



قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية
شُعبة الاتّصالات
مُقرر معمل تطبيقات الحاسوب والتصميم

Project 1

Yagi antenna design

◀ الاسم : غادة عادل الشّامي
◀ رقم القيد: 062220014

8 - شوال - 1447 هجري

الملخص:

يتناول هذا المشروع تصميم ومحاكاة هوائي من نوع Yagi-Uda للعمل في نطاق الترددات العالية جداً (VHF). تم تحسين أبعاد الهوائي (Optimization) ليعمل بكفاءة قصوى عند التردد الأوسط 250 ميغاهرتز، حيث تم تحقيق نسبة موجة واقفة (VSWR) تقترب من المثالية وقيمة عودة ممتازة (S11)، مع التركيز على دراسة الكسب (Gain) العالي والاتجاهية التي يتميز بها هذا النوع من الهوائيات.

فهرس المحتويات

رقم الصفحة	العنوان	
1	الملخص	
2	فهرس المحتويات	
3	فهرس الأشكال	
4	الفصل الأول : التعريف بهوائي ياغي-أودا	1
5	المقدمة	1.1
5-6	مكونات هوائي ياغي-أودا	1.2
5	العنصر المشع	1.2.1
6	العنصر العاكس	1.2.2
6	الموجهات	1.2.3
6	مبدأ عمل الهوائي	1.3
7	شكل إشعاع هوائي ياغي-أودا	1.4
7-8	التصميم	1.5
9	الفصل الثاني : الجزء العملي	2
9	بيئة عمل البرنامج	2.1
9	هيكلية وأبعاد الهوائي	2.2
9-10	المحاكاة	2.3
10-11-12-13-14	النتائج التي تم الحصول عليها	2.4
15	المراجع	

فهرس الأشكال

رقم الشكل	التعريف بالشكل	رقم الصفحة
الشكل 1	التركيب الهندسي التفصيلي لهوائي ياغي-أودا	5
الشكل 2	تطبيق عملي لمصفوفة الهوائيات	6
الشكل 3	نمط إشعاع هوائي ياغي-أودا	7
الشكل 4	بارامترات الهوائي	10
الشكل 5	هيكلية الهوائي 3D	10
الشكل 6	منحنى S11	11
الشكل 7	منحنى VSWR	11
الشكل 8	نمط الإشعاع والاتجاهية عند تردد المركز	12
الشكل 9	نمط الإشعاع والاتجاهية عن 200 ميغا هيرتز	12
الشكل 10	نمط الإشعاع والاتجاهية عند 300 ميغا هيرتز	13
الشكل 11	منحنى ممانعة الدخل	14

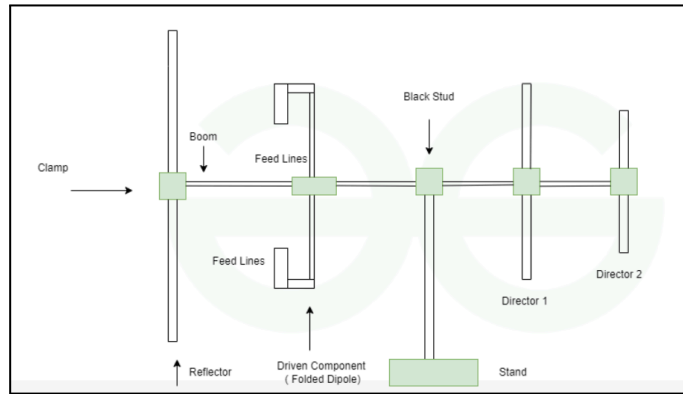
الفصل الأول : التعريف بهوائي ياغي-أودا

المقدمة:

يعتبر هوائي "ياغي-أودا" (Yagi-Uda Antenna)، والذي يُعرف اختصاراً بـ "هوائي ياغي"، أحد أكثر أنواع الهوائيات انتشاراً واستخداماً في تطبيقات الاتصالات اللاسلكية، وخاصة في استقبال البث التلفزيوني (VHF/UHF) والاتصالات الراديوية للهواة.

تكمُن أهمية هذا الهوائي في قدرته العالية على التوجيه (Directivity)، حيث يقوم بتركيز طاقة الإشارة في اتجاه واحد محدد، مما يزيد من قوة الإشارة المستلمة أو المرسلّة (كسب عالٍ - High Gain) مقارنة بهوائيات الدايبول العادية.

يوضح الشكل التخطيطي أدناه التركيب الهندسي التفصيلي لهوائي ياغي-أودا (Yagi-Uda). يرتكز الهوائي على ذراع حامل مركزي (Boom) تُثبت عليه العناصر المعدنية الموازية لبعضها.



الشكل (1) التركيب الهندسي التفصيلي لهوائي ياغي-أودا

يمكن ملاحظة المكونات الرئيسية بوضوح كالتالي :

● مكونات هوائي ياغي-أودا:

يتكون الهوائي من مجموعة من العناصر المعدنية المتوازية والمرتبة على طول ذراع مركزي. تنقسم هذه العناصر إلى ثلاثة أنواع رئيسية:

1- العنصر المشع (Driven Element):

- هو قلب الهوائي، وعادة ما يكون عبارة عن "دايبول" (Dipole) أو "دايبول مطوي" (Folded Dipole).
- يتم توصيل كابل التغذية (Feed line) بهذا العنصر مباشرة.
- طوله يساوي تقريباً نصف طول الموجة .

2- العاكس (Reflector):

- يوضع خلف العنصر المشع.
- وظيفته عكس الموجات الراديوية باتجاه الأمام لمنع ضياع الطاقة في الخلف.
- يكون طوله أكبر من طول العنصر المشع بحوالي 5%.

3- الموجّهات (Directors):

- توضع أمام العنصر المشع باتجاه استقبال أو إرسال الإشارة.
- وظيفتها زيادة توجيه الإشارة وتركيزها في شعاع ضيق.
- تكون أطوالها أقصر من طول العنصر المشع، وكلما زاد عدد الموجّهات، زاد كسب الهوائي (Gain).



الشكل (2) تطبيق عملي لمصفوفة الهوائيات

يوضح الشكل السابق تطبيقاً عملياً متقدماً يُعرف بـ (مصفوفة الهوائيات - Antenna Array)، حيث يتم تجميع عدة هوائيات ياغي معاً على حامل واحد. يهدف هذا التجميع إلى مضاعفة الكسب (Gain) وزيادة دقة التوجيه لمسافات بعيدة جداً مقارنة باستخدام هوائي ياغي مفرد.

• مبدأ عمل هوائي ياغي-أودا:

يعتمد مبدأ عمل هوائي "ياغي-أودا" بشكل أساسي على ظاهرتي الحث الكهرومغناطيسي (Electromagnetic Induction) وتداخل الموجات (Wave Interference) بين عناصره المختلفة. ورغم أن طاقة التردد الراديوي (RF) تُغذى لعنصر واحد فقط، إلا أن العناصر الأخرى تلعب دوراً حاسماً في تشكيل الإشعاع. تبدأ العملية عند توصيل كابل التغذية بالعنصر النشط (Driven Element)، حيث يمر فيه تيار متناوب يؤدي إلى انبعاث موجات كهرومغناطيسية ابتدائية تنتشر في الفضاء المحيط. عندما تصطدم هذه الموجات بالعناصر المعدنية المجاورة غير المتصلة بمصدر طاقة (العاكس والموجه)، فإنها تولد وتستحث تيارات كهربائية داخلها، لتصبح هذه العناصر بدورها هوائيات ثانوية تشع موجات كهرومغناطيسية جديدة.

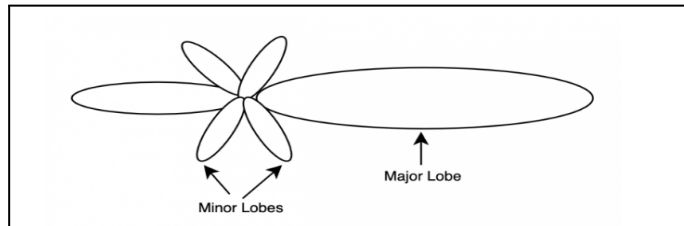
تعتمد طريقة تفاعل هذه الموجات على أطوال العناصر غير النشطة؛ حيث يلعب العاكس (Reflector) دوراً مهماً في توجيه الطاقة. نظراً لكون العاكس أطول قليلاً من العنصر النشط، تصبح

ممانعته الذاتية حثية (Inductive)، مما يؤدي إلى تأخر في طور التيار المستحث فيه (Phase Lag). ونتيجة لذلك، تتداخل الموجات الثانوية المنبعثة منه بشكل هدام (Destructive Interference) مع الموجات المتجهة للخلف فتلغيها، بينما تتداخل بشكل بناء (Constructive Interference) مع الموجات المتجهة للأمام، مما يعكس الطاقة ويدفعها بالاتجاه الأمامي.

على الجانب الآخر، يعمل الموجه (Director) بطريقة معاكسة لتوجيه الشعاع. فبما أنه أقصر من العنصر النشط، تكون ممانعته الذاتية سعوية (Capacitive)، مما يسبب تقدماً في طور التيار المستحث (Phase Lead). هذا يؤدي إلى تداخل موجاته بشكل بناء مع الموجات المندفعة من الخلف، ساحباً طاقة الإشعاع ليركزها في حزمة ضيقة نحو الأمام. والمحصلة النهائية لجمع كل هذه الموجات المتداخلة هي الحصول على نمط إشعاعي موجه بشدة (Highly Directional)، تتركز فيه معظم الطاقة الكهرومغناطيسية في الاتجاه الأمامي، مما يمنح الهوائي خصائصه المميزة من حيث الكسب العالي (High Gain) والاتجاهية الدقيقة.

• شكل إشعاع هوائي ياغي-أودا:

يتميز نمط إشعاع هوائي ياغي بأنه عالي التوجيه، كما هو موضح أدناه، في نمط الإشعاع هذا، يتوافق الفص الرئيسي مع الموجة المشعة الأمامية، وتوجد فصوص ثانوية عديدة في الخلف وعلى الجانبين. أما الفص الثانوي الأبرز فهو الفص العكسي الناتج عن الإشعاع في اتجاه العاكس.



الشكل (3) نمط إشعاع هوائي ياغي-أودا

حيث يوضح الشكل 3 نمط الإشعاع الاتجاهي لهوائي ياغي، حيث يتركز معظم كسب (Gain) الهوائي في الفص الرئيسي (Major Lobe) الموجه نحو المصدر، بينما تظهر الفصوص الثانوية (Minor Lobes) كإشعاعات جانبية وخلفية ضعيفة يفضل تقليلها لزيادة كفاءة التوجيه.

◀ التصميم:

- تحديد التردد المركزي:

$$f_c = \frac{200 + 300}{2} = 250 \text{ MHz}$$

- حساب الطول الموجي:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{300,000,000}{250,000,000} = 1.2 \text{ meters} = 120 \text{ cm}$$

- تصميم العنصر المشع:

يتم حسابه ليكون حوالي:

$$0.45\lambda \text{ إلى } 0.48\lambda$$

- تصميم العاكس:

يجب أن يكون أطول من العنصر المشع بنسبة 5% تقريباً (حوالي 0.5λ).

- تصميم الموجه:

تكون أقصر من العنصر المشع بنسبة 5% تقريباً (حوالي 0.4λ إلى 0.45λ).

العنصر	الرمز	المعادلة التقريبية	عملية الحساب	القيمة (سم)
العاكس (Reflector)	L_ref	0.479λ	0.479×120	57.5
العنصر النشط (Dipole)	L_dip	0.437λ	120×0.437	52.5
الموجه	L_dir1	0.429λ	120×0.429	51.5
المسافة الفاصلة بين العنصر المشع والعاكس	S_ref	0.24λ	120×0.24	29
المسافة بين العنصر المشع والموجه	S_dir	0.2λ	120×0.2	24
نصف قطر العناصر	rad	/	/	0.5
الفجوة بين القطبين	gap	/	/	1

الجدول رقم (1)

الفصل الثاني : الجانب العملي

◀ بيئة عمل البرنامج:

تعتبر بيئة عمل برنامج CST منصة هندسية متكاملة واحترافية تعتمد على واجهة شرائطية منظمة تسهل الوصول للأدوات بشكل منطقي يبدأ من النمذجة ثلاثية الأبعاد ثم تحديد المواد وصولاً إلى تفعيل المحركات الحسابية المتعددة التي تغطي كافة النطاقات الترددية من الموجات الدقيقة وحتى الأنظمة الحرارية والجسيمات المشحونة، وتتميز هذه البيئة بقدرة فائقة على دمج الأنظمة المعقدة وتحليلها بدقة عالية مع دعم كامل لتقنيات التسريع عبر كروت الشاشة لضمان الحصول على نتائج محاكاة واقعية وسريعة في واجهة رسومية واحدة تغنيك عن التنقل بين برامج مختلفة.



◀ هيكلية الهوائي والأبعاد:

لغرض بناء النموذج ثلاثي الأبعاد (3D Model) في برنامج المحاكاة (CST Studio Suite)، تم تعريف الأبعاد الهندسية لعناصر الهوائي كمتغيرات (Parameters) لتسهيل عملية الضبط والتحسين (Optimization).

يوضح الجدول رقم (1) الأبعاد النهائية التي تم إدخالها في البرنامج، والتي تم التوصل إليها بعد ضبط الحسابات النظرية لضمان عمل الهوائي بأعلى كفاءة وأفضل تطابق للممانعة (Impedance Matching) في النطاق الترددي المطلوب (200 - 300 MHz):

◀ المحاكاة باستخدام CST Studio Suite :

خطوات التصميم كانت كالتالي :

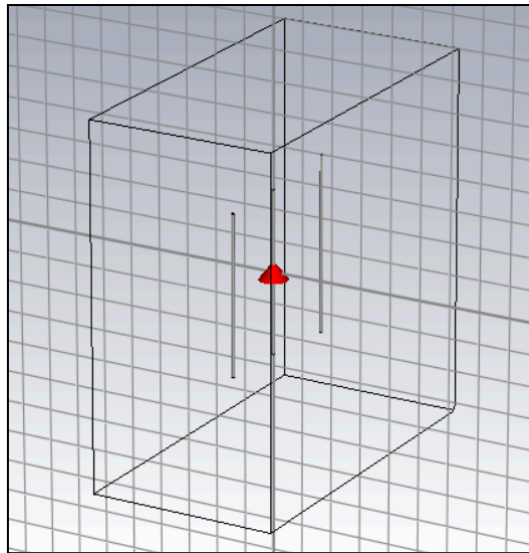
- تم تعيين مادة "الموصل الكهربائي المثالي" (PEC - Perfect Electric Conductor) لجميع الأسطوانات المكونة لعناصر الهوائي. تم اختيار هذه المادة لتقليل مفاويز التوصيل (Conduction Losses) إلى الحد الأدنى وللحصول على أعلى كفاءة إشعاع (Radiation Efficiency) ممكنة أثناء المحاكاة.
- لتشغيل الهوائي، تم استخدام منفذ تغذية من نوع (Discrete Port) بممانعة قياسية تبلغ 25 أوم . تم توصيل هذا المنفذ في الفجوة المركزية (Gap) التي يبلغ طولها 1 سم في منتصف العنصر المشع (Dipole)، وذلك لضمان انتقال الإشارة الكهربائية وتوافق الممانعة (Impedance Matching).

1- بدأت عملية المحاكاة بتعريف الأبعاد الهندسية الدقيقة لعناصر الهوائي كمتغيرات (Parameters) داخل البرنامج لضمان دقة التصميم وجميعها بالسانتي متر.

Parameter List			
Name	Expression	Value	Description
rad	= 0.5	0.5	
gap	= 1	1	
S_dir	= 24	24	
S_ref	= 29	29	
L_dir1	= 51.5	51.5	
L_dip	= 52.5	52.5	
L_ref	= 57.5	57.5	
<new parameter>			

الشكل (4) بارامترات الهوائي

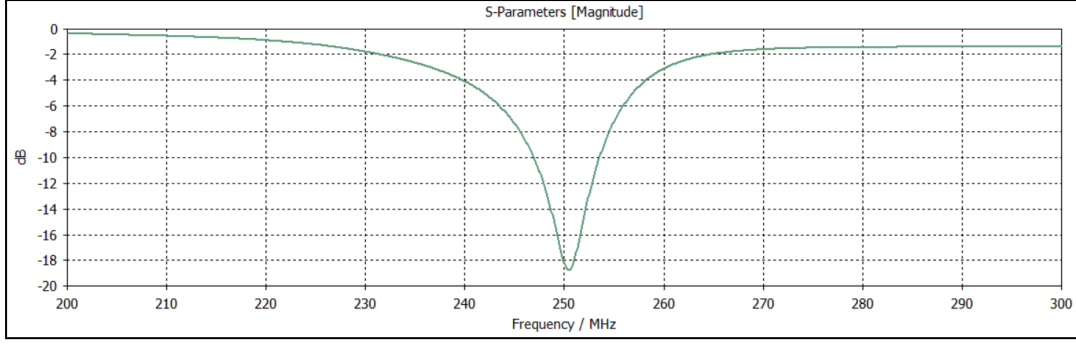
2- بناء النموذج ثلاثي الأبعاد في برنامج المحاكاة (3D Modeling in CST):
يعرض الشكل أدناه المظهر النهائي للنموذج ثلاثي الأبعاد لهوائي ياغي-أودا، كما تم رسمه وتنفيذه بدقة داخل واجهة البرنامج، تم بناء هذا النموذج هندسياً بناءً على قيم المتغيرات (Parameters) التي تم تحديدها أعلاه.



الشكل (5) هيكلية الهوائي 3D

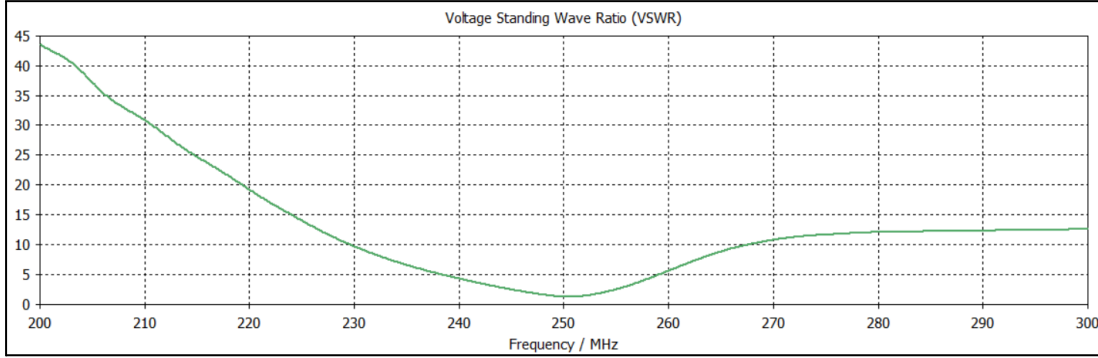
◀ النتائج التي تم الحصول عليها بـ CST Studio Suite :

- بعد اكتمال عملية المحاكاة، تم استخراج وتقييم النتائج الأساسية التي تحدد كفاءة الهوائي، وتتضمن الآتي:
- **خسارة العودة (Return Loss - S11)** وتوافق الممانعة: يُعد المعامل (S11) مؤشراً حاسماً على مقدار الطاقة المنعكسة من الهوائي إلى المصدر. للحصول على أداء مثالي، يجب أن تكون قيمة S11 أقل من (-10- ديسيبل) في النطاق المطلوب.
 - عرض الشكل أدناه منحنى (S11)، حيث نلاحظ انخفاض المنحنى بشكل واضح في النطاق الترددي (200 - 300 MHz)، مما يؤكد نجاح عملية توافق الممانعة (Impedance Matching) عند منفذ التغذية (25 أوم)، وأن الهوائي يمتص ويشتت معظم الطاقة المزودة إليه.



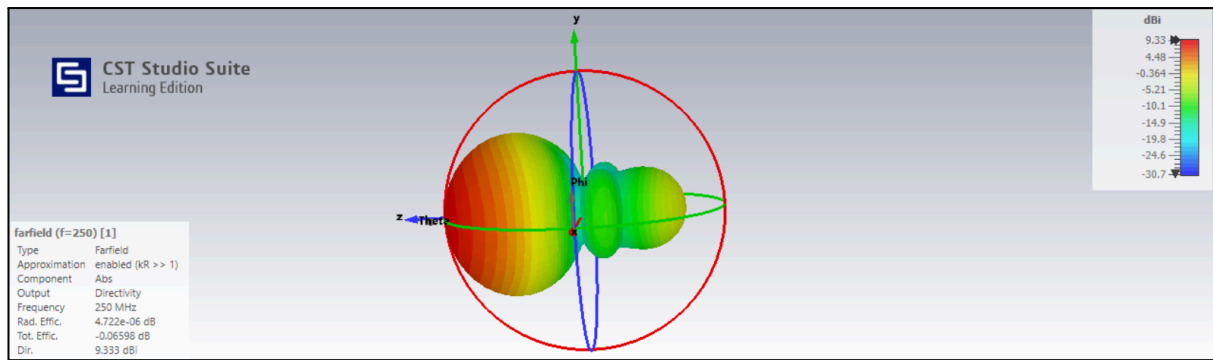
الشكل (6) منحنى S11

- نسبة الموجة الواقفة (VSWR): تم التحقق من نسبة الموجة الواقفة للجهد (VSWR)، والتي ترتبط ارتباطاً مباشراً بمعامل الانعكاس. أظهرت النتائج أن قيمة VSWR تقع تحت حاجز الـ 2 (VSWR < 2) عبر عرض النطاق الترددي المستهدف، وهو ما يطابق المعايير القياسية العالمية لكفاءة الهوائيات ويضمن عدم وجود طاقة راجعة تضر بجهاز الإرسال.



الشكل (7) منحنى VSWR

- نمط الإشعاع والاتجاهية (Radiation Pattern and Directivity): بما أن هوائي ياغي-أودا صُمم ليكون هوائياً موجهاً (Directional)، تم دراسة المجال البعيد (Farfield) في الأبعاد الثلاثية (3D) عند التردد الأوسط 250 ميغاهرتز. يوضح الشكل أدناه نمط الإشعاع، حيث يمكن ملاحظة الآتي:
 - الاتجاهية (Directivity): يتركز الشعاع الرئيسي (Main Lobe) بشكل واضح في الاتجاه الأمامي (على امتداد محور Z الموجب) نحو الموجه (Director)، مما يثبت فعالية العناصر غير النشطة (العاكس والموجه) في إعادة توجيه الإشعاع.
 - قيمة الكسب والاتجاهية (Gain & Directivity): كما هو موضح في بيانات المحاكاة المرفقة بالشكل، حقق الهوائي اتجاهية عالية تبلغ **9.33 dBi**. ونظراً لاستخدام مادة موصلة مثالية (PEC) بمفايد شبه معدومة، فإن الكسب يطابق هذه القيمة تقريباً، مما يجعله مناسباً جداً لتطبيقات الاتصالات التي تتطلب مدى تغطية طويل.
 - نسبة الإشعاع الأمامي إلى الخلفي (Front-to-Back Ratio): أظهر التصميم قليلاً ممتازاً للفصوص الخلفية (Back Lobes - الموضحة باللون الأخضر في الشكل)، مما يقلل من استقبال أو إرسال أي تداخلات من الاتجاه المعاكس بفضل وجود العاكس (Reflector).



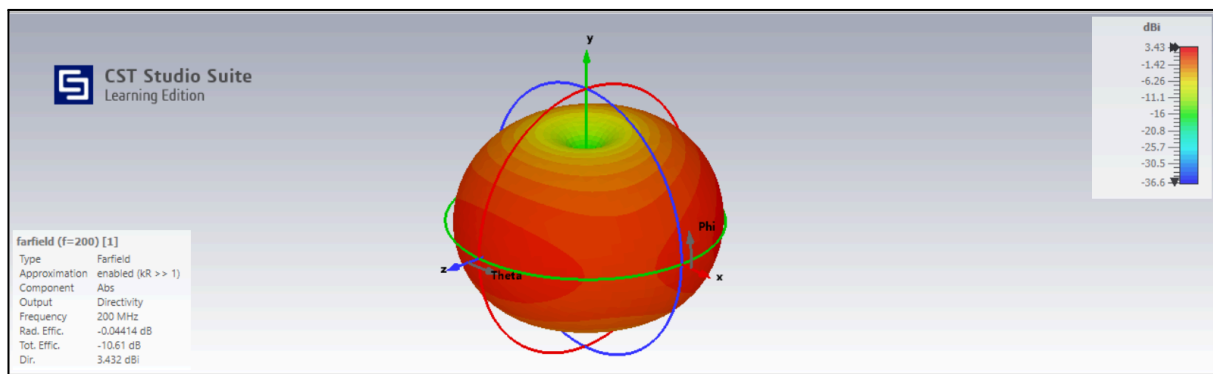
الشكل (8) نمط الإشعاع والاتجاهية عند تردد المركز 250 ميغا هيرتز

farfield (f=250) [1]	
Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs
Output	Directivity
Frequency	250 MHz
Rad. Effic.	4.722e-06 dB
Tot. Effic.	-0.06598 dB
Dir.	9.333 dBi

التعليق:

"تُظهر نتائج المجال البعيد (Farfield) عند التردد 250 MHz أداءً مثاليًا للهوائي، حيث بلغت التوجيهية 9.333 dBi، مما يعكس قدرة عالية على تركيز الإشارة في الاتجاه المطلوب. كما تشير الكفاءة الكلية التي بلغت -0.066 dB إلى وجود مطابقة ممانعة (Impedance Matching) ممتازة، حيث يتم إشعاع معظم الطاقة المغذية للهوائي دون فقد يذكر، مما يؤكد دقة الأبعاد المختارة للعناصر والمسافات الفاصلة بينها."

للتأكد من سلوك الهوائي عبر كامل النطاق الترددي، تم استخراج نمط الإشعاع عند الترددات الطرفية (200 MHz و 300 MHz). كما هو متوقع لهوائيات ياغي-أودا ضيقة النطاق، يلاحظ تراجع في قيمة الكسب وتشوه نسبي في نمط الإشعاع مقارنة بالتردد الرنيني (250 MHz)، وهو ما يتطابق تماماً مع النتائج المستخلصة مسبقاً من منحنى نسبة الموجة الواقفة (VSWR) وتوافق الممانعة.

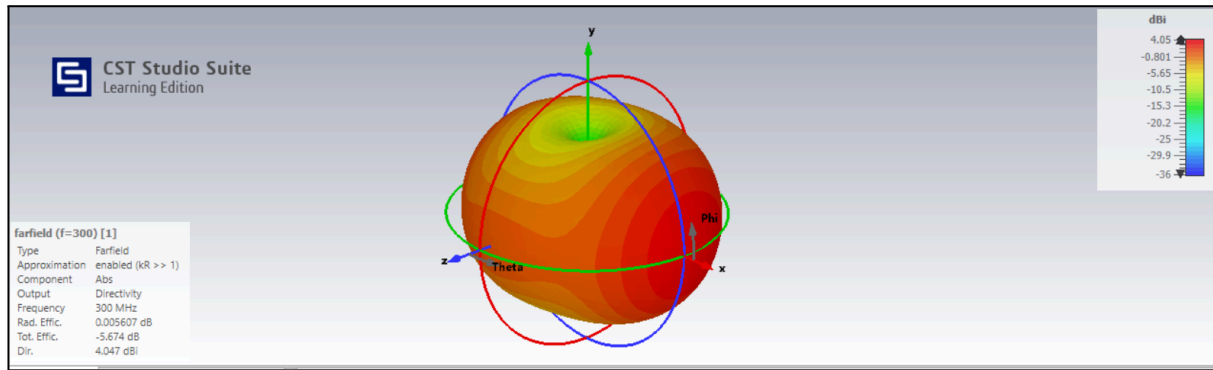


الشكل (9) نمط الإشعاع والاتجاهية عند تردد المركز 200 ميغا هيرتز

farfield (f=200) [1]	
Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs
Output	Directivity
Frequency	200 MHz
Rad. Effic.	-0.04414 dB
Tot. Effic.	-10.61 dB
Dir.	3.432 dBi

التعليق:

تظهر النتائج أن الهوائي يتمتع بكفاءة إشعاع (Radiation Efficiency) استثنائية بلغت -0.044 dB، مما يشير إلى أن الفقد الحراري في مواد الهوائي شبه منعدم. ومع ذلك، تعاني الكفاءة الكلية (Total Efficiency) من انخفاض ملحوظ لتصل إلى -10.61 dB، وهذا يعكس وجود خلل كبير في الموائمة (Impedance Matching) بين الهوائي وخط التغذية، مما أدى لضياع جزء كبير من القدرة نتيجة الانعكاس وليس الامتصاص. أما من حيث التوجيه، فقد حقق الهوائي اتجاهاً (Directivity) بمقدار 3.432 dBi، وهي قيمة جيدة تعكس نمط إشعاعي نصف توجيهي مستقر عند هذا التردد.



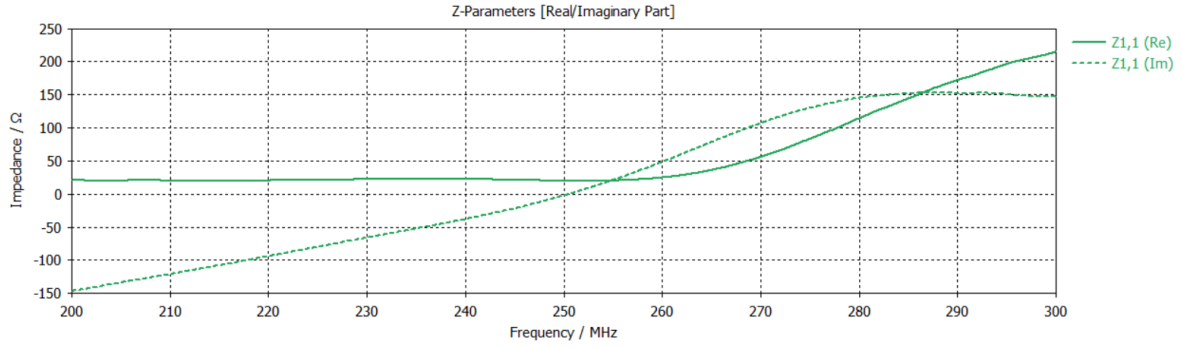
الشكل (10) نمط الإشعاع والاتجاهية عند تردد المركز 300 ميجا هيرتز

farfield (f=300) [1]	
Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs
Output	Directivity
Frequency	300 MHz
Rad. Effic.	0.005607 dB
Tot. Effic.	-5.674 dB
Dir.	4.047 dBi

التعليق:

"عند التردد 300 MHz، أظهر الهوائي أداءً محسناً بشكل واضح في الكفاءة الكلية، حيث انخفض الفقد الناتج عن عدم الموائمة بمقدار الضعف تقريباً مقارنة بالترددات الأدنى. حافظ الهوائي على كفاءة إشعاع ممتازة تقترب من المثالية، مع زيادة طفيفة في الاتجاهية لتصل إلى 4.047 dBi، مما يشير إلى أن هذا التردد أقرب لنقطة الرنين (Resonance) الخاصة بالتصميم، وإن كان لا يزال يحتاج إلى تحسين بسيط في الموائمة (Matching) للوصول لكفاءة كلية أفضل."

الشكل أدناه يوضح ممانعة الدخل (Z-Parameters) للهوائي. يوضح الشكل ممانعة الدخول للهوائي بجزأيه الحقيقي (الخط المتصل) والتخيلي (الخط المنقطع). يُلاحظ تحقيق حالة الرنين المثالية عند التردد 250 ميغاهرتز، حيث يتقاطع الجزء التخيلي مع الصفر تماماً، بينما تستقر قيمة الجزء الحقيقي عند حوالي 25 أوم، وهو ما يتطابق مع ممانعة منفذ التغذية المستخدم، مما يؤكد نجاح توافق الممانعة (Impedance Matching) في التصميم.



الشكل (11) ممانعة الدخل

المراجع:

- **Balanis, C. A. (2016).** *Antenna Theory: Analysis and Design* (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- **Kraus, J. D., & Marhefka, R. J. (2002).** *Antennas for All Applications* (3rd ed.). New York, NY: McGraw-Hill.

.....