

Designing A Protective Case to Reduce Electromagnetic Radiation Emitted from Mobile Phones Using CST Software

Rasim Amer Ali^{1,*}, Khairiya Salem Mega¹

¹Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Wadi Alshatti University, Brack, Libya

ARTICLE HISTORY

Received 16 February 2026
Revised 21 March 2026
Accepted 02 April 2026
Online 10 April 2026

KEYWORDS

Electromagnetic radiation;
Mobile phone emissions;
Shielding effectiveness;
Specific absorption rate (SAR).

ABSTRACT

In this paper, a Planar Inverted-F Antenna (PIFA) is designed for mobile applications. And to study the effect of incorporating a synthetic material shell that consists of 12 split ring resonator (SRR) cells, each cell containing two overlapping rings to improve safety from electromagnetic radiation. The free-space antenna performance was analyzed before and after shell integration, based on the key performance indicators reflection coefficient (S11), return wave ratio (VSWR), radiation efficiency, radiation pattern, placement of the phone next to a human head model to study electric field distribution and surface currents, and specific absorption rate (SAR) values. Simulation results showed that incorporating the enclosure did not negatively affect the antenna matching or radiation characteristics. The value of S11 remained below -10dB at the fundamental frequencies, at an operating frequency of 0.89GHz and a power supply of 0.5w. The value of SAR-1g decreased from 3.05 kg/w to 2.91 kg/w, a decrease of 4.6%. The value of SAR-10g decreased from 2.39 kg/w to 2.25 kg/w (a decrease of 5.9%). The results confirm that the incorporation of the 12-cell SRR material shell achieves an effective balance between reducing the specific absorption rate and maintaining antenna performance, making it a practical solution for improving electromagnetic safety in mobile phones.

تصميم غلاف وقائي للحد من الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من الهواتف المحمولة باستخدام CST

راسم عامر على^{1,*}، خيرية سالم ميغة¹

المخلص	الكلمات المفتاحية
في هذا البحث، تم تصميم هوائي Planar Inverted-F (PIFA) لتطبيقات الهاتف المحمول. ودراسة تأثير دمج غلاف المادة الاصطناعية الذي يتكون من 12 خلية مرنان حلقي مقسم (SRR)، كل خلية تحتوي على حلقتين متداخلتين لتحسين السلامة من الإشعاع الكهرومغناطيسي. تم تحليل أداء الهوائي في الفضاء الحر قبل وبعد تكامل الغلاف، بناءً على مؤشرات الأداء الرئيسية معامل الانعكاس (S11)، ونسبة الموجة الراجعة (VSWR)، والكفاءة الإشعاعية، ونمط الإشعاع، ووضع الهاتف بجوار نموذج رأس الإنسان لدراسة توزيع المجال الكهربائي والتيارات السطحية، وقيم معدل الامتصاص النوعي (SAR). أظهرت نتائج المحاكاة أن دمج الغلاف لم يؤثر سلباً على مطابقة الهوائي أو خصائص الإشعاع. حيث ظلت قيمة S11 أقل من 10dB - عند الترددات الأساسية، وعند تردد تشغيل قدره 0.89GHz ومصدر طاقة قدره 0.5w، وانخفضت قيمة SAR-1g من 3.05 kg/w إلى 2.91 kg/w انخفاض بنسبة 4.6%. وانخفضت قيمة SAR-10g من 2.39 kg/w إلى 2.25 kg/w (انخفاض بنسبة 5.9%). وتؤكد النتائج أن دمج غلاف المادة SRR المكونة من 12 خلية يحقق توازن فعال بين تقليل معدل الامتصاص المحدد والحفاظ على أداء الهوائي، مما يجعله حلاً عملياً لتحسين السلامة الكهرومغناطيسية في الهواتف المحمولة.	الإشعاع الكهرومغناطيسي انبعاثات الهواتف المحمولة فعالية التدريع الكهرومغناطيسي معدل الامتصاص النوعي (SAR)

المقدمة

الإنسان [1، 2]. عند استخدام الهاتف المحمول، يقوم الهوائي الداخلي بإرسال واستقبال الموجات الكهرومغناطيسية، مما يؤدي إلى امتصاص جزء من هذه الطاقة داخل الأنسجة البشرية. ويُعبّر عن هذا الامتصاص بمعدل الامتصاص النوعي SAR، وهو المقياس المعتمد عالمياً لتقييم مستوى التعرض الكهرومغناطيسي وتأثيره الحراري داخل الجسم [3، 4]. ومن الناحية الفيزيائية، يمكن ربط SAR بالمجال الكهربائي داخل الأنسجة وفق [5]:

الهاتف المحمول اليوم جزءاً أساسياً من الحياة اليومية للمليارات الأشخاص حول العالم، حيث يستخدم لفترات طويلة وبقرب مباشر من جسم الإنسان، خاصة منطقة الرأس أثناء المكالمات الصوتية. هذا الاستخدام المكثف أثار مخاوف صحية متزايدة تتعلق بالتعرض المستمر للإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من الهواتف المحمولة، وتأثيره المحتمل على الأنسجة الحيوية في جسم

*Corresponding author

https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_36

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



المستخدمة والتي بإمكانها تشتيت الإشعاع الكهرومغناطيسي، مما يعد من الأمور الأساسية للشركات المصنعة للأجهزة والهواتف الذكية.

كما اتجهت العديد من الدراسات البحثية إلى استكشاف تقنيات هندسية مختلفة لخفض قيم SAR، مثل استخدام مواد التدرج الكهرومغناطيسي، والهياكل المعدنية، ودمج مواد ذات خصائص كهرومغناطيسية خاصة داخل الهوائي أو غلاف الهاتف [12،11]. ومن بين هذه التقنيات، برزت المواد الفائقة metamaterial كحل واعد نظرًا لقدرتها على التحكم في انتشار الموجات الكهرومغناطيسية بطرق غير تقليدية [14،13]. أظهرت دراسات جديدة أن دمج تراكيب metamaterial، مثل حلقات الرنين المنفصلة (Split) Ring Resonators، مع هوائيات الهاتف المحمولة يمكن أن يساهم في تقليل قيم SAR مع الحفاظ على الأداء الإشعاعي للهوائي ضمن الحدود المقبولة [16،15]

دراسة تأثير تراكيب metamaterial، عند دمجها مباشرة في الهوائيات الذكية يعتبر من الجوانب الهامة للباحثين خصوصًا هوائيات PIFA، وفي بيئة تحاكي الاستخدام الحقيقي بالقرب من الرأس البشري.

يهدف هذا البحث إلى تصميم ومحاكاة هوائي داخلي من نوع PIFA للهاتف المحمول، ودراسة تأثير دمج حلقات SRR داخل ركيزته على قيم SAR داخل نموذج رأس بشري، مع تحليل أداء الهوائي من حيث الخصائص الإشعاعية، وذلك باستخدام برنامج CST Studio Suite كأداة محاكاة عددية ثلاثية الأبعاد.

المواد وطرق العمل

يعد CST Studio Suite أشهر برامج المحاكاة الكهرومغناطيسية ثلاثية الأبعاد، ويستخدم على نطاق واسع في تصميم وتحليل الهوائيات والدوائر عالية التردد، حيث يوفر البرنامج عدة محلات عددية (في مجال التردد أو الزمن) تسمح بدراسة النماذج المعقدة، وإضافة إلى أدوات ما بعد المعالجة اللازمة لاستخراج مؤشرات الأداء مثل S11 والكفاءة والكسب،

حيث يحسب الفقد الرجعي [17]:

$$RL = -10 \log \frac{P_i}{P_r} \quad (3)$$

حيث:

P_i - القدرة الداخلة.

P_r - القدرة المنعكسة.

بينما الكسب يكون مساويا

$$G = 4\pi \times \frac{E_t}{P_t} \quad (4)$$

حيث:

E_t - شدة الإشعاع.

P_t - مجموع القدرة الداخلة.

كما يمكن حساب مؤشرات السلامة الحيوية مثل SAR بمتوسطات 1 g و 10g [17]، وهو أداة متعددة الاستخدامات لمحاكاة EM سريعة ودقيقة للترددات العالية والمشكلات البصرية. إلى جانب نطاق واسع من التطبيقات، فإنه يوفر مزايا كبيرة من المنتج إلى السوق، حيث النماذج الأولية الافتراضية قبل التجارب المادية والتحسين بدلا من التجريب [17]. يعتبر الهوائي المستخدم في هذا العمل هو هوائي داخلي من نوع PIFA (Planar Inverted-F Antenna)، وهو من الأنواع الشائعة في هواتف المحمول لأنه منخفض

$$SAR = \frac{E|\sigma|^2}{\rho} \quad (1)$$

حيث:

σ : موصلية النسيج بوحدة (S/m).

E: شدة المجال الكهربائي داخل النسيج بوحدة V/m.

ρ : كثافة النسيج بوحدة (kg/m³).

SAR من (1)، تبين أن الامتصاص داخل الأنسجة يزيد كلما كانت موصلية النسيج σ أعلى أو كان المجال الكهربائي E داخل الجسم أقوى، بينما يقل عندما تكون كثافة النسيج ρ أكبر، وبما أن الامتصاص لا يكون موزعا بشكل متجانس فمن الطبيعي أن تظهر قيم مرتفعة موضعيا قرب مصدر الإشعاع خصوصا في منطقة الأذن والخذ أثناء استخدام الهاتف لذلك لا يتم الاعتماد على نقطة واحدة فقط عند الإبلاغ عن SAR، بل تستخدم طريقة المتوسط المكاني بحيث تحسب الذروة كمتوسط على كتلة صغيرة من النسيج مثل 1 g أو 10 g لتقليل تأثير القيم المرتفعة جدا وإعطاء قيمة أكثر تمثيلا للذروة، وعند امتصاص الأنسجة البشرية للطاقة الكهرومغناطيسية يتحول جزء من هذه الطاقة إلى حرارة مما يؤدي إلى ارتفاع في درجة الحرارة داخل النسيج، ويمكن تقدير مقدار هذا الارتفاع باستخدام معدل الامتصاص النوعي SAR، ومدة التعرض، وكثافة النسيج، والسعة الحرارية النوعية [6]، ويمكن حساب مقدار الزيادة في درجة الحرارة [7،5].

$$\Delta T = \frac{t \times SAR}{\rho^c} \quad (2)$$

حيث:-

ΔT مقدار الزيادة في درجة الحرارة (C°)

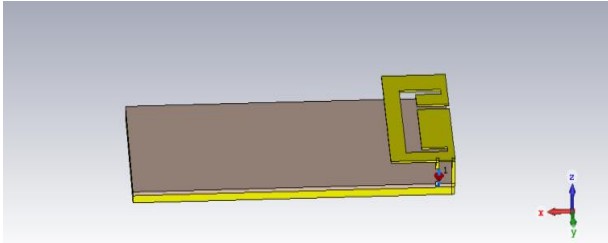
t مدة التعرض للإشعاع (s).

ρ^c السعة الحرارية النوعية للأنسجة (kg/m³).

من (2)، يمكن ملاحظة كيف يؤدي امتصاص الطاقة الكهرومغناطيسية إلى ارتفاع درجة حرارة الأنسجة، ويعتمد مقدار هذا الارتفاع على مدة التعرض، حيث معدل الامتصاص النوعي، وكثافة الأنسجة وسعتها الحرارية، أي كلما زاد SAR أو طول التعرض زادت الحرارة الناتجة، مما يوضح أهمية مراقبة مستويات الإشعاع بشكل دقيق، الكثير من الدراسات أوضحت أن قيم SAR تتأثر بعدة عوامل، منها تصميم الهوائي، تردد التشغيل، وخصائص أنسجة الرأس البشرية [6،5]. وضعت منظمات دولية وهيئات تنظيمية، مثل منظمة الصحة العالمية (WHO) World Health Organization واللجنة الدولية للحماية من الإشعاع غير المؤين (ICNIRP)، (INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION) حدودًا قصوى لقيم SAR يهدف لتقليل المخاطر الصحية المرتبطة بالتعرض للإشعاع الكهرومغناطيسي [8،7،1]. ومع ذلك، فإن الالتزام بهذه الحدود لا يلغي الحاجة الهندسية المستمرة إلى تطوير حلول تقلل امتصاص الطاقة الكهرومغناطيسية قدر الإمكان، خاصة مع تطور تقنيات الاتصالات وزيادة كثافة القدرة المشعة من الأجهزة المحمولة [10،9].

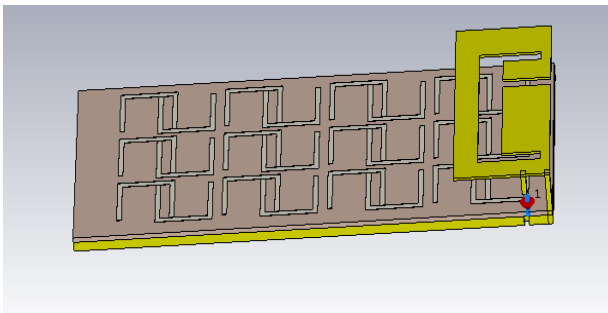
وجد الباحثون الكثير من التحديات في هذا الجانب، حيث يمثل تقليل كمية الإشعاع الممتص من الرأس البشري من أهم العناصر وذلك باستخدام عوامل وطرق مختلفة منها التدرج أو تغيير الأشكال الهندسية للهوائيات

المطبوعة ولوحات الهوائيات المحمولة ، وعلى الوجه الأسفل للركيزة تم تعريف طبقة أرضية Ground Plane من معدن النحاس تغطي اللوحة بالكامل بسمك 2 مم ، وتم بناء الرقعة (Patch) على مسافة 6 مم على الوجه العلوي مع وصلة قصيرة Shorting Wall ونقطة تغذية واحدة ، أبعاد الرقعة 20 مم × 40 مم × 0.5 مم والشكل (2) ، يوضح الصورة الظاهرية للهوائي .



الشكل 2: هوائي PIFA المطبوعة على ركيزة FR-4

تم إنشاء جسم خارجي (SRR_Unit) ، وجسم داخلي أصغر (SRR_Inner) ، حيث استخدمت عملية الطرح (Subtract) لإزالة الجسم الداخلي من الخارجي لتشكيل إطار معدني بعرض 1 مم مع ترك فتحة (Gap) للحلقة الرنانة (SRR) ، بحيث يلامس الوجه السفلي للحلقة سطح FR-4 العلوي لتكون الحلقات مطبوعة ومدمجة على نفس ركيزة الهوائي دون تلامس مع عنصر الهوائي أو خط التغذية. بعد ضبط الخلية الواحدة، استخدمت أدوات Transform لتكرار الخلية باستخدام أداة Copy/Translate في الاتجاهين X و Y، ولتدوير بعض الخلايا استخدمت أداة Rotate/Translate. لتكوين مصفوفة من عدة صفوف وأعمدة تغطي المنطقة بين هوائي ال PIFA وحافة اللوحة PCB. وتم ترتيب 12 خلية SRR بشكل منتظم لتشكيل طبقة الغلاف metamaterial، بحيث يغطي الهوائي بشكل متكامل ويحقق توزيعاً متوازناً للمجالات الكهرومغناطيسية، الشكل (3)، يوضح الهوائي مع الغلاف المصمم.



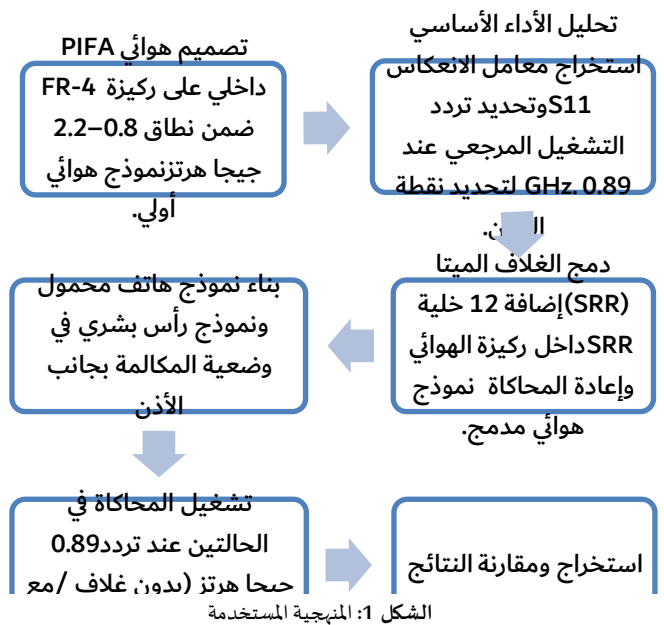
الشكل 3: الهوائي مع الغلاف (metamaterial)

ومن تم استخدمت لوحة ال PCB الخاصة بالهوائي كأساس لتركيب مكونات هاتف مبسط، وأضيفت المكونات باستخدام مجسمات Brick لتمثيل العناصر الأساسية مثل: البطارية، طبقات الشاشة (LCD) ، طبقة زجاجية أمامية، وغلاف بلاستيكي خارجي، مع اختيار أبعاد تحقق تمثيل هندسي واقعي لهاتف مستطيل بحيث يبقى هوائي PIFA قريباً من الحافة العلوية كما هو شائع في الهوائيات الشكل (4)، يوضح ذلك.

الارتفاع ويمكن دمجه بسهولة داخل هيكل الهاتف تم تصميم الهوائي بحيث يعمل في المجال الترددي من 0.8GHz- 2.2GHz ، وهو مجال يغطي عدة حزم ترددية مستخدمة في أنظمة الاتصالات الخلوية مثل GSM و DCS و UMTS/LTE في حيز الترددات الميكروية ، ويعتمد الغلاف المقترح على بنية metamaterial من نوع Split Ring Resonator (SRR) ، وهي خلايا رنانة تُستخدم للتحكم في المجالات القريبة ضمن نطاق ترددي محدد ، عملياً تعمل خلية SRR كرنان من نوع LC ؛ حيث يمثل مسار الحلقة محادثة، بينما تمثل الفتحة (Gap) سعة، وبالتالي يظهر سلوك رنين يمكن ضبطه بتغيير الأبعاد الهندسية للحلقة والفتحة والمسافات بين الخلايا، ولتمثيل الحلقات المعدنية داخل CST بطريقة واضحة وبسيطة، تم تعريف حلقات SRR كمادة PEC (Perfect Electric Conductor)، أي موصل مثالي تهمل فيه فقد المقاومة، ويستخدم هذا الافتراض بكثرة في المحاكاة عندما يكون الهدف الأساسي هو تحليل توزيع المجالات والتيارات وإظهار تأثير البنية الرنانة شكل الحلقة وال gap دون تعقيد النتائج بخسائر الموصل، وقد تم دمج هذه الحلقات على نفس ركيزة الهوائي بحيث تكون مطبوعة وملاصقة لسطح FR-4 العلوي تم ترتيب عدد (12) خلية SRR حول الهوائي لتشكيل الغلاف metamaterial ، بحيث يغطي الهوائي بشكل متكامل ويحقق توزيعاً متوازناً للمجالات الكهرومغناطيسية، مع التأكيد على عدم وجود تلامس كهربائي مباشر بينها وبين عنصر الهوائي أو خط التغذية، ويهدف هذا الترتيب إلى تقليل معدل الامتصاص النوعي (SAR) داخل أنسجة الرأس مع الحفاظ على مطابقة الهوائي واستقراره التشغيلي.

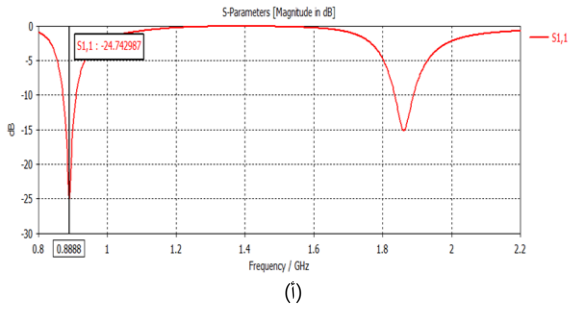
المنهجية والمحاكاة

تمت محاكاة تصميم وتحليل معالم الهوائي المصمم من خلال منهجية تعتمد على الدمج بين بناء النماذج المختلفة منها الهوائي ونموذج الرأس البشري، الشكل (1)، يوضح منهجية النظام المصمم واليات التحليل.

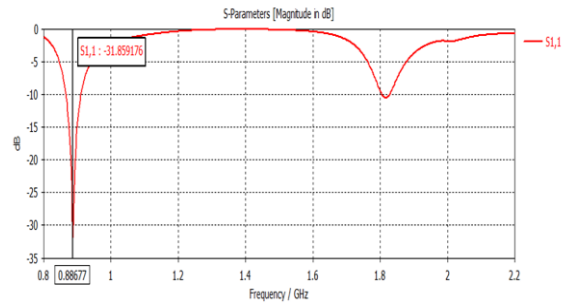


الشكل 1: المنهجية المستخدمة

تصميم هوائي من نوع PIFA ، انشاء على لوحة مطبوعة PCB من مادة FR-4 (lossy) بأبعاد 100 مم × 40 مم × 1 مم ، حيث استخدام ركيزة من نوع FR-4 بسماحية نسبية تقريبية $\epsilon_r \approx 4.3$ ، وهي أكثر الركائز استخداماً في الهوائيات



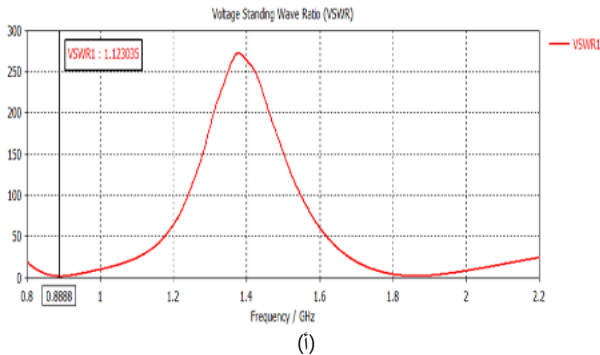
(i)



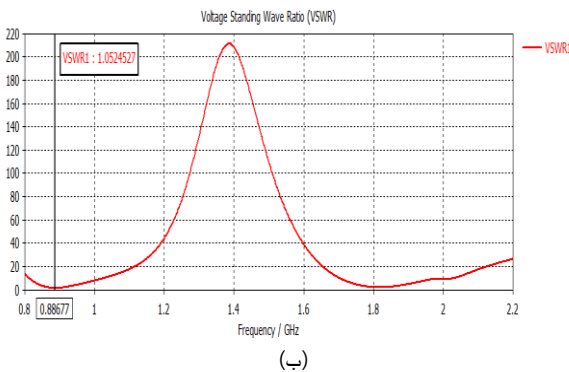
(ب)

الشكل 6: (أ) S11 لهوائي بدون الغلاف، (ب) S11 ل نفس الهوائي مع الغلاف

يمكن ملاحظة أن العلاقة بين التردد و (S11) قبل وبعد إضافة الغلاف متطابقة تقريباً مما يؤكد أن الغلاف يحافظ على استقرار الرنين ومطابقة الممانعة، حيث بقيت قيم (S11) أقل من -10dB وقيم VSWR قريبة من الواحد الصحيح الشكل (7) يبين ذلك.



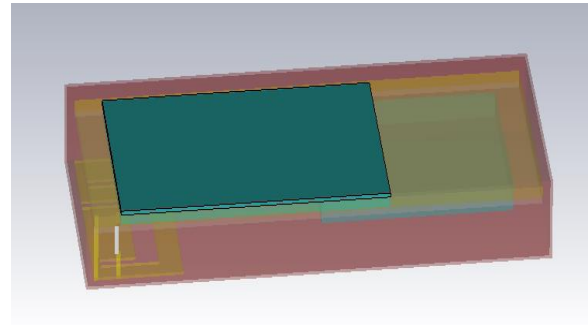
(i)



(ب)

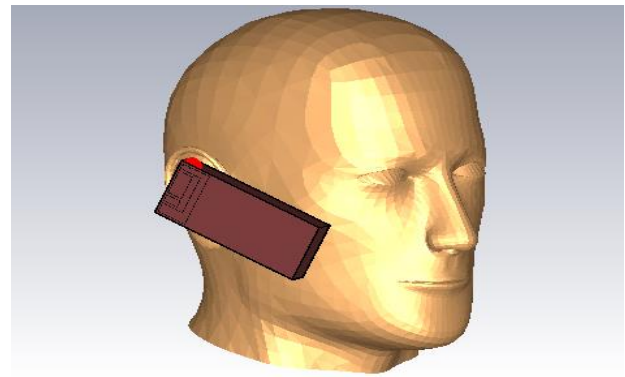
الشكل 7: (أ) VSWR للهوائي بدون الغلاف، (ب) VSWR للهوائي مع الغلاف

كما أظهرت النتائج الموضحة في الشكل 8، أن الهوائي يتمتع بكفاءة إشعاعية عالية تصل إلى 98%. ومن خلال تحليل توازن القدرة (Power Balance).



الشكل 4: الهاتف المبسط المصمم

تم استيراد نموذج رأس بشاري، واستخدمت نفس مادة الرأس باسم liquid Head ، بدون أي تعديلات للخصائص، ووضع الهاتف بجانب الرأس في وضعية تشبه شكل المكاملة، بحيث يكون الهوائي في أعلى الهاتف مقابل الاذن كما هو موضح بالشكل (5).

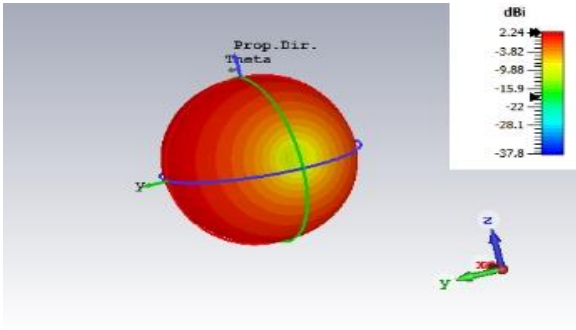


الشكل 5: نموذج رأس إنسان مع الهاتف

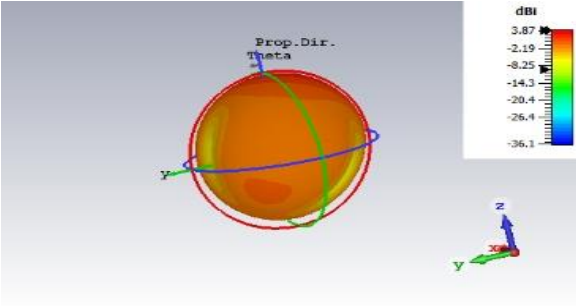
بعدها تم اختيار قالب البحث الخاص بتطبيقات التعرض الحيوي وحساب SAR ، حيث تم استخدام Time Domain Solver للمحاكاة وذلك ضمن نطاق 0.7–1.1 GHz حيث يغطي منطقة الرنين التي نهتم بها في تقييم الرأس والهاتف، تم 0.89 GHz كتردد، ولذلك تم ضبط Monitors Field عند هذا التردد لاستخراج خرائط المجال الكهربائي E-field وقدرة الفقد/كثافة الفقد ثم مؤشرات SAR ، وتم استخدام أداة SAR Calculation في مرحلة Post-Processing لحساب SAR-1g و SAR-10g لكل من الحالتين بدون الغلاف ومع الغلاف ، وتم الحصول على التيار السطحي وتوازن القدرة Power Balance عند نفس التردد .

النتائج والمناقشة

نتائج المحاكاة التي تشمل تقييم أداء هوائي ال PIFA في الفضاء الحر Free Space قبل وبعد إضافة غلاف ال metamaterial (SRR)، تم دراسة تأثير وجود الهاتف بجانب نموذج الرأس البشري وتقييم معدلات الامتصاص النوعي (SAR)، وتحليل أداء الهوائي في الفضاء الحر، والحصول على الخصائص الإشعاعية للهوائي للتأكد من أن إضافة الغلاف لا تؤدي إلى تدهور أداء الاتصال، الشكل 6، يبين قيم معامل الانعكاس (S11)، حيث حقق الهوائي مطابقة جيدة عند الترددات المستهدفة (0.89 GHz و 1.8).

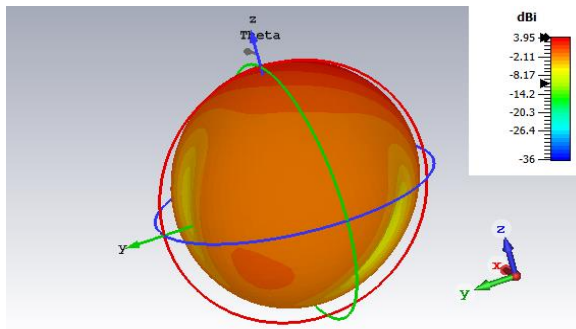


(i)

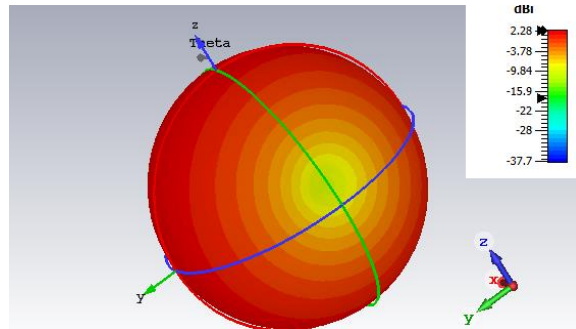


(ب)

الشكل 10: الاتجاهية بعد إضافة الغلاف 0.89GHz (ب), 1.8GHz

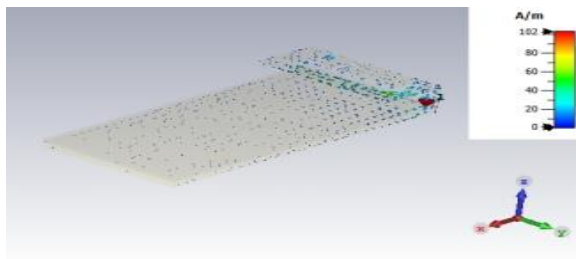


(i)

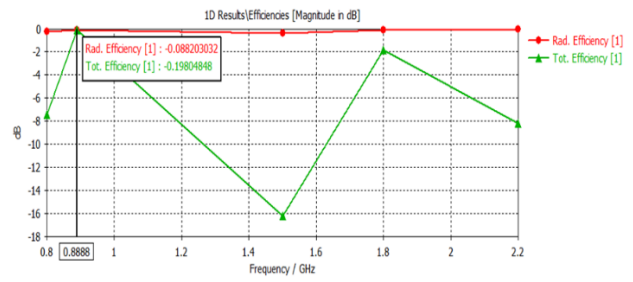


(ب)

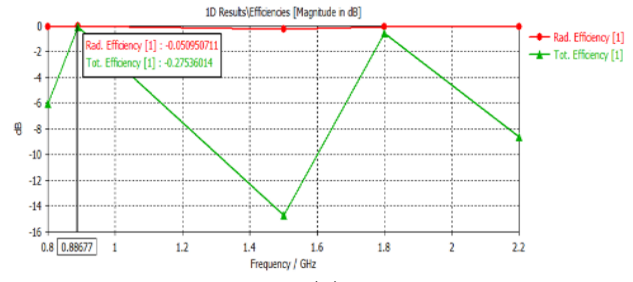
الشكل 11: الاتجاهية بعد إضافة الغلاف 0.89GHz (ب), 1.8GHz



(i)



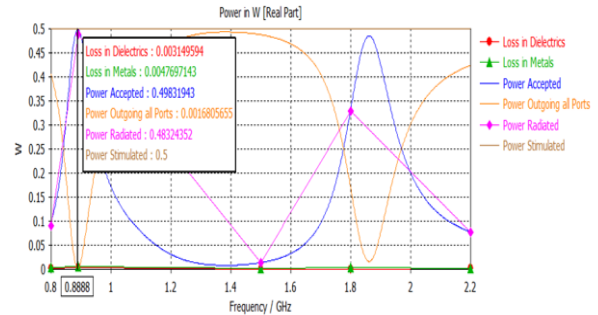
(i)



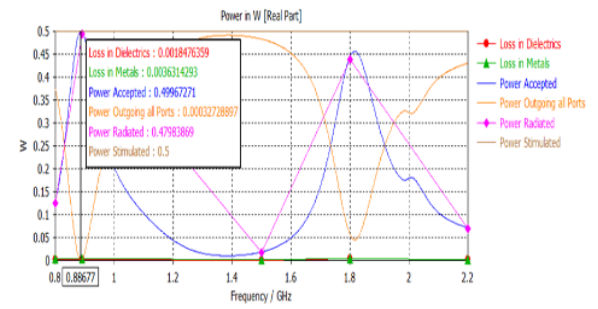
(ب)

الشكل 8: الكفاءة الإشعاعية والكلية للهوائي (أ) قبل الغلاف (ب) بعد إضافة الغلاف

الشكل 9، يبين تغيير طفيف في القدرة المقبولة (Paccepted) بعد إضافة الغلاف، مما يشير إلى كفاءة العناصر metamaterial، في تعزيز أداء الهوائي وتقليل الفاقد.



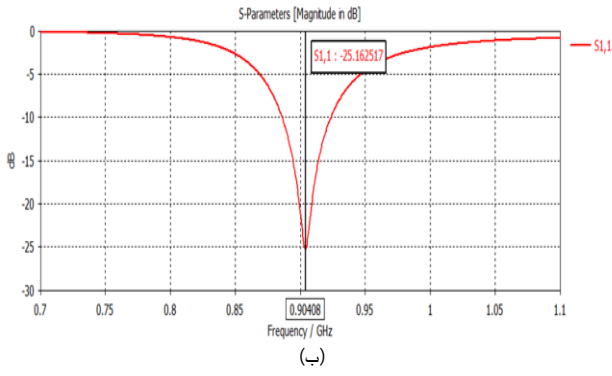
(i)



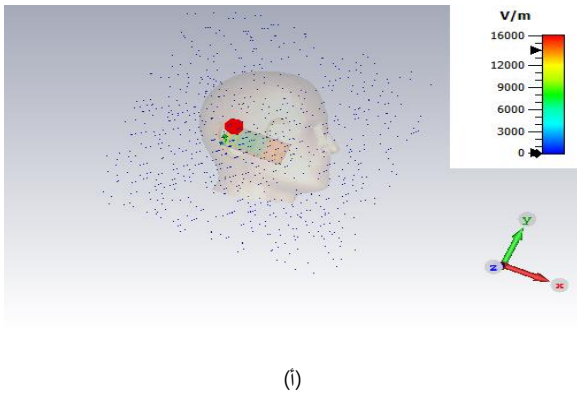
(ب)

الشكل 9: توازن القدرة (أ) قبل الغلاف (ب) بعد إضافة الغلاف

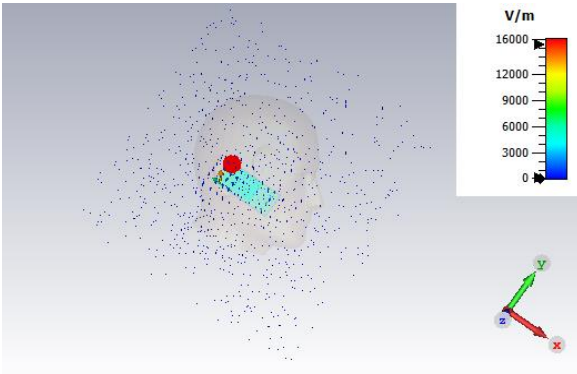
تبين الأشكال (10، 11) ان قيم الكسب والاتجاهية مستقرة، مما يعني أن الغلاف لا يعيق الإشعاع في المجال البعيد. ومع ذلك أظهرت توزيع التيار السطحي (Surface Current) الى إعادة توزيع واضحة للمسارات الكهربائية حول حلقات (metamaterial)، وهو ما يفسر قدرة الغلاف على التحكم في المجالات لقريبة. الشكل (12)، يبين ذلك.



الشكل 13: معامل الانعكاس S11 للهاتف بجانب الرأس (أ) بدون الغلاف، (ب) مع الغلاف

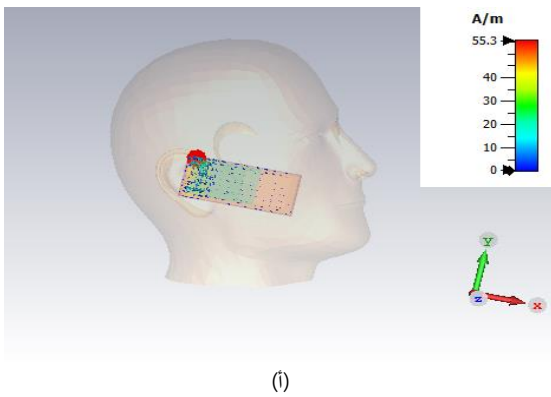


(أ)

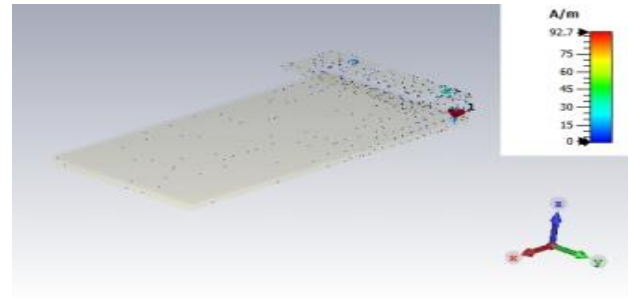


(ب)

الشكل 14: شدة المجال الكهربائي E قرب رأس الإنسان: (أ) بدون الغلاف (ب) مع الغلاف



(أ)



(ب)

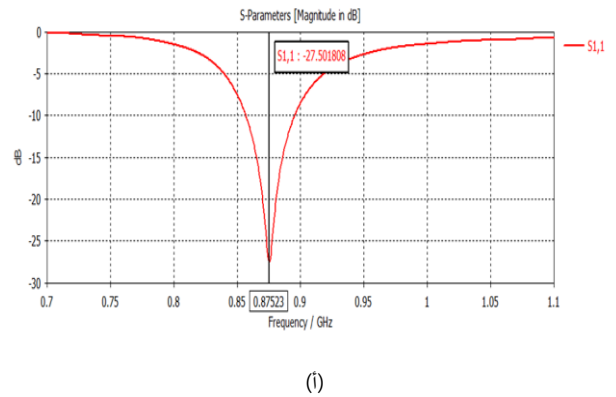
الشكل 12: توزيع التيار السطحي للهوائي بعد إضافة الغلاف

(أ) تردد 1.8GHz
(ب) 0.89GHz

الجدول 1: يبين مقارنة في أداء الهوائي قبل وبعد إضافة الغلاف في الفضاء الحر

الجدول 1: أداء الهوائي قبل وبعد إضافة الغلاف في الفضاء الحر				المعيار
0.89GHz (بدون غلاف)	0.89GHz (مع غلاف)	1.8GHz (بدون غلاف)	1.8GHz (مع غلاف)	
25-	30.7-	15.11-	10.52-	(S11) (dB)
1.11	1	1.42	1.8	VSWR
2.24	2.23	3.87	3.89	Gain (dB)
2.33	2.28	3.93	3.95	Directivity (dB)
98	98.8	98.5	98.5	الكفاءة الإشعاعية (%)
96.9	95.3	64.6	85.9	الكفاءة الكلية (%)

لدراسة تأثير الهاتف على نموذج الرأس البشري المصمم من خلال محاكاة وضعية "التحدث" لدراسة التفاعل بين الهوائي وأنسجة الرأس، حيث أدى وجود الرأس إلى إزاحة طفيفة في تردد الرنين من 0.875 GHz إلى 0.904GHz بسبب تأثير الاحمال (Loading Effect) للأنسجة الحيوية كما هو موضح في الشكل 13. ومع ذلك، ظلت مطابقة الممانعة ضمن الحدود المقبولة تقنياً، كما أظهر شكل توزيع المجال الكهربائي، الشكل 14. و الشكل 15 يبين التيار السطحي، حيث الغلاف يعمل كحاجز فعال (Shielding effect)؛ ويساهم في إعادة توجيه وتشتيت المجال الكهربائي بعيداً عن منطقة الأذن والخذ، مما أدى إلى زيادة مساحة المناطق ذات الكثافة المنخفضة والمحددة باللون الأزرق.



(أ)

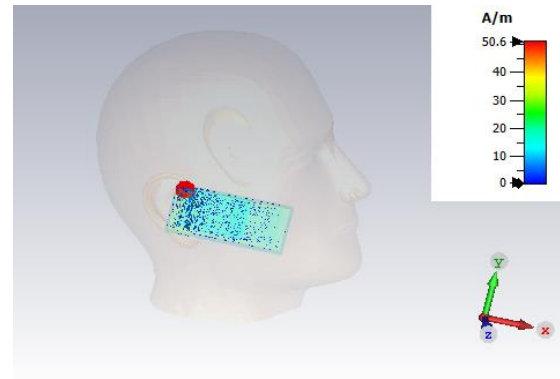
محاكاة النظام باستخدام CST. أظهرت النتائج أن الغلاف يعيد توزيع المجالات والتيارات في المجال القريب قرب الأذن، مما يساهم في تقليل SAR داخل الرأس عند تردد التشغيل المحدد، دون تأثير سلبي على تشغيل الهوائي، كما أن دمج الغلاف المكون من 12 خلية من حلقات SRR مع هوائي PIFA يساهم في إعادة تشكيل المجالات الكهرومغناطيسية في المنطقة القريبة من الهاتف، مما يساعد على تقليل الطاقة المتجهة نحو الرأس أثناء وضعية المكالمات. النتائج الخاصة بمعاملات النظام معامل الانعكاس S_{11} و VS_{WR} أن الهوائي حافظ على مطابقة جيدة قرب الرأس في الحالتين (مع الغلاف وبدونه)، مع حدوث انزياح بسيط في تردد الرنين نتيجة تأثير تحميل أنسجة الرأس وتغير شروط الاقتران في المجال القريب. وأوضحت اشكال التيار السطحي أن وجود الغلاف يقلل انتشار التيارات على أجزاء واسعة من جسم الهاتف ويجعلها أكثر تمركزاً حول منطقة الغلاف والهوائي، وهو ما يدل على أن الغلاف يؤثر على مسارات التيار ويحد من امتدادها باتجاه الرأس. كما أظهرت شدة المجال الكهربائي قرب الأذن أن الغلاف يغير توزيع المجال في المجال القريب، بحيث تزيد مساحة المناطق ذات الشدة الأقل قرب الرأس مقارنة بالحالة بدون الغلاف، وهو عامل يرتبط مباشرة بتغير الامتصاص داخل الأنسجة، ومن ما سبق وجد انه عند تقييم SAR عند تردد التشغيل المعتمد 0.89 GHz، حقق الغلاف انخفاضاً ملحوظاً في قيم SAR-1g و SAR-10g داخل الرأس تصل إلى 5% و 6% تقريباً، مما يؤكد أن تأثير الغلاف ليس شكلياً فقط، بل ينعكس فعلياً على مستوى التعرض الحيوي مع الحفاظ على تشغيل الهوائي ضمن مستوى مناسب، لكن الحكم على مطابقة النتائج للمعايير يجب أن يكون مع ذكر قدرة الإدخال (0.5w)، لأن حد FCC يخص SAR-1g (1.6 W/kg) وحد ICNIRP 2020 يخص SAR-10g (2W/kg).

التوصيات

من خلال هذا العمل، يمكن اقتراح جملة من التوصيات للأعمال المستقبلية والتطبيقات العملية:

1. ضبط حلقات SRR بدقة حول 0.89 GHz (الفجوة، العرض، التباعد، وعدد الخلايا) لأن أقوى خفض ل SAR يحدث عندما يكون الغلاف مضبوط على تردد التشغيل المستهدف.
2. إضافة نموذج اليد بالهاتف في المحاكاة، لأن اليد تغير المطابقة والمجال وبالتالي قد تغير SAR ونتائج الأداء.
3. توثيق المقارنة بشكل معياري تثبيت القدرة المدخلة، وتوضيح هل تم تحجيم SAR لسيناريو قدرة هاتف حقيقية، وذكر حدود 1g/10g حسب الجهات التنظيمية داخل فصل المعايير.
4. استبدال افتراض الموصل المثالي (PEC) بمحاكاة مواد عملية مثل النحاس بسمك موصل مناسب، مع استخدام عازل متوافق مع متطلبات الهوائي، وذلك للحصول على نتائج أكثر دقة وواقعية تعكس الأداء الفعلي عند التصنيع.

Author Contributions: Amer: Manuscript editing. Mega: Design the model and conceptualization of the introduction and related work; formulation of equations, system design, and geometric representation. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript



الشكل 15: توزيع التيار السطحي ف الرأس (أ) بدون غلاف، (ب) مع الغلاف

تقييم معدل الامتصاص النوعي SAR يعتبر من الجوانب الأساسية في الجانب الوقائي للعمل، حيث تم حساب قيم SAR لكتلة 1g و 10g عند تردد 0.89GHz. الجدول 2، يوضح نسبة الانخفاض المحققة بفضل الغلاف، وتمت مقارنة النتائج مع الحدود التنظيمية العالمية W/kg ل FCC و ICNIRP 2.0 W/kg، بالرغم من أن القيم المسجلة عند قدرة 0.5w تتجاوز هذه الحدود، إلا أن النتائج تثبت كفاءة الغلاف في تقليل الامتصاص. ولتحقيق المطابقة الكاملة تم اقتراح خفض قدرة الإدخال إلى ما دون 0.275w. كما هو موضح في الجدول 3.

الجدول 2: قيم SAR ونسبة الانخفاض عند تردد 0.89 GHz (قدرة إدخال 0.5w)

نوع المتوسط	بدون الغلاف (W/kg)	مع الغلاف (W/kg)	نسبة الانخفاض
SAR(1g)	3.05	2.91	4.59%
SAR (10g)	2.39	2.25	5.86%

الجدول 3: المقارنة المعيارية والقدرة التشغيلية الآمنة

المعيار	الحد المسموح	الحالة (عند 0.5 واط)	القدرة المقترحة للمطابقة
FCC (1g)	W/kg 1.6	أعلى من الحد	0.275 واط
ICNIRP (10g)	W/kg 2.0	أعلى من الحد	0.444 واط

ويمكن القول إن إضافة الغلاف المصمم (SRR) ساهم بشكل فعال في تقليل معدل الامتصاص النوعي (SAR) بنسبة تصل إلى 5.86% دون التأثير سلباً على كفاءة الهوائي أو خصائصه الإشعاعية في المجال البعيد، مما يجعله حلاً واعداً لتعزيز سلامة الهواتف المحمولة.

الاستنتاجات

في هذه الورقة تم تصميم هوائي PIFA يعمل ضمن نطاق الاتصالات الخلوية ودمج غلاف metamaterial مكون من حلقات SRR لدراسة تأثيره عند وضع الهاتف بجانب الرأس، حيث الرغبة في خفض معدل الامتصاص النوعي SAR مع الحفاظ على أداء الهوائي ضمن حدود مقبولة، من خلال

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] World Health Organization. "Electromagnetic Fields (EMF) – Health Topics." *WHO*, 2025. <https://www.who.int/health-topics/electromagnetic-fields>
- [2] U.S. Food & Drug Administration (FDA). "Scientific Evidence for Cell Phone Safety." FDA, 2024, <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/cell-phones/scientific-evidence-cell-phone-safety> (fda.gov in Bing).
- [3] M. Abdul-Al, et al. "Wireless electromagnetic radiation assessment based on the specific absorption rate (SAR): A review case study." *Electronics*, vol. 11, no. 4, p. 511, 2022. <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/4/511>
- [4] H. Schwan, and K. Li. "The mechanism of absorption of ultrahigh frequency electromagnetic energy in tissue as related to the problem of tolerance dosage." *IRE Transactions on Medical Electronics*, pp. 17–23, 1956. <https://apps.dtic.mil/sti/html/tr/AD0080164/>
- [5] P. Jacobs, R. Olsen, and K. Paulsen. "The effect of frequency (64–498 MHz) on specific absorption rate", *Medical Physics*, vol. 51, no. 2, 2023. <https://doi.org/10.1002/mp.16902>.
- [6] IEEE Std C95.1-2005, "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz," in *IEEE Std C95.1-1991*. vol., no., pp.1-76, 27. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1992.101091>
- [7] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)." *Health Physics*, vol. 118, no. 5, pp. 483–524, 2020. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210>.
- [8] E. Lund, and K. Caputa. "Dependence of the RF field absorption on the human body dimensions." *19th International Conference Radioelektronika. IEEE*. pp. 327-329, 2009. <https://doi.org/10.1109/RADIOELEK.2009.5158792>.
- [9] M. Zhadobov, G. Denysenkov, and R. Sauleau, "Recent Advances in RF Dosimetry and Exposure Assessment for 5G and IoT Devices." *IEEE Access*, vol. 11, pp. 53211–53228, 2023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3280152>.
- [10] N. Kuster, Q. Balzano, and M. Christ, "RF exposure limits and compliance assessment for future wireless technologies." *IEEE Trans. Electromagnet Compat*, vol. 63, no. 6, pp. 1829–1842, 2021. <https://doi.org/10.1109/TEMC>.
- [11] S. Abdulrazzaq. "SAR reduction in human head using ferrite and aluminum shield" *M.Sc. Thesis, Dept. of Communications Engineering, Al-Nahrain Univ., Baghdad, Iraq*, 2013. <https://nahrainuniv.edu.iq/ar/node/1209>.
- [12] M. Hossain, I. Faruque, and M. Islam. "A New Design of Cell Phone Body for the SAR Reduction in the Human Head." *Appl. Compute. Electromagnet. ACES Journal*, vol. 30, no. 07, pp. 792–798, 2021. <https://journals.riverpublishers.com/index.php/ACES/article/view/10485>
- [13] T. Ramachandran, et al. "Reduction of 5G cellular network radiation in wireless mobile phone using an asymmetric square shaped passive metamaterial design." *Scientific Reports*, 11(1), 2619, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82105-7>.
- [14] M. Alam, and S. Latif. "Double-Split Rectangular Dual-Ring DNG Metamaterial for 5G Millimeter-Wave Applications." *Electronics* 2023, 12(1), 174. <https://doi.org/10.3390/electronics12010174>,
- [15] M. Faruque, et al. "Metamaterial-Embedded Low SAR PIFA for Cellular Phone." *PLOS ONE*, vol. 10, no. 11, e0142663, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142663>
- [16] M. Hossain, et al. "Design and Analysis of Mobile Phone Casing for the Reduction of EM Absorption." *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 49, no. 3, pp. 395–403, 2015. <https://doi.org/10.3233/JAE-150045>.
- [17] H. Lai, and N. Singh. "Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radio-frequency electromagnetic radiation." *International Journal of Radiation Biology*, vol. 69, no. 4, pp. 513–521, 1996. <https://doi.org/10.1080/095530096145814>