التوصية ITU-R BS.1698-1

(2023/05)

السلسلة BS: الخدمة الإذاعية (الصوتية)

تقييم المجالات الكهرمغنطيسية الناجمة عن أنظمة الإرسال الإذاعي للأرض من أجل تقدير أثر التعرّض البشري للإرسالات غير المؤيّنة

تمهيد

يضطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد لمدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها.

ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهرتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في القرار ITU-R 1. وترد الاستمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني https://www.itu.int/publ/R-REC/en)

السلسلة	العنوان
BO	البث الساتلي
BR	التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية
BS	**الخدمة الإذاعية (الصوتية)**
BT	الخدمة الإذاعية (التلفزيونية)
F	الخدمة الثابتة
M	الخدمة المتنقلة وخدمة التحديد الراديوي للموقع وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة
P	انتشار الموجات الراديوية
RA	علم الفلك الراديوي
RS	أنظمة الاستشعار عن بُعد
S	الخدمة الثابتة الساتلية
SA	التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية
SF	تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة
SM	إدارة الطيف
SNG	التجميع الساتلي للأخبار
TF	إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت
V	المفردات والمواضيع ذات الصلة

ملاحظة: *تمت الموافقة على النسخة الإنكليزية لهذه التوصية الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية بموجب الإجراء الموضح في القرار ITU-R 1.*

النشر الإلكتروني
جنيف، 2024

© ITU 2024
جميع حقوق النشر محفوظة. لا يمكن استنساخ أي جزء من هذه المنشورة بأي شكل كان ولا بأي وسيلة إلا بإذن خطي من الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU).

التوصية ITU-R BS.1698-1

تقييم المجالات الكهرمغنطيسية الناجمة عن أنظمة الإرسال الإذاعي للأرض من أجل تقدير أثر التعرّض البشري للإرسالات غير المؤيّنة[1]

(2023-2005)

مجال التطبيق

الغرض من هذه التوصية وضع أساس لحساب وتقدير قيم المجالات الكهرمغنطيسية (EMF) الناجمة عن محطة إذاعة، على مسافات معيَّنة من موقع الإرسال. وهذه المعلومات تستخدمها المنظمات المسؤولة لوضع أساليب تقييم ملائمة لمستويات تُستعمَل لحماية الناس من التعرض للمجالات الكهرمغنطيسية. أما المستويات الفعلية اللازم تطبيقها بموجب أي تنظيم فتظل بالطبع مرهونة بالقرارات التي تتوصل إليها الهيئات الصحية المعنية، الوطنية منها والعالمية.

كلمات أساسية

حدود التعرض، المجالات الكهرمغنطيسية للترددات الراديوية (RF-EMF)، تقدير التعرض، تقييم التعرض، أنظمة الإرسال الإذاعي للأرض

المختصرات/مسرد المصطلحات

EMF المجالات الكهرمغنطيسية (*Electromagnetic Fields*)

ERP القدرة المشعة الفعالة بالنسبة إلى ثنائي أقطاب نصف موجي (*Effective Radiated Power, relative to a half wave dipole*)

HF الموجات الديكامترية (تُعرف أيضاً بالموجة القصيرة) (*High Frequency (also known as Short Wave)*)

HR، HRS هوائيات ستارية بالموجات الديكامترية؛ الارتفاع (H)، الصفوف (R)، قابلية التدوير (S) (*HF curtain antennas; Height (H), Rows (R), Slewable (S)*)

ICNIRP اللجنة الدولية المعنية بالحماية من الإشعاع المؤيّن، منظمة غير حكومية تعترف بها رسمياً منظمة الصحة الدولية (*International Commission on Non-Ionizing adiation Protection, a non-governmental organization formally recognised by WHO*)

LF الموجات الكيلومترية (تُعرف أيضاً بالموجة الطويلة) (*Low Frequency (also known as Long Wave)*)

MF الموجات الهكتومترية (تُعرف أيضاً بالموجة المتوسطة) (*Medium Frequency (also known as Medium Wave)*)

MOM طريقة العزوم (*Method of Moments*)

RF الترددات الراديوية (*Radio Frequency*)

RMS جَذْر متوسط التربيع (*Root Mean Square*)

SAR معدَّل الامتصاص النوعي (*Specific Absorption Rate*)

Z_0 المعاوقة المميزة في الفضاء الطلق (*Characteristic Impedance of Free Space*)

[1] طبقاً للرقمين **137.1 و138.1** من لوائح الراديو، يمثل المصطلح "البث" الإشعاع الذي تنتجه محطة إرسال راديوية.

توصيات الاتحاد الدولي للاتصالات وتقاريره وكتيباته ذات الصلة

توصيات قطاع الاتصالات الراديوية – السلسلة BS الخدمة الإذاعية (الصوتية):

BS.705: خصائص ومخططات هوائيات الإرسال والاستقبال على الموجات الديكامترية (HF)

BS.1195: خصائص هوائيات الإرسال على الموجات المترية (VHF) والموجات الديسيمترية (UHF)

BS.1386: خصائص ومخططات هوائيات الإرسال والاستقبال على الموجات الكيلومترية (LF) والموجات الهكتومترية (MF)

تقارير قطاع الاتصالات الراديوية – السلسلة SM: إدارة الطيف

التقرير ITU-R SM.2452: قياسات لتقدير التعرض البشري للمجالات الكهرمغنطيسية

كتيب قطاع الاتصالات الراديوية – لجنة الدراسات 1: إدارة الطيف:

كتيب مراقبة الطيف (القسم 6.5 "قياسات الإشعاع غير المتأين")

توصيات قطاع تقييس الاتصالات – السلسلة K: الحماية من التداخل:

K.52: إرشادات بشأن التقيّد بالقيم الحدية لتعرض الإنسان للمجالات الكهرمغنطيسية

K.61: إرشادات للقياس والتنبؤ الرقمي بالمجالات الكهرمغنطيسية لغرض تقيد منشآت الاتصالات بالقيم الحدية لتعرض الإنسان للمجالات الكهرمغنطيسية

K.70: تقنيات التخفيف للحد من تعرض الإنسان للمجالات الكهرمغنطيسية بالقرب من محطات الاتصالات الراديوية

K.83: مراقبة مستويات المجال الكهرمغنطيسي

K.91: إرشادات لتقدير وتقييم ومراقبة التعرض البشري للمجالات الكهرمغنطيسية للترددات الراديوية

K.100: قياس المجالات الكهرمغنطيسية للترددات الراديوية لتحديد التزامها بحدود التعرض البشري لهذه المجالات عندما توضع محطة قاعدة في الخدمة

K.113: إعداد خرائط لمستويات المجالات الكهرمغنطيسية في الترددات الراديوية

K.121: إرشادات بشأن الإدارة البيئية للالتزام بحدود المجالات الكهرمغنطيسية (EMF) للترددات الراديوية في محطات قاعدة الاتصالات الراديوية

K.122: مستويات التعرض في المحيط القريب من هوائيات الاتصالات الراديوية

K.145: تقييم وإدارة الالتزام بحدود التعرض للمجالات الكهرمغنطيسية للترددات الراديوية للعاملين في مواقع ومرافق الاتصالات الراديوية

المسألة 7/2 لدى قطاع تنمية الاتصالات – الاستراتيجيات والسياسات المتعلقة بالتعرض البشري للمجالات الكهرمغنطيسية:

تقرير مخرجات المسألة 7/2 لدى قطاع تنمية الاتصالات، أكتوبر 2021.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن طاقة الترددات الراديوية عالية المستوى يمكن أن تؤثر في جسم الإنسان تأثيراً خطيراً؛

ب) أن طاقة الترددات الراديوية يمكن أن تستحث في المواد الموصلة كمونات كهربائية مؤذية؛

ج) أن طاقة الترددات الراديوية عالية المستوى يمكن أن تنتج آثاراً صحية غير مباشرة عند التداخل على الأجهزة الطبية؛

د) أن طاقة الترددات الراديوية يمكن أن تسبب عرضاً احتراق مواد قابلة للاشتعال أو الانفجار؛

هـ) أن تحديد مستويات التعرض والكمونات الكهربائية الخطرة، من حيث محتوى الطيف، والشدة، والآثار التراكمية، وما إلى ذلك، تقوم به حالياً السلطات المختصة؛

و) أن السلطات المختصة تعمل حالياً على تحديد المناطق التي تتجاوز فيها قيم مجالات الترددات الراديوية والكمونات الكهربائية مستويات السلامة؛

ز) أن أشخاصاً لا علاقة لهم بهذه الأنظمة قد يتعرضون دون قصد للمجالات الكهرمغنطيسية والكمونات الكهربائية؛

ح) أن العمال الذين يشغلون أنظمة الإذاعة للأرض قد يطلب منهم أن يعملوا على مقربة من مصدر إرسالات الترددات الراديوية هذه،

توصي بما يلي

أن يُستعمَل الملحق 1 لهذه التوصية لتقييم المجالات الكهرمغنطيسية التي تولّدها أنظمة الإرسال الإذاعي للأرض من أجل تقدير أثر التعرض البشري للإرسالات غير المؤيّنة.

الملحق 1

تقييم المجالات الكهرمغنطيسية الناجمة عن أنظمة الإرسال الإذاعي للأرض من أجل تقدير أثر التعرّض البشري للإرسالات غير المؤيّنة

جدول المحتويات

الصفحة

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR) ii

الملحق 1 – تقييم المجالات الكهرمغنطيسية الناجمة عن أنظمة الإرسال الإذاعي للأرض من أجل تقدير أثر التعرض البشري للإرسالات غير المؤيّنة 3

1 مقدمة 5

2 خصائص المجالات الكهرمغنطيسية 6

1.2 خصائص المجال الكهرمغنطيسي العامة 6

2.2 مستويات التعرض لشدة المجال قربَ الهوائيات الإذاعية 10

3.2 المجال المختلطة فيه الترددات 13

4.2 المجالات الكهرمغنطيسية (EMF) داخل المباني 13

الصفحة

3 الحسابات 13
1.3 الإجراءات 14
2.3 حلول الحلقة المغلقة 14
4 القياسات 15
1.4 الإجراءات 15
2.4 الأجهزة 16
3.4 مقارنة بين التوقعات والقياسات 18
5 التدابير الاحترازية الواجبة في محطات الإرسال وفي جوارها 18
1.5 التدابير الاحترازية للتخفيف من الآثار المباشرة لبث الترددات الراديوية عالي المستوى على الصحة 18
2.5 التدابير الاحترازية للتخفيف من الآثار غير المباشرة للتعرض للترددات الراديوية 20
المرفق 1 بالملحق 1 – أمثلة على شدد مجال قريب من هوائيات الإرسال، قيمها محصَّلة بالحساب 21
1 المثال A – منحنيات شدة المجال الكهربائي والمجال المغنطيسي 21
2 المثال B – تحديد شدة المجال المغنطيسي في منطقة المجال القريب لهوائيات عالية القدرة تبث بالموجات الهكتومترية/الكيلومترية (MF/LF) 27
3 المثال C – المجال الكهرمغنطيسي في منطقة المجال القريب لهوائيات ستارية تبث بالموجات الديكامترية (HF) 28
1.3 مقدمة 28
2.3 المجالان القريبان الكهربائي والمغنطيسي للهوائيات الستارية 28
4 الخلاصة 30
المرفق 2 بالملحق 1 – مقارنة بين نتائج التوقعات ونتائج القياسات 31
1 تمهيد 31
1.1 نموذج نظام الهوائيات المستعمل 31
2.1 محاسن ومساوئ نموذج نظام الهوائيات 32
2 مقارنة بين التوقعات والقياسات 34
1.2 التحليل العددي للهياكل السلكية: مثال 34
2.2 18 MHz 42
3.2 مقارنة بين نتائج القياسات ونتائج التوقعات لشدة المجال في المنطقة القريبة 49
3 استنتاجات 50
المرفق 3 بالملحق 1 – الحدود والمستويات الدولية 51
المرفق 4 بالملحق 1 – مزيد من التفاصيل بشأن التشكيل 52
1 خصائص البث الراديوي 52
2 التعبير عن قدرة المرسل وشدة المجال بنمط التشكيل 53

الصفحة

المرفق 5 بالملحق 1 – طرائق تقييم أخرى 55
1 الإجراءات العددية..... 55
1.1 طريقة العزوم (MOM) 56
2.1 طريقة المحوَّلة السريعة محوَّلة Fourier/طريقة التدرج الاقتراني (FFT/CG) 57
3.1 طريقة الفروق المنتهية في المجال الزمني (FDTD)..... 57
4.1 طريقة متعددات الأقطاب العديدة (MMP)..... 57
5.1 طريقة المعاوَقات 57
2 حسابات شدة المجال..... 57
1.2 التحليل العددي للهياكل السلكية: مثال 57
3 قياس الجرعات 60
1.3 حسابات معدل الامتصاص النوعي 60
2.3 قياس المعدل SAR..... 61
4 قياس المعدل SAR بواسطة تيارات الجسم 62
1.4 تيارات الجسم المستحثة..... 62
2.4 قياس تيار التماس..... 63
3.4 قياس توتر التماس 64
المرفق 6 بالملحق 1 – الأجهزة الإلكترونية الطبية المغروسة والمحمولة..... 64
1 الأجهزة الإلكترونية الطبية 64
2 الأجهزة المغروسة والأجهزة المحمولة..... 64
المرفق 7 بالملحق 1 – مراجع إضافية 65

1 مقدمة

ما زال موضوع آثار التعرض يُدرَس منذ سنين، وبُذِلت محاولات في سبيل تكمية حدود معيَّنة يمكن استعمالها لحماية البشر من الآثار غير المرغوبة لهذه الإشعاعات. وأسفرت دراسات أجرتها منظمات مختلفة في بلدان عديدة عن وضع تنظيمات إدارية متنوعة. ومن الجدير بالملاحظة والسائغ فهمه أن كل تلك الجهود لم تأتِ بمعيار واحد في هذا المجال.

وتشير منظمة الصحة العالمية (WHO) [6] إلى أن العديد من البلدان تلتزم حالياً بالمبادئ التوجيهية التي أوصت بها:

– اللجنة الدولية للحماية من الإشعاعات غير المؤينة (ICNIRP)؛

– معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات من خلال اللجنة الدولية للسلامة الكهرمغنطيسية (IEEE ICES).

فالغرض من هذه التوصية هو وضع أساس لحساب وتقدير قيم التعرض للمجالات الكهرمغنطيسية الناجمة عن محطة إذاعة، على مسافات معيَّنة من موقع الإرسال. وهذه المعلومات تستخدمها المنظمات المسؤولة لوضع تقنيات قياس ملائمة تُستعمَل لضمان أن

مستويات المجالات الكهرمغنطيسية تحمي الناس من التعرض غير المرغوب فيه للإرسالات المؤذية. أما القيم الفعلية اللازم تطبيقها بحسب أي تنظيم فتظل بالطبع مرهونة بالقرارات التي تتوصل إليها الهيئات الصحية المعنية، الوطنية منها والعالمية.

يسترعى الانتباه إلى أن توصية قطاع الاتصالات الراديوية (ITU-R) هذه وتوصيات قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) تغطي مواد متشابهة، ولكن كلاً منها تركز على جوانب مختلفة من الموضوع العام نفسه. فعلى سبيل المثال، إن التوصيتين ITU-T K.52، توجيهات بشأن القيم الحدية لسلامة تعرض الأشخاص للمجالات الكهرمغنطيسية، وITU-T K.61، توجيهات بشأن قياس وتوقع المجالات الكهرمغنطيسية رقمياً من أجل التقيّد بالقيم الحدية لسلامة تعرض الأشخاص لإشعاعات منشآت الاتصالات، توفران توجيهات بشأن التقيد بحدود السلامة في التعرض لإشعاعات منظومات الاتصالات. انظر قسم "توصيات الاتحاد وتقاريره وكتيباته ذات الصلة" للاطلاع على المواد الإضافية الأكثر صلة.

2 خصائص المجالات الكهرمغنطيسية

1.2 خصائص المجال الكهرمغنطيسي العامة

يعطي هذا القسم لمحة شاملة عن خصائص معيَّنة من خصائص المجال الكهرمغنطيسي (EMF) لها صلة بهذه التوصية، ولا سيما التمييز بين المجال القريب والمجال البعيد. ويعرض هذا القسم معادلات بسيطة مشتقة من أجل حساب كثافة القدرة وشدة المجال في منطقة المجال البعيدة، ويأتي في ختام القسم تعريف مخططَيْ الاستقطاب والتداخل.

1.1.2 مكوِّنات المجال

يتألف المجال الكهرمغنطيسي الناجم عن إشعاع هوائي ما، من مكوِّنات مجال كهربائي ومغنطيسي متنوعة تتوهَّن تبعاً للمسافة r عن المصدر. والمكونات الرئيسية هي:

- المجال البعيد (Fraunhofer)، ويُسمّى أيضاً مجال الإشعاع، يتناقص فيه اتساع المجالات في ظروف الفضاء الطلق بمعدل $1/r$؛
- المجال القريب للإشعاع (Fresnel)، ويسمى أيضاً المجال الحثّي. بنية هذا المجال مرهونة إلى حد كبير بشكل الهوائي وقدّه ونمطه، على الرغم من أن معايير متنوعة وضعت وشاع استعمالها لتحديد سلوك هذا المجال؛
- المجال القريب المتفاعل (Rayleigh)، ويسمى أيضاً المجال شبه السكوني، يتناقص بمعدل $1/r^3$.

بما أن المجال الحثي والمجال شبه السكوني يتوهّنان سريعاً مع تباعد المسافة عن مصدر البث، فأهميتهما محصورة في قربهما من هوائي الإرسال – فيما يسمّى بمنطقة المجال القريب.

أما مجال الإشعاع فهو العنصر الغالب فيما يسمّى بمنطقة المجال البعيد. فمجال الإشعاع هو الذي يحمل بالفعل الإشارات الراديوية أو التلفزيونية من المرسِل إلى مستقبِل بعيد.

2.1.2 المجال البعيد

في منطقة المجال البعيد، يتسم المجال الكهرمغنطيسي بغلبة الموجة المستوية. وهذا يعني أن المجال الكهربائي والمجال المغنطيسي مطاوَران، وأن النسبة بين اتساعَيْهما ثابتة. وبالإضافة إلى ذلك، يشكل المجال الكهربائي والمجال المغنطيسي زاوية قائمة، ويقعان في مستوٍ عمودي على اتجاه الانتشار.

وكثيراً ما يُفترض أن شروط المجال البعيد تنطبق على مسافات أكبر من $2D^2/\lambda$، حيث D بين أبعاد الهوائي هو البعد الخطي الأقصى وλ هو طول الموجة.

ولكن يجب توخّي الاحتراس عند تطبيق هذا الشرط على هوائيات إذاعية، لسببين هما:

- أن هذا الشرط مستَخرَج من اعتبارات تتعلق بالهوائيات المستوية؛

– من المفترض أن D كبير قياساً إلى λ.

فحيثما انعدم الوفاء بالشروط المذكورة أعلاه، لزم استعمال مسافة أكبر من 10 λ بخصوص المجال البعيد؛ انظر أيضاً الملحق A بالمرجع IEC 62232 [5].

1.2.1.2 كثافة القدرة

يُحصَّل متَّجِه كثافة القدرة لمجال كهرمغنطيسي، متجه Poynting، ***S***، من ضرب متَّجِهَيْ المكوِّن الكهربائي، ***E***، والمكوِّن المغنطيسي، ***H***، للمجال الكهرمغنطيسي المقصود، أي:

$$S = E \times H \quad (1)$$

حين تتهيأ في المجال البعيد ظروف مُثلى، حيث لا تأثير ذا شأن من جهة الأرض أو الحواجز، يمكن تبسيط هذه المعادلة، لأن المجالين الكهربائي والمغنطيسي واتجاه الانتشار تكون كلها متعامدة. وبالإضافة إلى ذلك تكون النسبة بين اتساعَيْ شدتَيْ المجال الكهربائي، E، والمجال المغنطيسي، H، قيمة ثابتة، Z_0، معروفة بأنها المعاوقة المميِّزة للفضاء الطلق[2]، وأنها تضاهي377 Ω (أو 120π Ω).

وهكذا ففي منطقة المجال البعيد، تحصل كثافة القدرة، S، في الفضاء الطلق، بحل المعادلة السُّلميَّة التالية:

$$S = E^2/Z_0 = H^2 Z_0 \quad (2)$$

ويمكن حساب كثافة القدرة في المجال البعيد – أياً كانت المسافة وفي أي اتجاه كان – بتطبيق المعادلة التالية:

$$S = P\,G_i/(4\pi\,r^2) \quad (3)$$

حيث:

S: كثافة القدرة (W/m^2) في اتجاه معيَّن

P: القدرة (W) المزوَّد بها مصدر بث، على افتراض منظومة بلا خسارة

G_i: كسب هوائي مصدر بث في الاتجاه المعيَّن، بالنسبة إلى مشعاعٍ متناحٍ

r: المسافة (m) عن مصدر بث.

وفي المعادلة (3) يسمّى حاصل الضرب PG_i بالقدرة e.i.r.p. (القدرة المشَعَّة المكافئة المتناحية) وهي تمثل القدرة التي يحتاج إلى بثها مشعاع متناحٍ وهمي لكي يُحدِث شدة المجال نفسها في نقطة الاستقبال.

ويجب لحساب كثافة القدرة في اتجاهات أخرى أن يؤخذ في الاعتبار مخطط الهوائي.

وإذا أُريدَ استعمال المعادلة (3) بصدد هوائي كسبه G_a مستمد نسبياً من هوائي مرجعي كسبه متناحٍ G_r، مثل ثنائي القطب نصف الموجي أو الأحادي القطب القصير، وجب عندئذ الاستعاضة عن كسب الهوائي G_i بحاصل الضرب G_a . G_r كما في المعادلة (4) التالية. والعامل G_r الملائم يعرضه الجدول 1:

$$S = P\,G_r\,G_a/(4\pi\,r^2) \quad (4)$$

---

[2] على وجه العموم، تُحصَّل المعاوقة المميِّزة لوسط ما بالمعادلة التالية: $z = \sqrt{(\mu/\varepsilon)}$ حيث μ هي الإنفاذية المغنطيسية في الفضاء الطلق (=1,2566.. × 10^{-6} F/m)، وε هي السماحية في الفضاء الطلق (= 8,85418 × 10^{-12} H/m).

الجدول 1

عوامل الكسب المتناحي لأنماط من الهوائي المرجعي مختلفة

نمط الهوائي المرجعي	عامل الكسب المتناحي، G_r	الكسب المتناحي (dBi)	تطبيقات نمطية متعلقة بنمط الهوائي المرجعي
مشعاع متناحٍ	1,0	0,0	إذاعة بالموجات الديكامترية
ثنائي القطب نصف موجي	1,64	2,15	إذاعة بالموجات المترية (VHF) والديسيمترية (UHF) أحياناً
أحادي القطب قصير	3,0	4,80	إذاعة بالموجات الكيلومترية (LF) والهكتومترية (MF)

وهكذا، حين يكون كسب الهوائي G_d ($G_a = G_d$) معبَّراً عنه قياساً إلى كسب هوائي ثنائي القطب نصف موجي، تنطبق المعادلة التالية:

$$S = 1.64\,PG_d/(4\pi\,r^2) \quad (5)$$

حيث:

G_d: كسب الهوائي بالنسبة إلى هوائي ثنائي القطب نصف موجي.

كذلك، حين يكون كسب الهوائي $G_m = G_a$ معبَّراً عنه بالنسبة إلى كسب هوائي أحادي القطب قصير، تنطبق المعادلة التالية:

$$S = 3.0\,PG_m/(4\pi\,r^2) \quad (6)$$

حيث:

G_m: كسب الهوائي بالنسبة إلى هوائي أحادي القطب قصير.

2.2.1.2 شدة المجال

تستند المعادلات من (2) إلى (10) إلى افتراض ظروف موجة مستوية (في المجال البعيد) في الفضاء الحر، فهي لا تنطبق على الحسابات المتعلقة بالمجال القريب.

إذا أُدرِجت المعادلة (2) في المعادلة (3) من أجل إزالة S، وأُدخل عامل C مراعاة لاتجاهية مصدر البث، حَصَلت المعادلة (7) التي تمكِّن من حساب شدة المجال الكهربائي (E) في المجال البعيد لمصدر البث:

$$E = \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}}\frac{\sqrt{PG_i}}{r}\;C \;=\; \frac{C}{r}\sqrt{30PG_i} \quad (7)$$

حيث:

E: شدة المجال الكهربائي (V/m)

Z_0= 120 π (حوالي 377) Ω، المعاوقة المميزة للفضاء الحر

P: القدرة (W) المزوَّد بها مصدر الإشعاع، على افتراض نظام بلا خسارة

C: عامل ($0 \le C \le 1$) يراعي اتجاهية الهوائي (في الاتجاه الرئيسي للإشعاع، $C = 1$).

وإذا كان كسب الهوائي معبراً عنه بالنسبة إلى هوائي ثنائي القطب نصف موجي أو هوائي أحادي القطب قصير، وليس إلى كسب مشعاعٍ متناحٍ، فعندئذ يجب استعمال العاملين G_d وG_m بترتيب التوالي بدلاً من العامل G_i، في المعادلتين (8) و(9):

$$E = \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}}\frac{\sqrt{1.64PG_d}}{r}C = \frac{C}{r}\sqrt{49.2PG_d} \quad (8)$$

$$E = \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}}\frac{\sqrt{3PG_m}}{r}C = \frac{C}{r}\sqrt{90PG_m} \quad (9)$$

وتُستعمَل المعادلة (10) من أجل حساب شدة المجال المغنطيسي في المجال البعيد لمصدر الإشعاع:

$$H = E/Z_0 \quad (10)$$

حيث:

E: شدة المجال الكهربائي (V/m)

H: شدة المجال المغنطيسي (A/m)

Z_0 = 377 Ω (120π)، المعاوقة المميزة للفضاء الحر.

3.1.2 المجال القريب

بنية المجال في منطقة المجال القريب أكثر تعقيداً من البنية الموصوفة أعلاه بخصوص المجال البعيد. والسبب في المجال القريب هو العلاقة العشوائية للطور والاتساع بين متَّجِه شدة المجال الكهربائي ومتَّجِه شدة المجال المغنطيسي، فضلاً عن أن شدة المجال تتغير كثيراً من نقطة إلى أخرى. ومن ثم يجب من أجل تحديد طبيعة المجال القريب أن يُحسب أو يقاس الطور والاتساع لكلا المجالين الكهربائي والمغنطيسي. لكن تحقيق ذلك عملياً قد يكون بالغ الصعوبة.

1.3.1.2 كثافة القدرة وشدة المجال

ليس من السهل تحديد متَّجِه Poynting في المجال القريب، بسبب العلاقة العشوائية بين الطور والاتساع المذكورة أعلاه. إذ يجب أن يقاس أو يُحسب على حدة، وفي كل نقطة، الاتساع والطور لكلا المجالين E وH والعلاقة بينهما، وهذه الحسابات تجعل المهمة بالغة التعقيد والاستهلاك للوقت.

فلا يمكن باستعمال صيغ تحليلية أن تقدر شدة المجال في المجال القريب إلا بصدد مرسلات بسيطة مُثلى كالهوائي الثنائي القطب البسيط. أما في حالة أنظمة هوائيات أكثر تعقيداً، فيلزم استعمال تقنيات رياضية أخرى من أجل تقدير مستويات شدة المجال في منطقة المجال القريب. وهذه التقنيات الأخرى تمكِّن من تقديرات دقيقة نسبياً لشدة المجال، وكثافة القدرة وغيرهما من خصائص المجال المفيدة، وذلك حتى في منطقة المجال القريب المعقَّد.

4.1.2 الاستقطاب

يُعرَّف الاستقطاب بأنه اتجاه متَّجِه المجال الكهربائي، بالنسبة إلى اتجاه انتشار جبهة الموجة.

ويُستعمل في الإذاعة أنماط استقطاب مختلفة، بينها نمطان رئيسيان هما العمودي والأفقي (بالنسبة إلى جبهة موجة تنتشر بموازاة الأرض)، ولكن تُستعمَل أيضاً أنماط استقطاب أخرى، مثل الاستقطاب المائل والاستقطاب الإهليلجي.

5.1.2 التشكيل

التشكيل سمة خصوصية جداً للبث من مرسل إذاعي. وقد تدعو الحاجة لأن يؤخذ التشكيل في الاعتبار أيضاً عند إجراء قياسات أو حسابات لمعرفة ما إذا كان حاصلاً تجاوز لحدود السلامة أم لا.

ولسنوات عديدة، ما برحت هيئات الإذاعة تستخدم تقنيات التحكم في مستوى الموجة الحاملة حسب التشكيل (MDCL) مثل ضغط وبسط تشكيل الاتساع (AMC) لتقليل تكاليف الإرسال. وحيثما تُستخدم مثل هذه التقنيات، ينبغي إجراء تقييمات للمجالات الكهرمغنطيسية بنفس الطريقة التي يجرى بها إرسال تشكيل الاتساع (AM) مع الموجة الحاملة عند الخرج الاسمي لتشكيل الاتساع.

وفي إرسال عادي بتشكيل الاتساع تتعلق ذروة خرج الترددات الراديوية بعمق التشكيل. وكثيراً ما ينجم عن التشكيل تغير في اتساع الإشارة وترددها. فلهذا السبب يلزم عادة استخراج متوسط زمني لتحديد القيم الواجب استعمالها في القياسات والحسابات. وهذا المطلب معترف به أيضاً في مختلف المعايير ذات الصلة.

وتصنِّف لوائح الراديو (RR) (المجلد 2، التذييل 1) عمليات البث من المرسِلات الراديوية تبعاً لعرض النطاق المطلوب، ولخصائص الإرسال الأساسية والاختيارية. انظر المرفق 4 للاطلاع على المزيد من التفاصيل عن كيفية التعامل مع أنماط التشكيل المختلفة.

6.1.2 مخططات التداخل

من شأن البنى الطبيعية والاصطناعية على السواء أن تكرر إشعاع مجال كهرمغنطيسي. والمجال المعاد إشعاعه يضاف اتجاهياً إلى المجال المباشر. فتسفر هذه الإضافة عن مخططات تداخل تتألف من قيم محددة الموضع قصوى ودنيا لشدة المجال. بل ويزداد تعقيد مخطط التداخل متى تعددت حالات إعادة إشعاع المجال.

ثم إن مخططات التداخل تابعة لتردد مصدر الإشعاع. فكلما علا التردد صغُر طول الموجة، فقرُبت مكانياً القيم القصوى والدنيا. ففي الترددات الديسيمترية المخصصة للتلفزيون (الترددات UHF)، لا يفصل مكانياً بين القيم القصوى والدنيا إلا بضع عشرات من السنتيمترات.

ويحدث تراكب عدة مخططات في حالة تعدد مصادر البث، أي في حالة إرسال عدة قنوات إذاعة وتلفزيون من موقع واحد.

2.2 مستويات التعرض لشدة المجال قربَ الهوائيات الإذاعية

يتناول هذا القسم مستويات شدة المجال التي توجد قرب الهوائيات الإذاعية النمطية التي تُرسِل بالموجات الكيلومترية/الهكتومترية (LF/MF) والديكامترية (HF) والمترية (VHF) والديسيمترية (UHF) والسنتيمترية (SHF) والمليمترية (EHF).

1.2.2 نطاقات الموجات الكيلومترية/الهكتومترية (LF/MF) (150-605 1 kHz)

في حالة الإرسال بالموجات الكيلومترية والهكتومترية تكون الترددات أخفض من ترددات رنين كامل الجسم. ففي حالات تأثير المجال الكهرمغنطيسي مباشرة، تكون المستويات الحدية (وتُعرَّف أيضاً بأنها "مستويات مشتقة") لقيم كلا المجالين الكهربائي، E، والمغنطيسي، H، عالية نسبياً. إلا أنه في كثير من الحالات لا توجد القيم العالية إلا قريباً جداً من هوائي الإرسال. وهذا يصدق خصوصاً على الطرف الأدنى لمدى الترددات الكيلومترية/الهكتومترية، وعلى المعايير/الخطوط التوجيهية التي حددت مستويات مشتقة عالية. أما في الطرف الأعلى للنطاق فقد تمتد مسافات التأثير حتى بضع مئات الأمتار. وينبغي الإدراك أن سبب هذه الزيادة في المسافة هو، جزئياً على الأقل، الانخفاض في المستويات المرجعية عند الطرف الأعلى لنطاق الموجات الهكتومترية. فيجب تجنب النفاذ إلى صاري/برج الإرسال أثناء الإرسال، نظراً لارتفاع شدة المجال وخطر الصدمة الكهربائية.

2.2.2 نطاقات الموجات الديكامترية (HF) (3-30 MHz)

يُستدل من القياسات التي أُجريت في مناطق واسعة حول محطات الإرسال العالية القدرة بالموجات الديكامترية أن المجال الكهرمغنطيسي يفوق المستويات المشتقة لشدة المجال الكهربائي، وعلى الخصوص قرب كبلات التغذية المكشوفة. وقد أصبحت كبلات التغذية مغلَّفة ومدفونة في كثير من محطات البث الإذاعي من أجل خفض شدة المجال، لكن هذا الإجراء لا يمكن تطبيقه حول هوائيات الإرسال نفسها. ولذا يجب أن تُجعَل أجزاء من الأرض المحيطة بهوائيات الإرسال "مناطق محظورة"، وأن تُخطط أعمال الصيانة بحيث تُجرى في غير مواعيد الإرسال. لكن هذا سيكون عسيراً بخصوص كثير من محطات البث الإذاعي بالموجات الديكامترية، حيث يمكن أن تتغير مخططات المجال كل 15 دقيقة، بسبب متطلبات البرمجة. وأمام هوائيات البث الإذاعي بالموجات الديكامترية (HF) تجنح شدة المجال إلى التزايد اطراداً مع ارتفاع الهوائي فوق سطح الأرض. وهذا التزايد يُفسَّر جزئياً بأن الحزمة الرئيسية لها زاوية ارتفاع عن سطح الأرض تتراوح من 10 درجات إلى 15 درجة، لكنه يعود بصورة رئيسية إلى الظروف الحدية السائدة على سطح الأرض. فأكثرية هوائيات البث الإذاعي بالموجات HF ذات الاستقطاب الأفقي، وفي هذه الحالة تكون شدة المجال الكهربائي على سطح الأرض مساوية لصفر إذا كانت إيصالية الأرض غير محدودة. لكن إيصالية الأرض محدودة بالواقع، ولذا يظل لشدة المجال مكوِّن أفقي صغير.

ومن المهم الإدراك أن المجال القريب لصفيف هوائيات إرسال بالموجات HF قد يمتد مسافة كبيرة. وليس قد الهوائيات هو السبب الوحيد لهذا الامتداد، بل يسببه أيضاً عدم تساوي سطح الأرض المحيطة إذ إن عدم التساوي هذا يسفر عن اتساع كبير جداً

في فتحة الهوائيات الفعالة. وهذا يسبب بدوره أن قيم شدة المجال المأخوذة بالقياس في مواضع قريبة من الهوائيات تنخفض أدنى من المستويات المشتقة، ثم ترتفع من جديد كلما ابتعدت المسافة عن الهوائيات. إلا أنه، منذ الدخول في منطقة المجال البعيد، تتبع مستويات شدة المجال المخطط العادي وهو الانخفاض كلما ابتعدت المسافة عن الهوائيات.

وفي جوار صفيف ستاري بالموجات الديكامترية مستقطب أفقياً، يجب ألا يفترض أن المجالات الكهرمغنطيسية ذات استقطاب واحد بالضرورة – بل يمكن أيضاً العثور على مكونات ذات استقطاب رأسي؛ أي أنه لا يمكن افتراض استقطاب أي من مخاطر الترددات الراديوية الناشئة في المجال القريب.

3.2.2 نطاقات الموجات المترية/الديسيمترية (VHF/UHF) (30 MHz-3 GHz)

في المحطات العالية القدرة للإذاعة بالموجات VHF/UHF، تكون الهوائيات عادة مرفوعة نحو 100 m فوق سطح الأرض، على سَوارٍ أو أبراج بدون أواصر. ولذا تكون شدة المجال على سطح الأرض منخفضة نسبياً، بفضل المسافة الفاصلة عن الهوائي، وبفضل ضيق عرض الحزمة المرسَلة في المستوي العمودي.

4.2.2 نطاقات الموجات السنتيمترية (SHF) (3-30 GHz) والموجات المليمترية (EHF) (30-300 GHz)

النطاقات الترددية 11,7-12,5 و40,5-41 و41-42,5 و74-76 GHz موزعة للخدمة الإذاعية. وفي هذه الترددات، يتطلب توهين الانتشار أن تكون مرسلات الإذاعة للأرض قريبة من المستقبلات.

وتتناول الأقسام الفرعية التالية الأنظمة المستعملة في الإذاعة.

1.4.2.2 تعاريف مناطق المجال

بخصوص الهوائيات المكافئيّة التي قطرها $D >> \lambda$، تستعمل التعاريف التالية، انظر أيضاً المرجع ETSI TR 102 457 [7]:

منطقة المجال القريب – في المجال القريب، أو منطقة Fresnel، للحزمة الرئيسية، تبلغ كثافة القدرة قيمة قصوى قبل أن تبدأ بالتناقص مع تزايد المسافة. وتكون القيمة القصوى لكثافة القدرة في المجال القريب وعلى محور الهوائي تابعة للقدرة المزوَّد بها الهوائي، ولقطر الهوائي، D، ولكفاءة الهوائي.

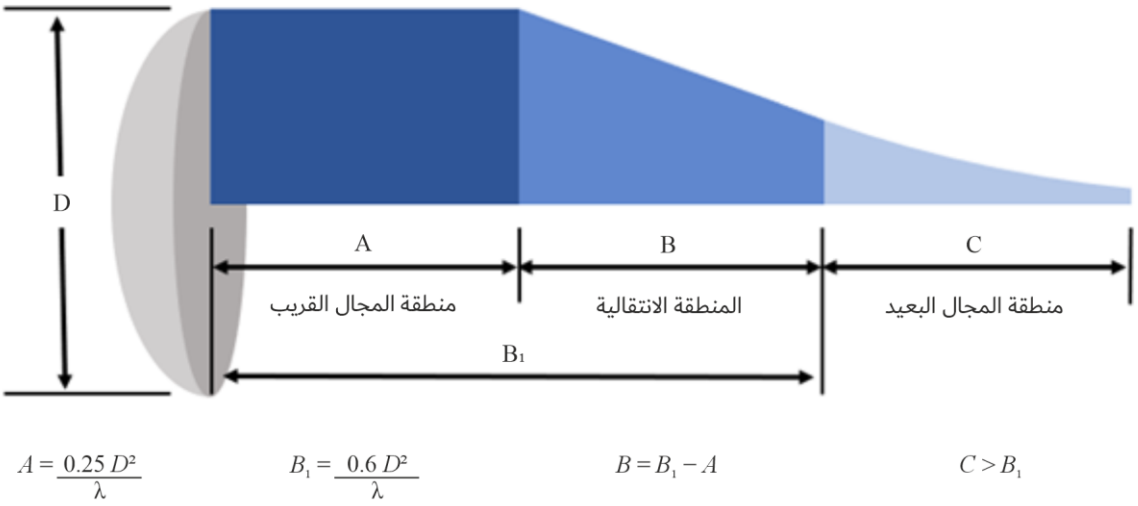
المنطقة الانتقالية – تتناقص كثافة القدرة في المنطقة الانتقالية بتناسب عكسي مع المسافة عن الهوائي.

منطقة المجال البعيد – في منطقة المجال البعيد في الفضاء الحر أو منطقة Fraunhofer، تتناقص كثافة القدرة بتناسب عكسي مع مربع المسافة.

ويوضِّح الشكل 1 مختلف مناطق الهوائي المكافئي (المستعمَلة أساساً للتقديرات من نقطة إلى نقطة). لكن النهج التالي لا يصلح إلا على امتداد المحور الرئيسي للهوائي.

الشكل 1

كثافة القدرة لهوائي مكافئيّ على محور الهوائي



BT.1698-01

يغطي إشعاع الهوائي المكافئيّ كامل امتداد منطقة المجال القريب بشكل اسطواني قطره D. وتظل القيمة القصوى لشدة المجال الكهرمغنطيسي هي وكثافة القدرة المصاحبة ثابتتين في منطقة المجال القريب بكاملها.

ويعبَّر عنها بالمعادلة التالية:

$$S\left(\mathrm{W/m^2}\right) = \frac{16\eta P}{\pi D^2} \tag{11}$$

حيث:

η: فعالية الهوائي المكافئيّ (تُستعمل قيمة 0,55)

P: قدرة المرسِل (W)

D: قطر الهوائي المكافئيّ (m).

والكثافة S، قيمتها قصوى في منطقة المجال القريب بأكملها.

انطلاقاً من نقطة 1 (بداية المنطقة الانتقالية)، تتناقص الكثافة، S، خطيا تبعاً للمسافة r حتى نقطة 2، بداية منطقة المجال البعيد.

وفي منطقة المجال البعيد في الفضاء الحر، تتناقص الكثافة، S، بتناسب عكسي مع مربع المسافة طبقاً للمعادلة التالية:

$$S\left(\mathrm{W/m^2}\right) = \frac{GP}{4\pi\, r^2} \tag{12}$$

حيث:

G: كسب الهوائي المكافئيّ بالنسبة إلى مصدر إشعاع متناحٍ

r: المسافة عن الهوائي المكافئيّ (m).

وتكون قيمة الكثافة S قصوى على محور الهوائي المكافئيّ.

3.2 المجال المختلطة فيه الترددات

كثيراً ما يوجد في الموقع الواحد عدد من المرسِلات (ذات ترددات إرسال مختلفة). فمن الضروري في هذه الحالة أن يؤخذ في الاعتبار التأثير الكلي (المركب) لجميع هذه المرسلات على الشخص الذي يتعرض لطاقة الترددات الراديوية. بيد أن الآثار تابعة للترددات، ومن ثم ينبغي أن تُحسَب أولاً المعلمات ذات الصلة (S وE وH) ثم يؤخذ التأثير المركب في الاعتبار.

وبخصوص الآثار الحرارية، تعطى حدود التعرض بدون خطر بعبارات معدل الامتصاص النوعي (SAR) (انظر المرفق 3)، وهذا يعني أنه يجدر تحديد ما يلائم من كثافات القدرة. ففي حالة موقع مرسل متعدد الترددات، يُوصي بأن تكون الكثافة الكلية للقدرة حاصل جمع كثافات القدرة لكل تردد إرسال، طبقاً للمعادلة التالية:

$$S_t = \sum_{i=1}^{n} S_i \tag{13}$$

حيث S_i هي كثافة القدرة للتردد (f_i ($i = 1, 2, \ldots n$)، بشرط تحقق اللاتعادلية التالية:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{S_i}{L_i} \leq 1 \tag{14}$$

حيث L_i هي المستوى المرجعي لكثافة القدرة، بخصوص التردد (f_i ($i = 1, 2, \ldots n$).

هذا هو المبدأ الأساسي، لكن تطبيقه يشتمل على فروق (انظر المرفق 3).

4.2 المجالات الكهرمغنطيسية (EMF) داخل المباني

إن لمواد إقامة المبنى وللبنية التحتية داخله تأثيراً قوياً جداً على المجال، إذ إنها تسبب تغير المجال من نقطة إلى نقطة، حتى داخل الغرفة الواحدة. فالتغيّرات المكانية في المجال الكهرمغنطيسي تسببها الانعكاسات المتعددة للموجة الساقطة، ومن ثم فإن استقطاب المجال الناتج يمكن أن يختلف عن استقطاب الموجة الساقطة.

وتسبب الأشياء المعدنية والتمديدات (الأسلاك والأنابيب) إعادة إشعاع (فتؤثر كمصدر ثانوي)، وتغير شدة المجال في جوارها.

فكل هذه الظروف تجعل تقدير حدود التعرض مسألة صعبة. ولذا ينبغي أن يؤخذ في الاعتبار عدد كبير من المعلمات، عند إجراء حسابات أو قياسات.

ولا بد من اختيار النموذج الملائم لتمثيل البيئة، لتحقيق حساب حدود التعرض بدقة مقبولة.

وأما الدقة في القياس فإنها مرهونة بحجم ونمط المسبار، وكذلك بموضع القائس بالنسبة إلى مصدر الإشعاع وإلى المسبار. انظر التقرير ITU-R SM.2452 – قياسات لتقدير التعرض البشري للمجالات الكهرمغنطيسية، والتوصية ITU-R P.1238 والتوصية ITU-R P.2109 والتوصية ITU-T K.61.

فلبُّ المسألة لا ينحصر في معرفة قيمة حدود التعرض، بل يتعداها إلى معرفة الطريقة السديدة لإجراء الحسابات والقياسات، وهذا هو الهدف الرئيسي لهذه التوصية.

3 الحسابات

لا تُستعمَل الإجراءات التحليلية إلا لحساب الخواص الكهرمغنطيسية للمجال في بعض الحالات والأشكال الهندسية الخاصة. أما حل المسائل العامة فيستلزم تطبيق تقنيات عددية. ويمكن استخدام البرامج التجارية وفقاً للحالة. ولا تنطبق البصريات الفيزيائية والهندسية في المجال القريب؛ ويمكن الاطلاع على معلومات ومبادئ توجيهية إضافية بشأن أساليب حساب التعرض للمجالات الكهرمغنطيسية في المرجع IEC 62232 [5].

1.3 الإجراءات

تمكِّن طرائق الحساب التحليلية والرقمية من توقع المجال الخارجي أو الداخلي الناجم عن مرسل كهرمغنطيسي. والحسابات مفيدة في تقدير مستوى شدة المجال في ظروف تعرض معيّنة، بغية تحديد ما إذا كانت القياسات لازمة، وأي تجهيز يجب استعماله لإجراء القياس. ومن مزايا الحسابات أيضاً أنها تكمل القياسات، وتُستعمَل للتحقق من أن النتائج المحصَّلة بالقياسات معقولة.

ومن شأن الحسابات أن تحل محل القياسات في بعض الحالات، مثل ظروف تعرض معقدة في المجال القريب، لا يتيسر معها تجهيز باهظ التكلفة لقياس معدل الامتصاص النوعي (SAR).

وتكون جودة الحسابات ودقتها مرهونة بالطريقة التحليلية أو الرقمية المستعملة، وبدقة وصف المصدر الكهرمغنطيسي (أو المصادر)، والأشياء المادية المحتمل تأثيرها على شدة المجالين، الموجودة بين المرسل والنقطة المقصودة بالتوقع. وبخصوص حسابات المعدل SAR تتأثر جودة النتائج بدقة النموذج البدني.

ولا بد من معرفة أو تقدير معلمات المصدر أولاً، لكي يمكن إجراء الحسابات.

ومن أمثلة معلمات مصدر الإذاعة: التردد، القدرة، ذروة القدرة، ومخطط إشعاع الهوائي وكسبه ومطاله فوق الأرض.

2.3 حلول الحلقة المغلقة

في منطقة المجال البعيد لمصدر إرسال، حيث يغلب اتسام المجالين الكهربائي والمغنطيسي باستواء الموجة، يمكن استعمال عبارات رياضية تحليلية لتقدير شدة المجال. ففي الاتجاه الرئيسي للهوائي، يمكن استعمال معادلة Friis الخاصة بالفضاء الطلق، من أجل حساب كثافة القدرة:

$$S = \frac{PG}{4\pi\, d^2} \tag{15}$$

حيث:

S: كثافة القدرة (W/m^2)

P: متوسط قدرة الخرج (W)

G: كسب الهوائي في المجال البعيد بالنسبة إلى مشعاع متناحٍ

d: المسافة عن المشعاع (m).

والعلاقة بين كثافة القدرة وشدة كل من المجالين الكهربائي والمغنطيسي تعطيها المعادلة التالية:

$$S = \frac{E^2}{Z_0} = H^2 Z_0 \tag{16}$$

حيث:

E: شدة المجال الكهربائي الفعالة (RMS) (V/m)

H: شدة المجال المغنطيسي الفعالة (RMS) (A/m)

Z_0: المعاوقة الملازمة للفضاء الحر، 120 π (377) Ω.

وعليه، يمكن حساب شدة كل من المجالين باستعمال الصيغتين المتقدمتين طبقاً للمعادلتين التاليتين:

$$E = \sqrt{\frac{P\ G\ Z_0}{4\pi\ d^2}} = \frac{5.5\sqrt{PG}}{d}$$

$$H = \sqrt{\frac{PG}{4\pi\ d^2 Z_0}} = \frac{\sqrt{PG}}{68.8d}$$

لكن هاتين المعادلتين لا تصلحان إلا في منطقة المجال البعيد لمصدر الإشعاع، يعني حين تصح الصيغة $d > 2D^2/\lambda$، حيث D هي أكبر بعد بين أبعاد البنية المشِعّة، وλ هي طول الموجة. ولا يُؤخذ في الحساب شيء من توهين أو تقوية شدة المجال بسبب الانعكاس،

والإرسال عبر المواد، والانعراج. ثم إن استعمال المعادلتين المذكورتين أعلاه في منطقة المجال القريب، أو في اتجاهات غير الاتجاه الرئيسي، يعطي بوجه عام قيماً مفرطة في الكبر، ما لم يُدخَل في الحساب عامل تصحيح بخصوص المجال القريب أو عامل مخطط الإشعاع.

4 القياسات

1.4 الإجراءات

إن أساليب القياس حرجة، ولا سيما في المجالات القريبة والمنخفضة التردد؛ انظر التقرير ITU-R SM.2452 – قياسات لتقدير التعرض البشري للمجالات الكهرمغنطيسية، والتوصية ITU-T K.61 والمرجعين EN 50496 [8] وEN 50 554 [9]. ففي نطاقات الترددات المنخفضة تكون طريقة القياس دقيقة جداً ومعقدة جداً، إذ إن مسافة نقطة القياس (عن مصدر البث) تكون عادة أقصر بكثير من طول الموجة. ولهذا السبب يقسم مدى الترددات 10 GHz 300-kHz إلى أربعة أقسام نطاقات بث رئيسية هي: نطاقات الترددات الكيلومترية/الهكتومترية (LF/MF)، ونطاقات الترددات الديكامترية (HF)، ونطاقات الترددات المترية/الديسيمترية (VHF/UHF)، ونطاقات الترددات السنتيمترية (SHF) والملليمترية (EHF) وباتباع المبادئ التوجيهية للجنة الدولية المعنية بالحماية من الإشعاع المؤيّن عام 2020 (ICNIRP 2020) للحد من التعرض للمجالات الكهرمغنطيسية (من 100 kHz إلى 300 GHz) [1]، يُستخدم مجالا E وH حتى 2 000 MHz حصراً؛ في حين أن كثافة القدرة الواردة لا تستعمل إلا فوق 30 MHz.

1.1.4 نطاقات الموجات الكيلومترية/الهكتومترية (LF/MF)

للتحقق من النتائج النظرية، تُجرى قياسات شدة المجال في المنطقة القريبة باستعمال أجهزة خاصة (مقاييس شدة المجال) مكوَّنة من ثلاثة ثنائيات قطب قصيرة منصوبة بصورة متعامدة. ويوصى بعدم استعمال أي جهاز يستلزم كبلاً لتزويده بالقدرة.

وتحاشياً لأي تأثير مخِلّ بالقياس من جهة الشخص الذي ينفِّذه، يُربَط جهاز القياس بعصا معزولة. والمسافة بين الجهاز والمنفِّذ يجب تحديدها مع مراعاة ما إذا كان يحدث أي تغير في سلم الجهاز بسبب أي حركة من المنفِّذ. ويتوقف مقدار هذه المسافة على تردد الإشارة المقصودة بالقياس.

ولا بد، عند إجراء قياس من هذا النوع، من مراعاة التأثيرات الممكنة من جهة جميع الأشياء التي في الجوار، ولا سيما التي من شأنها توليد آثار إعادة إشعاع.

وعندما يكون المقصود من القياس هو التحقق من نتائج حساب نظري، يجب اختيار نقاط القياس على امتداد اتجاه إشعاعي وعلى ارتفاع يتراوح بين 1 m و2 m.

وفي التوصية ITU-R BS.1386 شرحٌ أكثر تفصيلاً.

2.1.4 نطاقات الموجات الديكامترية (HF)

يرد شرح مفصل في التوصية ITU-R BS.705

3.1.4 نطاقات الموجات المترية/الديسيمترية (VHF/UHF)

يرد شرح مفصل في التوصية ITU-R BS.1195.

4.1.4 نطاقات الموجات السنتيمترية (SHF)/الملليمترية (EHF)

في هذه الحالة تُطبَّق الطريقة المعيارية للقياس، نظراً لطول الموجة والمسافات عن مصادر البث.

2.4 الأجهزة

1.2.4 مقدمة

يقتضي قياس شدة المجال، في مدى الترددات 10 GHz 300-kHz جهداً كبيراً لتحديد تغير المجال مكانياً وزمنياً.

ومن الضروري استعمال أجهزة تفي بالغرض، والتقيد بالتصرف الصحيح في تنفيذ القياس. فمن الأهمية بمكان معرفة خصائص أجهزة القياس، لأن هذه الخصائص تقرر اختيار الجهاز المناسب. والخصائص المرتبطة بالترددات، مثل التفاعلات الكبلية، والاستجابات غير المعايَرة خارج النطاق، والاستجابة الترددية المقَوْلبة، كلها بالغة الأهمية بخصوص الأجهزة العريضة النطاق. وبالمقابل، هناك خواص للمجال يجب مواءمتها لخصائص الأجهزة، مثل تفاعلية المجال أو إشعاعيته، أو الاستقطاب والتشكيل فيه، أو عدد مصادر الإشعاع الناجم عنها المجال.

تقاس عادة تعرضات الجسم البشري للمجالات الكهرمغنطيسية بوحدات كثافة القدرة، لكن قياسات أخرى مثل، التيار المستحَث في الجسم، يمكن أن تكون أنسب، وهذه جوانب هامة في مشكلات الحماية أو المراقبة التي يتعيّن على المهندس حلها. وفي كثير من الحالات، لا توجد نسبة رياضية بسيطة بين المجالين الكهربائي والمغنطيسي، ففي مثل هذه الحالات يجب قياس كل مجال بمفرده.

وأجهزة القياس اللازم استعمالها في هذه الحالة هي:

- أجهزة قياس قيمة شدة المجال E وقيمة شدة المجال H؛
- أجهزة قياس التيار.

1.1.2.4 أمور عامة

المكونات الأساسية هي:

- المسابير؛
- كبلات التوصيل التي تنقل الإشارة من المسبار إلى وحدة القراءة والحساب؛
- وحدة القراءة والحساب.

2.1.2.4 المسابير

يتميز المسبار المتناحي النظري بنمط إشعاع كروي. وأكثرية المسابير متناحية أو شاملة الاتجاه في ثلاثة أبعاد، معَدَّة لقياس الطاقة المشَعَّة من جميع الاتجاهات.

ويجب أن تتوافر في المسابير الخصائص التالية:

- الاستجابة للمجالات المقصودة، الكهربائي (E) أو المغنطيسي (H)، وعدم الاستجابة للمجالات غير المقصودة؛
- على العموم، يكون المسبار صغيراً بالنسبة إلى طول موجة المجال الكهربائي، أي أقل من $\lambda/10$ لأقصى تردد تشغيلي؛ لكن تقييمات معيَّنة أظهرت أن بعض المسابير يمكن أن تكون أبعادها أكبر بالنسبة إلى طول موجة المجال الكهربائي؛
- الاستجابة كما هو متوقَّع لتغيرات الظروف البيئية، مثل الحرارة والرطوبة.

وأثناء القياس، من المهم جداً أن توضع المسابير المتناحية في موضع يجعل التوصيل يقلل عند المسبار تشويش المجال بسبب كبلات التوصيل. وتشويش المجال هذا مشكلة أكثر شيوعاً في عمليات قياس شدة المجال الكهربائي الناجم عن ترددات الموجات المتوسطة أو ترددات أخفض.

3.1.2.4 الكبلات

يُشترط في الكبلات المستعملة لتوصيل المسبار بجهاز القراءة والحساب أن تكون عديمة الضوضاء، وتمنع اقتران المجال بوحدة القياس.

ومن المهم جداً الملاحظة أن من الممكن أن تشتغل الكبلات شغل هوائي، فتعدِّل المجال عند المسبار، بحيث تأتي قراءة القيمة مغلوطة. وهذه المشكلة يمكن حلها أحياناً، بتثبيت الكبلات أثناء الاختبار في وضع عمودي على المجال الكهربائي؛ ويمكن أن يؤدي استخدام فرِّيت الكبح على كبل القياس إلى التخفيف من هذه الآثار.

2.2.4 خصائص جهاز القياس لكل من المجالين الكهربائي والمغنطيسي

على العموم، يُجرى قياس التعرض للمجال الكهرمغنطيسي في مجال التردد. وهناك زمرتان رئيسيتان من الأجهزة.

1.2.2.4 أنماط ومواصفات الأجهزة العريضة النطاق

نستطيع بالأجهزة العريضة النطاق (انظر الشكل 2) قياس مجال بكامله، في مدى ترددي معيَّن (مثل عرض النطاق)، ولكنه يتعذّر تمييز إسهام مصدر تردد معيَّن، حين تشع عدة مصادر معاً.

الشكل 2

الأجهزة عريضة النطاق

BT.1698-02

تتكون الأجهزة العريضة النطاق من محاسيس، وهذه يمكن أن تكون غير متناحية فيقاس بها مكوِّن فضائي وحيد للمجال، ويمكن أن تكون متناحية فتقاس بها مكوِّنات المجال الثلاثة في الوقت نفسه. وتمكِّن هذه الأجهزة من قياس المستوى الكلي للمجال الكهربائي أو المغنطيسي الآني أو قيمة شدة المجال الفعالة (RMS) أو قيمة متوسط كثافة القدرة في فترة زمنية معيَّنة، وهي عادة 6 دقائق تبعاً لمعايير التعرض. وتنقسم الأجهزة العريضة النطاق إلى الأصناف التالية، تبعاً للكاشف المستعمَل:

- ثنائي المساري؛
- مقياس شعّي حراري (بولومتر)؛
- مزدوجة حرارية.

وهذه الأجهزة يمكن استعمالها في كلا الحيِّزين، المجال القريب والمجال البعيد.

3.2.4 أنماط ومواصفات الأجهزة الضيقة النطاق

الأجهزة الضيقة النطاق انتقائية تجاه الترددات، فتمكّن من قياس شدة المجال الكهرمغنطيسي في مدى معيّن من الترددات المختلفة. والمستقبلات ضيقة النطاق مفيدة بشكل خاص في حالة تعدد المصادر، نظراً لإمكانية تقييم مساهمة كل مصدر في المجال الكلي. فيستطاع بواسطة محساس لا متناحٍ أو هوائي لا متناحٍ تقدير اتجاه المجال واستقطابه. ويجب التنبّه عند نصب التجهيزات إلى أن المجالات تتغير بسرعة في الفضاء تبعاً لِقدِّ الهوائي، وعلى الخصوص في حضور أشياء عاكسة كالجدران والأرض والأبراج والبنى المعدنية. ومن المهم الملاحظة أن تغيير نقطة القياس يمكن أن يسفر عن تغير شدة المجال كلياً. ويتأثر القياس أيضاً بوضع الهوائي وكبلات التوصيل.

ومن الضروري، عند تنفيذ قياس في المجال الزمني لشدة مجال كهرمغنطيسي، أن تُستعمَل أجهزة ذات خواص تحليلية ملائمة (بخصوص الاستجابة من حيث التردد والاستبانة) من أجل الحصول على نتائج جيدة من تحليل الطيف بواسطة محوَّلة Fourier.

يتألف النظام من المكونات الأساسية التالية:

- هوائي معايَر، يحوِّل المجال الكهربائي الخاص بهوائي ثنائي القطب أو المجال المغنطيسي الخاص بهوائي إطاري، إلى موجة على خط نقل؛
- خط نقل وتوصيل معايَر أو كبل متحد المحور معاير؛
- مستقبِل انتقائي، وهو عموماً محلل طيف أو مستقبِل قياس، يقيس، بواسطة دارة توليف، شدة الإشارة المستقبَلَة باعتبارها تابعة للتردد. فيعطي محلل الطيف قيم التوتر أو القدرة في مجال التردد.

أثناء إجراء هذه القياسات من المهم ألا تشوش أجهزة القياس المجال الجاري قياسه.

3.4 مقارنة بين التوقعات والقياسات

تبيِّن المقارنة بين التوقعات والقياسات أن نتائج القياسات متوافقة جيداً مع النتائج المحصلة بحسابات نظرية. ويرجَع إلى المرفق 2 للوقوف على مزيد من التفاصيل.

5 التدابير الاحترازية الواجبة في محطات الإرسال وفي جوارها

هذا القسم يوجز التدابير الاحترازية الواجب اتخاذها حول محطات الإرسال الإذاعي، من أجل تلافي المخاطر المحتملة بسبب التعرض للترددات الراديوية. وتنقسم هذه المخاطر إلى فئتين رئيسيتين، الأولى فئة الأخطار المباشرة على الصحة البشرية التي تقع عند التعرض لمستويات عالية من بث الترددات الراديوية، مثل الصدمات، والحروق، وإمكان سوء أداء الغرسات الطبية. وتضم الفئة الثانية الأخطار غير المباشرة مثل أن يسبب بث الترددات الراديوية انفجارات أو حرائق أو تشويش وظائف الآلات من رافعات ومركبات وما إلى ذلك.

1.5 التدابير الاحترازية للتخفيف من الآثار المباشرة لبث الترددات الراديوية عالي المستوى على الصحة

تخص هذه الاحتياطات فئتين من الناس. تضم الفئة الأولى العاملين في محطات الإرسال والزائرين الرسميين الذين يأتون إليها بصورة منتظمة. هذه الفئة تتعرض كثيراً للخطر، ويلزم بشأنها اتخاذ احتياطات أشد بكثير مما يلزم بخصوص الفئة الثانية التي تضم أفراداً من عامة الجمهور.

1.1.5 التدابير الاحترازية بخصوص الموظفين (العاملين)

1.1.1.5 التدابير المادية

ينبغي توفير حواجز وقائية، إذا أمكن، لتقييد النفاذ إلى أي مساحة يحصل فيها تجاوز لحدود التعرض أو يمكن فيها لمس موصلات الترددات الراديوية المعرَّضة. فيجب أن لا يكون النفاذ إلى مثل هذه المساحات ممكناً إلا باستعمال مفتاح أو جهاز ما. وينبغي توفير إرتاج ميكانيكي أو كهربائي لأبواب الأسيجة التي تُفتَح لأغراض الصيانة.

وينبغي اتخاذ تدابير مادية أخرى مثل استعمال الأضواء أو العلامات، بالإضافة إلى الحواجز الواقية، لا بديلاً عنها.

ثم يجب التقليل إلى أدنى حد ممكن من احتمالات الصدمة الكهربائية أو الإصابة بحروق من التوترات الناجمة عن الترددات الراديوية والمستحثة في الأشياء الموصلة، كالأسيجة والهياكل الحاملة، وذلك عن طريق ترتيبات تأريض أو تقييد فعالة ومصونة بصورة وافية. وينبغي توجيه عناية خاصة لتأريض أي كبل مؤقت أو أي حبل معدني مثل أربطة الشد والرفع.

وإذا لزم تناول مثل هذه الأشياء ضمن مجال الترددات الراديوية، توفَّر وسائل إضافية لاتقاء الصدمات والحروق، مثل القُفَّازات الواقية والعلامات المنبِّهة الفعالة.

2.1.1.5 الإجراءات التشغيلية

عند بدء تشغيل محطة الإرسال وكذلك عند إدخال أي تغيير هام عليها، يجب تنفيذ عمليات تقدير لمخاطر التعرض للترددات الراديوية على يد مهنيين مدربين كفاية التدريب وذوي خبرة. وأول ما ينبغي أن يستهدفه التدقيق هو الأشياء التالية:

- المساحات الممكن أن يتعرض فيها الناس لمستويات مرجعية؛
- مختلف فئات الناس المحتمل تعرضهم، مثل الموظفين، والشركاء في الموقع، وأفراد عامة الجمهور؛
- عواقب اختلال شروط التشغيل، مثل التسرب من حواف الترددات الراديوية، وسوء تراصف الهوائي، وأخطاء التشغيل.

ويمكن إجراء تدقيق أولي لمستويات التعرض للترددات الراديوية بواسطة الحساب أو النمذجة الرياضية، ولكن يجب إجراء قياس لبعض العيّنات لأغراض التحقق. ولكن في أكثرية الحالات، يلزم إجراء قياسات لتحديد مستويات التعرض للترددات الراديوية بوجه أدق. والمقادير الفعلية الواجب قياسها (شدة المجال الكهربائي، شدة المجال المغنطيسي، كثافة القدرة، التيار المستحَثّ) يجب تحديدها بالاستناد إلى الظروف المعيَّنة. ويشمل هذا القياس ترددات المحطة، ومنطقة المجال (المجال القريب/البعيد)، والتحقق من الالتزام بالتقييدات الأساسية (كالمعدل SAR) أو فقط بالمستويات المرجعية. وعلى ضوء ذلك يتقرر بسهولة ما إذا كان ينبغي قياس مكوّنات المجال الثلاث فرادى أو ينبغي استعمال أجهزة قياس متناحية. وعندئذ ينبغي إجراء عمليات مسح التعرض للترددات الراديوية على أيدي موظفين مدربين على استعمال مثل هذه الأجهزة، يتّبعون فيها إجراءات القياس المفروضة، ويسجلون النتائج بنسق محدد.

وداخل كل منظمة أو شركة، يجب أن تُسنَد مسؤولية تعرف أجهزة القياس المناسبة وتوفيرها إلى شخص كفؤ معيَّن. ويجب استعمال هذه الأجهزة دائماً طبقاً لتعليمات الصانع، وإخضاعها بصورة دورية لعمليات تدقيق وظيفي (مقارنة بالمصدر) ومعايرة. ويجب، على أثر عمليات التدقيق والمعايرة، أن تُلصَق على هذه الأجهزة بطاقات تبيِّن تواريخ انتهاء العمل بها، وأن تُحفظ سجلات معايرة تتضمن ما إذا كان لزم إدخال تعديلات و/أو تصليحات على هذه الأجهزة. ثم تُستعمَل هذه المعلومات لتحديد الفترات الفاصلة بين عمليات المعايرة.

ويجدر الأخذ بطرائق عمل تضمن عدم تجاوز التعرض للترددات الراديوية الحدود المفروضة. وينبغي تدريب الموظفين على ما يناسب من إجراءات السلامة من هذه الترددات الراديوية. أما أعمال الصيانة في المساحات المقيَّد النفاذ إليها بسبب المستويات العالية للتعرض للترددات الراديوية، فيجب تخطيطها بحيث تجرى، قدر الإمكان، في فترات انقطاع الإرسال أو فترات تغير مخطط البث. إلا أنه ينبغي أيضاً الموازنة في الاهتمام بين أخطار البث بالترددات الراديوية وغيرها من الأخطار، مثل العمل ليلاً في أبراج نقل القدرة، ولو في ظروف إضاءة وافية. فعند اللزوم يجب تنفيذ عملية تبديل في تيار المرسِلات لتخفيف القدرة أو قطع التيار عنها، ضماناً للسلامة في عمل الصيانة أو التصليح.

ويجب أن تُحدَّد وتعلَّم بوضوح المساحات المحظور دخولها في محطات الإرسال، وأن يقام نظام "إذن بالعمل" لدخولها. وينبغي وضع الترتيبات الملائمة بخصوص أية منظومات أو هوائيات أو مضاميم أو مساحات مشتركة مع منظمات أخرى. والموظفون الذين يعملون بصورة منتظمة في المناطق العالية فيها مستويات التعرض للترددات الراديوية يلزم تزويدهم جميعاً بجهاز شخصي للإنذار أو لقياس خطر الإشعاعات.

ويجب أن تُدوَّن في سجلات حالات التعرض لمستويات التعرض للترددات الراديوية تفوق المستوى المحدد. ويتعيَّن على الشركات أو المنظمات المسؤولة عن تشغيل محطات الإرسال أن تراقب صحة الموظفين لديها الذين يعملون في المساحات العالية فيها مستويات التعرض للترددات الراديوية، وأن تشارك في الاستقصاءات الوبائية حسبما يلائم.

وينبغي إصدار تعليمات مكتوبة بشأن السلامة في نطاق العمل، تتضمن تفاصيل السياسات والإجراءات العامة المتعلقة بالوقاية من التعرض للترددات الراديوية، وتوزيعها على جميع العاملين المعنيين. وبالإضافة إلى ذلك، يجب إصدار تعليمات محلية تخص كل محطة إرسال بعينها، لضمان الامتثال لتلك السياسات والإجراءات.

ويُفترض في التدريب على تدابير السلامة أن يشتمل أيضاً على موضوع طبيعة التعرض للترددات الراديوية وآثارها، وعلى الجوانب الطبية ومعايير السلامة.

ولا بد من إيلاء اهتمام خاص للعاملين الذين يتحسسون بشكل خاص للمجالات الكهرمغنطيسية، مثل النساء الحوامل، والعمال الذين يحملون أجهزة طبية منفعلة أو نشطة. وبالنسبة للعاملين الذين يحملون أجهزة طبية نشيطة قابلة للغرس (AIMD)، تتوفر إرشادات تفصيلية من المبادئ التوجيهية الإقليمية، مثل وثائق اللجنة الأوروبية للتقييس الكهرتقني (CENELEC) من السلسلة EN 50527 المعنونة – إجراء لتقييم التعرض للمجالات الكهرمغنطيسية للعاملين الذين يحملون أجهزة طبية نشيطة قابلة للغرس. انظر أيضاً المرفق 6 بالملحق 1.

2.1.5 التدابير الاحترازية بخصوص عامة الجمهور

1.2.1.5 التدابير المادية

تنطبق على عامة الجمهور اعتبارات مماثلة لما تقدم تفصيله في الفقرة 1.1.1.5 بخصوص العاملين. ينبغي إيلاء اهتمام خاص لمساحات معيَّنة يمكن فيها أن يتجاوز التعرض للترددات الراديوية الحدود المقررة، بسبب حالات العطب. ويُفترض وضع حواجز واقية بشكل أسيجة محيطة، مؤرضة كما يلزم حيثما لُمِست حاجة لتأريضها. وربما لزم إضافة علامات تحذير من الخطر.

2.2.1.5 الإجراءات التشغيلية

أثناء عمليات تقدير المخاطر المطلوب في الفقرة 2.1.1.5 إجراوها، يجب أن يؤخذ في الاعتبار احتمال أن يكون أفراد من عامة الجمهور مزوَّدين بغرسات طبية. فيلزم اعتماد إجراءات توفر معلومات عن المخاطر الصحية لمثل هؤلاء الزائرين المحتملين، كما يلزم اعتماد الإجراءات المناسبة بخصوص نفاذهم إلى المساحات الخطرة. ويفترَض أن توفَّر لمن يزورون الموقع بصورة متواترة التعليمات الأساسية بشأن السلامة من إشعاعات الترددات الراديوية.

ويجب أن يُدرس موضوع إجراء مسوح للتعرض للترددات الراديوية خارج حدود موقع المحطة، وعلى الخصوص حيث يُحتمل أن تسبب التوترات المستحثَّة في البنى المعدنية الخارجية (من مرافيع وجسور ومبانٍ وغيرها) حروقاً أو صدمات طفيفة للناس. وعند إجراء مثل هذه المسوح، ينبغي أن يراعى إمكان تزايد شدة المجال مع المسافة، بسبب ميلان الأرض عادة. وينبغي عند اللزوم اتخاذ إجراءات مراقبة لتطبيقات التخطيط أو تنفيذ مقترحات أخرى تطويرية.

2.5 التدابير الاحترازية للتخفيف من الآثار غير المباشرة للتعرض للترددات الراديوية

يمكن أن تحدث الآثار غير المباشرة ع للتعرض للترددات الراديوية، مثل اندلا ع النار في مواد قابلة للاشتعال، مع مستويات أدنى بكثير من المستويات المرجعية، وخصوصاً في حالات الإرسال بالموجات الهكتومترية/الديكامترية (MF/HF). وذلك، لأن المواد القابلة للاشتعال قد تكون مخزَّنة في موقع فيه بنى موصلة، مثل شبكة أنابيب تؤدي وظيفة هوائي استقبال فعال بما فيه الكفاية. لكن الأخطار الفعلية نادرة، وإن كانت تهدد منشآت المعالجة الصناعية، ومستودعات المحروقات، ومحطات التزوّد بالوقود. بيد أن التقييم المفصَّل بعيد عن البساطة. ولذا فإن الإجراءات الموصى بها أدناه تستند إلى إزالة الأسباب تدريجياً. ومع ذلك يلزم، في التدابير الاحترازية التفصيلية التي تُعتمَد، مراعاة المعايير أو التشريعات الوطنية السارية في البلد المعني.

يُفترَض أن يجرى تقييم أولي، يستند إلى تقديرات عملية تتناول أسوأ الحالات، ويتحقق فيها حد أدنى من الفصل بين نمط معيَّن من المرسلات والبنية الموصلة، تجنبا للخطر. وتقوم الخطوة الأولى في هذا التقييم على تحديد أدنى قيمة لشدة المجال يمكن أن يتمثل فيها خطر اندلاع حريق، نظراً لترددات المرسل المعيَّن المستعملة. وهذا التحديد يتبع أيضاً نوع المادة القابلة للاشتعال، ومحيط العروة التي تشكلها البنى المعدنية، شبكات الأنابيب عادة، ويتسنّى إحرازه بكثير من السهولة عن طريق جداول وبيانيات. ثم تُحدد المنطقة المعرضة للخطر بسبب شدة المجال الدنيا هذه، بواسطة الحساب والنمذجة الرياضية أو بواسطة جداول/بيانيات.

فإذا كانت المساحة المعرضة، التي تم تحديدها كما تقدم، تشتمل على مواقع مخزّنة فيها مواد قابلة للاشتعال، أو كان جارياً التخطيط لمثل ذلك فيها، لزم عندئذ إجراء تقييم أكثر تفصيلاً. وينبغي أن يستند هذا التقييم إلى الأبعاد الفعلية لأي بنى معدنية، ونوع غاز المادة (أو المواد) القابلة للاشتعال المخزّنة، وشدة المجال المحصلة قيمتها بالقياس. ويُفترَض أن يجرى هذا التقييم المفصل بحساب القدرة الممكن استخراجها من البنية المعدنية، من أجل تقرير ما إذا كانت هذه القدرة تتجاوز المقدار الأدنى اللازم من الطاقة لاندلاع النار في المادة القابلة للاشتعال. فإذا تجاوزت المقدار الأدنى هذا، لزم عندئذ قياس القدرة الممكن استخراجها، وإدخال أي تعديل ضروري على البنية المعدنية، و/أو تنفيذ غير ذلك من تدابير السلامة.

وفي فئة مماثلة لأخطار الحرائق، تندرج **المواد القابلة للانفجار**. ولكن يندر جداً أن تصدف مثل هذه الحالة، والإرشادات المفصلة متيسرة في مبادئ توجيهية إقليمية، مثل وثيقة اللجنة الأوروبية للتقييس الكهرتقني (CENELEC) PD CLC/TR 50426:2004 (تقدير الإقلاع غير المقصود للأجهزة الكهربائية المتفجرة في الأسلاك الجسرية بواسطة دليل إشعاع الترددات الراديوية). ومن الآثار غير المباشرة الأخرى التي ينبغي أخذها في الاعتبار تداخل الترددات الراديوية في أنظمة السلامة المعتمَدة في المركبات، والآليات، والمرافيع، وغيرها، التي قد توجد ضمن حدود تأثير محطات الإرسال.

ثم يجب، حيثما اقتضت الضرورة، أن تتخذ تدابير احترازية شبيهة من حيث المبدأ بما تقدم وصفه في الفقرة 2.1.5.

المرفق 1
بالملحق 1

أمثلة على شدد مجال قريب من هوائيات الإرسال، قيمها محصَّلة بالحساب

1 المثال A – منحنيات شدة المجال الكهربائي والمجال المغنطيسي

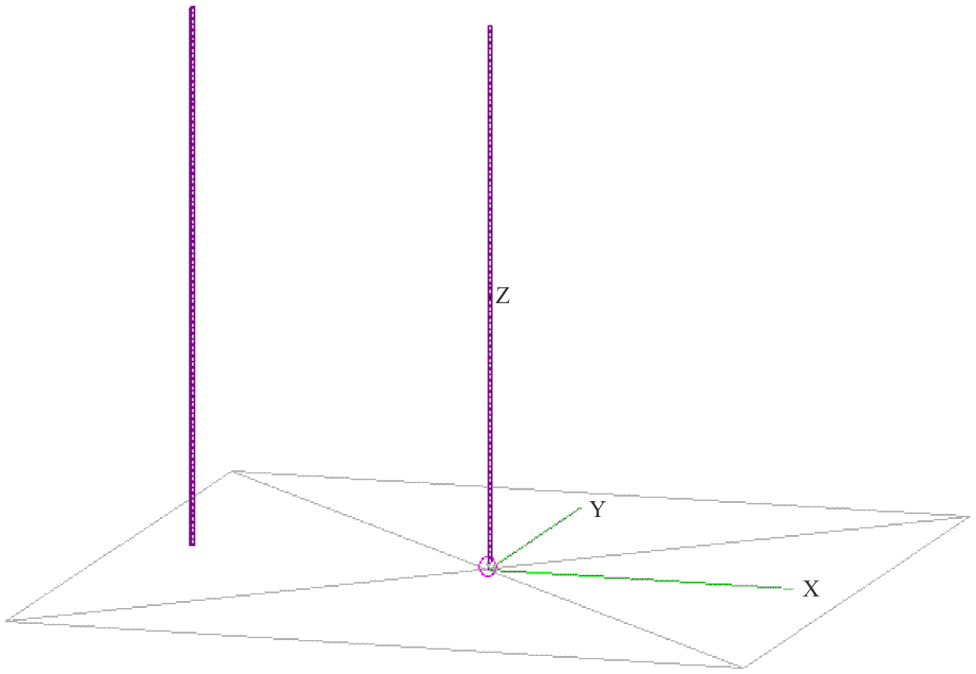
حسبما جاء في القسم 3 أعلاه، يمكن إجراء حسابات رقمية لتوزيع شدة كل من المجالين الكهربائي والمغنطيسي قرب هوائيات الإرسال الإذاعي، من أجل تحديد قيم شدة المجال في بعض النقاط أو المساحات، ولا سيما منطقة المجال القريب حيث تكون بنية المجال معقدة جداً على العموم. ويمكن إجراء حسابات أيضاً من أجل التحقق من خطوط الكفاف (الخطوط أو السطوح الثابتة فيها شدة المجال) حيث يتم التقيد بالقيم الحدودية المناسبة (المستويات) للمجال الكهرمغنطيسي. وعلى هذا النحو يمكن (لأغراض التخطيط، مثلاً) تقدير امتداد المساحات التي يمكن أو يجب أن تُنفَّذ فيها تدابير حماية.

والأشكال التالية تعرض بصورة منحنيات بيانية، بعض نتائج الحسابات لأمثلة هوائيات بث إذاعي بالموجات الهكتومترية (MF) والديكامترية (HF).

ويفصل الشكل 3 محاكاة لهوائي اتجاهي بالموجات الهكتومترية (MF)؛ ويتألف الهوائي من صاريتين طول كل منهما نصف طول موجة؛ أحدهما يغذى، والآخر عاكس منفعل. ويبين الشكل 3 النموذج؛ ويبلغ طول المحاور المرجعية 50 m.

الشكل 3

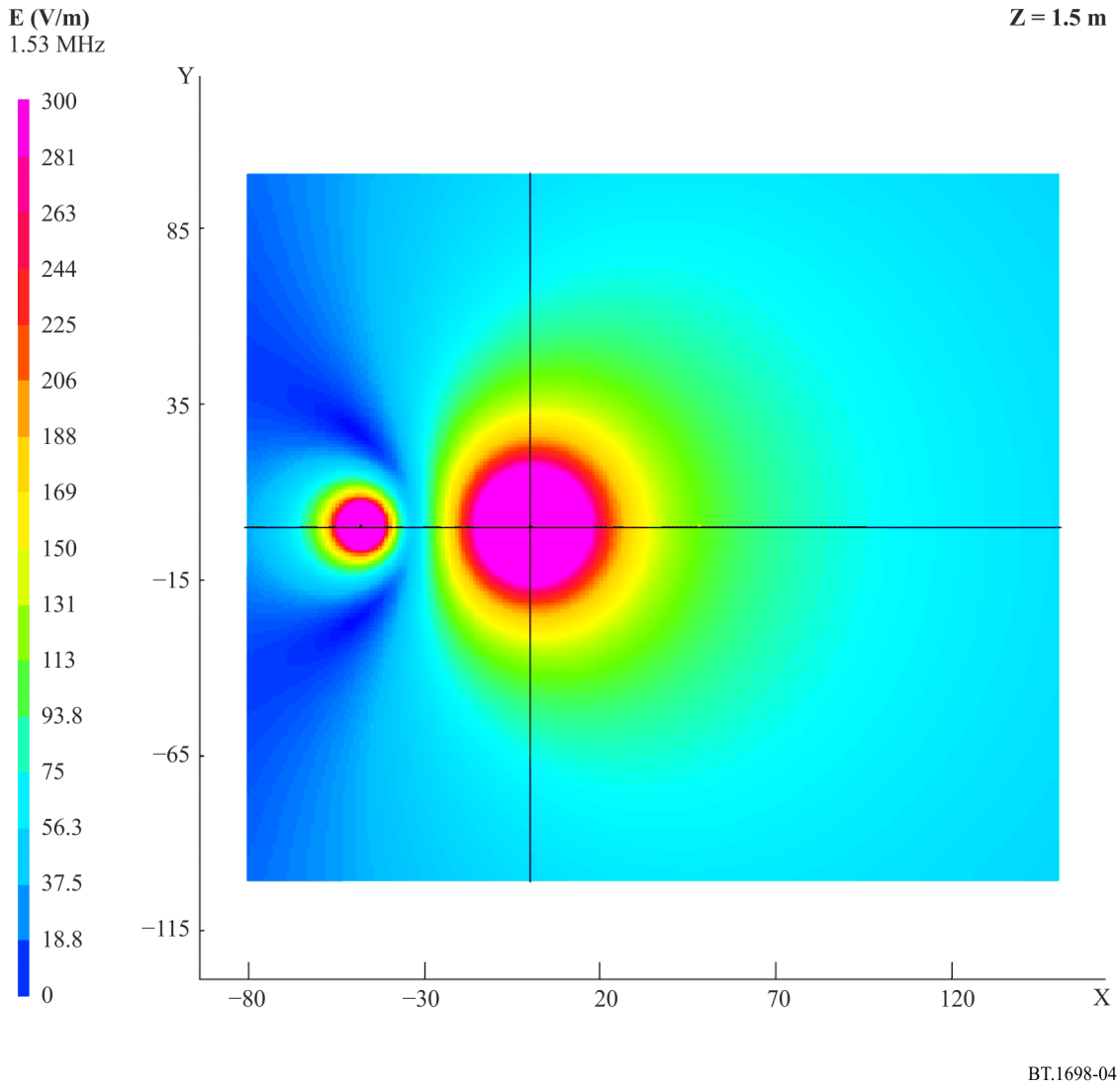
محاكاة لهوائي اتجاهي بالموجات الهكتومترية (MF)



ويبين الشكل 4 شدة المجال الكهربائي المحسوبة على ارتفاع 1,5 m فوق سطح الأرض، بدخل 500 kw.

الشكل 4

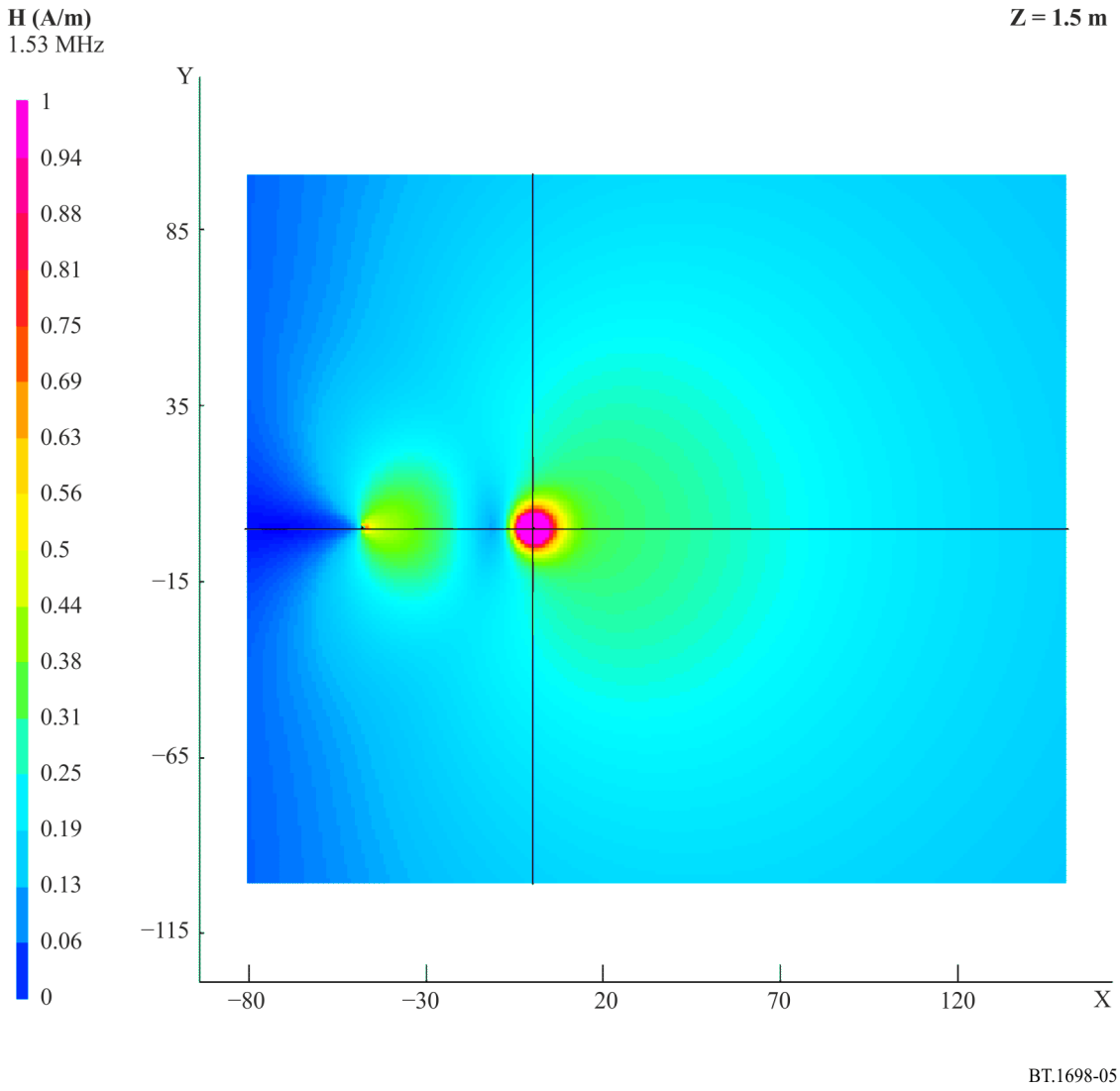
شدة المجال الكهربائي المحسوبة على ارتفاع 1,5 m فوق سطح الأرض، بدخل 500 kw



ويبين الشكل 5 شدة المجال المغنطيسي المحسوبة على ارتفاع 1,5 m فوق سطح الأرض، بدخل 500 kw.

الشكل 5

شدة المجال المغنطيسي المحسوبة على ارتفاع 1,5 m فوق سطح الأرض، بدخل 500 kw

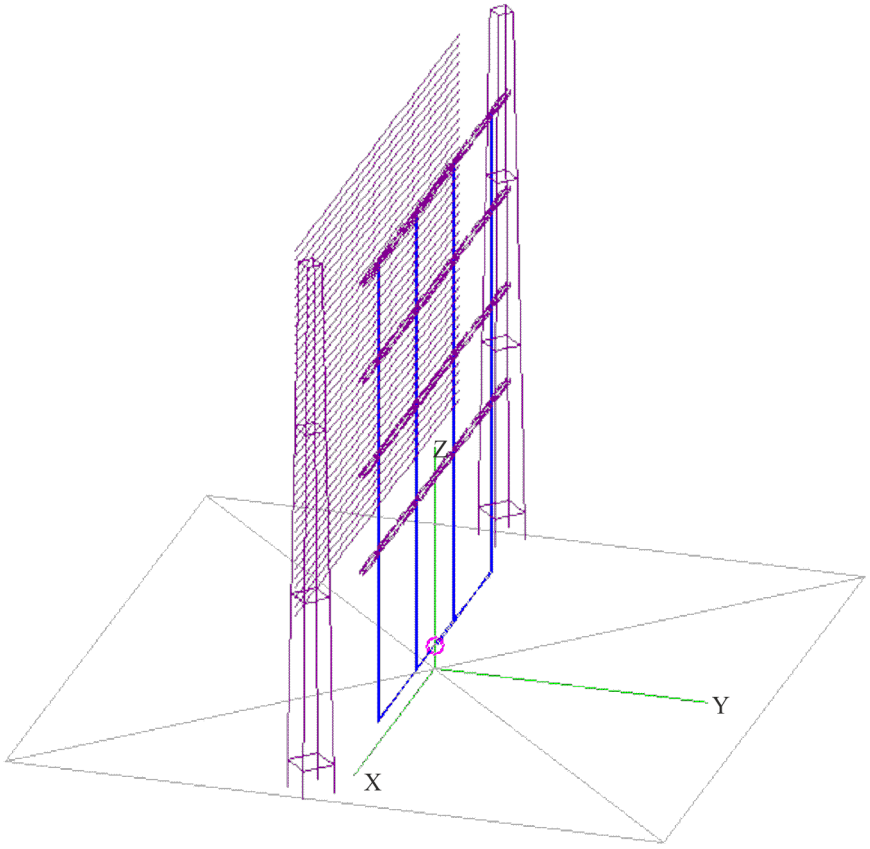


ويمثل الشكل 6 نموذج هوائي ستاري نمطي بالموجات الديكامترية (HF) (HF 4/4/1) ذي عاكس غير دوري على ارتفاع طول موجة واحد فوق سطح الأرض (AHR(S) 4/4/1) وهناك أربعة صفوف من العناصر، يتألف كل منها من أربعة ثنائيات أقطاب. وتؤخذ العناصر المشعة النشطة للهوائي والعاكس وهيكل الدعم المبسط في الاعتبار في النموذج، وتظهر النتائج التي تبين المجال الكهربائي والمجال المغنطيسي الناتجين في الشكلين 7 و8 على التوالي على ارتفاع 1,5 m فوق سطح الأرض. والمحاور (باللون الأخضر) طولها 50 m كمرجع.

ويلاحَظ أن المستويات لا تهبط مجرد هبوط رتيب مع زيادة المسافة عن الصفيف.

الشكل 6

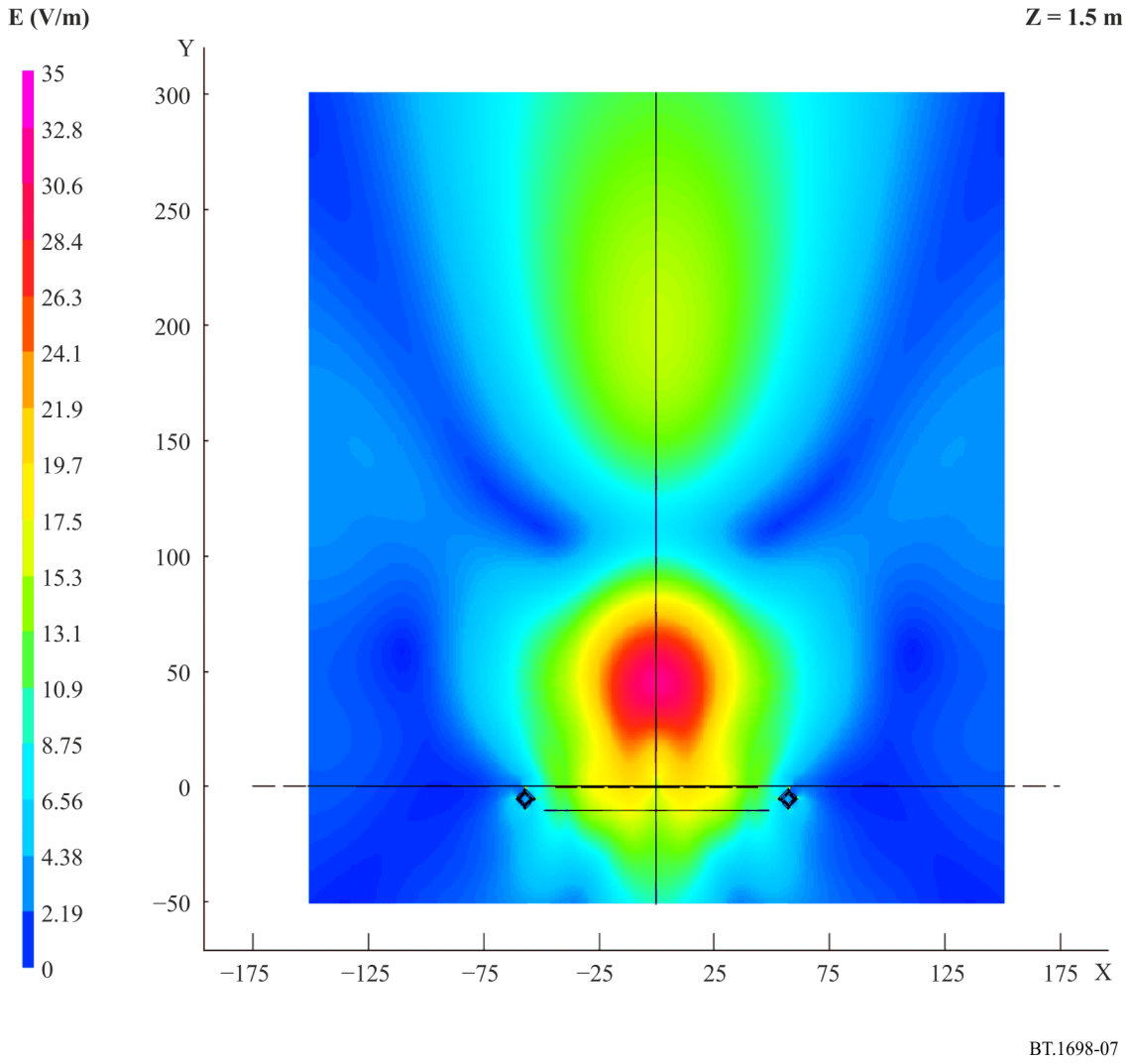
نموذج هوائي AHR(S) 4/4/1 نمطي



BT.1698-06

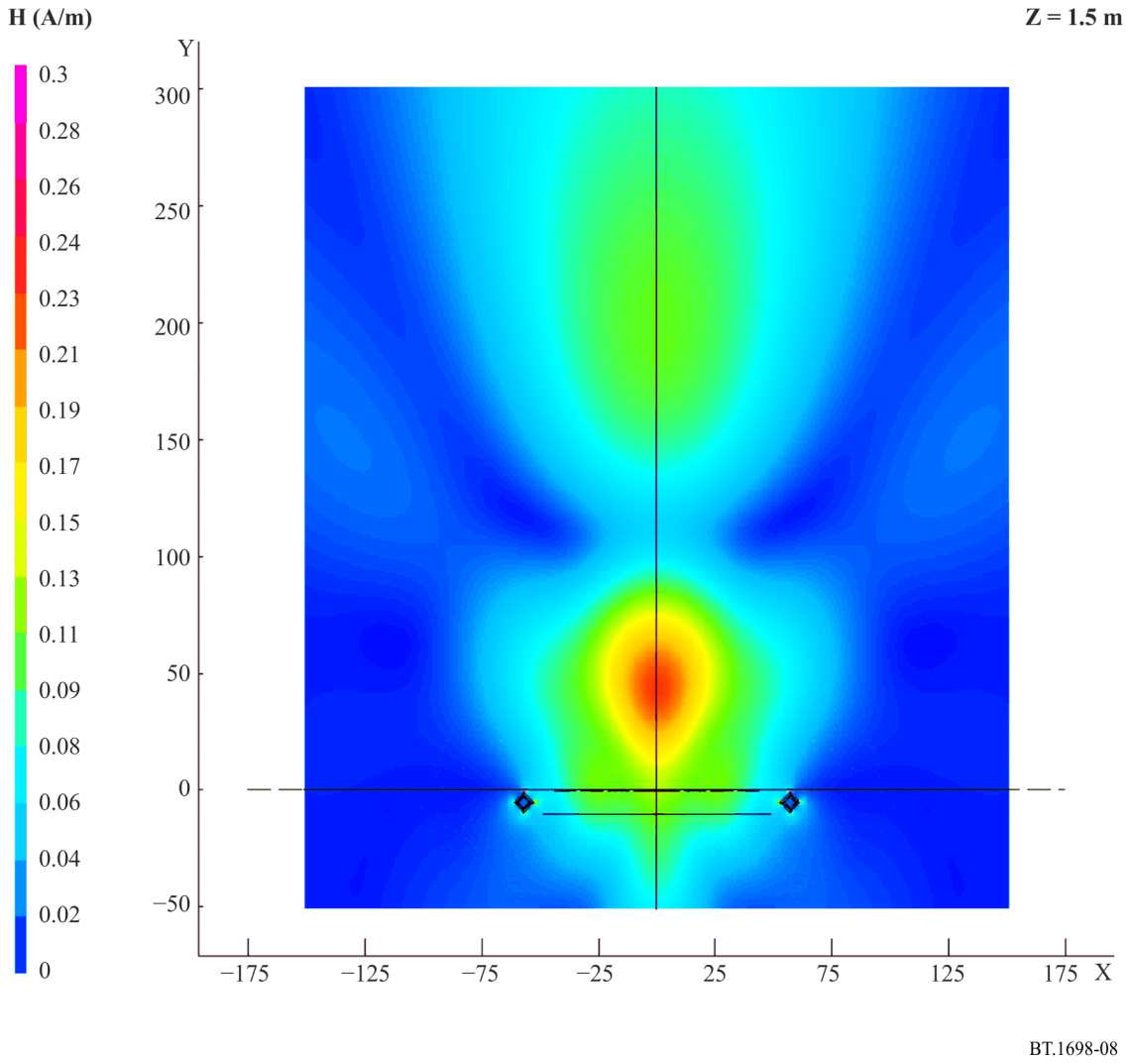
الشكل 7

شدة المجال الكهربائي (V/m) المحسوبة على ارتفاع 1,5 m فوق الأرض؛ لهوائي ستاري نمطي ARS 4/4/1 قدرة الدخل 500 kW والتردد 7 MHz



الشكل 8

شدة المجال المغنطيسي (A/m) المحسوبة على ارتفاع 1,5 m فوق سطح الأرض؛ لهوائي ستاري نمطي ARS 4/4/1 قدرة الدخل 500 kW والتردد 7 MHz



2 المثال B – تحديد شدة المجال المغنطيسي في منطقة المجال القريب لهوائيات عالية القدرة تبث بالموجات الهكتومترية/الكيلومترية (MF/LF)

يحدد هذا المثال شدة المجال المغنطيسي في منطقة المجال القريب لهوائيات مرفوعة على سوارٍ (أحادية القطب)، تبث بالموجات الهكتومترية (MF) والكيلومترية (LF)، وذلك عن طريق حل معادلة Hallen التكاملية.

وفي حالة البث في نطاقات الترددات الأقل من 10 MHz تكون العلاقة الفيزيائية بين المجالين الكهربائي والمغنطيسي أكثر تعقيداً بكثير منها مع نطاقات أخرى. إذ إنه، خلافاً لحالة ترددات أعلى حيث المجال الكهرمغنطيسي له خصائص منطقة المجال البعيد حتى على مسافات قريبة جداً من مصدر البث، وحيث يكون مفهوم كثافة القدرة المشَعَّة (شدة متَّجه Poynting) مفيداً جداً. في الواقع، تزول العلاقة البسيطة بين المجال الكهربائي والمجال المغنطيسي، في منطقة المجال القريب أياً كان التردد: إذ إن المجالين ليسا هنا في الطور نفسه، وليست نسبتهما 377 Ω. ولكن بالنسبة للترددات المنخفضة التي تبلغ 10 MHz وما دون، تكون منطقة المجال القريب أكبر من تلك الخاصة بالترددات الأعلى.

فمن الواضح أن قيم شدة المجال المحصَّلة بالقياس تتوقف على نمط هوائي الإرسال، وقدرة الإرسال، والمسافة عن الهوائي المرسِل. مثلاً: في حالة إرسال عالي القدرة، يمكن لقيم شدة المجال للمكوِّن E، في موقع مرسلات نمطية تبث بالموجات LF/MF، أن تتراوح من بضع V/m إلى أكثر من 250 V/m. وفي المواضع القريبة جداً من هوائي الإرسال قد تصل شدة المجال الكهربائي حتى إلى 1 000 V/m.

3 المثال C – المجال الكهرمغنطيسي في منطقة المجال القريب لهوائيات ستارية تبث بالموجات الديكامترية (HF)

1.3 مقدمة

يتعلق هذا المثال ببنى هوائيات أكثر تعقيداً، تسمى الهوائيات الستارية. هذه الهوائيات هامة جداً لأغراض الإرسال العالي القدرة بالموجات القصيرة (الديكامترية، HF). إنها بالواقع صفيفات من الهوائيات الثنائية القطب الأفقية المرتبة في مستوٍ عمودي.

إن النزعة العامة نحو زيادة القدرة وكسب هوائيات الإرسال قوية جداً في مجال الإذاعة بالموجات القصيرة. وليس من غير المألوف، في مراكز الإرسال الكبرى ذات التغطية العالمية، أن تصل قدرات إلى المرسل 500 kW، وكسب الهوائي (في اتجاه البث الأقصى) أكثر من 20 dB (بالنسبة لثنائي القطب نصف الموجي). فالمرسل المشتغل بقدرة 500 kW المشكَّل بنسبة 100% (انظر المرفق 4 بالملحق 1) وهوائي كسبه 20 dB يُحدِث قدرة مشعَّة فعلية (ERP) قيمتها 75 MW (في اتجاه البث الأقصى).

والمرفق 5 (الفقرة 1.2) يصف التقنية العددية التي يمكن استعملها لحساب شدة كل من المجالين القريبين الكهربائي والمغنطيسي للهوائيات العالية القدرة. وفي الفقرة 2.3 تُعطى نتائج هذه الحسابات بخصوص المجالين قرب الهوائيات الستارية المرسِلة بالموجات الديكامترية (HF).

2.3 المجالان القريبان الكهربائي والمغنطيسي للهوائيات الستارية

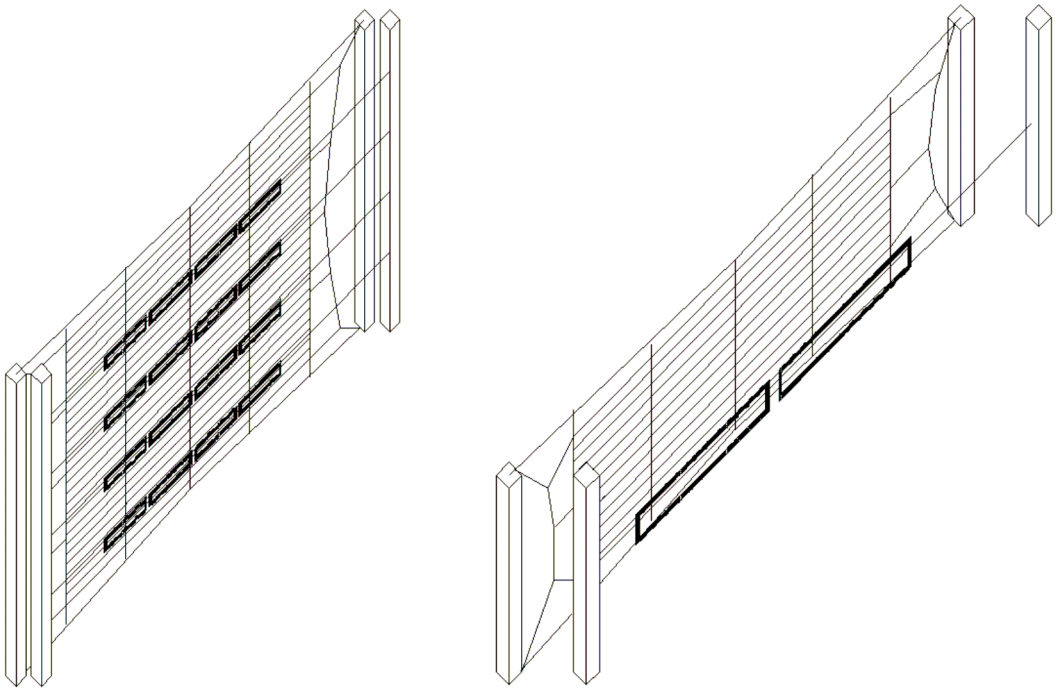
تتنوع هوائيات الإرسال العالية القدرة المستعملة في الإذاعة بالموجات القصيرة، فمنها ثنائيات القطب الأفقية (التي تشكل عادة صفيفاً أو ستاراً توجيهياً)، والهوائيات المعيَّنية، وأُحاديات القطب العمودية. وثنائيات القطب المستعملة في صفيف ستاري هي عادة ثنائية قطب نصف موجية، إما بسيطة وإما مطوية، تُغذّى بتيارات كهربائية متساوية الاتساع تقريباً (ولكن مختلفة الطور أحياناً)، لكي تولد إشعاعاً حسب مخطط إشعاع البث المرغوب. ويُجهَّز الهوائي عادة بعاكس منفعل، يتكون في أكثرية الحالات العملية من شبكة أسلاك (عاكس غير دوري)، ولكن يمكن أيضاً أن يكون صفيفاً من ثنائيات القطب المولَّفة. وتوسم الصفائف الستارية بالسمات التالية: H(R)(S) *m*/*n*/*h*، حيث *H* تدل على صفيف من ثنائيات القطب المرتّبة في مستوٍ عمودي؛ و*R* تدل على عاكس (إن وُجد)؛ و*S* تدل على زحزحة الطور (إن وجدت) بين التيارات التي تغذي الثنائيات المتجاورة الواقعة على مستقيم واحد من أجل تدوير سمت الحزمة الرئيسية؛ و*m* تدل على عدد ثنائيات القطب الواقعة على مستقيم واحد في كل صف؛ و*n* تدل على عدد ثنائيات القطب المتوازية المنضَّدة عمودياً (على مسافة تساوي عادة نصف طول الموجة)، يعني عدد الصفوف (الفسحات)؛ و*h* تدل على ارتفاع أوطأ صف فوق مستوى الأرض (بطول الموجة). وللاطلاع على معلومات أوفى، انظر التوصية ITU-R BS.705.

للصفائف الستارية خواص ممتازة، منها على الخصوص الكسب العالي (أكثر من 20 dB)، يعني مخطط إشعاع بث يتصف بتوجيهية عالية؛ والمقدرات العالية لتناول القدرة (حتى مستوى 500 kW). فهي بالتالي تؤدي دوراً هاماً جداً في المحطات الكبيرة للإرسال بالموجات الديكامترية (HF). وتقوم المسألة المركزية في هذه التوصية على إعداد تقنية دقيقة وفعالة لتقييم هذه المجالات.

ويحتوي حقل الهوائيات النمطي لمحطة إذاعية بالموجات الديكامترية (HF) على عدة هوائيات مستقطبة أفقياً. وفي بعض الحالات هناك أيضاً هوائيات ربعية شاملة الاتجاه. ويحتوي الهوائي الستاري النمطي على 16 من ثنائيات القطب مرتبة في أربع فسحات من أربعة عناصر (HRS 4/4/*h*). وأحياناً، لكل من الهوائيات الستارية عاكس غير دوري، مصنوع من أسلاك دقيقة أفقية أو صفيف من ثنائيات القطب المولَّفة (انظر الشكل 9).

الشكل 9

صفائف ستارية بالموجات الديكامترية (HF)



HR 4/4/*h* HR 2/1/*h*

BT.1698-09

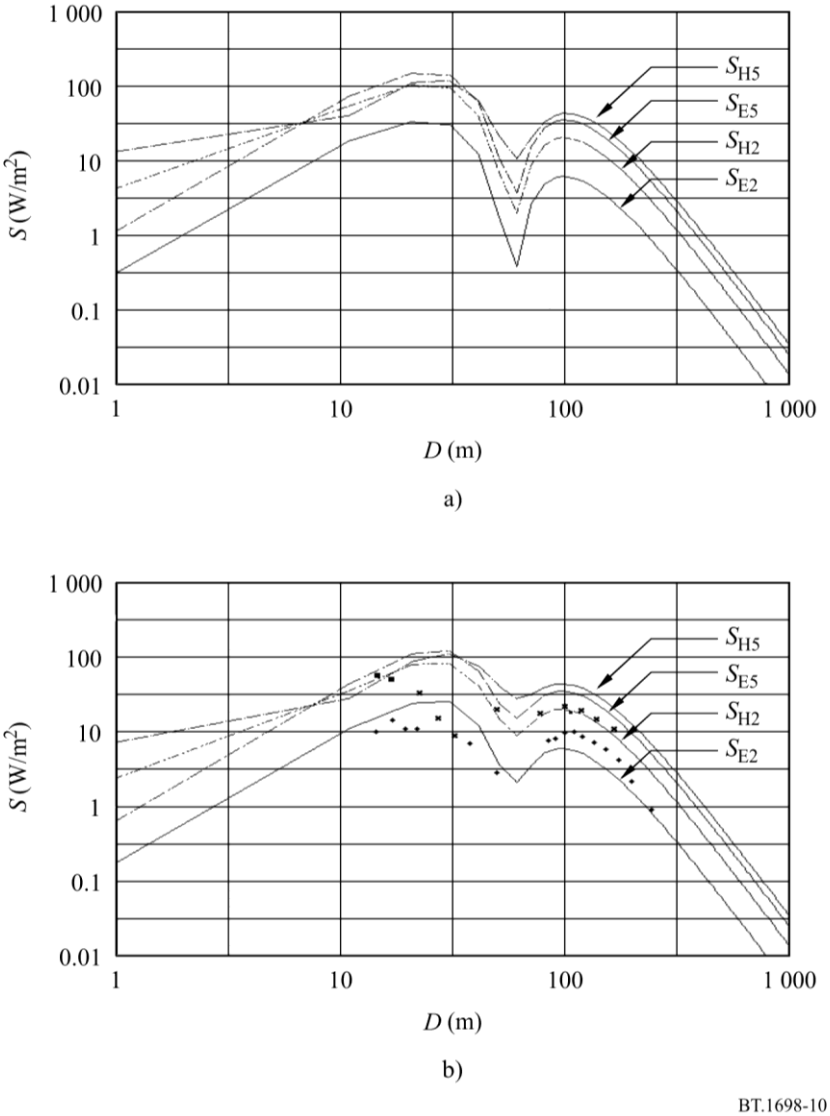
من بين البحوث المتخصصة، قليلة هي البحوث التي تناولت موضوع حساب شدة كل من المجالين الكهربائي والمغنطيسي للهوائيات الستارية المرسِلة بالموجات الديكامترية (HF)، لكنها تستند كلها إلى التقريب الجيبي لتوزع التيار على طول ثنائيات القطب، كما تستند إلى افتراض أن التيارات التي تغذي ثنائيات القطب لها نفس الاتساع. والهدف هنا هو توفير تحليل أشد صرامة، باستعمال طريقة تقريب أدق بخصوص توزع التيار، مع مراعاة الاقتران بين عناصر الصفيف، يعني عن طريق تغذية العناصر بتوترات متساوية الاتساع.

لقد أُقيم البرهان تجريبياً (وتم تأكيده نظرياً باستعمال طريقة التقريب الجيبي بخصوص توزع التيار)، على أن تقريباً تمثيلياً للأرض بمستوى جيد التوصيل يأتي بنتائج دقيقة. وهذا التبسيط مهم، لأنه لا يعالج الهوائيات إلا فوق أرضية لا عيب فيها. وقد أُجري التحليل الذي نحن بصدده سريعاً بفضل اعتماد ثنائيات قطب بسيطة بدلاً من المطوية، لأن هذه العملية التقريبية إنما وضعت من أجل تحصيل نتائج دقيقة. فطول ثنائي القطب البسيط مأخوذ على أنه أقصر بعض الشيء من طول نصف الموجة في التردد الاسمي، بالاستناد إلى المعطيات المستمدة من أبعاد الهوائيات الستارية الفعلية. والمسافة الفاصلة بين نقاط تغذية الهوائيات المتجاورة تساوي باستمرار نصف طول الموجة، في كلا الاتجاهين الأفقي والعمودي. والمسافة بين ثنائيات القطب والعاكس تساوي بالضبط ربع طول الموجة. وجرت نمذجة العاكس بإدخال صور سلبية عن ثنائيات القطب الأصلية في المستوي العمودي. وعليه، فالمسافة بين ثنائيات القطب الأصلية وصورها السلبية المناظرة تساوي نصف طول الموجة.

وجرى تقييم شدة كل من المجالين القريبين، الكهربائي والمغنطيسي، في الاتجاه الأقصى في مخطط إشعاع البث (إذ وُجد المجال في اتجاه الفصين الجانبيين أضعف بكثير). وتم التقييم من نقطة على ارتفاع m 2 = z من أجل تقييم مخاطر التعرض على العاملين في محطة الإذاعة، إذ يُحتمل أن يتنقلوا ضمن مجال الهوائي، ومن نقطة على ارتفاع m 5 = z من أجل عامة السكان، إذ أُخذ في الحسبان الأشخاص القاطنين في مساكن من طابقين.

الشكل 10

متجه Poynting "المكافئ" لهوائي HRS 4/4/1 عند تغذية ثنائيات القطب بواسطة أ) تيارات متطابقة وب) الفولتية المتطابقة، إلى جانب البيانات (النقاط) التجريبية



وقورنت نتائج التحليل أولاً بالنتائج المحصلة في صدد الهوائي HRS 4/4/1. وكان التردد الذي يشتغل به الهوائي هو 15,245 MHz، وقدرة تغذيته 500 kW. ويعرض الشكل 10أ) النتائج المحصلة بخصوص متَّجِه Poynting "المكافئ"، على افتراض أن ثنائيات القطب تتغذى بتيارين متماثلين تماماً. ويعرض الشكل 10ب) نفس النتائج ولكن على افتراض أن ثنائيات القطب تتغذى بتوتريْن متماثلين تماماً، مع معطيات مستمدة من القياس على z = 2 m. وتبيَّن أن التوافق بين المعطيات النظرية والمعطيات التجريبية حسن. ولذا فمن البديهي أن تغذية الهوائي بتوترات متساوية تعطي نتائج توقعية أفضل بشأن المجال الفعلي، وعلى الخصوص قرب ثنائيات القطب على مسافة 70 m من الهوائي.

4 الخلاصة

جرى بحث نظري لشدة المجالين الكهربائي والمغنطيسي في جوار هوائيات إرسال، ستارية، عالية القدرة، مشتغلة بالموجات الديكامترية (HF). وحُددت مساحات الأمان للأشخاص في جوار هذه الهوائيات. وقُدِّمت النتائج المتعلقة بالمجالين القريبين للهوائيات الستارية، باستعمال نظرية صارمة لأول مرة، وثبت أنها على توافق جيد مع المعطيات التجريبية المنشورة في غير هذا الموضع.

المرفق 2
بالملحق 1

مقارنة بين نتائج التوقعات ونتائج القياسات

1 تمهيد

أجريت المحاكاة والقياسات بصورة مستقلة، علي يد أشخاص ليس بينهم اتصال، تحاشياً للتأثير والتأثر في العمل والنتائج.

حوكي نظام الهوائيات محاكاة جزئية فقط، نظراً لتعقيدها (انظر نموذج نظام الهوائيات في الفقرة 1.1).

أجريت القياسات والتوقعات على نظام هوائيات، ممثَّلة في الشكلين 11 و12، قادرة على الاشتغال في نطاق الموجات القصيرة، وقد جرت المقارنة بخصوص الترددين 13 MHz و18 MHz.

الشكل 11

مثال صفيف بالموجات الديكامترية (HF)

BT.1698-11

1.1 نموذج نظام الهوائيات المستعمل

نموذج نظام الهوائيات الممثل في الشكل 12 مكوَّن من صفيف أفقي الاستقطاب قوامه 16 من ثنائيات القطب المطوية، قبالة عاكس مصنوع من شبكة أسلاك. وتستمد ثنائيات القطب تغذيتها عن طريق خطوط ثنائية السلك تشكل شبكة مواءمة للمعاوقة معقدة؛ وجميع الخطوط الثنائية السلك لشبكة مواءمة المعاوقة، الممثلة في الشكل 10، عمودية بمعظمها (متعامدة مع ثنائيات القطب)؛

وبعض الخطوط الأفقية قصيرة نسبياً، ومرتبة عمودياً على ثنائيات القطب وعلى أنظمة التغذية، في اتجاه الانتشار. وفي قاعدة نظام الهوائيات خطوط ثنائية السلك أخرى تفلق القدرة المستعملة للترددات الراديوية وتوزعها بين الـ "أعمدة" الأربعة لثنائيات القطب.

الشكل 12

تفاصيل عناصر الإشعاع وجزء من شبكة المواءمة

BT.1698-12

توخياً لتبسيط النموذج وتجنب التفاصيل غير اللازمة وما ينجم عنها من تطويل وقت الحسابات، جرت نمذجة النظام بكامله على أساس أنه صفيف بسيط قوامه 16 من ثنائيات القطب، كما هو مبيَّن في الشكل 13، وكل منه يستمد تغذيته من مولد توتر خاص به مطاوَر على نحو صحيح مع سائر المولدات، دون حاجة إلى نمذجة شبكة المواءمة/التغذية. إضافة إلى ذلك، جرت نمذجة كل من ثنائيات القطب المطوية، المؤلَفة من سلكين متوازيين مطويين في الطرفين، على أساس أنه ثنائي القطب أحادي السلك، ذو مقطع عرضاني ملائم للحصول على نفس القيمة للمعاوقة.

أخيراً جرى تمثيل كل من ثنائيات القطب بـ 24 قطعة، لا يتجاوز طول الواحدة $\lambda/20$، كما يبيّنه الشكل 14.

2.1 محاسن ومساوئ نموذج نظام الهوائيات

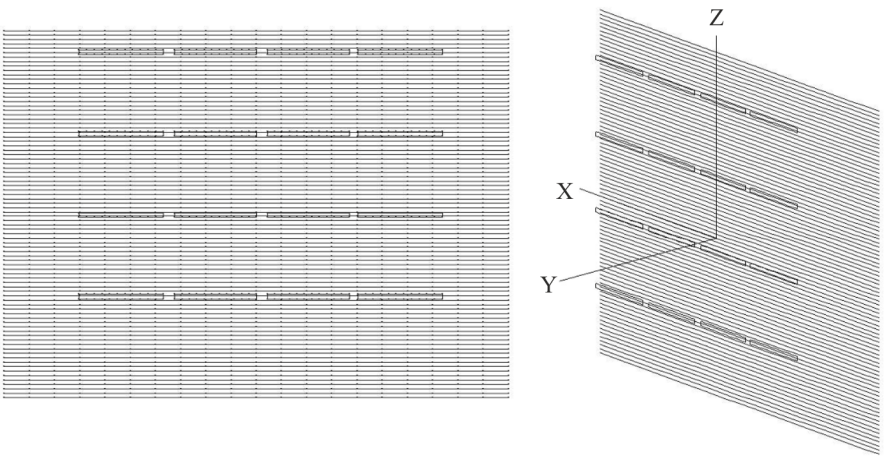
المزيَّة الأهم هي أن النموذج المنفَّذ في غاية البساطة إزاء تعقيد نظام الهوائيات الحقيقية. فبفضل هذا النموذج يمكن إنجاز الحسابات في وقت قصير نسبياً.

والمزية الثانية الكبيرة هي إمكان تعديل النموذج بسهولة، عند اللزوم، توخياً لتمثيل النظام الحقيقي على وجه أفضل. وبالفعل، على وجه العموم تمثل نتيجة المقارنة الأولى بين المحاكيات والقياسات منطلقاً جيداً لإدخال بعض التعديلات على النموذج الأول. وأهم سيئة في النموذج البسيط المعتمد هي استحالة أن يؤخذ في الحساب بصورة صحيحة إسهام شبكة المواءمة/التغذية المعقدة

في المكوّنات x وy وz للمجالين. إذ إن كمّاً من القدرة تُشِعُّه خطوط المواءمة الثنائية السلك، خطوط تشتغل بالموجات المستقرة. فلهذا السبب لا يظهر المكوّن العمودي (المكوّن z) للمجال الكهربائي (E)، ولا المكون الأفقي في اتجاه الانتشار (المكون y) إلا في بعض الحالات حين تكون القيم منخفضة جداً؛ ويلاحظ نفس السلوك من جانب المكوّن x للمجال المغنطيسي (H). والسبب هو أن التوقع لم يُراعَ فيه المشاعيع العمودية ولا المشاعيع المشتغلة العاملة في اتجاه الانتشار. أما في نتائج القياسات فعلى عكس ذلك يُسجَّل حضور كلا المكوّنين، العمودي (z) والأفقي (y) للمجال E، وكذلك حضور المكوّن الأفقي (x) للمجال H، وهذا الاختلاف يسبب بعض المشكلات في المقارنة المباشرة. والتصرف الأرشَد لتذليل الصعوبة هو اعتبار أن هذين المكوّنيْن يتولّدان عن كم القدرة الذي لا يبلغ إلى صفيفات ثنائيات القطب؛ ومن ثم فإن إسهامهما في شدة المجال المقصود قياسها ينبغي أن يراعى في إسهام المكوّن الأفقي (x)في نتيجة المحاكاة. وبعبارة أخرى، إن إسهام المكوّن الأفقي (x) المحصَّل بالمحاكاة تجب مقارنته بالنتيجة الإجمالية للقياسات، وهذه النتيجة هي الجذر التربيعي لمجموع القيم المربَّعة للإسهامات المحصلة بالقياس على المحاور x وy وz.

الشكل 13

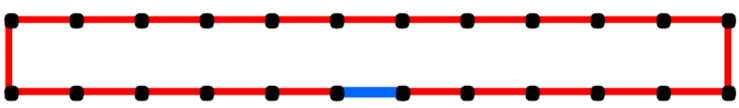
نموذج لصفيف من ثنائيات القطب وتوجهه في نظام ثلاثي المحاور X وY وZ
كل من ثنائيات القطب يتغذى من مولد توتر خاص به، في الطور نفسه مع سائر المولدات. واتجاه إسهام المكوّنات Ex، Ey، Ez وHx، Hy، Hz للمجالين E وH في نقطة التقييم هو اتجاه المحاور X وY وZ نفسه



BT.1698-13

الشكل 14

نموذج لواحد من ثنائيات القطب. جرت نمذجته على 24 قطعة طول الواحدة أقصر من 20/ λ.
تُسلَّط الإثارة على مركز الساعد العلوي أو الساعد السفلي في نقطة الوسط من القطعة المركزية



BT.1698-14

2 مقارنة بين التوقعات والقياسات

1.2 التحليل العددي للهياكل السلكية: مثال

1.1.2 التوقعات

1.1.1.2 ملاحظات على النموذج

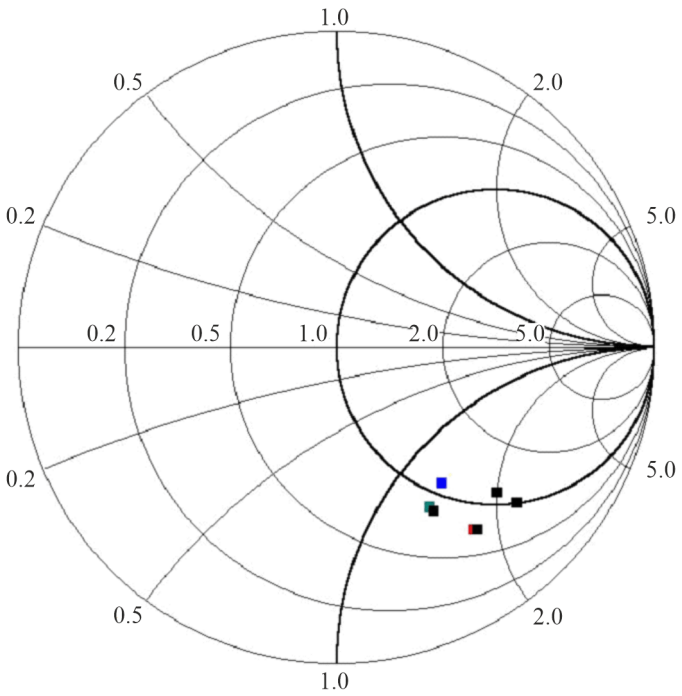
لا بد، لكي يكون التناظر على أمثل وجه بين النموذج المتقدم وصفه ونظام الهوائيات الحقيقية، من معرفة دقيقة لكم القدرة في دخل كل ثنائي قطب، نظراً للخسارة الحاصلة في خط النقل.

وتوخياً لإمداد كل من ثنائيات القطب بقيمة التوتر المناسبة، جرى حساب معاوقة الدخل لكل واحد من ثنائيات القطب هذه. والقيم معروضة في الشكل 15.

الشكل 15

القيم المحصَّلة بالمحاكاة لمعاوقة دخل ثنائيات القطب، معاوقة مُقيَّسة بـ 600 Ω.
يسترعى الانتباه إلى التشتت الضئيل – لكنه غير معدوم – في قيم المقاومة قرب 600 Ω

MHz 13، ثنائيات القطب (معاوقة مقيسة 600 Ω)



BT.1698-15

ثم اعتُمِد بشأن كل ثنائي قطب قيمة واحدة للمقاومة تساوي 600 Ω، وهذه هي القيمة الوسطية المحصلة بالمحاكاة. ويسترعى الانتباه إلى أن هذا القرار قد يكون هو سبب عدم الدقة في نتائج التوقعات.

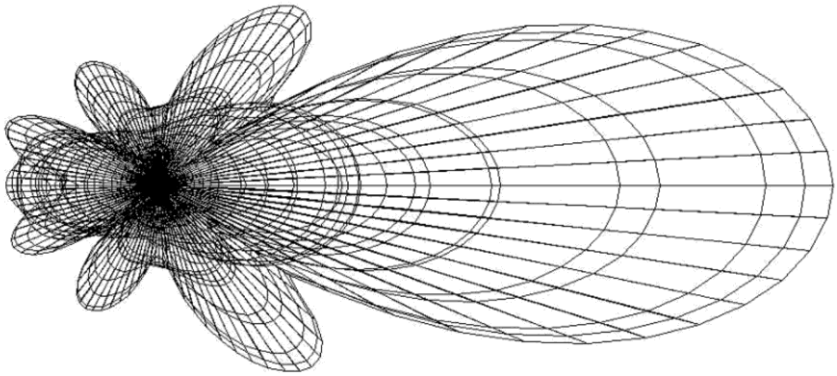
وتعويضاً عن عدم المواءمة الناجم بمعظمه عن المكوّن التفاعلي وما يتبعه من عكس القدرة نحو المرسِل، ارتُئيَ أن تزاد القدرة الزيادة الوافية. وعليه، فقد طُبِّق التوتر المناسب على كل ثنائي قطب.

2.1.1.2 تقييمات المجال البعيد

توخياً للمقارنة على أفضل وجه بين النموذج والهوائيات الحقيقية الممثلة في الشكلين 11 و12، حُسِبت مخططات الإشعاع، فكانت النتائج ما يرد تمثيله في الشكل 16 (المستوي الأفقي)، والشكل 17 (المستوي العمودي)، والشكل 18 (المشهد الأمامي).

الشكل 16

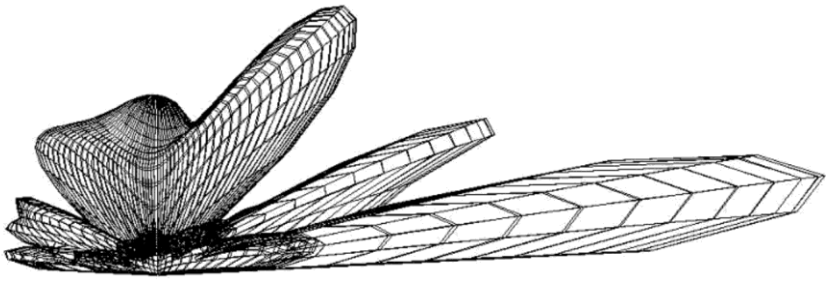
مخطط الإشعاع في المستوي الأفقي



BT.1698-16

الشكل 17

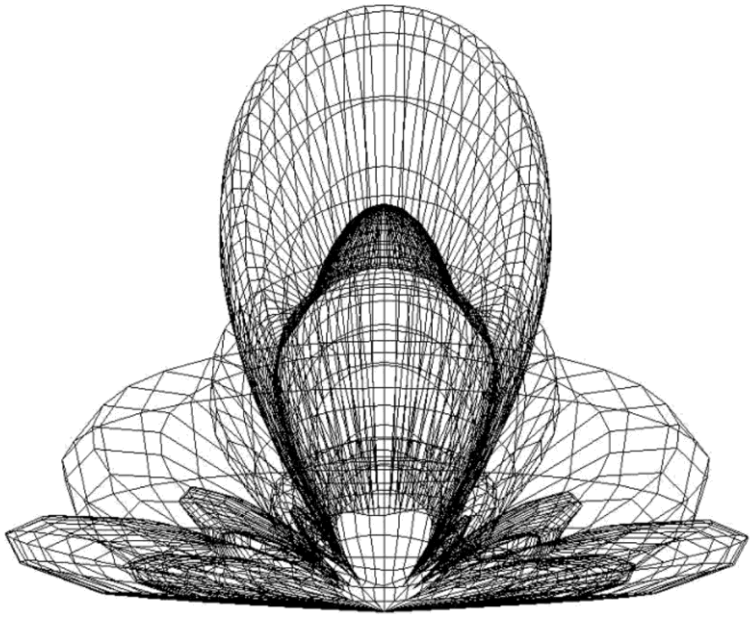
مخطط الإشعاع في المستوي العمودي



BT.1698-17

الشكل 18

مخطط الإشعاع، المشهد الأمامي



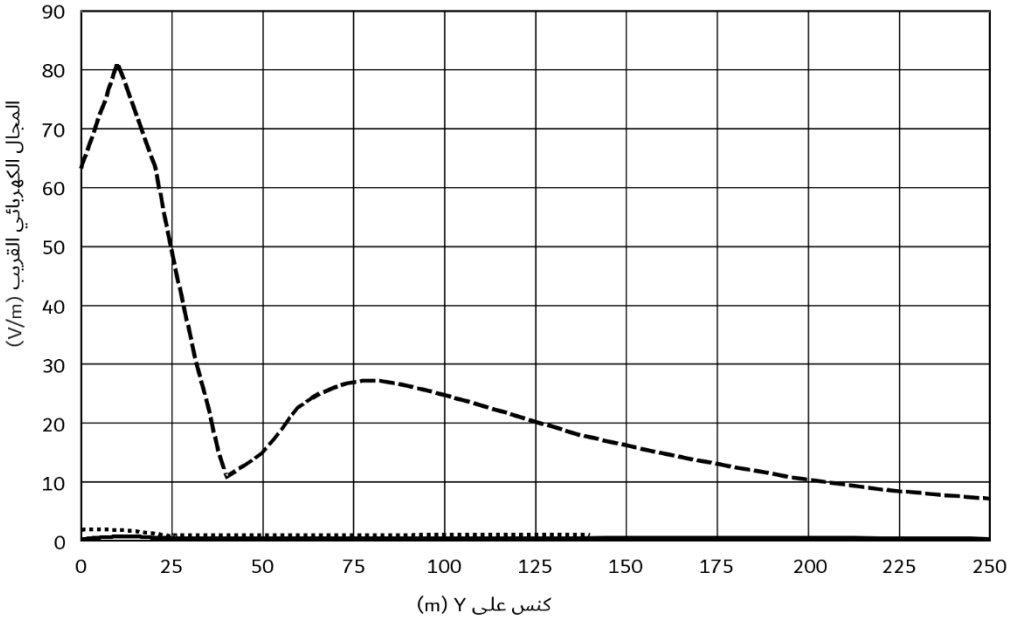
BT.1698-18

3.1.1.2 نتائج توقع شدة المجال في المنطقة القريبة

نُفِّذ توقع عن طريق حساب المكوّنات x وy وz للمجالين E وH، في اتجاه الكسب الأقصى للهوائي (المحور Y)، وعلى ارتفاع 2 m فوق مستوى الأرض (المحور Z = 2). والقيم المحصَّلة بالحساب ممثلة في الشكل 19 (المجال E) والشكل 20 (المجال H). ثم إن التأثير القوي لتضاريس الأرض على عمليات التقييم كما على عمليات القياس من شأنه أن يُدخِل فرقاً إضافياً بين نتائجهما. فتوخياً لإظهار تأثير التضاريس الشديد، حُسِبت أيضاً قيم المجالين E وH مع تغيير ارتفاع نقطة التقييم فوق مستوى الأرض (المحور Z) من 0 إلى 9 m على مسافة ثابتة طولها 60 m (60 = Y) وتأثُّر النتائج بتغيير ارتفاع نقطة التقييم يمثله الشكل 21 (بخصوص المجال E) والشكل 22 (بخصوص المجال H).

الشكل 19

قيمة شدة المجال الكهربائي في المنطقة القريبة، محصلة بالحساب



MHz 13، شدة المجال الكهربائي القريب تبعاً للمسافة. قدرة المرسل: kW 225 عند موصِّل هوائي.
الارتفاع: m 2 عن مستوى الأرض

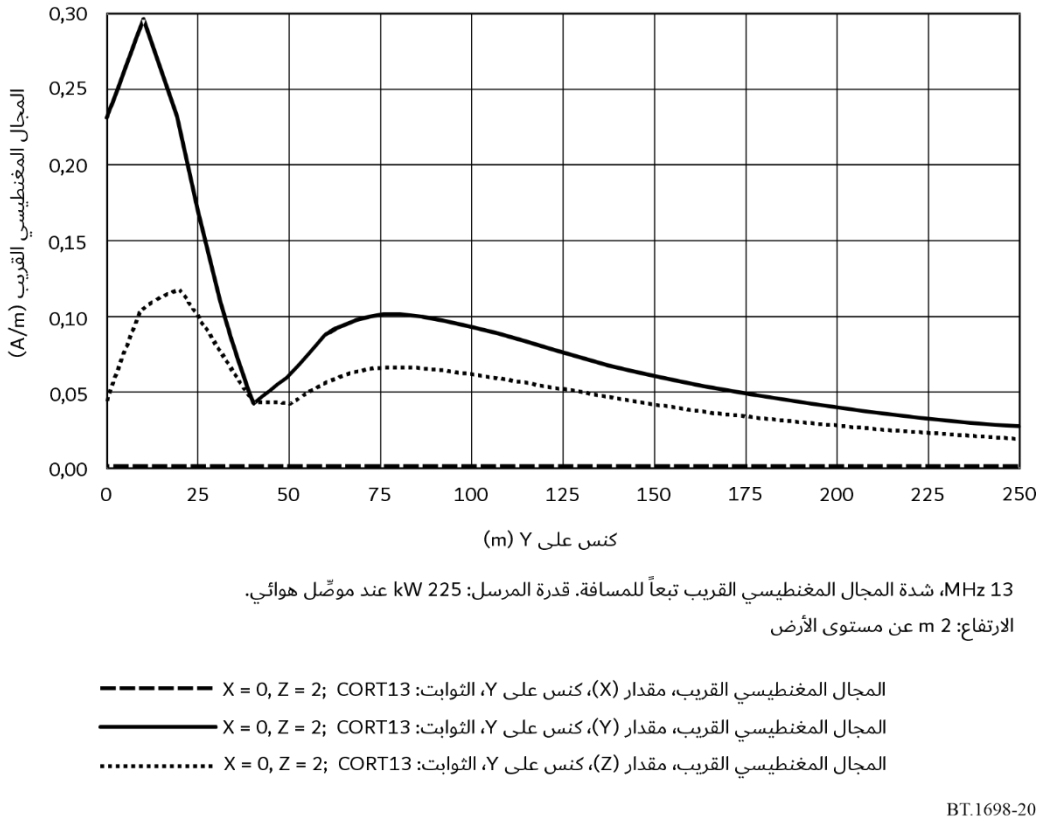
المجال الكهربائي القريب، مقدار (X)، كنس على Y، الثوابت: X = 0, Z = 2; CORT13
المجال الكهربائي القريب، مقدار (Y)، كنس على Y، الثوابت: X = 0, Z = 2; CORT13
المجال الكهربائي القريب، مقدار (Z)، كنس على Y، الثوابت: X = 0, Z = 2; CORT13

BT.1698-19

يعود الإسهام الأهم إلى المكوِّن x. يمثل المحور الأفقي المسافة بالأمتار عن الهوائي (كنس على Y). قيمة Z ثابتة على m 2 (الارتفاع عن مستوى الأرض). شدة مكونات المجال الكهربائي (E) معبَّر عنها بـV/m على المحور العمودي.

الشكل 20

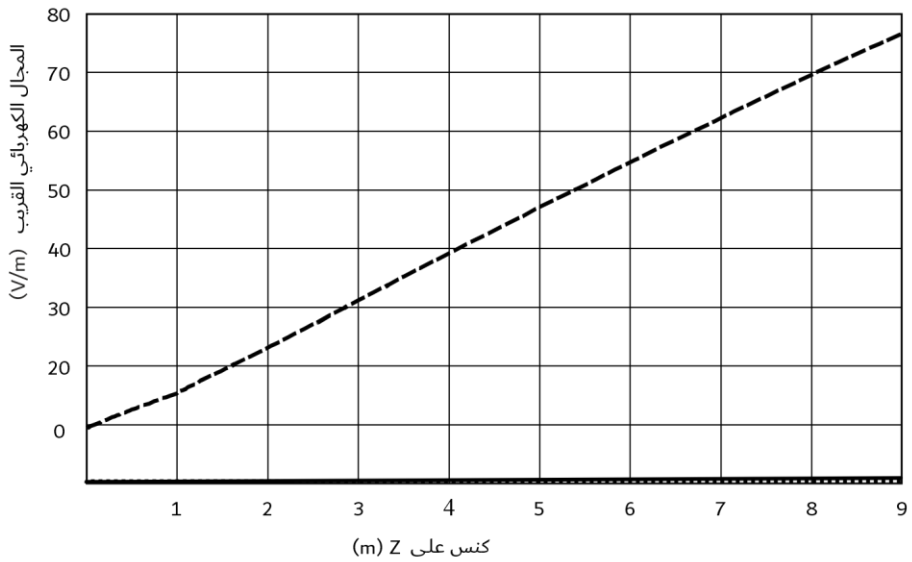
قيمة شدة المجال المغنطيسي في المنطقة القريبة، محصلة بالحساب



يعود الإسهام الأهم إلى المكوّن y المكوّن z أقل، في حين المكوّن x هو 0. يمثل المحور الأفقي المسافة بالأمتار عن الهوائي (كنس على Y). قيمة Z ثابتة على m 2 (الارتفاع عن مستوى الأرض). شدة مكونات المجال المغنطيسي (H) معبَّر عنها بـA/m على المحور العمودي.

الشكل 21

قيمة شدة المجال الكهربائي في المنطقة القريبة، محصلة بالحساب على مسافة m 60 من الهوائي (Y = 60)، وعلى ارتفاعات مختلفة بين 0 و9 (كنس على محور Z)



MHz 13، شدة المجال المهربائي القريب تبعاً للارتفاع على مسافة m 60 من الهوائي.
قدرة المرسل: kW 225 عند موصِّل هوائي.

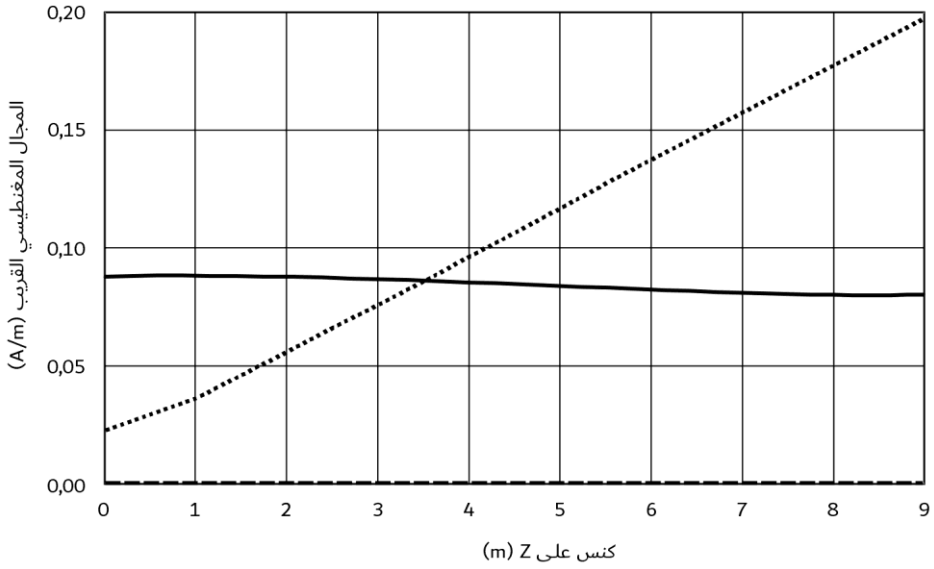
المجال الكهربائي القريب، مقدار (X)، كنس على Z، الثوابت: CORT13 ;X = 0, Y = 60
المجال الكهربائي القريب، مقدار (Y)، كنس على Z، الثوابت: CORT13 ;X = 0, Y = 60
المجال الكهربائي القريب، مقدار (Z)، كنس على Z، الثوابت: CORT13 ;X = 0, Y = 60

BT.1698-21

العلاقة القوية بين قيم E والارتفاع ظاهرة (ليس حاضراً إلا المكون x للمجال E).

الشكل 22

قيمة شدة المجال المغنطيسي في المنطقة القريبة، محصلة بالحساب على مسافة 60 m من الهوائي (Y = 60)، وعلى ارتفاعات مختلفة بين 0 و9 (كنس على محور Z)



13 MHz، شدة المجال المغنطيسي القريب تبعاً للارتفاع على مسافة 60 m من الهوائي.
قدرة المرسل: 225 kW عند موصِّل هوائي.

المجال المغنطيسي القريب، مقدار (X)، كنس على Z، الثوابت: CORT13 ;X = 0, Y = 60
المجال المغنطيسي القريب، مقدار (Y)، كنس على Z، الثوابت: CORT13 ;X = 0, Y = 60
المجال المغنطيسي القريب، مقدار (Z)، كنس على Z، الثوابت: CORT13 ;X = 0, Y = 60

BT.1698-22

العلاقة القوية بين قيم H والارتفاع ظاهرة أيضاً (كلا المكوّنين z وy للمجال H حاضر، وقيمة المكوّن y تكاد تكون ثابتة).

2.1.2 القياسات

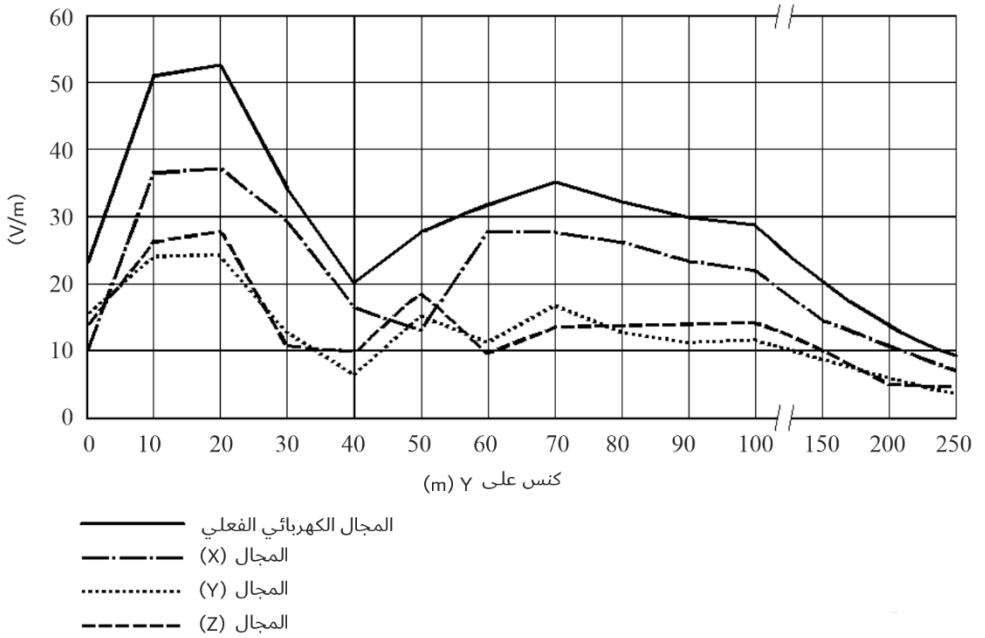
أُجريت القياسات باستعمال مقياس لشدة مجال النطاقات العريضة، منصوب على عربة معزولة عن الكهرباء يحركها مشغِّل متمركز بعيداً عن موقع الهوائي. وبهذه الوسيلة تم تجنّب أي تشويش للمجالين الكهربائي والمغنطيسي.

1.2.1.2 نتائج القياسات

القيم المحصلة بالقياس معروضة في الشكلين 23 (المجال E) و24 (المجال H). والشكلان 23 و24 قابلان للمقارنة المباشرة مع الشكلين 19 و20 على ترتيب التوالي.

الشكل 23

قيم شدة المجال الكهربائي محصلة بالقياس

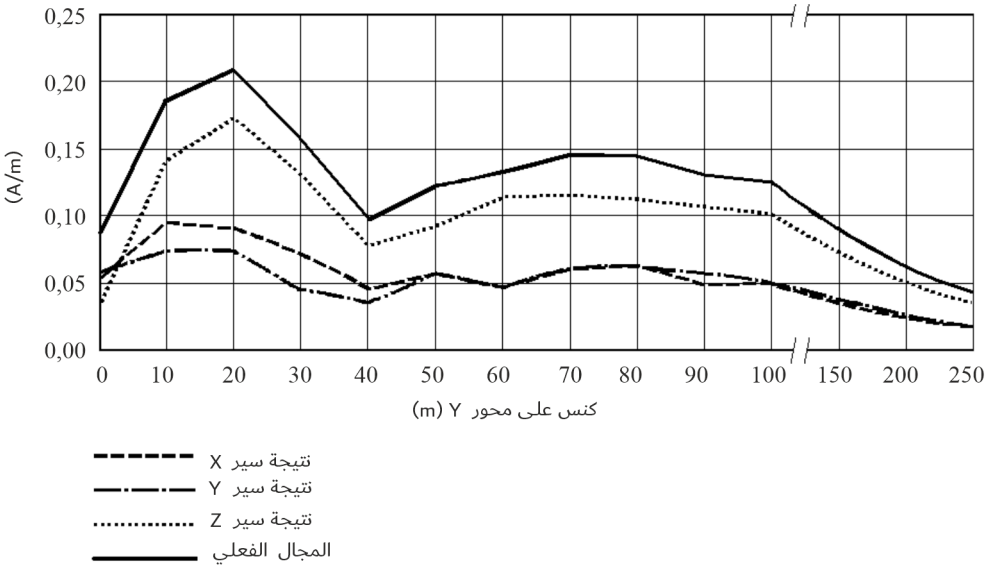


BT.1698-23

يمثل المحور الأفقي المسافة عن الهوائي بالمتر (كنس على Y). وشدة مكوّنات المجال E ممثلة بـV/m على المحور العمودي. المكوّنات الثلاثة x وy وz للمجال E حاضرة، والخط العلوي يمثل القيمة الإجمالية.

الشكل 24

قيمة شدة المجال المغنطيسي محصلة بالقياس



BT.1698-24

يمثل المحور الأفقي المسافة عن الهوائي بالمتر (كنس على محور Y). وشدة مكوّنات المجال H ممثلة بـA/m على المحور العمودي. المكوّنات الثلاثة x وy وz للمجال H حاضرة، والخط العلوي يمثل القيمة الإجمالية.

2.2 MHz 18

1.2.2 التوقعات

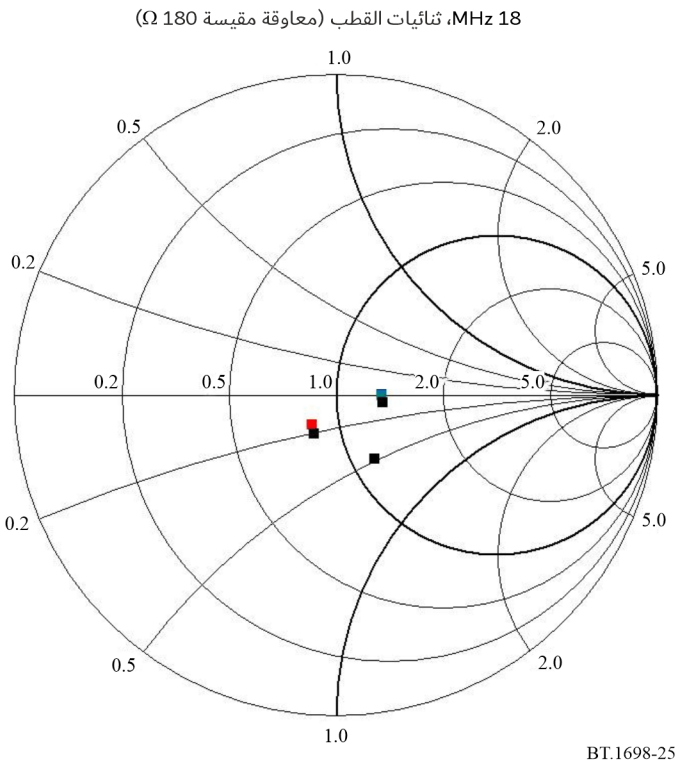
1.1.2.2 ملاحظات على النموذج

لا بد، لكي يكون التناظر على أمثل وجه بين النموذج المتقدم وصفه ونظام الهوائيات الحقيقي، من معرفة دقيقة لكم القدرة في دخل كل ثنائي قطب، نظراً للخسارة الحاصلة في خط النقل وبسبب عدم المواءمة.

وتوخياً لإمداد كل من ثنائيات القطب بقيمة التوتر المناسبة، جرى في المحاكاة حساب معاوقة الدخل لكل واحد من ثنائيات القطب. والقيم معروضة في الشكل 25.

الشكل 25

معاوقة دخل ثنائيات القطب، المُقيَّسة بـ180 Ω



ثم اعتُمِد بشأن كل ثنائي قطب قيمة واحدة للمقاومة تساوي 180 Ω، وهذه هي القيمة الوسطية المحصلة بالمحاكاة. ويسترعى الانتباه إلى أن هذا القرار قد يكون هو سبب عدم الدقة في نتائج التوقعات.

نظراً لانخفاض المكوّنات التفاعلية لمعاوقة الدخل المعقدة، لا يلزم إدخال تعديلات على قدرة المرسل للتعويض عن خسارة القدرة بسبب عدم المواءمة والانعكاس الناجم عنه، بين المرسل والهوائي.

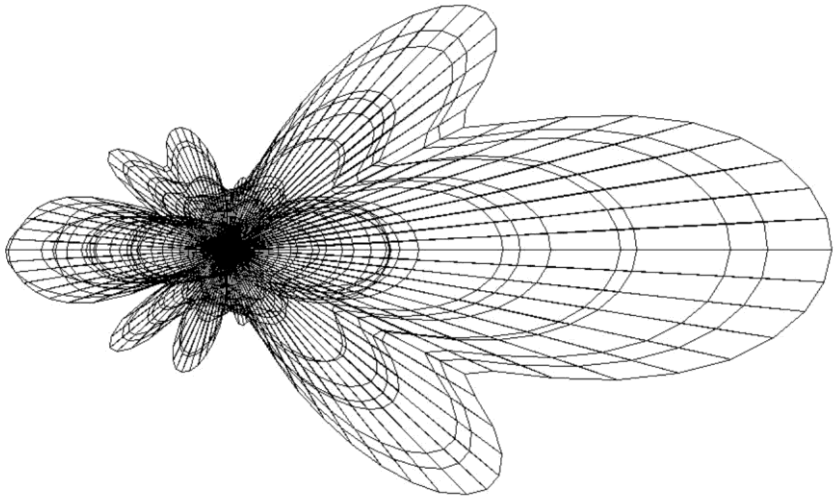
يسترعى الانتباه إلى التشتت الضئيل – لكنه غير معدوم – في قيم المقاومة قرب 180 Ω، والغياب الكبير للمكوّنات التفاعلية.

2.1.2.2 تقييمات المجال البعيد

توخياً للمقارنة على أفضل وجه بين النموذج والهوائيات الحقيقية الممثلة في الشكلين 11 و12، حُسِبت مخططات الإشعاع، فكانت النتائج ما يرد تمثيله في الشكل 26 (المستوي الأفقي)، والشكل 27 (المستوي العمودي)، والشكل 28 (المشهد الأمامي).

الشكل 26

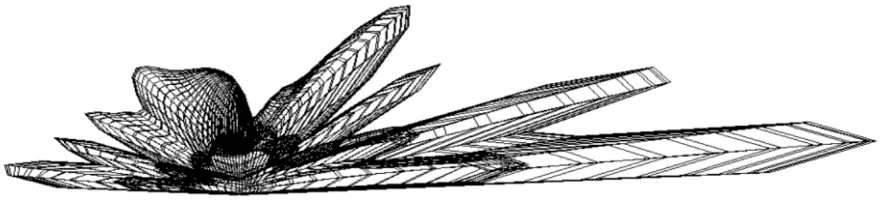
مخطط الإشعاع في المستوي الأفقي



BT.1698-26

الشكل 27

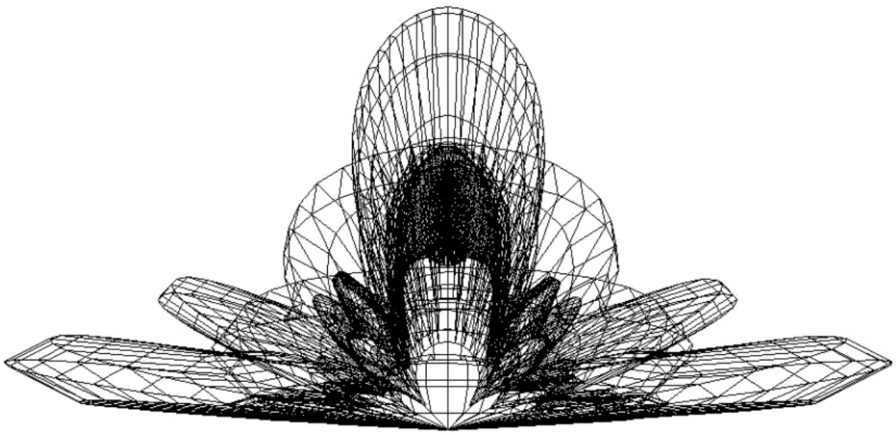
مخطط الإشعاع في المستوي العمودي



BT.1698-27

الشكل 28

مخطط الإشعاع، المشهد الأمامي



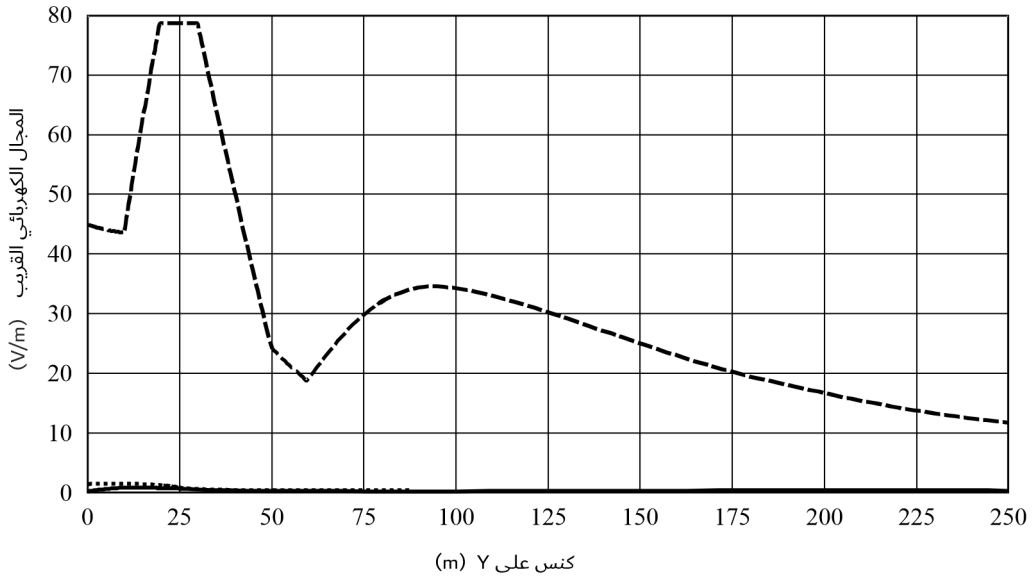
BT.1698-28

3.1.2.2 نتائج توقع شدة المجال في المنطقة القريبة

نُفِّذ توقع عن طريق حساب المكوِّنات x وy وz للمجالين E وH، في اتجاه الكسب الأقصى للهوائي (المحور Y)، وعلى ارتفاع 2 m فوق مستوى الأرض (المحور Z = 2). والقيم المحصَّلة بالحساب ممثلة في الشكل 29 (المجال E) والشكل 30 (المجال H). ثم إن التأثير القوي لتضاريس الأرض، على عمليات التقييم كما على عمليات القياس، من شأنه أن يُدخِل فرقاً إضافياً بين نتائجهما. فتوخياً لإظهار تأثير التضاريس الشديد، حُسِبت أيضاً قيم المجالين E وH مع تغيير ارتفاع نقطة التقييم فوق مستوى الأرض (المحور Z) من 0 إلى 9 m على مسافة ثابتة طولها 60 m (Y = 60) وتأثر النتائج بتغيير ارتفاع نقطة التقييم يمثله الشكل 31 (بخصوص المجال E) والشكل 32 (بخصوص المجال H).

الشكل 29

قيمة شدة المجال الكهربائي في المنطقة القريبة



18 MHz، شدة المجال الكهربائي القريب تبعاً للمسافة. قدرة المرسل: 200 kW عند موصِّل هوائي.
الارتفاع: 2 m عن مستوى الأرض

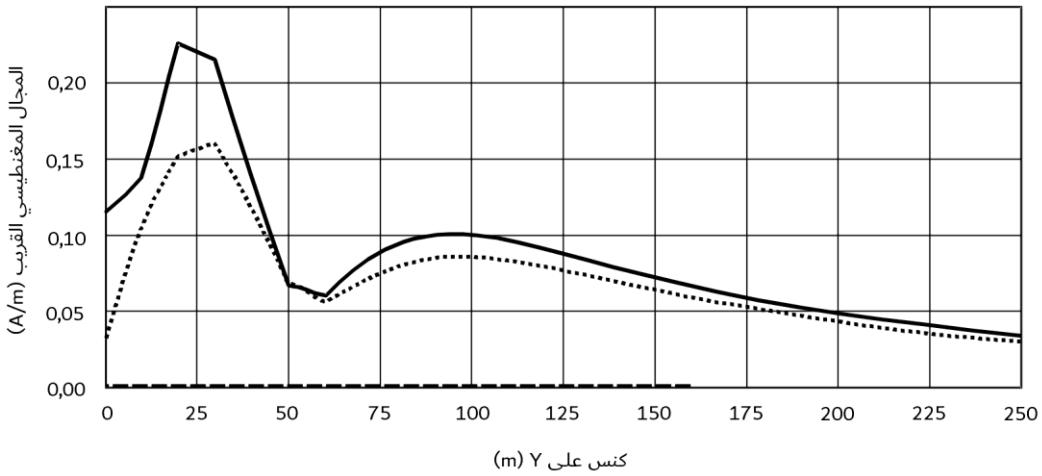
المجال الكهربائي القريب، مقدار (X)، كنس على Y، الثوابت: CORT18 ;X = 0, Z = 2
المجال الكهربائي القريب، مقدار (Y)، كنس على Y، الثوابت: CORT18 ;X = 0, Z = 2
المجال الكهربائي القريب، مقدار (Z)، كنس على Y، الثوابت: CORT18 ;X = 0, Z = 2

BT.1698-29

يعود الإسهام الأهم إلى المكوِّن x. يمثل المحور الأفقي المسافة بالأمتار عن الهوائي (كنس على Y). قيمة Z ثابتة على 2 m (الارتفاع عن مستوى الأرض). شدة مكونات المجال الكهربائي (E) معبَّر عنها بـ V/m على المحور العمودي.

الشكل 30

قيمة شدة المجال المغنطيسي في المنطقة القريبة، محصلة بالحساب



MHz 18، شدة المجال المغنطيسي القريب تبعاً للمسافة. قدرة المرسل: kW 200 عند موضِّل هوائي.
الارتفاع: m 2 عن مستوى الأرض

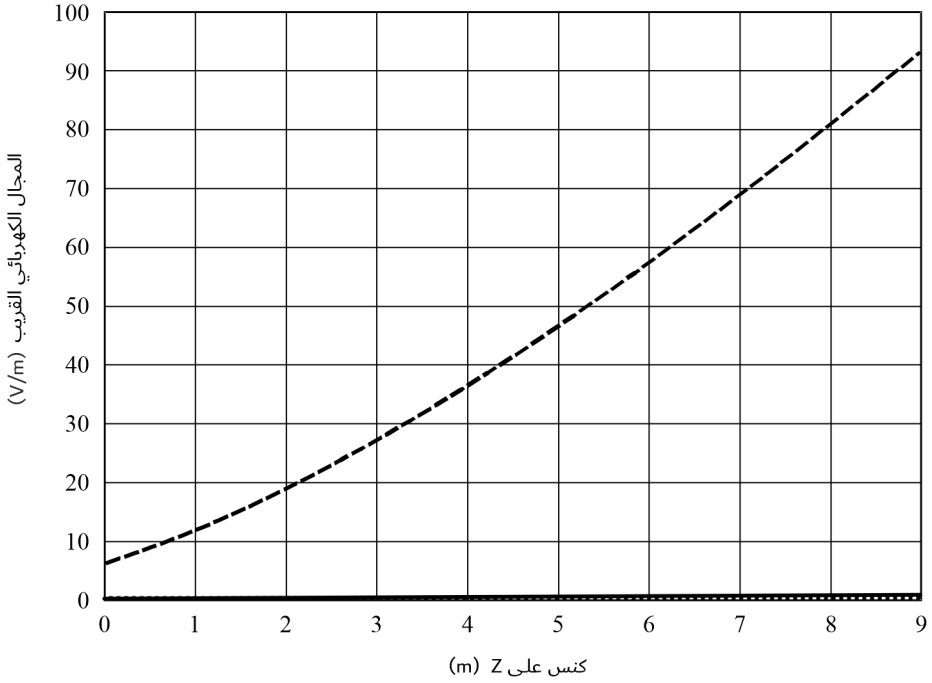
المجال المغنطيسي القريب، مقدار (X)، كنس على Y، الثوابت: CORT18 ;X = 0, Z = 2
المجال المغنطيسي القريب، مقدار (Y)، كنس على Y، الثوابت: CORT18 ;X = 0, Z = 2
المجال المغنطيسي القريب، مقدار (Z)، كنس على Y، الثوابت: CORT18 ;X = 0, Z = 2

BT.1698-30

يعود الإسهام الأهم إلى المكوِّن y. المكوِّن z أقل، في حين أن المكوِّن x هو 0. يمثل المحور الأفقي المسافة بالأمتار عن الهوائي (كنس على Y). قيمة Z ثابتة على m 2 (الارتفاع عن مستوى الأرض). شدة مكونات المجال المغنطيسي (H) معبَّر عنها بـ A/m على المحور العمودي.

الشكل 31

قيمة شدة المجال الكهربائي في المنطقة القريبة، محصلة بالحساب على مسافة 60 m من الهوائي (Y = 60)، وعلى ارتفاعات مختلفة بين 0 و9 (كنس على Z)



18 MHz، شدة المجال الكهربائي القريب تبعاً للارتفاع على مسافة 60 m من الهوائي.
قدرة المرسل: 200 kW عند موصِّل هوائي.

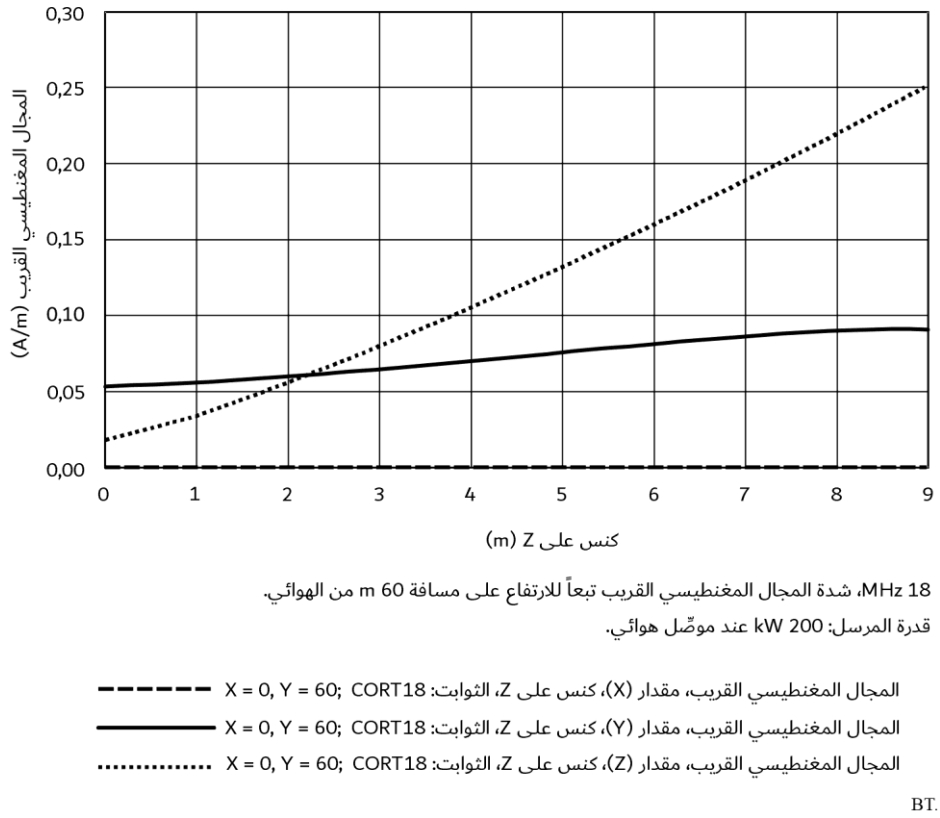
المجال الكهربائي القريب، مقدار (X)، كنس على Z، الثوابت: X = 0, Y = 60; CORT18
المجال الكهربائي القريب، مقدار (Y)، كنس على Z، الثوابت: X = 0, Y = 60; CORT18
المجال الكهربائي القريب، مقدار (Z)، كنس على Z، الثوابت: X = 0, Y = 60; CORT18

BT.1698-31

العلاقة القوية بين قيم E والارتفاع ظاهرة (ليس حاضراً إلا المكون x للمجال E).

الشكل 32

قيمة شدة المجال المغنطيسي في المنطقة القريبة، محصلة بالحساب على مسافة 60 m من الهوائي (Y = 60)، وعلى ارتفاعات مختلفة بين 0 و9 (كنس على Z)



العلاقة القوية بين قيم H والارتفاع ظاهرة أيضاً (كلا المكوّنين z وy للمجال H حاضر، وقيمة المكوّن y ثابتة).

2.2.2 القياسات

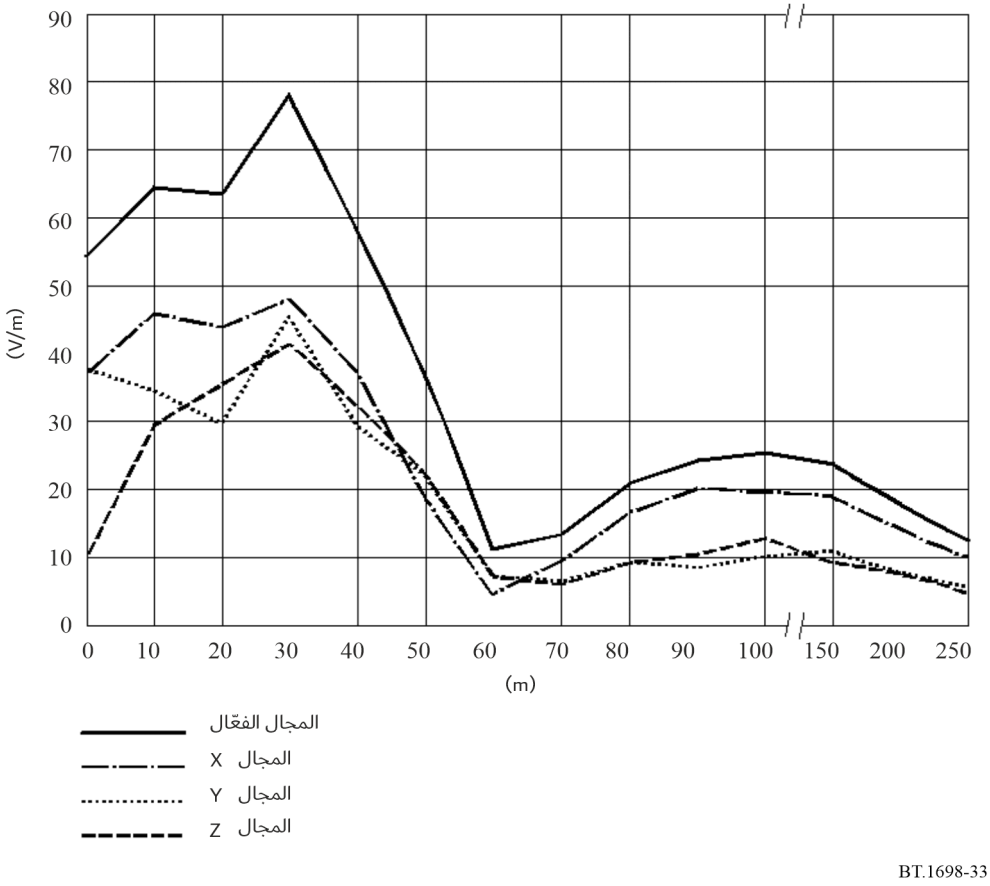
أُجريت القياسات باستعمال مقياس لشدة مجال النطاقات العريضة، منصوب على عربة معزولة عن الكهرباء يحركها مشغِّل متمركز بعيداً عن موقع الهوائي. وبهذه الوسيلة تم تجنّب أي تشويش للمجالين الكهربائي والمغنطيسي.

1.2.2.2 نتائج القياسات

القيم المحصلة بالقياس معروضة في الشكلين 33 (المجال E) و34 (المجال H). والشكلان 33 و34 قابلان للمقارنة المباشرة مع الشكلين 28 و29 على التوالي.

الشكل 33

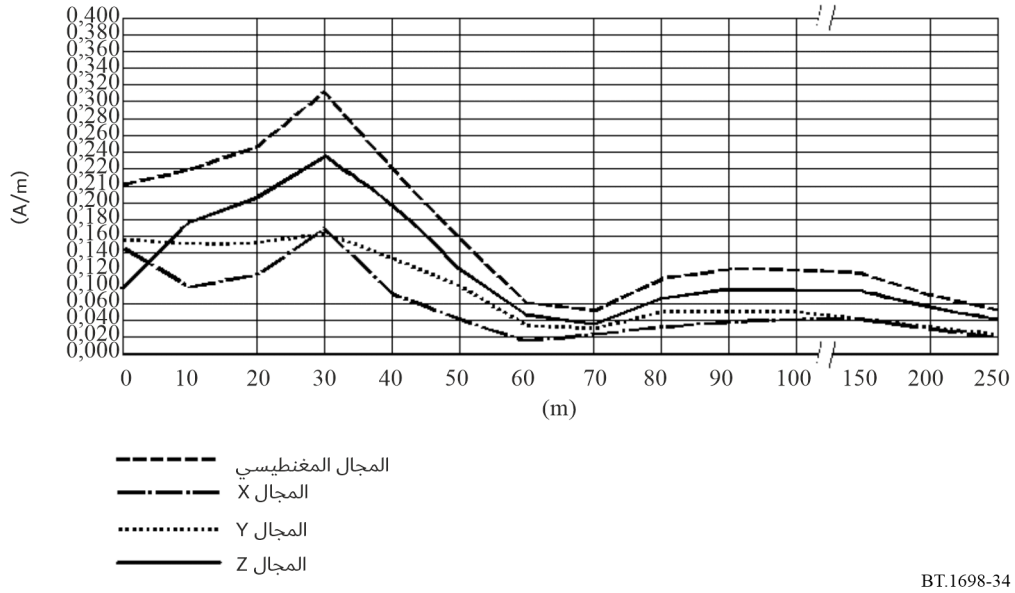
قيم شدة المجال الكهربائي في المنطقة القريبة، محصلة بالقياس



يمثل المحور الأفقي المسافة عن الهوائي بالمتر (كنس على Y). وشدة مكوّنات المجال E ممثلة بـV/m على المحور العمودي. المكوّنات الثلاثة x وy وz للمجال E حاضرة، والخط العلوي يمثل القيمة الإجمالية.

الشكل 34

قيمة شدة المجال المغنطيسي في المنطقة القريبة، محصلة بالقياس



يمثل المحور الأفقي المسافة عن الهوائي بالمتر (كنس على Y). وشدة مكوّنات المجال H ممثلة بA/m على المحور العمودي. المكوّنات الثلاثة x وy وz للمجال H حاضرة، والخط العلوي يمثل القيمة الإجمالية.

3.2 مقارنة بين نتائج القياسات ونتائج التوقعات لشدة المجال في المنطقة القريبة

1.3.2 MHz 13

على مسافة أقل من 40 m أعطى التوقع نتائج، بخصوص كلا المجالين، E وH، أعلى من نتائج القياس. والقيم العليا لكلا نظام المجالين، E وH وجدت على مسافة 10-20 m عن الهوائي، بكلتا الطريقتين، المحاكاة والقياس.

وعلى مسافة 40 m من الهوائي، ظهرت قيمة "دنيا" في نتائج كلتا الطريقتين، التوقع والقياس، لكنها في التوقع أدنى منها في القياس.

والقيمة "العليا" الثانية بلغت ذروتها، في كلتا الحالتين، على مسافة 75 m من الهوائي؛ وفي هذه الحالة جاءت القيم المحصلة بالمحاكاة أقل من المحصلة بالقياس.

أما على مسافات أكبر، مثل 250 m عن الهوائي، فإن النتائج بخصوص جميع المجالات متساوية تقريباً، في التوقع كما في القياس.

2.3.2 MHz 18

على مسافة أقل من 40 m أعطى التوقع نتائج، بخصوص كلا المجالين، E وH، أعلى من نتائج القياس. والقيم العليا لكلا نظام المجالين، E وH وجدت على مسافة 10–20 m عن الهوائي، بكلتا الطريقتين، المحاكاة والقياس.

والقيمة "العليا" الثانية وُجدت، بالتوقع والقياس، بخصوص كلا المجالين، E وH، على مسافة 100 m من الهوائي، وجاءت القيمة المحصلة بالقياس للمجال E أقل. وعلى مسافة أبعد من 60 m عن الهوائي، يُفترض أن المجال H يعطي نفس القيم بطريقة التوقع كما بطريقة القياس.

3 استنتاجات

أتت بنتائج مهمة المقارنةُ بين القيم المحصلة بالقياس والقيم المتوقعة بالحساب لكلا المجالين، الكهربائي (E) والمغنطيسي (H)، مع تردد MHz 13 وتردد MHz 18.

على العموم، لا تتطابق القيم تماماً، أمر كان ممكناً توقعه. إلا أنه لا فروق كبيرة بينها، بالنظر إلى أن الأجهزة غير يقينية، وأن سطح الأرض ليس مستوياً تماماً قرب الهوائي (وهذا الأمر لم يراعَ في المحاكَيات، حتى حين كان من الواضح تبعية شدة المجال بقوة لارتفاع نقطة القياس)، وأن بساطة النموذج مفروضة. والفروق كبيرة قرب الهوائي (يعني أن القيمة العليا الأولى تظهر على بعد نحو m 10) حتى إنها تصل إلى 50%، ثم تتناقص كلما كبرت المسافة حتى تصير زهيدة على مسافة m 250.

وتُعزى هذه الفروق إلى مصاعب إجراء القياسات في المجال القريب، واللايقين الملازم لأجهزة القياس، وبساطة النموذج، ووجود بعض الأشياء قرب الهوائي (بنى معدنية، العارضتان المستعملتان لتثبيت ثنائيات القطب، شبكة المواءمة) لم تراعَ في النموذج، كما لم تراعَ شبكة المواءمة وإرسالاتها. أخيراً، جرت نمذجة أرض الموقع بقيم كهربائية نمطية.

ففي سبيل تنفيذ توقعات المجالين E وH باستعمال نموذج، نوصي بما يلي:

نموذج الهوائي: يلزم أن تُدرس بعناية الأبعاد المادية للعناصر المشعة والعناصر المنفعلة، وكذلك معاوقة الدخل المعقدة للنظام. فربما كان من المستحسن لتبسيط نظام معقد، أي صفيف المشاعيع، أن يستعاض عن شبكة المواءمة والتغذية بعدد مساوٍ من مولدات التوتر، ويُسلَّط مولِّد على دخل كل مشعاع. وإذا استُبعدت فكرة شبكة المواءمة، فعندئذ يلزم التعويض عما يلي:

عدم المواءمة المحتمل بين المولدات والمشاعيع، وذلك بإدخال عناصر مواءمة مصطنعة أو شبكات بسيطة، أو تعديل القدرة المخصصة للمرسل. والنتيجة النهائية لا تتأثر مطلقاً بوجود عيوب مواءمة ضئيلة لا تستلزم نمذجة.

تقسيم القطع إلى قطع أصغر: يكون كافياً أن تمثَّل أنظمة الهوائيات السلكية بقطع لا يتجاوز طولها λ/20.

نموذج أرضية الموقع: من الضروري إعطاء القيم بالضبط فيما يخص السماحية والإيصالية، خصوصاً في حالة مجال كهربائي مستقطَب أفقياً.

قدرة المرسل: من الأهمية بمكان أن تؤخذ في الحساب الخسارة في خطوط الإرسال، وكذلك شبكة المواءمة، ومقاومة المرابط، وسوء المواءمة للشحنة. ويُستنسَب في بعض الحالات تعديل القيمة المضبوطة للقدرة تعديلاً مصطنعاً، من أجل مراعاة الأسباب المتنوعة للخسارة، دون تعقيد نموذج منظومة الهوائيات.

ارتفاع نقاط القياس عن مستوى الأرض: هذه المعلَمَة هامة جداً في كثير من الحالات، إذا كان المقصود هو المقارنة بين القيم المحصَّلة بالقياس والقيم المتوقعة بالحساب. وبالفعل، يلاحَظ التأثير القوي للارتفاع على قيم المجالين، ثم إذا كانت نمذجة أرضية الموقع قد جرت على أساس أنها مستوية، تصادَف أخطاء كبيرة عند مقارنة نتائج الحسابات بنتائج القياسات. ففي كل هذه الحالات حيث تكون المشاعيع في جوار الأرضية ولا تكون هذه مستوية تماماً، يجب التحفظ بشأن نتائج التوقعات.

اختيار الشفرة: يبدو أن المحاكاة المعتمدة على طريقة العزوم (MOM) مفيدة وسهلة الاستعمال في حالات الهوائيات السلكية، المعروفة جيداً خصائصها الطبيعية والكهربائية. ثم إنه بالإمكان وسهل جداً تبسيط النموذج تبعاً لعدد محدود من القواعد، بدون الخسارة في دقة النتائج.

المرفق 3
بالملحق 1

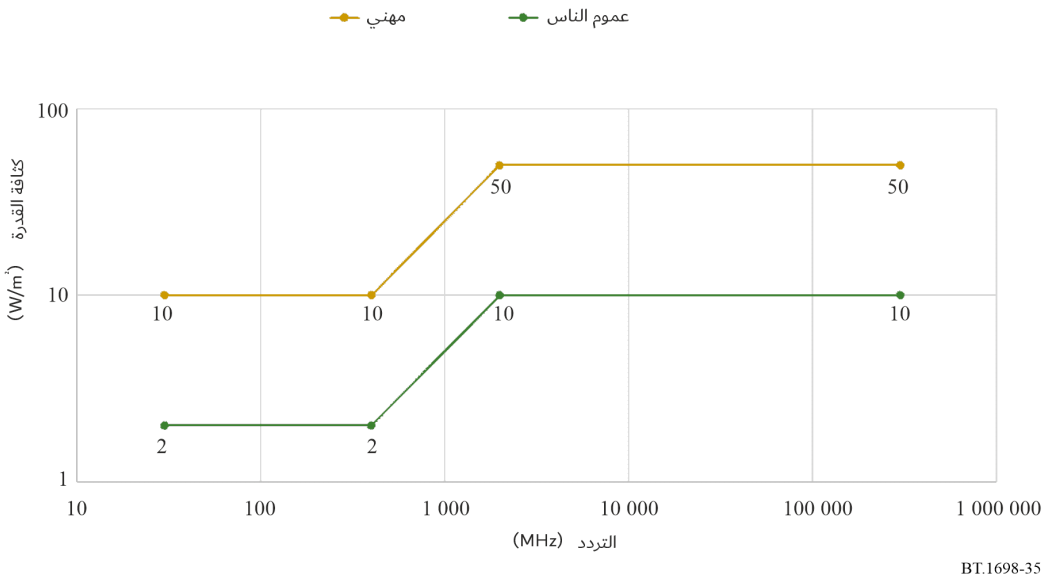
الحدود والمستويات الدولية

كما ذُكر في المقدمة، لا يوجد معيار عالمي واحد يُستخدم لوضع الحدود. ولكن إرشاد اللجنة الدولية للحماية من الإشعاعات غير المؤيّنة (ICNIRP) ومعيار IEEE معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) كليهما يتبعان نهجاً مماثلاً. والهدف من ذلك هو وضع حدود بدلالة القيود الأساسية (مثل معدل الامتصاص النوعي) التي يصعب قياسها عملياً؛ ثم تقديم مستويات مرجعية إضافية بدلالة شدة المجال التي يمكن قياسها بسهولة أكبر ويمكن استخدامها للمساعدة في تحديد الالتزام.

والتوصية ITU-T K.91 المعنونة "إرشادات لتقدير وتقييم ومراقبة التعرض البشري للمجالات الكهرمغنطيسية للترددات الراديوية"، في التذييل الأول المعنون "حدود التعرض" تعتمد على المبادئ التوجيهية اللجنة الدولية للحماية من الإشعاعات غير المؤيّنة (ICNIRP) (2010 [2] و2020 [1])، ومعيار معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات IEEE C95.1-2019 [3] وتقرير المسألة 7/2 لقطاع تنمية الاتصالات لعام 2021. ويوصِّف التذييل الأول المبادئ التوجيهية للجنة ICNIRP (2010) و(2020) السارية، ويشرح جداول وأشكال المبادئ التوجيهية ICNIRP (2020)، ويورد تفاصيل المعيار IEEE C95.1-2019 ويشرح التعرض المتزامن لمصادر متعددة.

الشكل 35

الجدول 5 من المبادئ التوجيهية ICNIRP (2020)، بشأن كثافة قدرة التعرض المهني
مقابل تعرض العامة/عموم الناس في المدى الترددي MHz 30 – GHz 300

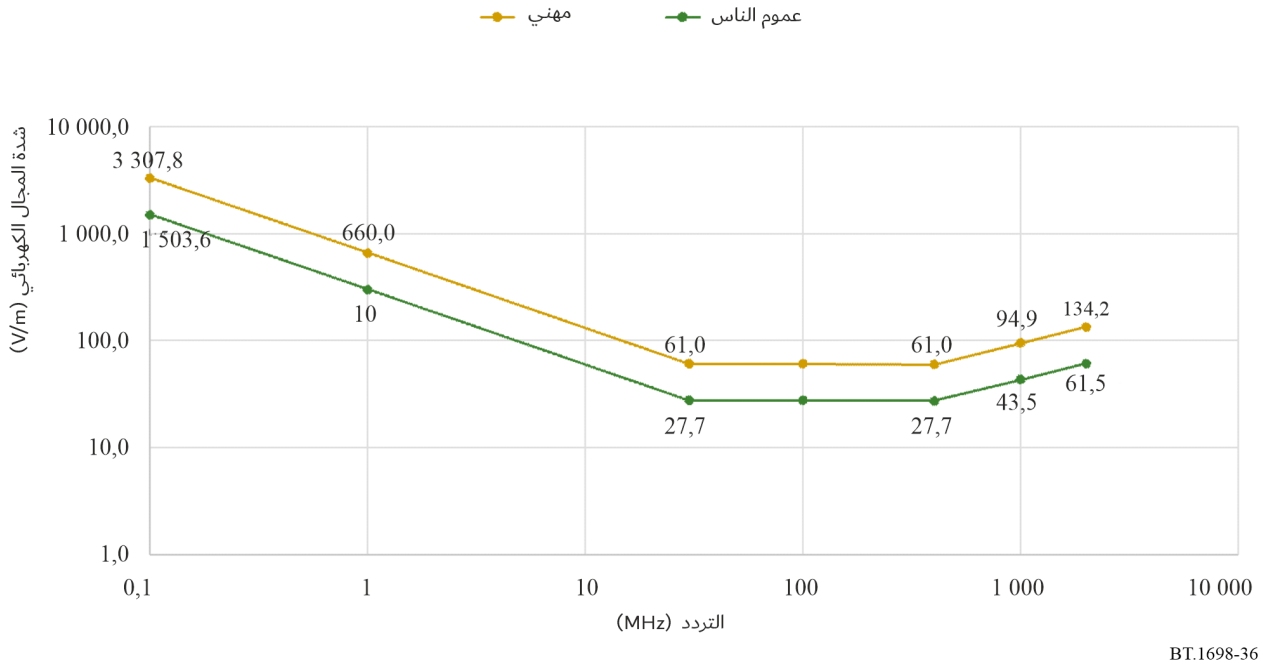


يبين الشكل 35 السابق والشكل 36[3]، [4] المراجع في الفصل 9 عام 2021 الاختلافات بين شدة المجال وفق المبادئ التوجيهية للجنة الدولية للحماية من الإشعاعات غير المؤيّنة (ICNIRP) (2020) وبين مستويات التعرض لكثافة القدرة في التعرُّض المهني وتعرُّض عموم الناس، والمحسوب متوسطها خلال 30 دقيقة وعلى كامل الجسم. فنسبة كثافة القدرة البالغة 5 في الجدول 5 من وثيقة المبادئ التوجيهية للجنة ICNIRP (2020) (في المدى الترددي 30-400 MHz، تبلغ نسبة الواط 10/50 مثلاً) تنتج نسبة V/m البالغة $\sqrt{5} \approx 2.2 = 61.0/27.7$.

[3] Mazar، عام 2016، Wiley، "إدارة الطيف الراديوي: السياسات واللوائح والتقنيات" (مراجَع عام 2021) الفصل 9، الشكلان 6.9 و7.9. انظر أيضاً الشكل 1.I في التوصية ITU-T K.91.

الشكل 36

مقارنة الجدول 5 من وثيقة المبادئ التوجيهية للجنة ICNIRP (2020) لتعرُّض المهني/تعرُّض عموم الناس في المدى الترددي 0,1 MHz-2 000 MHz والمحسوب متوسطه خلال 30 دقيقة وعلى كامل الجسم



وفي أبريل 2022، نشرت اللجنة الدولية للحماية من الإشعاعات غير المؤيِّنة (ICNIRP) بياناً جديداً بعنوان "وصف لنظام إرشادات ICNIRP المستقل لأفضل الممارسات بشأن حماية الأشخاص والبيئة من التعرض للإشعاع غير المؤين".

المرفق 4
بالملحق 1

مزيد من التفاصيل بشأن التشكيل

1 خصائص البث الراديوي

تصنِّف لوائح الراديو عمليات البث من المرسِلات الراديوية تبعاً لاتساعات النطاق المطلوبة، ولخصائص الإرسال الأساسية والاختيارية. ويتكون التصنيف الكامل من تسعة سمات ولكن، عند النظر في قضايا السلامة المتصلة بالترددات الراديوية، لا يؤخذ إلا بالسمات الأساسية الثلاث، كما يلي:

- نمط تشكيل الموجة الحاملة الرئيسية — السمة 5
- طبيعة الإشارة (أو الإشارات) التي تشكل الموجة الحاملة الرئيسية — السمة 6
- نمط المعلومات المقصود إرسالها — السمة 7

يستند الجدول 2 إلى المعلومات التي تتضمنها لوائح الراديو، ويعرض مختلف السمات المستعمَلة في تصنيف الخصائص الأساسية الثلاث للإرسال الراديوي.

الجدول 2

السمات المستعملة، ذات الصلة بالإذاعة، لتعريف صنف البث، استناداً إلى المعلومات المعطاة في لوائح الراديو

السمة 5 نمط تشكيل الموجة الحاملة الرئيسية		السمة 6 طبيعة الإشارات المشكِّلة للموجة الحاملة الرئيسية		السمة 7 نمط المعلومات المقصود إرسالها	
A	تشكيل اتساع: نطاق جانبي مزدوج	1	قناة وحيدة تحتوي: معلومات تماثلية	E	مهاتفة بما فيها إذاعة صوتية
R	تشكيل اتساع: نطاق جانبي وحيد، موجة حاملة مخفضة أو متغيرة المستوى	7	قناتان أو قنوات تحتوي: معلومات مكمّاة أو رقمية	F	تلفزيون (فيديو)
J	تشكيل اتساع: نطاق جانبي وحيد، الموجة الحاملة محذوفة	9	قناتان أو قنوات تحتوي: خليط من قنوات تماثلية ورقمية		
C	تشكيل اتساع: نطاق جانبي متبقٍّ				
X	حالات غير مشمولة بطريقة أخرى				

ويحتوي الجدول 3 على تفاصيل أكثر أصناف البث شيوعاً للخدمة الإذاعية.

الجدول 3

أكثر أصناف البث شيوعاً للخدمة الإذاعية

النظام الإذاعي	وصف البث	صنف البث
صور تلفزيونية تماثلية	VSB	C3F
صوت تلفزيوني تماثلي	صوت FM أو AM	A3E أو F3E
ATSC	VSB	C7W
DVB-T/T2/H	COFDM	X7F
ISDB-T	SOFDM	X7F
ISDB-T (نظام F متعدد الوسائط)	OFDM	X7W
T-DMB	COFDM	X7W
T-DAB	COFDM	X7E
DRM	COFDM	X7E
إذاعة صوتية HF/MF/LF	AM	A3E / A8E
إذاعة صوتية FM	FM	F3E / F8E

2 التعبير عن قدرة المرسل وشدة المجال بنمط التشكيل

يمكن الحصول على معلومات عن قدرة المرسل المزوَّد بها الهوائي وعن نمط التشكيل، من المسؤولين عن تشغيل التجهيز في موقع ما. ومن المهم معرفة ما إذا كانت قدرة المرسِل معبراً عنها بقدرة الموجة الحاملة، P_c، أو القدرة المتوسطة، P_m، أو قدرة الذروة، P_p، لكي يمكن مقارنة القيم المحصَّلة بالقياس أو بالحساب مقارنة دقيقة بالمستويات المرجعية.

لنأخذ مثالاً على ذلك مرسل إذاعة صوتية بالموجات الهكتومترية (MF) (أي إرسال من النمط A3E). ويُفترَض أن الحسابات والقياسات روعي فيها قدرة الموجة الحاملة فقط، لكن المستويات المرجعية روعي فيها مكوِّنات التشكيل أيضاً (من حيث قدرة المرسل هذه القدرة هي المتوسطة). ويُفترَض بالإضافة إلى ذلك أنه لا يُستعمَل إلا القيم الفعالة.

ولا بد للمقارنة بين القيم المحصَّلة بالقياس أو بالحساب والمستويات المرجعية، من إجراء أحد التحويلين التاليين:

– تعديل القيم المحصَّلة بالقياس أو بالحساب بحيث تتضمن مكوِّنات التشكيل؛

– تعديل المستويات المشتقة بحيث تطابق قيم قدرة الموجة الحاملة فقط، أي بدون مكوِّنات التشكيل.

ويعطي الجدول 4 عوامل الضرب التي تربط أنماط ترميز القدرة بعضها ببعض (وتعريف أنماط الترميز هذه موجود في لوائح الراديو). ففي حالة إرسال تصنيفه A3E، مشار إليه بـ A*E في الجدول 4، نستطيع أن نشاهد أن القدرة المتوسطة، P_m، تساوي 1,5 مرة قدرة الموجة الحاملة، P_c.

ويفترض الجدول 4 التشكيل بعمق 100%. ومن الناحية العملية، كثيراً ما يكون عمق تشكيل مرسل إذاعي أقل من ذلك. ومرة أخرى، يُستشهد بمثال إرسال تصنيفه A3E، ولكن بعمق التشكيل m، حيث $m = 1$، تمثل 100%، وتكون ذروة القدرة $(1 + m)^2 P_c$، ومتوسط القدرة $[1 + 2(m/2)^2]P_c$.

ملاحظة: تتعلق القيم المذكورة أعلاه بالقدرات ومن ثم يجب استعمال الجذر التربيعي لعوامل التحويل الواردة في الجدول 4 عند التعامل مع شدة المجال. وبالتالي، في المثال أعلاه بشأن راديو AM، ينبغي ضرب شدة المجال الفعالة (RMS) للموجة الحاملة فقط بالجذر $\sqrt{1,5}$ لإعطاء شدة المجال الفعالة الشاملة لمكونات التشكيل. وعلى العكس من ذلك، ينبغي تقسيم المستوى المشتق (بما في ذلك مكونات التشكيل) على $\sqrt{1,5}$ لإعطاء مستوىً مشتق مكافئ للموجة الحاملة فقط.

ويمكن حساب القيمة الفعالة (RMS) لشدة المجال في المجال البعيد من القدرة المعروفة باستخدام المعادلة (7)؛ ويبين الجدول 5 النمط المناسب من القدرة الواجب استعماله (أي P_m أو P_p).

الجدول 4

العلاقة بين قدرة الموجة الحاملة والقدرة المتوسطة وذروة القدرة والقدرة الآنية القصوى
بخصوص أصناف إرسال مختلفة (الأرقام تمثل أسوأ الحالات)

صنف الإرسال (الخصائص الأساسية) (1)، (2)	نمط القدرة المعروفة								
	قدرة الموجة الحاملة، P_c			القدرة المتوسطة، P_m			ذروة القدرة، P_p		
	عامل تحديد:			عامل تحديد:			عامل تحديد:		
	P_c	P_m	P_p	P_c	P_m	P_p	P_c	P_m	P_p
A*E	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C*F[3]									
تشكيل سلبي	–	–	–	–	1	1,85	–	0,54	1
تشكيل إيجابي					1	1,42		0,87	1
F*...[4]	1	1	1	1	1	1	1	1	1
X7E	1	1	1	1	1	1	1	1	1
GX7F	1	1	1	1	1	1	1	1	1
X7W	1	1	1	1	1	1	1	1	1

الجدول 4 (*تتمة*)

صنف الإرسال (الخصائص الأساسية) (1)، (2)	نمط القدرة المعروفة								
	قدرة الموجة الحاملة، P_c			القدرة المتوسطة، P_m			ذروة القدرة، P_p		
	عامل تحديد:			عامل تحديد:			عامل تحديد:		
	P_c	P_m	P_p	P_c	P_m	P_p	P_c	P_m	P_p

(1) يُرجَع إلى الجدول 1 لاستكمال المعلومات عن الشفرة الثلاثية الرموز، المستعملة في وصف الخصائص الأساسية الثلاث لنمط الإرسال.

(2) تدل العلامة النجمية * على أن الخصيصة الثانية (أي طبيعة إشارة التشكيل) لا صلة لها بتقدير المخاطر.

(3) ليست قدرة الموجة الحاملة، P_c، معرَّفة بوضوح.

(4) الخصيصة الثالثة لا صلة لها بتقدير المخاطر.

هذه العوامل معطاة بخصوص X7E وX7F وX7W *عندما* تقاس القدرة في القناة كلها (وتكون على العموم 1,5 MHz للإرسال DAB و8 MHz للإرسال DVB).

الجدول 5

العلاقة بين بعض ترميزات شدة المجال وبعض ترميزات القدرة

القيمة المقصودة بالحساب	القدرة المناسب استعمالها
القيمة الفعلية لشدة المجال المكافئة	قدرة المرسِل المتوسطة، P_m
القيمة المتوسطة لشدة المجال المكافئة التي تحصل خلال فترة الذروة لذبذبة التردد الراديوي	ذروة القدرة، P_p
قيمة الذروة (القصوى) لشدة المجال المكافئة	ذروة القدرة، P_p(1)

(1) تحدد قيمة الذروة لشدة المجال المكافئة انطلاقاً من ذروة القدرة، P_p، باستعمال عامل تصحيح قيمة الذروة/القيمة الفعالة. وعامل التصحيح هذا هو 2/21 بخصوص موجة حاملة جيبية.

المرفق 5
بالملحق 1

طرائق تقييم أخرى

1 الإجراءات العددية

يقدم هذا القسم لمحة موجزة عن الطرائق العددية المختلفة؛ علماً بأن الطرائق العددية ورد بحثها أيضاً في التوصية ITU-T K.61. وهناك بعض البرامج التجارية المتاحة فيي هذا الصدد، من قبيل CST، وHFSS وWIPL-D.

ولا تُستعمَل الإجراءات التحليلية إلا لحساب الخواص الكهرمغنطيسية للمجال في بعض الحالات والهندسات الخاصة. أما حل المسائل العامة فيستلزم تطبيق تقنيات عددية. ونذكر فيما يلي الإجراءات العددية الأكثر شيوعاً لحساب شدة المجال الكهرمغنطيسي الناجم عن مصدر إرسال أو شدة المجالين الداخليين، ومعدل الامتصاص النوعي للأجسام البيولوجية. أما اختيار التقنية العددية

الأكثر ملاءمة لحل مسائل بعينها، فإنه يتوقف على مدى الترددات موضع النظر، والبنى الهندسية المقصودة نمذجتها، وحالة التعرض النمطية (في مجال قريب أو مجال بعيد).

يأتي فيما يلي ذكر طرائق النمذجة العددية:

- البصريات الطبيعية (PO)
- نظرية الانعراج الطبيعية (PTD)
- البصريات الهندسية (GO)
- نظرية الانعراج الهندسية (GTD)
- نظرية الانعراج المنتظمة (UTD)
- طريقة التيارات المكافئة (MEC)
- طريقة العزوم (MOM)
- طريقة متعددات الأقطاب العديدة (MMP)
- طريقة الفروق المنتهية في المجال الزمني (FDTD)
- طريقة العناصر المنتهية (FEM)
- طريقة المعاوَقات.

في صدد كل تطبيق، يجب إجراء تقييم من أجل تقرير أي من هذه الطرائق هي الأنسب لحل المسألة المطروحة. على سبيل المثال، ولا تنطبق البصريات الفيزيائية والهندسية في المجال القريب.

وكل من هذه الطرائق تمكِّن من تحديد الاتساع والطور لمقادير المجال الكهرمغنطيسي التالي ذكرها، في كل نقطة من المكان، حيث من الجائز أن تكون العناصر المشِعّة والناثرة إما أجساماً موصلة مثالية وإما أجساماً عازلة للكهرباء:

- شدة المجال الكهربائي؛
- شدة المجال المغنطيسي؛
- كثافة القدرة؛
- التيار؛
- التوتر؛
- المعاوَقة.

1.1 طريقة العزوم (MOM)

كثيراً ما تُستعمَل طريقة العزوم في تصميم أنظمة هوائيات الإرسال الراديوي (خرج المرسل، وقدرته، وكسب الهوائي، وما إلى ذلك) وفي حساب شدد المجالات الكهرمغنطيسية الناجمة عنها. فهي تمكّن من إجراء الحسابات في كلا طرفي الإرسال والاستقبال، وكذلك في المجالين القريب والبعيد للهوائي.

ويمكن بفضل هذه الطريقة نمذجة البنى التقنية حتى البنى الثلاثية الأبعاد، بمراعاة معلماتها المادية (مثل الثابت المعقد للعازل) وكذلك معلمات الأرض. تعتمد النمذجة على أسلاك دقيقة بالنظر إلى طول الموجة، وتستطيع من حيث المبدأ تمثيل المساحات أيضاً. أما محدودية هذه الطريقة فتكْمُن في أن نمذجة بنى كبيرة ومعقدة تستهلك بصورة مفرطة وقت الحاسوب وذاكرته.

إن طريقة العزوم تقنية أصبحت تُستعمَل على نطاق واسع لحل مسائل كهرمغنطيسية، وإجراء حسابات معدل الامتصاص النوعي (SAR)، على نماذج فدرية من الأجسام البيولوجية. وبهذه الطريقة أيضاً تُحسب شدة المجال الكهربائي داخل جسم بيولوجي، عن طريق حل معادلاتMaxwell التكاملية بواسطة دالة Green.

2.1 طريقة المحوَّلة السريعة محوَّلة Fourier/طريقة التدرج الاقتراني (FFT/CG)

الطريقة FFT/CG هي امتداد تطويري لطريقة العزوم. وقد بنُيت على هذه الطريقة وطريقة التدرج الاقتراني خوارزميات تكرارية تُستعمَل لحل معادلات خطية مشتقة من طريقة العزوم.

3.1 طريقة الفروق المنتهية في المجال الزمني (FDTD)

طريقة FDTD رقمية تُستعمَل لحل معادلاتMaxwell التدويرية التفاضلية في المجال الزمني. ويمكن استعمالها لحساب شدة المجال الكهرمغنطيسي الداخلي والخارجي، وتوزيع المعدل SAR في الأجسام البيولوجية المعرَّضة في المجالين القريب والبعيد. وبمقتضى هذه الطريقة يُجعَل كلا الزمن والمكان كمّا منفصلاً لا متصلاً، ويُنمذَج الجسم البيولوجي بتخصيص قيم السماحية والإيصالية للخلايا التي يشغلها من المكان. وتكون الذاكرة الحاسوبية اللازمة لذلك متناسبة مع عدد الخلايا المكانية. تُعتبَر هذه الطريقة أقوى الطرائق وعدا فيما يتعلق بحساب معدل الامتصاص النوعي (SAR)، لكن الحسابات الدقيقة تستلزم حواسيب قديرة جداً.

4.1 طريقة متعددات الأقطاب العديدة (MMP)

تعتمد طريقة MMP على أساليب تحليلية لحل معادلات المجالات التي لها متعدد أقطاب في نقطة من المكان، وتستعمَل مقترنةً مع تقنية متعدد الأقطاب المعممة (GMP). وطريقة MMP ملائمة خصوصاً لمحاكاة الأجسام المسماة "شديدة التوهين التناثري"، التي تكون قرب مصادر الإشعاع أي ضمن المجال القريب.

5.1 طريقة المعاوَقات

استُعمِلت طريقة المعاوقات بنجاح لحل مسائل تتعلق بقياس الجرعات الإشعاعية، التي يمكن بصددها إجراء حسابات شبه سكونية. وثبتت فعالية هذه الطريقة في حسابات معدل الامتصاص النوعي (SAR) في جسم الإنسان بخصوص ترددات عالية حتى 40 MHz. في هذه الطريقة يُنمذَج الجسم البيولوجي بواسطة شبكة ثلاثية الأبعاد من المعاوقات المعقدة.

2 حسابات شدة المجال

يمكن أن تُستعمَل أكثرية الطرائق المذكورة أعلاه لحساب مستويات شدد المجالات الناجمة عن مشاعيع كهرمغنطيسية. وتتوقف دقة النتائج بقدر كبير جداً على جودة نمذجة المشعاع (كالهوائي مثلاً). فإذا وُجدت أشياء قرب المشعاع، أو بين المشعاع والنقطة التي يُجرى فيها توقع شدة المجال، أو قرب هذه النقطة، وكان من شأن هذه الأشياء أن تؤثر تأثيراً كبيراً على شدة المجال، وجبت نمذجة هذه الأشياء أيضاً.

1.2 التحليل العددي للهياكل السلكية: مثال

يقدم هذا التحليل لمحة عامة عن النهج المحتمل لتحديد مستويات شدة المجال في جوار هوائي ستاري للموجات الديكامترية (HF)، على أساس صياغة ما يسمى المعادلتين المحتملتين للتوزيع الحالي على طول الأسلاك. فيصار إلى حل هذه المعادلة باستعمال تقريب متعدد الحدود للتيار.

فلنفترض أن بنية ما موجودة في الفراغ، ومؤلفة من قطع أسلاك مستقيمة موصلة تمام الإيصالية. وطبقاً للشروط الحدودية، على سطوح الأسلاك، يجب أن يساوي المكوِّن المماسّي للمجال الكهربائي الكلي قيمة صفر، يعني:

$$(E + E_i)_{\tan} = 0 \tag{17}$$

حيث:

E: المجال الكهربائي المتولِّد عن تيارات وشحنات البنية السلكية

E_i: المجال الكهربائي المسلَّط، الذي يُنَمذِج إثارة النظام.

والمجال المسلَّط يمكن أن يكون، على سبيل المثال، هو المجال الكهربائي المتولد عن موجة مستوية ساقطة على البنية (في تحليل الناثرات أو الهوائيات المستقبِلة)، أو المجال الواقع في منطقة صغيرة من مطاريف الهوائي، والذي يُنَمذِج المولِّد الحافز للهوائي (في تحليل الهوائيات المرسِلة).

والمجال الكهربائي المتولِّد عن تيارات وشحنات البنية السلكية يمكن التعبير عنه بحدود الكمون الاتجاهي المغنطيسي، A، والكمون اللا اتجاهي الكهربائي، V، كما يلي:

$$E = -j\omega\, A - \operatorname{grad} V \tag{18}$$

حيث:

ω: التردد الزاويّ ($\omega = 2\pi f$).

وهذان الكمونان يمكن التعبير عنهما بدورهما بحدود كثافات التيارات ($\mathbf{J}_s$) والشحنات (ρ_s) السطحية، وهذه الحدود مرتبطة بمعادلة الاستمرار. ثم يُجرى تقريب التيارات والشحنات السطحية بواسطة تيارات وشحنات الخطوط (تقريب بواسطة السلك الدقيق)، وتُقسم البنية السلكية إلى عدد N من القطع (لكل منها محور محلي، s_m). وأخيراً تحصل معادلة الكمونَيْن (وتسمى أيضاً معادلة الكمون الاتجاهي والكمون اللااتجاهي) الخاصة بتوزُّع التيار، على الشكل التالي:

$$\sum_{m=1}^{N} \int_0^{h_m} \left[\mathbf{u}_p \cdot \mathbf{u}_m I_m\,(s_m)\; g(r_a) + \frac{1}{k^2}\; \frac{\mathrm{d}I_m(s_m)}{\mathrm{d}s_m}\; \operatorname{grad}\, g(r_a) \right] \mathrm{d}s_m = \frac{\mathbf{u}_p \cdot \mathbf{E}_i}{\mathrm{j}\,\omega\,\mu_0} \tag{19}$$

حيث:

I_m: شدة التيار على طول القطعة

$k = \omega\sqrt{\varepsilon_0\,\mu_0}$: معامل الطور في الفضاء الطلق

$g(r_a) = \dfrac{1}{4\pi}\; \dfrac{\exp(-\mathrm{j}\,k\,r_a)}{r_a}$: دالة Green المطابقة

r_a: المتوسط التقريبي للمسافة بين النقطة على سطح العنصر السلكي $\mathrm{d}s_m$ والنقطة من المجال.

والمعادلة (19) تكاملية وتفاضلية من أجل توزع التيار، ولا يمكن حلها إلا رقمياً. ولهذا الغرض، تُتبع الخطوط التوجيهية العامة بخصوص طريقة العزوم، وتُقرَّب الدالة المجهولة $I_m(s_m)$ بواسطة سلسلة من الدوالّ المعلومة (الدوالّ الأساسية)، مع معاملات ترجيح مجهولة. ومثل الدوال الأساسية، تُختار الدوال البسيطة للقدرة، التي تؤول إلى تقريب متعدد الحدود لتوزع التيار، أي:

$$I_m(s_m) = \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^i \tag{20}$$

حيث:

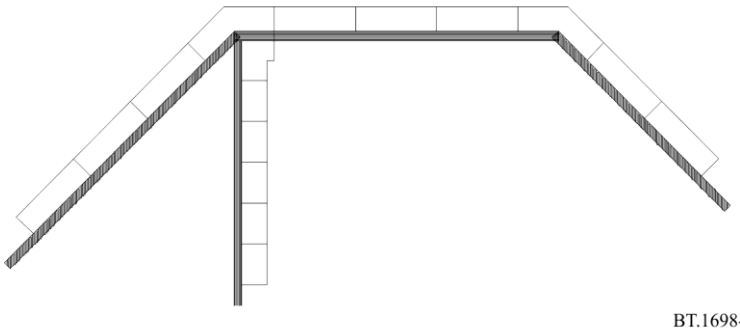
h_m: طول القطعة

I_{mi}: معاملات الترجيح.

لا يمكن أن تُحَلّ المعادلة (19) حلاً مرضياً في جميع النقاط على طول القطع السلكية، ولكن تقريبياً فقط. فطبقاً لطريقة العزوم (MOM) تُختار مجموعة من دوال الترجيح، وتقيَّم هذه الدوالّ وحواصل الضرب الداخلية للمعادلة (19). وتُعتبر الدوال نبضات. وكل نبضة تعتبَر ثابتاً للوحدة المعيَّنة، محدداً في قطعة فرعية قصيرة، وصفراً في غير موضع. ويبيّن الشكل 37 التوزع النمطي للنبضات.

الشكل 37

التوزيع النمطي لدوال الترجيح المستعملة بشكل نبضات في البرنامج AWAS



BT.1698-37

ومن تقييم حواصل الضرب الداخلية، بخصوص نبضة ما محددة في القطعة الفرعية (s_{p1}, s_{p2}) على طول محور القطعة السلكية p، تنتج المعادلة (21) التالية:

$$\sum_{m=1}^{N}\sum_{i=0}^{n_m} I_{mi}\left\{\int_{s_{p1}}^{s_{p2}}\int_{0}^{h_m}\mathbf{u}_p\cdot\mathbf{u}_m\left(\frac{s_m}{h_m}\right)^i g(r_a)\,\mathrm{d}s_m\mathrm{d}s_p+\frac{1}{k^2}\frac{i}{h_m}\int_{0}^{h_m}\left(\frac{s_m}{h_m}\right)^{i-1}\left[g(r_a)_{s_{p2}}-g(r_a)_{s_{p1}}\right]\mathrm{d}s_m\right\}$$
$$+\sum_{i=0}^{n_p} I_{pi}\int_{s_{p1}}^{s_{p2}}\frac{Z'(s_p)}{\mathrm{j}\,\omega\,\mu_0}\left(\frac{s_p}{h_p}\right)^i\mathrm{d}s_p=\int_{s_{p1}}^{s_{p2}}\frac{\mathbf{u}_p\cdot\mathbf{E}_i}{\mathrm{j}\,\omega\,\mu_0}\,\mathrm{d}s_p \tag{21}$$

وفي هذه المعادلة، $\mathbf{u}_p$ هي متَّجه الوحدة للقطعة السلكية p، وZ' هي المعاوقة في الوحدة الطولية من شحنة معاوقة ممكنة موزعة على طول القطعة. وحين يجرى تقييم المعادلات التي من الشكل (21) بخصوص جميع النبضات، فهي تشتمل على منظومة من المعادلات الخطية في I_{mi} يمكن حلها عددياً.

ومتى عُرِفت المعاملات I_{mi}، يتحدد التوزيع التقريبي للتيار على طول القطع السلكية، ويصير بالإمكان تقييم خصائص مختلفة لبنية السلك. وهذا الجزء من التوصية يعالج بالدرجة الأولى موضوع المجالين القريبين الكهربائي والمغنطيسي. فالمجال الكهربائي يمكن تقييمه بحدود الكمونَيْن، بنفس الطريقة المتبَّعة في اشتقاق معادلة الكمونَيْن، أي:

$$\mathbf{E}=-\,\mathrm{j}\,\omega\,\mu_0\sum_{m=1}^{N}\sum_{i=0}^{n_m} I_{mi}\int_{0}^{h_m}\left[\mathbf{u}_m\left(\frac{s_m}{h_m}\right)^i g\,(r_a)+\frac{1}{k^2}\frac{i}{h_m}\left(\frac{s_m}{h_m}\right)^{i-1}\mathrm{grad}\;g\,(r_a)\right]\mathrm{d}s_m \tag{22}$$

والمجال المغنطيسي يكن التعبير عنه بحدود الكمون الاتجاهي المغنطيسي كالتالي:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \text{ rot } \mathbf{A} \tag{23}$$

ومتى عبّرنا عن هذا الكمون بحدود التيارات السلكية، حصلنا على ما يلي:

$$\mathbf{H} = - \sum_{m=1}^{N} \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \int_0^{h_m} \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^i \mathbf{u}_m \times \text{grad } g(r_a) \, \text{d}s_m \tag{24}$$

3 قياس الجرعات

يمكّن تطبيق مفاهيم قياس الجرعات من إقامة الصلة بين القيم الخارجية لشدة المجال (أي المحصَّلة بالقياس خارج الجسم) والمقادير الداخلية من شدة المجال، وكثافة التيار المستحث، ومعدل امتصاص الأنسجة للقدرة. ويتكامل استعمال الطريقتين التجريبية والرقمية لقياس الجرعات. وكلتاهما تستلزم عمليات تقريب لمحاكاة تعرض جسم الإنسان. لكن ابتكار مواد مكافئة لأنسجة الجسم، ومسابير قلما تشوش الاختبارات، إلى جانب استعمال نماذج قريبة من الواقع تشريحياً لأغراض حسابية، قد حسّن فهم تفاعل الجسم والمجالات الكهرمغنطيسية.

وفي حين أن كثافة التيار وشدة المجال الكهربائي الداخلية هما الكميتان الأوضح صلة بالآثار البيولوجية في حالة الترددات المنخفضة، يصير معدل الامتصاص النوعي (SAR) هو الكم الأهم عندما تتزايد الترددات مقتربة بطول موجاتها من أبعاد جسم الإنسان.

لكن المعدل SAR لا يمكن استخراجه، في أكثرية حالات التعرض، إلا من قيم شدة المجال المحصلة بالقياس في البيئة، باستعمال نماذج خاصة بقياس الجرعات. وجرى استعمال تقنيات غير مشوِّشة للقياس بخصوص ترددات تحت 100 MHz، من أجل قياس التيار المستحث، وفي المجالات المنتظمة الموسعة أُوجِدت الصلة كدالة للتردد بين قيم شدة المجال الكهربائي الخارجي والتيار المستحث. وبخصوص ترددات رنين الجسم، لوحظ حصول حالات تعرض في منطقة المجال القريب التفاعلي لا يستهان بها عملياً، مجال يصعب فيه إقامة الاقتران بين المجال الطارئ وجسم الإنسان، بسبب عدم انتظام المجال من جهة، وتغير تراصف المجال والجسم من جهة أخرى. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تحدث، في بعض أجزاء الجسم، زيادات موضعية في كثافة التيار وفي معدل الامتصاص النوعي (SAR)، لأن المقطع العرضاني الهندسي للأنسجة الأقوى إيصالية ضيق.

والمقادير المتصلة بقياس الجرعات يمكن حسابها باستعمال إجراءات رقمية ونماذج لجسم الإنسان حسابية. ومن جهة أخرى يمكن قياس هذه المقادير باستعمال نماذج طبيعية ملائمة (أشباح).

1.3 حسابات معدل الامتصاص النوعي

نظراً لصعوبة قياس متوسط المعدل SAR لكامل الجسم أو ذروته المكانية في الكثير من حالات التعرض، يعوَّل على الحسابات الرقمية، أي على عدد من التقنيات الرقمية المذكورة أعلاه، مثل الطرائق FDTD وMOM وMMP، لتقدير توزيع معدل الامتصاص النوعي في جسم بيولوجي معرّض للإشعاع إما في المجال الكهرمغنطيسي القريب وإما في البعيد.

أما اختيار الأنسب من بين هذه الطرائق لحل مسألة معيَّنة فيتوقف على التردد، مثلاً، وظروف التعرض، وقد الشيء المعرَّض، والدقة المطلوبة، ووقت الحساب الأقصى المسموح به. ويقتضي استعمال أي من هذه الطرائق توفر الخبرة في الفيزياء البيولوجية والتحليل الرقمي.

ويقتضي أيضاً استعمال أي من هذه الطرائق وجود نموذج هندسي ثلاثي الأبعاد للجسم أو جزء الجسم المعرض. ويجب أن تكون معروفة الخواص الكهربائية لمختلف أجزاء الجسم تحت التردد المعرَّض له الجسم. وتبعاً للدقة المطلوبة، يمكن استعمال نماذج متفاوتة في التعقيد. ويكفي في بعض الحالات استعمال قوالب بسيطة كروية أو أسطوانية الشكل لنمذجة الجسم. أما خواص العزل الكهربائي التي يتصف بها الجسم البشري فهي موثّقة جيداً. ولذا يمكن عن طريق صور للجسم البشري مأخوذة بتقنية الرنين المغنطيسي، إحراز نماذج لهذا الجسم رقمية معقدة جداً ودقيقة جداً. وإن نماذج مستمدة من صور الرنين المغنطيسي لأنسجة متنوعة، وباستبانة دقيقة

حتى بضع مليمترات، تم استعمالها بالطريقة FDTD المذكورة أعلاه، لحساب توزيع المعدل SAR في جسم شخص معرض لمجالات كهرمغنطيسية متولّدة عن مرسلات راديوية محمولة. وتتوفر حزم البرمجيات التجارية لتنفيذ مثل هذه النماذج.

2.3 قياس المعدل SAR

إن معدل الامتصاص النوعي (SAR) (W/kg) هو المقدار الحدي الأساسي المعتمد في أكثرية التنظيمات والمعايير المتعلقة بالتعرض للترددات الراديوية. إنه قياس معدل الطاقة الكهرمغنطيسية التي تبددها الوحدة الكتلية من نسيج الجسم: القدرة التي تمتصها وحدة الكتلة.

ويمكن تعريف المعدل SAR بأنه القيمة المقيَّسة في كامل الجسم (يسمّى أحياناً "متوسط SAR لكامل الجسم") أو القيمة الموضعية المحددة لحجم صغير من نسيج الجسم (متوسط SAR الموضعي).

يمكن الحصول على قيمة المعدل SAR انطلاقاً من المقادير الداخلية، على ثلاثة أوجه، كما تدل المعادلة التالية:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} = C_i \frac{d_T}{d_t} = \frac{J^2}{\sigma\rho} \quad (25)$$

حيث:

E: شدة المجال الكهربائي الداخلي في نسيج الجسم (V/m^{-1})

σ: إيصالية نسيج الجسم (S/m^{-1})

ρ: كثافة نسيج الجسم (kg/m^{-3})

C_i: السعة الحرارية لنسيج الجسم ($J/kg^{-1}\ °C^{-1}$)

d_T/d_t: المشتقة الزمنية للحرارة في نسيج الجسم ($°C/s^{-1}$)

J: كثافة التيار المستحث في نسيج الجسم (A/m^2)

يُعرَّف المعدل SAR الموضعي في كتلة تزايدية (dm) بأنه المشتقة الزمنية للطاقة الممتصَّة التزايدية (dW) مقسومةً على الكتلة:

$$SAR = d/d_t \quad \text{dW/dm} \quad (26)$$

وقيمة هذا المقدار هامة باعتبار أمرين هما: التوزع غير المنتظم الناجم عن امتصاص الطاقة، في حالة التعرض لموجة مستوية منتظمة؛ والامتصاص الموضعي للطاقة الناجم عن مجالات غير منتظمة قريبة قرباً مباشراً من مصدر الإشعاع.

تنص التنظيمات أو المعايير المتعلقة بحالات التعرض على حدود مشتقة للمجالين الكهربائي والمغنطيسي. ومفهوم قياس الجرعات يطمئن إلى أن التقيّد بالمستويات المشتقة (الخارجية) يضمن التقيّد بالحدود الأساسية للمعدل SAR. إلا أنه يمكن أيضاً أن تُستعمَل قياسات المعدل SAR الخارجي أو الداخلي للتحقق من التقيد بالمعايير. وفي حالات تعرض جزء من الجسم لمجال قريب، يمكن أن يكون من الصعب قياس شدد المجالات الكهرمغنطيسية الخارجية، ويمكن أن تتجاوز الحدود المشتقة على الرغم من كون المعدل SAR الموضعي أقل من الحدود الأساسية. ففي هذه الحالات يجب إجراء قياسات للمعدل SAR الداخلي في نماذج جسمية. وفيما يلي وصف أهم الطرائق لقياس المعدل SAR.

1.2.3 طريقة القياس بواسطة المجال الكهربائي

المعدل SAR متناسب أيضاً مع مربع القيمة الفعالة (RMS) لشدة المجال الكهربائي E (V/m) داخل النسيج المعرَّض، طبقاً للمعادلة التالية:

$$SAR = \sigma E^2/\rho \quad (27)$$

حيث:

σ (S/m): الإيصالية

ρ (kg/m^3): كثافة الكتلة لمادة النسيج في الموضع المقصود بالقياس.

يُحدَّد المعدل SAR الموضعي داخل جسمٍ تلقى الإشعاع، بواسطة مسبار للمجال الكهربائي المتناحي. ويمكن تحديد قيم توزع هذا المعدل في كامل الجسم أو في جزء منه، عن طريق تنقيل المسبار وتكرار عملية قياس المجال الكهربائي. ولا تستغرق عملية قياس واحدة للمجال الكهربائي أكثر من بضع ثوانٍ، وهذا يعني أنه يمكن تحديد توزيعات ثلاثية الأبعاد للمعدل SAR باستبانة عالية وفي غضون وقت للقياس معقول (أقل من ساعة بوجه عام).

2.2.3 طريقة القياس بواسطة الحرارة

المعدل SAR متناسب مع المعدل الابتدائي $\mathrm{d}T/\mathrm{d}t$ (K/s) لارتفاع الحرارة في نسيج شيء معرَّض، طبقاً للمعادلة التالية:

$$SAR = c\,\Delta_T/\Delta_t \quad (28)$$

حيث c هي السعة الحرارية النوعية لمادة النسيج ($\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}}$). فيمكن تحديد المعدل SAR الموضعي داخل نموذج جسمي متلقٍ للإشعاع، عبر الاستعانة ببعض مسابير الحرارة. يُستعمل مسبار أو عدة مسابير لتحديد تزايد الحرارة ΔT في مدة تعرض قصيرة (أقل من 30 ثانية، على العموم، تجنباً لنقل الحرارة). وتحسب القيمة التقريبية لمعدل ارتفاع الحرارة الابتدائي بتطبيق الصيغة $\Delta T/\Delta T$، ثم تُحسب قيمة المعدل SAR لكل موضع قياس. وهكذا يمكن، بتكرار قياس الحرارة في الجسم بكامله أو في جزء منه، تحديد توزيع المعدل SAR وقيمه الوسطية في كامل الجسم أو في جزء منه.

بيد أن القياسات الثلاثية الأبعاد لتوزيع المعدل SAR تستغرق الكثير من الوقت، بسبب العدد الكبير من النقط التي يجرى فيها القياس. فتوخياً لأن يكون وقت القياس معقولاً، يجب الحد من عدد هذه النقاط، وهذا يعني أنه من الصعب جداً إحراز قياسات دقيقة لتوزيع المعدل SAR غير المنتظم. ثم إن قياسات الحرارة تتأثر أيضاً بالإيصال الحراري وبالحَمْل الحراري أثناء عمليات القياس أو بينها.

3.2.3 طريقة القياس المِسْعَريّ

يمكن تحديد متوسط المعدل SAR لكامل الجسم بطرائق القياس المِسْعَريّ. في عملية قياس مسعري عادية، يُجرى أولاً تعريض نموذج جسمي قدُّه طبيعي أو سُلَّميّ، ومتوازن حرارياً، للإشعاع طيلة فترة ما. ثم يستعمَل مسعر لقياس تدفق الحرارة من الجسم، حتى يعود النموذج إلى حالة التوازن الحراري. ثم يقسم مجموع الطاقة التي كان امتصها النموذج الجسمي على وقت التعرض وعلى كتلة النموذج، فيكون حاصل القسمة هو المعدل SAR لكامل الجسم. وهناك طريقة للقياس المسعري تستعمل مسعرين ونموذجين متماثلين تماماً. يُعرَّض أحدهما للإشعاع ويُستعمل الآخر مرجعاً حرارياً. وهذا يعني أنه يمكن إجراء القياس ولكن التحكم في الظروف الحرارية يكون في هذه الطريقة أضعف منه في الطريقة العادية.

تحدد طرائق القياس المسعري المعدل SAR لكامل الجسم بدقة كافية، لكنها لا تفيد شيئاً عن توزعه داخل الجسم. ويلزم لتحصيل نتائج دقيقة تفريغ مقدار كاف من الطاقة. وقد يبلغ عدة ساعات مجموع الوقت اللازم للقياس، وهو الوقت اللازم لعودة الجسم إلى التوازن الحراري بعد تعرضه للإشعاع. أما المعدل SAR لجزء من الجسم فيمكن قياسه باستعمال أشباح لأجزاء من الجسم ومساعر صغيرة.

4 قياس المعدل SAR بواسطة تيارات الجسم

يمكن وضع أجهزة قياس تيارات الجسم في صنفين:

- أجهزة قياس التيار الساري من الجسم إلى الأرض؛
- أجهزة قياس تيار التماس.

1.4 تيارات الجسم المستحثة

تحدث تيارات الجسم الداخلية المستحثة في الأشخاص عن تعرض كامل الجسم أو بعضه لمجالات ناجمة عن الترددات الراديوية، بدون تماس مع شيء غير الأرض.

والتقنيتان الرئيسيتان المستعملتان لقياس تيارات الجسم هما: محولات التيار (اللولبية) القامطة، تستعمل لقياس التيار الساري في أعضاء الجسم؛ والأجهزة ذات الصفيحتين المتوازيتين، تمكّن من قياس التيارات التي تجتاز القدمين قبل أن تمتصها الأرض.

وقد صُنِعت محولات تيار قامطة تُحمَل.

وتُركَّب وحدة القياس إما مباشرة على المحول، وإما بواسطة وصلة ليف بصري تمكّن من عرض مرئي على شاشة لحركة التيار الساري في العضو المقموط بمحول التيار. أما كشف التيار في وحدات القياس هذه فيتم إما باستعمال تقنيات ضيقة النطاق، كمحللات الطيف مثلاً أو مستقبلات مولَّفة (مزيتها أنها تحدد توزيع التردد للتيار المستحث في بيئات متعددة مصادر الإشعاع)، وإما باستعمال تقنيات عريضة النطاق تعتمد طريقة الكشف بها على ثنائيات القطب أو على التحويل الحراري.

وقد صُنِعت أجهزة تدل دلالة صحيحة على القيم الفعالة لشدة المجال، في حضور موجات متعددة الترددات و/أو مشكَّلَة الاتساع.

تلبّي محولات التيار عادة الترددات العليا حتى 100 MHz لا أكثر، ولذا صنعت محولات نواتها هوائية (مقابل التي نواتها من الفرّيت) لتوسيع مدى تلبية الترددات العليا. وتتميز المحولات الهوائيةُ النواةِ بالخفة التي تجعلها صالحة للقياسات الطويلة الأجل، لكنها أقل حساسية بكثير من التي نواتها فرّيت.

يوجد بديل للأجهزة القامطة في الأجهزة ذات الصفيحتين: تستقبل الصفيحة العليا التيار المتدفق عبر القدمين، وينقله منها محساس تيار مركب بين الصفيحتين إلى الصفيحة القاعدية الملامسة للأرض. ويمكن تحديد قوة التيار المتدفق من الصفيحة العليا إلى الصفيحة القاعدية عن طريق قياس انخفاض التوتر الناجم عن الترددات الراديوية بواسطة جهاز مقاومة منخفض المعاوقة. ويمكن أيضاً قياس التيار المتدفق بين الصفيحتين عبر الموصِّل، بواسطة محول تيار ضيق الفتحة، أو بواسطة مزدوجة حرارية موضوعة في فراغ.

ومتيسِّرة هي أيضاً الأجهزة الملبية لترددات مستوية الموجة من 3 kHz إلى 100 MHz

وعند اختيار جهاز لقياس التيار المستحث، يجب مراعاة عدة أمور:

أولاً، إن أجهزة القياس التي يقف عليها الشخص تتأثر بتيارات الانتقال المستحثة الناجمة عن المجالات المنتهية في الصفيحة العليا. فقد أجريت بحوث أثبتت أن الأخطاء الظاهرية الملحوظة أثناء غياب الشخص ليست لها شأن يُذكر في عملية القياس حين يكون الشخص واقفاً على الجهاز.

ثانياً، إن التيارات المحصلة قيمتها من الكاحلين بالقياس بواسطة جهاز قامط تجنح بمجموعها إلى أن تفوق بقليل المجموع المحصل بواسطة جهاز ذي صفيحتين. إلا أن مقدار هذه الزيادة التابعة للترددات الراديوية ولهندسة الجهاز معاً، لا يرجح أن تكون ذات شأن. ومع ذلك يبقى أن أدق طريقة لتقييم التيارات السارية في الأعضاء هي المعتمدة على محول التيار. وقد تتوقف دقة طريقة القياس على المتطلبات المحددة في الخطوط التوجيهية بشأن الحماية، متطلبات هي المرجع لتقييم المطابقة.

ثالثاً، التيارات المستحثة في الأعضاء يجب بحث إمكان قياسها في ظروف تأريض واقعية كالتي توجد في حياة الممارسة. على وجه الخصوص، إن اختلاف درجة التماس الكهربائي بين الأرض والصفيحة القاعدية من جهاز القياس ذي الصفيحتين المتوازيتين، وكذلك الحالة الفعلية لسطح الأرض، من شأنهما التأثير على السريان الظاهر للتيار نحو الأرض.

ويمكن إجراء القياسات باستعمال هوائيات مصممة بحيث تكون مكافئة للشخص. وهذه الطريقة تمكّن من استعمال طريقة مقيَّسة وإجراء قياسات التيار بدون الحاجة إلى تعريض أشخاص لتيارات أو لمجالات خطرة عليهم.

2.4 قياس تيار التماس

يجب أن يوضع جهاز قياس التيار بين يد الشخص والشيء الموصل. ويمكن أن تقوم تقنية القياس على مسبار معدني (مساحة التماس محددة) يمسك أحد طرفيه باليد بينما يكون طرفه الآخر في تماس مع الشيء الموصل. ثم يمكن أن يُستعمَل محساس قامط (محول تيار) لقياس تيار التماس الساري في اليد التي في حالة تماس مع الشيء الموصل عبر المسبار.

وهناك طريقتان أخريان:

- قياس فرق الكمون (انخفاض التوتر) عبر مقاومة لا حثية (مدى المقاومة من 5 إلى 10Ω) موصَّلة بالتسلسل بين الشيء الموصل والمسبار المعدني الممسوك طرفه باليد؛
- مقياس ملّي أمبير بشكل مزدوجة حرارية يوصَّل بالتسلسل توصيلاً مباشر.

يجب أن توضع التوصيلات السلكية وجهاز قياس التيار بطريقة تقلل قيمة ما ينجم عن التيارات الملتقَطَة من التداخل والأخطاء.

وفي حالة توقع تيارات عالية بصورة مفرطة، يمكن التعويل على شبكة كهربائية من المقاومات والمكثفات لمحاكاة معاوقة الجسم المكافئة.

3.4 قياس توتر التماس

يقاس توتر التماس (توتر بدون شحنة) بفلطمتر أو بكاشف تذبذب مناسب لمدى التردد موضع البحث. وتكون أجهزة القياس موصَّلة بين الشيء الموصل المشحون بالتوتر المستحث من المجال والكمون المرجعي (الأرض). ويجب ألا تكون معاوقة دخل الفلطمتر أقل من 10 kΩ.

المرفق 6
بالملحق 1

الأجهزة الإلكترونية الطبية المغروسة والمحمولة

1 الأجهزة الإلكترونية الطبية

الملاءمة الكهرمغنطيسية (EMC) مسألة عامة تنطرح بصدد التجهيزات الإلكترونية، ولا سيما التجهيزات الإلكترونية الطبية. فهذه إذا استُعملت في حضور محطات إذاعية أرضية قوية يمكن ألا تشتغل بصورة صحيحة. ويزداد خطر سوء الأداء كلما قويت شدة المجال. وخطر سوء الأداء مرهون بعدة متغيّرات، مثل مستوى شدة المجال، وهذه تابعة للمسافة بين الهوائي المرسِل والجهاز، ومثل قدرة المرسل، وتردد البث، ونمط تشكيل الإشارة المشعَّة، وتأثير اقتران الكبلات، وحصانة الجهاز الإلكتروني نفسه إزاء الترددات الراديوية.

وقد يتسنى الحد من تداخل الترددات الراديوية على الأجهزة الإلكترونية الطبية أو إزالة هذا التداخل كلياً، بواسطة حجب الترددات الراديوية الحجب الملائم أو بطريقة الترشيح الإلكتروني. فمن المناسب أن تُطبَّق تقنيات مشتقة من التقنيات الشائع استعمالها بشأن الملاءمة الكهرمغنطيسية. ويمكن أن تُطبَّق، على الأجهزة الطبية، مغروسة كانت أم لا، وعلى الأجهزة الطبية، حدود خاصة أشد من المفروضة بخصوص عامة الجمهور.

2 الأجهزة المغروسة والأجهزة المحمولة

من شأن المجالات الكهرمغنطيسية أن تسبب تداخلاً على الأجهزة الطبية المغروسة والمحمولة. يدخل في هذا الصنف مضخات الأنسولين وناظمات القلب، وسيكبر عدد هذه الأجهزة. ويبدو آخذاً في التزايد أيضاً مدى وعدد الأجهزة الجديدة المختلفة، مثل المرقَب المحمول، والمعينات البدلية للبصر والحركة. فبوجه عام، يمكن أن تتأثر ناظمات القلب وسائر الأجهزة الطبية من تداخل المجالات الكهرمغنطيسية المرسَلة. ومع ذلك فإن مشكلات تداخل الترددات الراديوية على الأجهزة الإلكترونية الطبية المغروسة لم تُحَلّ تماماً.

المرفق 7
بالملحق 1

مراجع إضافية

[1] ICNIRP 2020, Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz).

[2] ICNIRP 2010, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz).

[3] IEEE C95.1-2019, Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz.

[4] Mazar 2016, Radio Spectrum Management: Policies, Regulations and Techniques, Chapter 9, 2021.

[5] IEC 62232, Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure.

[6] WHO (2020, February), Radiation: 5G mobile networks and health.

[7] ETSI TR 102 457, Fixed Radio Systems; Evaluation of the Electro Magnetic Field (EMF) radiated by Line-of-Sight (LoS) fixed radio stations using parabolic dish directional antennas.

[8] EN 50496, Determination of workers' exposure to electromagnetic fields and assessment of risk at a broadcast site.

[9] EN 50554, Basic standard for the in-situ assessment of exposure to radio frequency electromagnetic fields in the vicinity of a broadcast site.