (Microstrip Line)، التغذية المتداخلة (Inset Feed)، الاقتران عبر الفتحة (Aperture Coupling)، والاقتران التقاربي (Proximity Coupling) [15].

تعتمد هذه الدراسة على تصميم هوائي شريحة دقيقة مستطيل الشكل، مُغذًى بواسطة خط شريطي متداخل (Inset Microstrip Line). وذلك بهدف تحقيق مواءمة الممانعة (Impedance Matching) بدقة من خلال ضبط عمق نقطة التداخل، فضلاً عن سهولة تصنيعه مقارنةً بآليات التغذية الأخرى [15]. إضافة إلى ذلك، يتيح هذا النوع من التغذية تحكماً مرئياً في الممانعة مع لحفاظ على البنية الهندسية المسطحة (Planar Configuration) [16-19]، ويُظهر الشكل (2) التصميم الهندسي المقترح لهوائي الرقعة الشريطية الدقيقة المستطيلة الذي يعمل بتقنية التغذية المتداخلة.

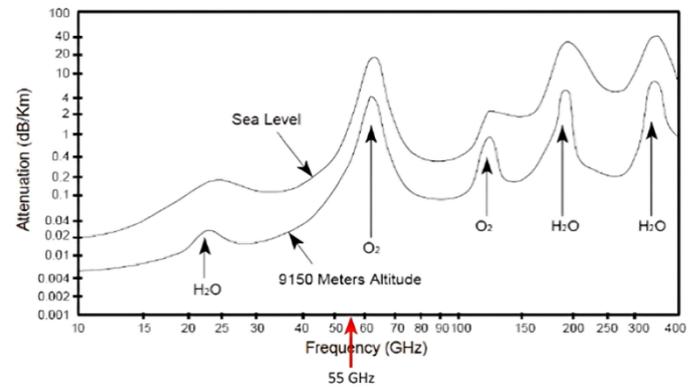


الشكل 2: البنية الهندسية لهوائي رقعة شريطية ذي التغذية المتداخلة (أو لغائرة) [15]

لتصميم هذا النوع من الهوائيات، تقتضي الخطوة الأولى حساب المعلمات التصميمية [15]. ويستعرض الجدول (1) التسلسل الرياضي والمعادلات الحاكمة المستخدمة لاستنتاج ابعاد الهوائي، وذلك بناءً على تردد الرنين

هوائيات الرقعة الشريطية الدقيقة تحديات، لا سيما في تحسين مؤشرات أدائها مثل مطابقة المعاوقة، والكسب، والتوجيهية، ونسبة الموجة الموقوفة للجهد (VSWR) [4]. ومع ذلك، يرتبط سلوك الرنين لهوائي رقعة الميكروستريب بأبعاده الفيزيائية، مما يسمح بتصميم هندسته بصورة تحليلية لتطبيقات معينة [5].

مع تطور تقنيات الاتصالات، برز النطاق الترددي V-Band (40-75 GHz) كجزء حيوي لتطبيقات الجيل الخامس (5G)، وتحديدًا التردد 55GHz المستخدم في تطبيقات وصلات الربط الخلفي (Wireless Backhaul) لربط الخلايا الصغيرة، نظرًا لما يوفره من عرض نطاق ترددي ضخم ومعادلات نقل بيانات فائقة [6, 7]. ومع ذلك، يواجه هذا النطاق تحديات فيزيائية تؤثر على استقرار الشبكة وكفاءة الهوائي، أبرز هذه التحديات هو فقدان مسار الإشارة (Path Loss) المرتفع، وتعدد المسارات وتوهين الإشارة الحاد [8]. يُضاف إلى ذلك التحدي الأكبر المتمثل في الامتصاص الشديد للأكسجين في النطاق V، والذي يحد بشكل كبير من مسافة الإرسال اللاسلكي، الشكل (1) يبين امتصاص الأكسجين في الغلاف الجوي [9].

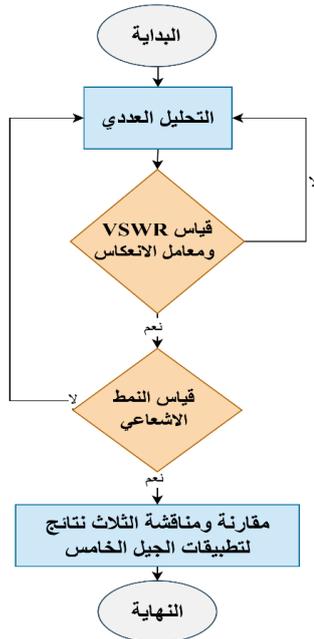


الشكل 1: قيم توهين الغلاف الجوي وامتصاص الأكسجين عبر ترددات الموجات المليمترية [10].

بناءً على هذه التحديات، فإن تصميم هوائيات عالية الكفاءة ضمن هذا النطاق يمثل تحدياً هندسياً؛ إذ يؤثر اختيار الركيزة العازلة بشكل كبير على الكسب والعرض الترددي. ونظرًا لأن هذا النطاق يتميز بخسائر انتشار مرتفعة، يبرز دور الركيزة (substrate) في التحكم بالخسائر وتحسين أداء الهوائي، إذ أن اختيار ركيزة منخفضة الفقد وذات خصائص مناسبة يساهم في تحقيق الأداء الأمثل [11]. ركزت العديد من الدراسات الحديثة على تطوير هوائيات الشريط الدقيق في نطاق V-Band. على سبيل المثال، قدم Hussain وآخرون (2021) تصميمًا باستخدام ركيزة Rogers RT-5880 مع فتحات هندسية لتحقيق كسب تجاوز 10.2dBi ضمن المجال 63-74.2GHz [12]. وفي سياق مماثل، طرح Biddut وآخرون (2022) هوائيًا متعدد الفتحات عند تردد 54.5GHz محققًا كفاءة 94% وعرض نطاق واسع [7]. كما عرض Iriqat وYenikaya (2024) نموذجًا عند 60GHz مدعماً بعناصر طفيلية وأرضية ممتدة لتحسين الكسب وتقليل الإشعاع الخلفي [13]، وعلى الرغم من أهمية الدراسات السابقة، إلا أن التقييم المنهجي المقارن لتأثير مواد الركيزة المختلفة على نفس التصميم الهندسي وضمن نفس ظروف التشغيل عند تردد 55GHz لا يزال محدودًا. ومن هنا، يهدف هذا البحث إلى إجراء دراسة مقارنة شاملة لتصميم ومحاكاة هوائيات الشريط الدقيق (Microstrip Patch Antennas) التي تعمل عند التردد

يتمحور هذا البحث حول تصميم ومحاكاة ثلاث نماذج من هوائيات الرقعة الشريطية الدقيقة (Microstrip Patch Antennas) باستخدام ركائز عازلة متنوعة؛ بهدف تحليل تأثير الخصائص الفيزيائية لكل مادة على الأداء الإشعاعي. وقد وقع الاختيار على المواد التالية: Rogers RT/duroid 5880 للتصميم الأول، Rogers RO3003 للتصميم الثاني، و Rogers RO4350B للتصميم الثالث. ولتحقيق الهدف من الورقة، تم اعتماد منهجية عمل متسلسلة كما هو موضح في المخطط الانسيابي في الشكل (3). يعتمد المفهوم الجوهرى لهذه الورقة على تصميم ثلاثة هوائيات تعمل ضمن نطاق ترددي موسع يمتد من (50-60GHz)، بتردد مركزي 55GHz، ولضمان التشغيل الأمثل، تم اتباع معايير الأداء المحددة التي يجب أن تستوفها التصاميم المقترحة وهي: معامل انعكاس ( $S_{11}$ ) أقل من -10 dB، ونسبة موجة موجية ثابتة (VSWR) أقل من أو تساوي 2dB، ومواءمة الممانعة (Impedance Matching) عند القيمة القياسية  $50\Omega$ ، وعرض النطاق الترددي لا يقل عن 100MHz.

علاوة على ذلك، خضعت التصاميم الهندسية لسلسلة من عمليات التحسين (Optimization) لضبط الأبعاد وضمان استيفاء معايير الأداء المطلوبة، تبعها تقييم شامل لخصائص لكسب (Gain) وأنماط الإشعاع (Radiation Patterns) لكل هوائي. وفي الختام، أُجريت مقارنة شاملة لنتائج المحاكاة المستخلصة من التصاميم الثلاثة؛ بهدف تحديد الركيزة الأمثل التي تحقق الأداء الأقصى وتلبي متطلبات التشغيل ضمن هذا النطاق الترددي.



الشكل 3: المخطط الانسيابي لمنهجية تصميم ومحاكاة هوائيات Microstrip Patch Antennas

للحصول على الأبعاد الفيزيائية للهوائيات، تم استخدام برنامج MATLAB 2024 لتطبيق المعادلات الرياضية القياسية الموضحة في الجدول (1)، وذلك بعد تحديد النطاق الترددي الحسابي الموسع لضمان الحصول على التردد المركزي. ويستعرض الجدول (3) الأبعاد الهندسية المستخلصة لكل هوائي بناء على نوع الركيزة المستخدمة. ولضمان اجراء مقارنة عادلة وموضوعية، تم توحيد سُمك الركيزة العازلة لجميع النماذج عند 0.127 mm، كما اعتمد النحاس (Copper) مادة أساسية لكل من للرقعة المشعة (Patch)

المستهدف ( $f_r$ ) والخصائص الفيزيائية لمادة الركيزة، المتمثلة في سماحيها النسبية ( $\epsilon_r$ ) وسمكها ( $h$ ).

الجدول 1: المعادلات الرياضية ومنهجية تصميم هوائي الشريحة الدقيق [15]

خطوة التصميم	المعادلة الرياضية
عرض الرقعة	$W_p = \frac{c}{2f_r} \times \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$
ثابت العزل الفعال	$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W_p}}} \right]$
الطول الفعال للرقعة	$L_{eff} = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{eff}}}$
الامتداد الطولي	$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{W_p}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left( \frac{W_p}{h} + 0.8 \right)}$
الطول الفعلي للرقعة	$L_p = L_{eff} - 2\Delta L$
أبعاد الأرضي	$L_s = L_p + 6h$ $W_s = W_p + 6h$

ولضمان أقصى انتقال للطاقة، تم حساب عرض خط التغذية ( $W_f$ ) بما يتوافق مع الممانعة المميزة القياسية ( $Z_c = 50\Omega$ )، وذلك بالاعتماد على معادلات التخليق الهندسي لخطوط الشريحة الدقيقة (Microstrip Line) (Synthesis Equations).

يلعب اختيار مادة الركيزة (Substrate) دورًا جوهريًا في تحديد الأداء العام؛ حيث تتراوح قيم ثابت العزل ( $\epsilon_r$ ) عادة بين (2.2 و 12). ومن الناحية التصميمية، تُفضل الركائز السميكة ذات ثابت العزل المنخفض لتعزيز كفاءة الإشعاع وتوسيع عرض النطاق الترددي (Bandwidth)، وإن كان ذلك على حساب زيادة لحجم الفيزيائي. في المقابل، تُستخدم الركائز الرقيقة ذات ثابت العزل المرتفع لغرض تصغير الحجم وتقليل الإشعاع الجانبي غير المرغوب فيه. لذا، يتطلب التصميم إجراء موازنة دقيقة (Compromise) بين الكفاءة الإشعاعية والأبعاد الهندسية [14]. ويمكن تلخيص تأثير الخصائص الفيزيائية للركيزة فيما يلي [14]:

1. ثابت العزل الكهربائي ( $\epsilon_r$ ): المحدد الرئيسي لسرعة انتشار الموجة وأبعاد الهوائي.
  2. سُمك الركيزة ( $h$ ): يرتبط طردياً مع عرض النطاق، ولكن زيادته المفرطة تولد موجات سطحية (Surface Waves) مشتتة للطاقة.
  3. ظل زاوية الفقد ( $\tan\delta$ ): المقياس الأساسي للطاقة المبددة حراريًا، ويعد انخفاضه شرطاً ضرورياً أساسياً لضمان كسب (Gain) مرتفع.
- وفي إطار هذا البحث، ولتحليل هذه التأثيرات تجريبياً عبر المحاكاة، تم اختيار ثلاث مواد تجارية من عائلة "Rogers" بخصائص متباينة، لدراسة أدائها عند تردد 55 GHz. ويوضح الجدول (2) المواصفات الفنية لهذه المواد.

الجدول 2: الخصائص الكهربائية لمواد الركيزة المستخدمة [14]

الركيزة	$\epsilon_r$	h (mm)	$\tan\delta$
Rogers RO4350B	3.48	0.168	0.0037
Rogers RT-Duroid 5880	2.20	0.127	0.0009
Rogers Ro 3003	3.00	1.575	0.0010

## منهجية التصميم واعدادات المحاكاة

■ التغذية: تم استخدام نوع التغذية (Direct Contact Feed) لأنه يتناسب مع تطبيقات الترددات العالية (mm Wave)، وتم تحديد عرض خط التغذية ليتوافق مع المعاوقة بقيمة  $50\Omega$ .

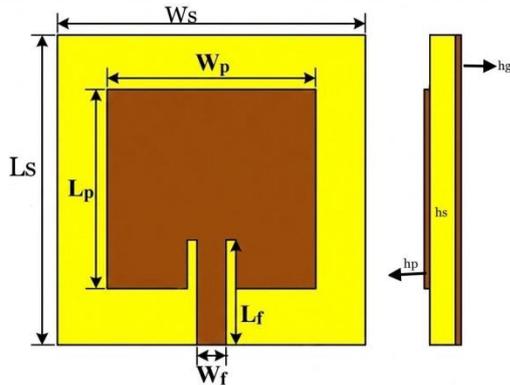
#### النموذج الثاني: هوائي Rogers RO3003

تم بناء هذا النموذج بناء على الأبعاد الموجودة في الجدول (3)، وأبعاد الفتحات الموجودة في الجدول (4)، وتم تنفيذه بذات منهجية النموذج الأول من حيث قالب التصميم في CST ونوع التغذية ومادة Patch والأرضي، والاختلاف كان في المادة العازلة، حيث تم اختيار Rogers RO3003 الذي يتمتع بنفاذية نسبية مقدارها 3.0.

#### النموذج الثالث: هوائي Rogers RO4350B

تم بناء هذا النموذج بناء على الأبعاد الموجودة في الجدول (3)، والجدول (4) التي أجري فيها تحسين من خلال إضافة فتحات للتصميم، وتم تنفيذه بذات المنهجية المتبعة في النموذجين السابقين ولكن باختلاف نوع مادة العازل، وفي هذا النموذج تم اختيار مادة Rogers RO4350B التي تتمتع بنفاذية نسبية مقدارها 3.66.

يُوضح الشكل (4) التصميم الهندسي العام المعتمد للنماذج الثلاثة، حيث يبرز المسقط العلوي والجانبى للمعلمات الفيزيائية التي تم حسابها وتطبيقها لكل هوائي. يمثل الشكل الهيكل الأساسي الذي تم اشتقاق أبعاده الموضحة في الجدول (3) ليتناسب مع كل نوع من الركائز العازلة (Rogers) (Broadband)، فقد تم اعتماد المصمم الزمني (T-Solver) (Transient Solver) لإجراء التحليل. تم ضبط نطاق تردد المحاكاة ليبدأ من 50 GHz وينتهي عند 60 GHz، وهو النطاق التشغيلي المستهدف. ولغرض المقارنة، تم بناء ثلاث نماذج باستخدام نفس الأبعاد الهندسية الموجودة في الجدول (3)؛ إلا أنه وبسبب عدم الحصول على نتائج مطابقة لمتطلبات التصميم من حيث التردد الرنيني، تم تحسين التصميم بإضافة فتحات للهوائي (Slot) على الرقعة المشعة. تم تحديد طول الفتحة ليعادل ربع طول الرقعة (Patch)، أما العرض فقد ضبط عن قيمة 0.050505 من عرض الرقعة، وهي القيمة التي أثبتت كفاءتها بعد سلسلة من الاختبارات التحليلية. يوضح الجدول (4) الأبعاد النهائية المعتمدة لهذه الفتحات لكل تصميم.



الشكل 4: المسقط العلوي والجانبى للمعلمات التصميمية (Parameters) للهوائيات الثلاثة

#### النتائج والمناقشة

تمت مقارنة نتائج المحاكاة للهوائيات للنموذج الأول والثاني والثالث من حيث الأداء العام للهوائي، كالآتي:

أ. معامل الانعكاس ( $S_{11}$ ) ونسبة الموجة الدائمة للجهد (VSWR) أكدت نتائج المحاكاة التي أجريت باستخدام CST دقة منهجية التصميم الهندسي المقترح. وكما هو موضح في منحنى معامل الانعكاس ( $S_{11}$ ) الشكل (5)، حققت الهوائيات تردد رنين (Resonance Frequency) عند 55GHz، وهو ما يتطابق بدقة مع التردد المستهدف مع القليل من الانزياح الترددي، مما يؤكد صحة الحسابات النظرية للأبعاد، وكشفت النتائج عن تباين في مقاييس الأداء بين النماذج الثلاثة. بالنسبة للنموذج الأول، سُجلت

والسطح الأرضي بسُمك قدره 0.017 mm؛ نظرًا لخصائصه الموصلية العالية التي تجعله مثاليًا للتطبيقات العاملة ضمن نطاقات التردد العالي.

الجدول 3: الأبعاد الفيزيائية للهوائيات المقترحة

Rogers		RT/duroid		الرمز	الأبعاد (مم)
Rogers RO4350B	Rogers RO3003	5880			
2.5487	2.6905	2.9181	$W_g$	عرض السطح الأرضي	
2.1424	2.2836	2.5296	$L_g$	طول السطح الأرضي	
0.127	0.127	0.127	$h_g$	سمك السطح الأرضي	
2.5487	2.6905	2.9181	$W_s$	عرض المادة العازلة	
2.1424	2.2836	2.5296	$L_s$	طول المادة العازلة	
0.127	0.127	0.127	$h_s$	سمك المادة العازلة	
1.7867	1.9285	2.1561	$W_p$	عرض الرقعة المشعة	
1.3804	1.5216	1.7676	$L_p$	طول الرقعة المشعة	
0.017	0.017	0.017	$h_p$	سمك الرقعة المشعة	
0.2780	0.3192	0.3913	$W_f$	عرض التغذية	
0.3810	0.3810	0.3810	$L_f$	طول التغذية	
0.017	0.017	0.017	$h_f$	سمك التغذية	

تم إجراء المحاكاة باستخدام برنامج المحاكاة الكهرومغناطيسية CST Microwave Studio 2024 ونظرًا لأن هوائي الرقعة الشريطي (Microstrip Patch Antennas) هو هيكل عريض النطاق (Broadband)، فقد تم اعتماد المصمم الزمني (T-Solver) (Transient Solver) لإجراء التحليل. تم ضبط نطاق تردد المحاكاة ليبدأ من 50 GHz وينتهي عند 60 GHz، وهو النطاق التشغيلي المستهدف. ولغرض المقارنة، تم بناء ثلاث نماذج باستخدام نفس الأبعاد الهندسية الموجودة في الجدول (3)؛ إلا أنه وبسبب عدم الحصول على نتائج مطابقة لمتطلبات التصميم من حيث التردد الرنيني، تم تحسين التصميم بإضافة فتحات للهوائي (Slot) على الرقعة المشعة. تم تحديد طول الفتحة ليعادل ربع طول الرقعة (Patch)، أما العرض فقد ضبط عن قيمة 0.050505 من عرض الرقعة، وهي القيمة التي أثبتت كفاءتها بعد سلسلة من الاختبارات التحليلية. يوضح الجدول (4) الأبعاد النهائية المعتمدة لهذه الفتحات لكل تصميم.

الجدول 4: أبعاد الفتحات لكل هوائي.

أبعاد الفتحة (مم)	Rogers RO4350B	Rogers RO3003	Rogers RT/duroid 5880
العرض	0.090237	0.096425	0.108894
الطول	0.3451	0.3804	0.4419

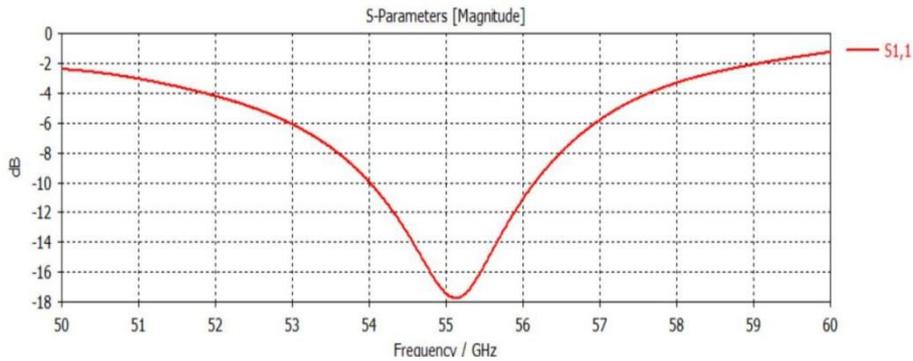
#### النموذج الأول: هوائي Rogers RT/duroid 5880

هذا النموذج هو النموذج الأول وتم تصميمه بناء على الأبعاد الموجودة في الجدول (3) وإضافة الفتحة الموجودة في الجدول (4)، وتم تنفيذه كالآتي:

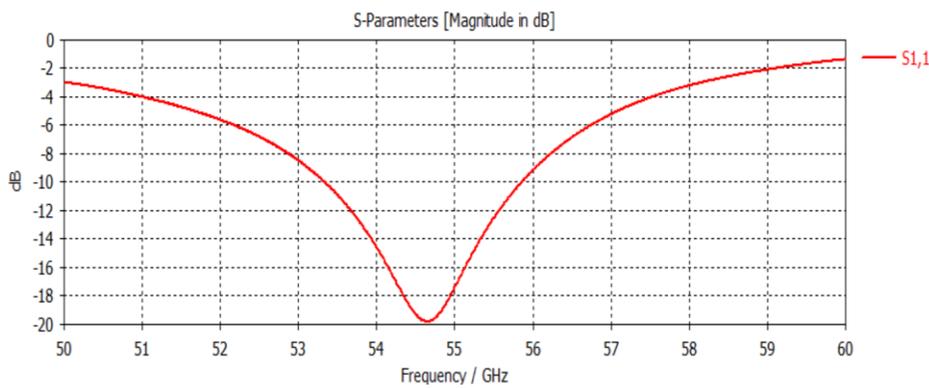
■ قالب المحاكاة (Template): تم استخدام قالب (Planar) في برنامج CST، لأنه الأنسب لتحليل الهوائيات من هذا النوع.  
 ■ المادة: تم تحديد مادة الأرضي والرقعة من النحاس، أما بالنسبة للركيزة فكانت Rogers RT/duroid 5880 التي تتمتع بنفاذية نسبية تبلغ 2.2.

قيمة فقد العودة (Return Loss) بمقدار  $-17.753$  Db عند تردد  $55.13$ GHz، مع عرض نطاق ترددي بلغ  $2.146$ GHz. وبشكل مشابه، حقق النموذج الثالث عرض نطاق متقارب  $2.191$  GHz ولكن مع انزياح في تردد الرنين وقيمة فقد عودة أقل كفاءة بلغت  $-15.723$ Db. أما النموذج الثاني، فقد أثبت أنه التصميم الأمثل؛ إذ أظهرت النتائج أن تردد الرنين المركزي سجل انزياحاً طفيفاً ليقع عند  $54.6$  GHz تقريباً، محققاً أفضل قيمة فقد عودة (Return Loss) تصل إلى  $-19.8$  dB، وعلى الرغم من أن

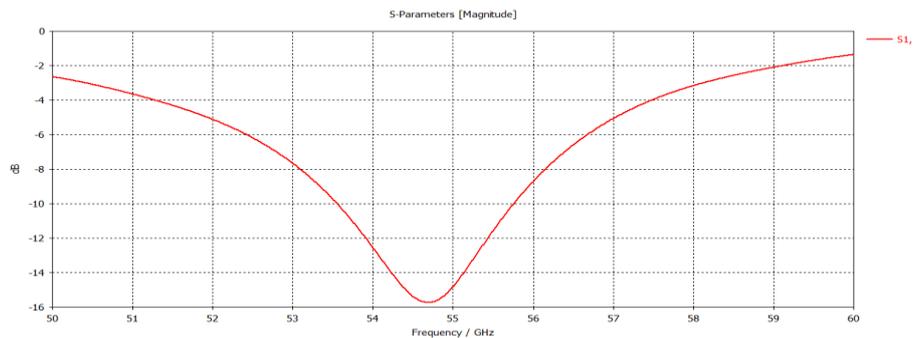
قيمة فقد العودة (Return Loss) بمقدار  $-17.753$  Db عند تردد  $55.13$ GHz، مع عرض نطاق ترددي بلغ  $2.146$ GHz. وبشكل مشابه، حقق النموذج الثالث عرض نطاق متقارب  $2.191$  GHz ولكن مع انزياح في تردد الرنين وقيمة فقد عودة أقل كفاءة بلغت  $-15.723$ Db. أما النموذج الثاني، فقد أثبت أنه التصميم الأمثل؛ إذ أظهرت النتائج أن تردد الرنين المركزي سجل انزياحاً طفيفاً ليقع عند  $54.6$  GHz تقريباً، محققاً أفضل قيمة فقد عودة (Return Loss) تصل إلى  $-19.8$  dB، وعلى الرغم من أن



الشكل 5.أ: S11 للنموذج الأول



الشكل 5.ب: S11 للنموذج الثاني

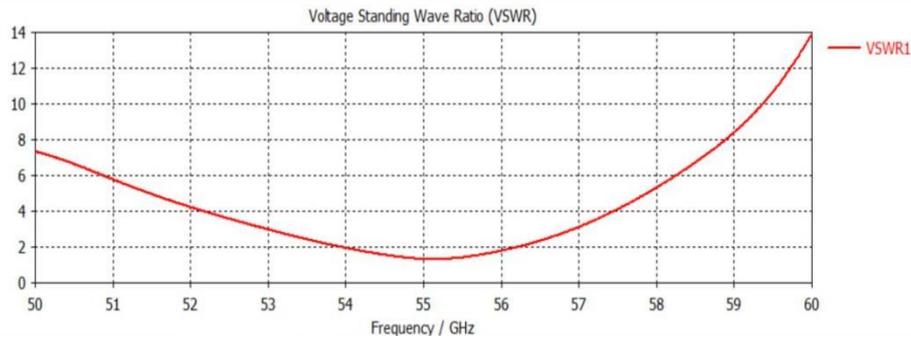


الشكل 5.ج: S11 للنموذج الثالث

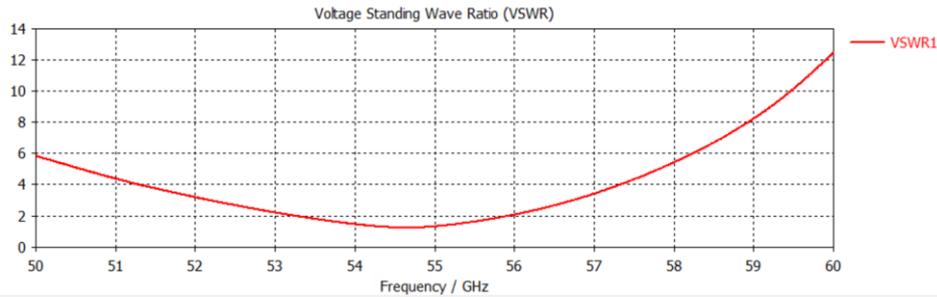
مما يؤكد تحقيق توافق جيد في المعاوقة (Impedance Matching) بين خط التغذية ( $50\Omega$ ) والرقعة المشعة (Patch)، وتعزز موثوقية هذه النتيجة بتطابقها مع ما تم رصده في منحنى معامل الانعكاس ( $S_{11}$ )، مما يثبت أن نسبة الطاقة المنعكسة ضئيلة، وبالمثل أظهر النموذجان الثاني والثالث قيمًا ممتازة بلغت  $1.312$  و  $1.391$  على التوالي، وبما أن جميع القيم تقع ضمن النطاق الآمن (أقل من 2)، فإن هذا يؤكد نجاح التصميم في تحقيق توافق المعاوقة المطلوب لكافة النماذج.

ب. تحليل نتيجة نسبة الموجة الموقوفة للجهد (VSWR Analysis) يبين الشكل (6)، سلوك نسبة الموجة الموقوفة للجهد (VSWR) للهوائي المصمم عبر نطاق التردد المحدد، يُعد معامل VSWR مقياساً حاسماً لكفاءة نقل الطاقة من المصدر إلى الهوائي، حيث يشير المعيار الهندسي المعتمد إلى أن القيمة يجب أن تكون أقل من 2 ( $VSWR > 2$ ) لضمان أداء تشغيلي مقبول.

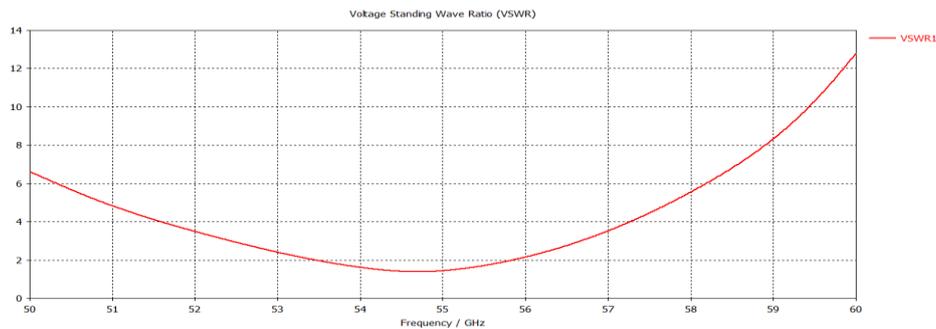
عند النظر إلى النتائج عند التردد المستهدف  $55$ GHz نلاحظ أن النموذج الأول سجل قيمة تقارب  $1.298$ . تقع هذه القيمة تحت العتبة القياسية (2)،



الشكل 6.1: VSWR للنموذج الأول



الشكل 6.2: VSWR للنموذج الثاني

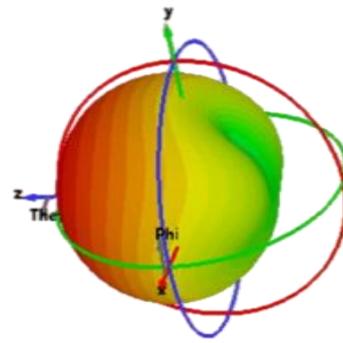


الشكل 6.3: VSWR للنموذج الثالث

الإشعاعي، وبين كفاءة التوجيه من خلال الفصوص الجانبية المنخفضة بشكل مقبول، ويظهر أن اتجاهية الهوائيات ليست عالية التوجيه بل توزع الطاقة على مساحة واسعة. ومن خلال تحليل العلاقة بين نتائج المحاكاة والأبعاد الفيزيائية، نلاحظ أن النموذج الثالث (Rogers RO4350B) صاحب أعلى ثابت عزل ( $\epsilon_r=3.6$ ) حقق أقل أبعاد للطبقة الأرضية (mm)  $2.5487 \times 2.1424$ ، بينما سجل النموذج الأول (Rogers RT/duroid) صاحب أقل ثابت عزل ( $\epsilon_r=2.2$ ) أكبر أبعاد  $2.9181 \times 2.2836$  mm) أما النموذج الثاني فجاءت أبعاده متوسطة بينهما  $2.5296 \times 2.6905$ ، تؤكد هذه القيم وجود علاقة عكسية بين ثابت العزل للمادة وأبعاد الهوائي؛ فكلما زادت قيمة ثابت العزل صغرت أبعاد الهوائي. أما من حيث الأداء الترددي، فقد أظهرت النتائج تفوقاً ملحوظاً للنموذج الثاني (Rogers RO3003) الذي حقق أوسع عرض نطاق ترددي بلغ **2.527GHz**، مما يجعله الخيار الأمثل لتطبيقات السرعة العالية. في المقابل، أظهر النموذجان الأول والثالث تقارباً كبيراً في عرض النطاق الترددي (2.146 GHz) للأول و (2.191 GHz) للثالث، مع اختلاف ترددات الرنين لهما.

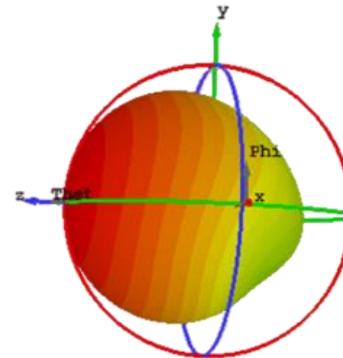
ج. نمط الإشعاع للهوائيات المقترحة  
أجريت تحليلات إضافية لنمط الإشعاع (Radiation Pattern) للهوائيات المقترحة. حيث يُعد نمط الإشعاع أحد الجوانب الرئيسية في تصميم وتحليل الهوائي، نظراً لتأثيره المباشر على أدائه. يوضح الشكل (7) منظر ثلاثي الأبعاد للنمط الإشعاعي، بالإضافة إلى المكاسب التي حققتها التصميم المقترحة، فحقق التصميم الأول كسب (Gain) قدره 6.157 dBi، وكان كسب المقترح الثاني 5.812 dBi، بينما حقق التصميم الثالث كسب قدره 5.653 dBi أثناء التشغيل على التردد المطلوب البالغ 55GHz. ومن نمط الإشعاع نتحصل أيضاً على قيم الاتجاهية (Directivity) لكل هوائي، فالنموذج الأول كان مقدار الاتجاهية له 6.816 dBi، أما النموذج الثاني فسجل الهوائي اتجاهية مقدارها 6.345dBi عند تردد 55 GHz، وكانت قيمة الاتجاهية للنموذج الثالث 6.131 dBi. بالإضافة إلى ذلك، يُظهر نمط الإشعاع في المخطط ثنائي الأبعاد الموضح في الشكل (8) تغطية واسعة، مما يجعله مناسباً للتطبيقات التي تتطلب استقبال أو إرسال الاشارات من زوايا متعددة وليس من نقطة واحدة محددة بدقة، كما يؤكد هذا المخطط النتائج التي تم الحصول عليها من النمط

(Value) القيمة	(Parameter) المعامل
55GHz	(Frequency) التردد
6.157 dBi	(Gain) الكسب
-0.6588 dB	(Radiation Efficiency) كفاءة الإشعاع
-0.7375 dB	(Total Efficiency) الكفاءة الكلية



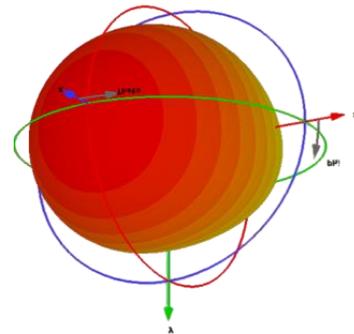
الشكل 7.1: النمط الإشعاعي للنموذج الأول

(Value) القيمة	(Parameter) المعامل
55GHz	(Frequency) التردد
5.812dBi	(Gain) الكسب
-0.5331 dB	(Radiation Efficiency) كفاءة الإشعاع
-0.6132 dB	(Total Efficiency) الكفاءة الكلية



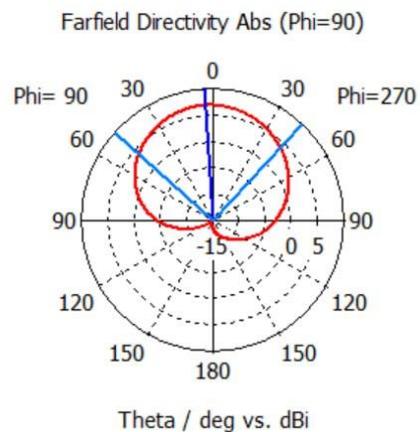
الشكل 7.2: النمط الإشعاعي للنموذج الثاني

(Value) القيمة	(Parameter) المعامل
55GHz	(Frequency) التردد
5.653dBi	(Gain) الكسب
-0.4783dB	(Radiation Efficiency) كفاءة الإشعاع
-0.6248 dB	(Total Efficiency) الكفاءة الكلية



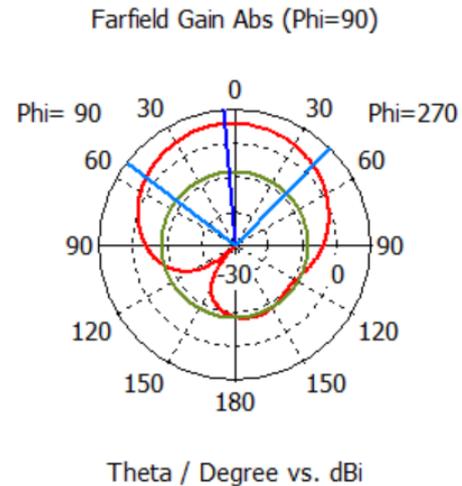
الشكل 7.3: النمط الإشعاعي للنموذج الثالث

(Value) القيمة	(Parameter) المعامل
55GHz	(Frequency) التردد
6.82 dBi	(Main lobe magnitude) مقدار الفص الرئيسي
4.0 deg	(Main lobe direction) اتجاه الفص الرئيسي
91.1 deg	(Angular width-3dB) عرض الحزمة



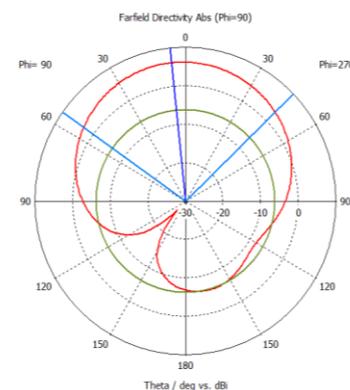
الشكل 7.8: النمط الإشعاعي ثنائي الأبعاد للنموذج الأول

(Value) القيمة	(Parameter) المعامل
55GHz	(Frequency) التردد
5.81 dBi	(Main lobe magnitude) مقدار الفص الرئيسي
5.0 deg	(Main lobe direction) اتجاه الفص الرئيسي
96.3 deg	(Angular width-3dB) عرض الحزمة
-13.9 dB	(Side lobe level) مستوى الفص الجانبي



الشكل 8.ب: النمط الإشعاعي ثنائي الأبعاد للنموذج الثاني

(Value) القيمة	(Parameter) المعامل
55GHz	(Frequency) التردد
6.13 dBi	(Main lobe magnitude) مقدار الفص الرئيسي
6.0 deg	(Main lobe direction) اتجاه الفص الرئيسي
100.4 deg	(Angular width-3dB) عرض الحزمة
-12.3dB	(Side lobe level) مستوى الفص الجانبي



الشكل 8.ج: النمط الإشعاعي ثنائي الأبعاد الثالث

وفيما يتعلق بالكفاءة (Efficiency)، أظهرت جميع النماذج أداءً ممتازاً، حيث تصدر النموذج الثالث القائمة بكفاءة بلغت 89.58%، تلاه بفرق بسيط جداً النموذج الثاني بكفاءة 88.45%، ثم النموذج الأول بكفاءة 85.83%. ويوضح الجدول (5) مقارنة شاملة بين النماذج الثلاثة.

وبالنسبة لخصائص الإشعاع، حقق التصميم الأول أعلى قيمة كسب (Gain) بلغت 6.157 dBi وأعلى اتجاهية (Directivity) بمقدار 6.816 dBi، يليه التصميم الثاني بكسب 5.812 dBi واتجاهية 6.345 dBi، بينما سجل التصميم الثالث أقل القيم كسب 5.653 dBi واتجاهية 6.131 dBi. تشير هذه النتائج إلى أن انخفاض ثابت العزل يساهم في تحسين الكسب والاتجاهية.

الجدول 5: مقارنة بين نتائج الهوائي

نوع المادة	النفذية	التردد	S11 dBi	VSER	الكسب	الاتجاهية	عرض النطاق (GHz)	الكفاءة
Rogers RT/duroid 5880	2.2	55.13	-17.753	1.298	6.157	6.816	2.146	85.83%
Rogers RO3003	3.0	54.64	-19.8	1.31	5.812	6.345	2.527	88.45%
Rogers RO4350B	3.66	54.69	-15.723	1.391	5.653	6.131	2.191	89.58%

#### مقارنة العمل الحالي بالدراسات السابقة

تُظهر النتائج التي تم الحصول عليها في هذا البحث توافقاً وتنافساً ملحوظاً مع الدراسات الحديثة التي ركزت على تطوير هوائيات النطاق V-band ويوضح الجدول التالي مقارنة بين أداء النماذج الثلاثة المقترحة في هذه الدراسة مع نتائج دراسات سابقة بارزة: تُثبت المقارنة المنهجية مع الدراسات السابقة كفاءة التصميم المقترح من حيث الشمولية؛ فبينما ركزت دراسة Hussain وآخرون على الترددات المرتفعة (63-74.2 GHz) لتعظيم الكسب، وتوجّهت دراسة Biddut

باختصار، يقدم الجدول (5) نظرة شمولية لأداء النماذج الثلاثة، مما يبرز بوضوح تأثير خصائص مادة الركيزة على مخرجات التصميم، يتضح أن النموذج الثاني يمثل الحل الأكثر توازناً وكفاءة لتطبيقات الجيل الخامس التي تتطلب سرعات عالية، نظراً لتحقيقه أعرض نطاق ترددي وأفضل توافق في المعاوقة، بينما يظل النموذج الأول هو الخيار المفضل للتطبيقات التي تعتمد على قوة الإشارة ومدى التغطية بفضل كسبه العالي، أما النموذج الثالث، فيوفر ميزة تنافسية في التطبيقات المدمجة التي تتطلب تصغير حجم الدوائر الإلكترونية.

الميزة الأبرز	الكفاءة (%)	الكسب (dBi)	التردد (GHz)	المادة المستخدمة (الركيزة)	الدراسة
كسب عالي جداً باستخدام فتحات هندسية.	-	10.2	74.2-63	Rogers RT-5880	Hussain وآخرون (2021)
كفاءة إشعاعية مرتفعة وعرض نطاق واسع.	94%	7.486	54.504	Rogers RT 5880	Biddut وآخرون (2022)
تحسين الكسب وتقليل الإشعاع الخلفي عبر عناصر طفيلية.	90%	13.10	60	Rogers RT 5880	Iriqat وYenikaya (2024)
أفضل كسب واتجاهية بين النماذج الثلاثة.	85.83%	6.157	55	Rogers RT/duroid 5880	العمل الحالي (نموذج 5880)
أعرض نطاق ترددي (2.527GHz).	88.45%	5.812	55	Rogers RO3003	العمل الحالي (نموذج RO3003)
أصغر أبعاد فيزيائية وأعلى كفاءة في الدراسة.	89.58%	5.653	55	Rogers RO4350B	العمل الحالي (نموذج RO4350B)

أوسع عرض نطاق ترددي (2.527 GHz) يغطي تردد التشغيل بالكامل بكفاءة عالية، مما يجعله الخيار الأمثل لمتطلبات نقل البيانات فائقة السرعة.

3. تعزيز الكسب: في السيناريوهات التي تتطلب مدى تغطية أطول Longer Range، يُعد النموذج الأول Rogers 5880 هو الأنسب بفضل تحقيقه أعلى معدلات كسب واتجاهية.

وختاماً، تقدم الورقة دليلاً لاختيار مادة الركيزة وفقاً لأولوية التطبيق؛ مرجحاً النموذج الثاني للسرعة وعرض النطاق، والأول للمدى، والثالث لتقليص الحجم.

### التوصيات

1. إجراء دراسة موسّعة لتأثير سماكة الركيزة على كلاً من الكسب وعرض النطاق الترددي لتحديد القيم المثلى التي تحقق توازناً بين الكفاءة الإشعاعية والمطابقة.

2. يُنصح بدراسة تصميم مصفوفات باستخدام الركيزة ذات أعلى كسب (Rogers RT/duroid 5880) لزيادة الكسب الإجمالي ودعم تطبيقات الوصلات الخلفية وأنظمة 5G/6G طويلة المدى في نطاق الموجات المليمترية.

3. يُنصح بدراسة تأثير سماكة الركيزة على الكسب وعرض النطاق الترددي، مع استخدام تقنيات مثل الفتحات (Slots) أو الهياكل الأرضية المعدلة (Defected Ground Structures – DGS) ومواد متقدمة مثل الميتاماتيريال أو الركائز منخفضة الفقد لتعزيز الأداء وتحقيق توازن بين الكسب والكفاءة عند ترددات V-band.

4. يوصى بدراسة تكامل الهوائي مع الدوائر والأجهزة المحيطة ضمن النظام الكامل للاتصالات، بما يشمل تقليل التداخل الكهرومغناطيسي وتحسين التوافقية، لضمان أن الأداء المحسن للهوائي ينعكس فعلياً على جودة الإشارة والاستقرار التشغيلي في تطبيقات V-band.

وآخرون [7] نحو تحقيق أقصى كفاءة إشعاعية ممكنة، نجح العمل الحالي في تقديم توازن تشغيلي دقيق عند التردد 55GHz. وتبرز قوة النتائج الحالية بشكل خاص في النموذج (RO3003) الذي حقق نطاقاً ترددياً مؤكداً (2.527 GHz)، مما يوفر استجابة طيفية متزنة تلبى متطلبات الجيل الخامس المتقدمة دون التضحية بالاستقرار الهيكلي.

ومن منظور المفاضلة الهندسية، ورغم التحسينات التي قدمتها دراسة Iriqat و Yenikaya في تقليل الإشعاع الخلفي، إلا أن هذا البحث يتميز بتقديم دراسة تقييمية شاملة تتيح اختيار الركيزة الأنسب حسب الأولوية التصميمية؛ سواء كان الهدف تحقيق الكسب المرتفع (6.16 dBi) كما في نموذج 5880، أو الوصول إلى أعلى كفاءة وأصغر حجم فيزيائي كما هو الحال في نموذج (RO4350B) (89.58%). وبذلك، لا تقتصر المساهمة الجوهرية لهذا العمل على الأرقام المحققة فحسب، بل في تقديم نموذج مرجعي للمفاضلة التقنية بين الركائز المختلفة تحت ظروف تشغيل موحدة.

### الاستنتاجات

هدفت هذه الدراسة إلى تصميم وتحليل هوائيات شريحة دقيقة (Microstrip Patch Antennas) تعمل عند تردد 55GHz لتطبيقات الجيل الخامس (5G)، مع التركيز على دراسة تأثير تغيير مادة الركيزة (Substrate) على أداء الهوائي.

ومن خلال محاكاة وتحليل ثلاثة نماذج بخصائص عزل مختلفة ( $\epsilon_r=2.2$ ) (3.0, 3.66)، خلصت الدراسة إلى جملة من الاستنتاجات، أبرزها:

1. المفاضلة بين الأداء والحجم: أثبتت النتائج أن هناك علاقة عكسية واضحة بين ثابت العزل وأبعاد الهوائي؛ حيث يوفر استخدام مواد ذات ثابت عزل مرتفع مثل Rogers 4350B ميزة تصغير حجم الهوائي، وهو ما يناسب الأجهزة المدمجة، ولكنه قد يقلل نسبياً من كفاءة الإشعاع.
2. التفوق في عرض النطاق: أظهر النموذج الثاني Rogers RO3003 الأداء الأكثر توازناً واحترافية لتطبيقات الجيل الخامس، حيث حقق

**Author Contributions:** “Al-Zahraa: Design of the third model and conceptualization of the introduction and related work ;Fatima: Design of the second model, formulation of equations, system design, and geometric representation; Wasq: Design of the first model, development of the methodology, and analysis of results. Prof. Dr. Rasim Amer: Manuscript editing. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”

**Funding:** “This research received no external funding.”

**Data Availability Statement:** “The data are available at request.”

**Conflicts of Interest:** “The authors declare no conflict of interest.”

### References

- [1] Z. Abdhafith, R. Ali, and N. Abohmoed. “Impact of substrate thickness on the rectangular patch antenna for 5G communication system by CST Studio.” *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 2, no. 1, pp. 79-83, 2024. [https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1\\_24](https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_24)
- [2] I. Adam, and R. Ali. “Design and Analysis of Massive MIMO Patch Antenna (8x8) In E band Application,” *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 273-278, 2025. [https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2\\_33](https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_33)
- [3] A. Mohammed, et al. “Microstrip patch antenna: A review and the current state of the art.” *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, vol. 11, no. 7, pp. 510-524, 2019. <https://doi.org/10.13164/re.2020.0479>

- [4] O. Saqar, and N. Abuhamoud. "Design and Optimization of Low Power Microstrip Patch Antennas for Enhanced Short-Range Wireless Communications," *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 182-191, 2025. [https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1\\_24](https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_24)
- [5] B. Mishra, R. Verma, and R. Singh. "A review on microstrip patch antenna parameters of different geometry and bandwidth enhancement techniques," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 14, no. 5, pp. 652-673, 2022. <https://doi.org/10.1017/s1759078721001148>
- [6] A. Nasr, and Y. Fahmy. "Millimeter-wave wireless backhauling for 5G small cells: Scalability of mesh over star topologies," in *2017 IEEE 18th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, 2017, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/wowmom.2017.7974345>
- [7] N. Biddut, et al. "A wide band microstrip patch antenna design using multiple slots at V-band." *2022 International Mobile and Embedded Technology Conference (MECON), IEEE*. 2022. <https://doi.org/10.1109/mecon53876.2022.9751951>.
- [8] S. Ermis. "The Effect of Substrate Dielectric Constant and Thickness on Millimeter Wave Band Patch Antenna Performance." *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 20, no. 4, pp. 40-59, 024. <https://doi.org/10.18466/cbayarfb.1514216>
- [9] N. Biddut, M. Haque, and N. Jahan. "A wide band microstrip patch antenna design using multiple slots at V-band." in *2022 International Mobile and Embedded Technology Conference (MECON)*, 2022, pp. 113-116. <https://doi.org/10.1109/mecon53876.2022.9751951>
- [10] A. El Oualkadi. "Trends and challenges in CMOS design for emerging 60 GHz WPAN applications." *Advanced Trends in Wireless Communications*, 2011. <https://doi.org/10.5772/15494>
- [11] M. Saeed. "Design and simulation of rectangular microstrip patch antennas (45 GHz and 60 GHz) for V-band applications." *Passer Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. 100-104, 2022. <https://doi.org/10.24271/psr.2022.333252.1124>
- [12] M. Hussain, et al. "A wideband antenna for V-band applications in 5G communications." *2021 International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies (IBCAST), IEEE*. 2021. <https://doi.org/10.1109/ibcast51254.2021.9393018>.
- [13] S. Iriqat, and S. Yenikaya. "Microstrip patch antenna design with enhanced radiation efficiency for 5G 60 GHz millimeter-wave systems." *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 29, no. 1, pp. 101-112, 2024. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1366173>
- [14] C. Balanis. *Antenna theory: analysis and design*: John Wiley & sons, 2016. <https://www.wiley.com/en-us/Antenna+Theory+%3A+Analysis+and+Design%2C+4th+Edition-p-9781118642061>
- [15] L. Paul, M. Rashid, M. Mowla, M. Morshed, and K. Sarkar. "Performance enhancement of an inset feed rectangular microstrip patch antenna by adjusting feeding position for wireless applications." in *3rd International Conference on Electrical, Electronics, Engineering Trends, Communication, Optimization and Sciences (EEECOS 2016)*, 2016. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.1549>
- [16] L. Basilio, M. Khayat, J. Williams, and S. Long. "The dependence of the input impedance on feed position of probe and microstrip line-fed patch antennas." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 1, pp. 45-47, 2002. <https://doi.org/10.1109/8.910528>
- [17] T. Samaras, A. Kouloglou, and J. Sahalos. "A note on the impedance variation with feed position of a rectangular microstrip-patch antenna." *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 46, no. 2, pp. 90-92, 2004. <https://doi.org/10.1109/map.2004.1305543>
- [18] V. Samarthy, and B. Kund. "Optimization and Design in a Feed RMPA for 10 GHz, For Varying Inset Feed Width and Length." *Journal Of Information, Knowledge and Research in Electronics and Communication*, vol. 3, no. 1, 2014. [https://scholar.google.com/scholarq=related:wkbngMtJyqsJ:scholar.google.com/&hl=ar&as\\_sdt=0,5#d=gs\\_qabs&t=1769111705116&u=%23p%3DwkbngMtJyqsJ](https://scholar.google.com/scholarq=related:wkbngMtJyqsJ:scholar.google.com/&hl=ar&as_sdt=0,5#d=gs_qabs&t=1769111705116&u=%23p%3DwkbngMtJyqsJ)
- [19] J. Fal, N. Abuhamoud, and A. Abdulgader. "Study and design multiband MPA antenna for smart phones." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 146-150, 2025. [https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1\\_16](https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_16)