التوصية ITU-R BS.1698

تقييم المجالات الناجمة عن أنظمة الإرسال الإذاعي للأرض العاملة في أي نطاق تردد من أجل تقدير أثر التعرض للإشعاعات غير المؤينة

(المسألة ITU-R 50/6)

(2005)

مجال التطبيق

الغرض من هذه التوصية وضع أساس لحساب وتقدير قيم الإشعاعات الكهرمغنطيسية الناجمة عن محطة إذاعة، على مسافات معينة من موقع الإرسال. وهذه المعلومات تستخدمها المنظمات المسؤولة لوضع معايير ملائمة تُستعمَل لحماية الناس من التعرض غير المرغوب فيه للإشعاعات المؤذية. أما القيم الفعلية اللازم تطبيقها بموجب أي تنظيم فتظل بالطبع مرهونة بالقرارات التي تتوصل إليها الهيئات الصحية المعنية، الوطنية منها والعالمية.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن طاقة الترددات الراديوية من شأنا أن تؤثر في جسم الإنسان تأثيراً خطيراً؛

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

ج) أن طاقة الترددات الراديوية من شأنا أن توقع آثاراً مؤذية في الأجهزة (مثل أجهزة الاتصالات الراديوية، وأجهزة الملاحة، والناظمات القلبية، والتجهيزات العلمية أو الطبية، وغير ذلك؛

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

ه) أن تحديد سويات الإشعاعات 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 سويات السلامة؛

ز) أن أشخاصاً لا علاقة لهم بذه الأنظمة قد يتعرضون بالصدفة لهذه الإشعاعات (كالمسافرين جواً، على سبيل المثال) أو لهذه الكمونات الكهربائية؛

ح) أنه قد يُطلَب من القائمين بتشغيل وصيانة أنظمة الإرسال الراديوي أن يعملوا في الجوار المباشر لمصادر إشعاع الترددات الراديوية هذه؛

توصي بما يلي:

1 أن يُستعمَل الملحق 1 لهذه التوصية لتقييم المجالات الكهرمغنطيسية التي تولدها أنظمة الإرسال الإذاعي للأرض العاملة في أي نطاق تردد، من أجل تقدير أثر التعرض للإشعاعات غير المؤينة.

الملحق 1

تقييم المجالات الناجمة عن أنظمة الإرسال الإذاعي للأرض العاملة في أي نطاق تردد من أجل تقدير أثر التعرض للإشعاعات غير المؤينة

المحتويات

الصفحة

1 مقدمة

ما زال موضوع آثار الإشعاعات الكهرمغنطيسية يُدرَس منذ سنين، وبُذِلت محاولات في سبيل تكمية حدود معينة يمكن استعمالها لحماية البشر من الآثار غير المرغوبة لهذه الإشعاعات. وأسفرت دراسات أجرتا 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.

فالغرض من هذه التوصية هو وضع أساس لحساب وتقدير قيم الإشعاعات الكهرمغنطيسية الناجمة عن محطة إذاعة، على مسافات معينة من موقع الإرسال. وهذه المعلومات تستخدمها المنظمات المسؤولة لوضع معايير ملائمة تُستعمَل لحماية الناس

من التعرض غير المرغوب فيه للإشعاعات 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. وترد في التذييل 6 معلومات عن المراجع ذات الصلة.

2 خصائص المجالات الكهرمغنطيسية

1.2 خصائص المجال الكهرمغنطيسي العامة

يعطي هذا القسم لمحة شاملة عن خصائص معينة من خصائص المجال الكهرمغنطيسي (المجال EM) 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 مكونات المجال

يتألف المجال EM الناجم عن إشعاع هوائي ما، من مكونات مجال كهربائي ومغنطيسي متنوعة تتوهن تبعاً للمسافة r عن المصدر. والمكونات الرئيسية هي:

- المجال البعيد (Fraunhofer)، ويُسمّى أيضاً مجال الإشعاع، يتناقص فيه اتساع المجالات بمعدل $1/r$؛
- المجال القريب للإشعاع (Fresnel)، ويسمى أيضاً المجال الحَثّي. 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 الإشعاع، فأهميتهما محصورة في قربما من هوائي الإرسال – في ما يسمّى بمنطقة *المجال القريب*.

أما مجال الإشعاع فهو العنصر الغالب في ما 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 اتساعَيهما ثابتة. وبالإضافة إلى ذلك، يشكل المجال الكهربائي والمجال المغنطيسي زاوية قائمة، ويقعان في مستوٍ عمودي على اتجاه الانتشار.

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

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 $10\ \lambda$ بخصوص المجال البعيد.

1.2.1.2 كثافة القدرة

يُحصل متجِه كثافة القدرة لمجال كهرمغنطيسي، متجه Poynting، $\boldsymbol{S}$، من ضرب متجِهَيْ المكون الكهربائي، $\boldsymbol{E}$، والمكون المغنطيسي، $\boldsymbol{H}$، للمجال الكهرمغنطيسي المقصود، أي:

$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H} \tag{1}$$

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 شدَتيْ المجال الكهربائي، E، والمجال المغنطيسي، H، قيمة ثابتة، Z_0، معروفة بأنها المعاوقة المميزة للفضاء الحر[1]، وأنها تضاهي $377\ \Omega$ (أو $120\ \pi\ \Omega$).

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

$$S = E^2/Z = H^2 Z_0 \tag{2}$$

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

$$S = P\ G_i/(4\pi\ r^2) \tag{3}$$

حيث:

S: كثافة القدرة (W/m^2) في اتجاه معين

P: القدرة (W) المزود بها مصدر الإشعاع، على افتراض منظومة بلا خسارة

G_i: عامل كسب مصدر الإشعاع في الاتجاه المعين، بالنسبة إلى مشعاعٍ متناحٍ

r: المسافة (m) عن مصدر الإشعاع.

وفي المعادلة (3) يسمّى حاصل الضرب PG_i بالقدرة e.i.r.p. (القدرة المشَعة 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 عامل الكسب G_i بحاصل الضرب $G_r\ .\ G_a$ كما في المعادلة (4) التالية. والعامل G_r الملائم يعرضه الجدول 1:

$$S = P\ G_r\ G_a\ /(4\pi\ r^2) \tag{4}$$

---

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

الجدول 1

عوامل الكسب المتناحي لأنماط من الهوائي المرجعي مختلفة

نمط الهوائي المرجعي	عامل الكسب المتناحي، G_r	تطبيقات نمطية متعلقة بنمط الهوائي المرجعي
مشعاع متناحٍ	1,0	رادار، وصلة راديوية ساتلية أو أرضية
ثنائي القطب نصف موجي	1,64	تلفزيون، إذاعة بالموجات المترية (VHF) والديكامترية (HF) أحياناً
أحادي القطب قصير	3,0	إذاعة بالموجات الكيلومترية (LF) والهكتومترية (MF) وأحياناً بالديكامترية (HF)

وهكذا، حين يكون كسب الهوائي G_d ($G_a = G_d$) معبراً 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_a = G_m معبراً 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 المال

تستند المعادلات (2)-(10) إلى افتراض ظروف موجة مستوية (في المال البعيد)، فهي لا تنطبق على الحسابات المتعلقة بالمال القريب.

إذا أُدرجت المعادلة (2) في المعادلة (3) من أجل إزالة S، وأُدخل عامل C مراعاة لاتجاهية مصدر الإشعاع، حَصَلت المعادلة (7) التي تمكن من حساب شدة المال الكهربائي (E) في المال البعيد لمصدر الإشعاع:

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

حيث:

E: شدة المال الكهربائي (V/m)

Z_0 = 377 Ω، المعاوقة المميزة للفضاء الحر

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

C: عامل ($0 \le C \le 1$) يراعي اتجاهية مصدر الإشعاع (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 متجهِ شدة المجال الكهربائي ومتجهِ 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 متجهِ 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 مشاعيع بسيطة مُثلى كالهوائي الثنائي القطب البسيط. أما في حالة أنظمة هوائيات أكثر تعقيداً، فيلزم استعمال تقنيات رياضية أخرى من أجل تقدير سويات شدة المجال في منطقة المجال القريب. وهذه التقنيات الأخرى تمكن من تقديرات دقيقة نسبياً لشدة المجال، وكثافة القدرة وغيرهما من خصائص المجال المفيدة، وذلك حتى في منطقة المجال القريب المعقد.

ثم إن عملية القياس في المجال القريب أصعب من ذلك، إذ لا توجد طريقة مرجعية للمعايرة. وفي الوقت الحاضر، تعمل اللجنة الكهرتقنية الدولية على إعداد معيار لقياس شدة المجال الكهرمغنطيسي العالي الترددات (من 9 kHz إلى 300 GHz) ولا سيّما في المجال القريب [1]. وفضلاً عن ذلك، يوجد مزيد من المعلومات عن هذا الموضوع في الفقرة 4.1.6 من المعيار EN 61566 (قياسات التعرض لشدة المجال الكهرمغنطيسي للترددات الراديوية المتراوحة في مدى التردد 1 kHz - 1 GHz).

4.1.2 الاستقطاب

يُعرف الاستقطاب بأنه اتجاه متجهِ 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. وبما أن بعض آثار الإشعاع الكهرمغنطيسي تابعة لنمط التشكيل المستعمل، يلزم من ثم أن يؤخذ التشكيل في الاعتبار عند تقييم ظروف السلامة. ويجب أن يؤخذ التشكيل في الاعتبار أيضاً عند إجراء قياسات أو حسابات لمعرفة ما إذا كان حاصلاً تجاوز لحدود السلامة أم لا.

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.

1.5.1.2 خصائص الإرسال الراديوي

تصنف لوائح الراديو عمليات البث من المرسِلات الراديوية تبعاً لعرض النطاق المطلوب، ولخصائص الإرسال الأساسية والاختيارية. ويقوم التصنيف الكامل على تسع سمات كما يلي:

- السمات 1-4 تصف عرض النطاق، يُستعمَل فيها ثلاثة أرقام وحرف؛
- السمات 5-7 تصف الخصائص الأساسية، يُستعمَل فيها حرفان ورقم واحد؛
- السمات 8-9 تصف الخصائص الاختيارية، يُستعمَل فيها حرفان.

وعند 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. فبخصوص الإرسالات الصوتية والتلفزيونية، السمات ذات الصلة هي:

- إرسال راديوي AM (موجات كيلومترية (LF)، وهكتومترية (MF)، وديكامترية (HF) بنطاق جانبي مزدوج) A3E
- إرسال راديوي AM (موجات ديكامترية (HF) بنطاق جانبي وحيد، الموجة الحاملة مخفضة/متغيرة السوية) R3E
- إرسال راديوي AM (موجات ديكامترية (HF) بنطاق جانبي وحيد، الموجة الحاملة محذوفة) J3E
- صور تلفزيونية C3F
- إشارات صوتية تلفزيونية F3E أو A3E
- إرسال راديوي FM F3E أو F9E
- إرسال راديوي فيديوي رقمي (DVB) G7F
- إرسال راديوي سمعي رقمي (DAB) G7E

الجدول 2

السمات المستعملة لتعريف صنف الإرسال، استناداً إلى المعلومات المعطاة في لوائح الراديو

السمة 5 نمط تشكيل الموجة الحاملة الرئيسية		السمة 6 طبيعة الإشارات المشكلة للموجة الحاملة الرئيسية		السمة 7 نمط المعلومات المقصود إرسالها	
N	غير مشكل	0	إشارة غير مشكلة	N	لا معلومات مرسلة
A	تشكيل اتساع: نطاق جانبي مزدوج	1	قناة وحيدة تحتوي: معلومات مكماة أو رقمية غير مستعملة لحاملة فرعية مشكلة	A	إبراق من أجل استقبال سمعي
H	تشكيل اتساع: نطاق جانبي وحيد، موجة حاملة كاملة	2	قناة وحيدة تحتوي: معلومات مكماة أو رقمية مستعملة لحاملة فرعية مشكلة	B	إبراق من أجل استقبال أوتوماتي

الجدول 2

السمات المستعملة لتعريف صنف الإرسال، استناداً إلى المعلومات المعطاة في لوائح الراديو

السمة 5 نمط تشكيل الموجة الحاملة الرئيسية		السمة 6 طبيعة الإشارات المشكلة للموجة الحاملة الرئيسية		السمة 7 نمط المعلومات المقصود إرسالها	
R	تشكيل اتساع: نطاق جانبي وحيد، موجة حاملة مخفضة أو متغيرة السوية	3	قناة وحيدة تحتوي: معلومات تماثلية	C	طبصلة
J	تشكيل اتساع: نطاق جانبي وحيد، الموجة الحاملة محذوفة	7	قناتان أو قنوات تحتوي: معلومات مكمّاة أو رقمية	D	إرسال معطيات، قياس عن بعد وتحكم عن بعد
B	تشكيل اتساع: نطاقات جانبية مستقلة	8	قناتان أو قنوات تحتوي: معلومات تماثلية	E	مهاتفة بما فيها إذاعة صوتية
C	تشكيل اتساع: نطاق جانبي متبق	9	قناتان أو قنوات تحتوي: خليط من قنوات تماثلية ورقمية	F	تلفزيون (فيديو)
F	تشكيل زاويّ: تردد (FM مثلاً)	X	حالات غير مشمولة بطريقة أخرى	W	توليفة من العناصر الواردة أعلاه
G	تشكيل زاويّ: طور			X	حالات غير مشمولة بطريقة أخرى
D	خليط اتساع وتشكيل زاوي (بتآون أو بتتابع)				
P	تتابع نبضات: غير مشكل				
K	تتابع نبضات: مشكل بالاتساع				
L	تتابع نبضات: مشكل بالعرض/بالمدة				
M	تتابع نبضات: مشكل بالموضع/بالطور				
Q	تتابع نبضات: تشكيل زاوي للموجة الحاملة طيلة مدة النبضة				
V	تتابع نبضات: توليفة من K وL وM وQ، أو غير ذلك				
W	حالات غير مشمولة بما تقدم أعلاه: موجة حاملة مشكلة بأسلوبين أو أكثر (اتساع، زاوية، نبضة)				
X	حالات غير مشمولة بطريقة أخرى				

2.5.1.2 التعبير عن قدرة المرسل وشدة المجال بنمط التشكيل

يمكن الحصول على معلومات عن قدرة المرسل المزود بالهوائي 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 المحصلة بالقياس أو بالحساب مقارنة دقيقة بالسوّيات المشتقة.

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 السويات المشتقة روعي فيها مكونات 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 المحصلة بالقياس أو بالحساب والسوّيات المشتقة، من إجراء أحد التحويلين التاليين:

- تعديل القيم المحصلة بالقياس أو بالحساب بحيث تتضمن مكونات التشكيل؛
- تعديل السويات المشتقة بحيث تطابق قيم قدرة الموجة الحاملة فقط، أي بدون مكونات التشكيل.

ويعطي الجدول 3أ 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 3أ، نستطيع أن نشاهد أن القدرة المتوسطة، P_m، تساوي 1,5 مرة قدرة الموجة الحاملة، P_c.

ويجدر الانتباه هنا إلى أن الجدول 3أ يعطي القيم في "أسوأ الحالات"، إذ يفترض التشكيل بعمق 100%. أما في الواقع فإن عمق التشكيل لمرسل إذاعي يكون أقل من 100%، ومن ثم يكون متوسط القدرة مساوياً أقل من 1,5 مرة قدرة الموجة الحاملة. ولهذا السبب يعطي الجدول 3ب عوامل ضرب تناسب عمقاً نمطياً للتشكيل (أي 70% لإرسالٍ تصنيفُه A3E، ما يطابق نسبة بين متوسط القدرة وقدرة الموجة الحاملة (P_m/P_c) تساوي 1,25 وليس 1,5).

الجدول 3أ

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
A1A A1B	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A*C A*E	1	1,5	4	0,67	1	2,67	0,25	0,38	1
(3)B*B (3)B*E (3)B*W	–	–	–	–	1	1	–	1	1

الجدول 3أ

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								
	فدرة 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
C*F[4] تشكيل سلبي تشكيل إيجابي	–	–	–	–	1 1	1,85 1,42	–	0,54 0,87	1 1
F*...[5]	1	1	1	1	1	1	1	1	1
H*A H*B H*E	1	2	4	0,5	1	2	0,25	0,5	1
J*B[3] J*C[3] J*E[3]	–	–	–	0	1	1	0	1	1
K*A K*E	1	1,5	4/*d*	0,67	1	2,67/*d*	0,25*d*	0,38*d*	1
L*A L*E M*A H*E P*N	1	1	1/*d*	1	1	1/*d*	*d*	*D*	1
R*B[3] R*C[3] R*E[3]	–	–	–	–	1	1	–	1	1
G7E	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G7F	1	1	1	1	1	1	1	1	1

(1) يُرجَع إلى الجدول 2 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) يُفتَرَض أن الموجة الحاملة محذوفة بالكامل تقريباً، وأنه يمكن، في حالة تشكيل مع نغمة، أن تصل قدرة المرسل إلى الذروة في نطاق جانبي وحيد.

(4) ليست قدرة الموجة الحاملة، P_c ، معرفة بوضوح.

(5) الخصيصة الثالثة لا صلة لها بتقدير المخاطر.

d = عامل استعمال تتابع نبضات.

هذه العوامل معطاة بخصوص الإرسال السمعي الرقمي (DAB) والإرسال الفيديوي الرقمي (DVB) عندما تقاس القدرة في القناة كلها (وتكون على العموم 1,5 MHz للإرسال DAB و8 MHz للإرسال DVB).

الجدول 3ب

العلاقة بين قدرة الموجة الحاملة والقدرة المتوسطة وذروة القدرة والقدرة الآنية القصوى بخصوص أصناف إرسال مختلفة (حالة التشكيل النمطية)

صنف الإرسال (الخصائص الأساسية)	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*C (من أجل m = 70%)									
A*C (من أجل m = 70%)	1	1,25	2,89	0,80	1	2,32	0,35	0,43	1
C*F[1]									
تشكيل سلبي	–	–	–	–	1	4,34	–	0,23	1
تشكيل إيجابي	–	–	–	–	1	2,7	–	0,37	1
F*...	1	1	1	1	1	1	1	1	1

[1] ليست قدرة الموجة الحاملة، P_c، معرفة بوضوح.

ويمكن أيضاً استعمال الجدول 3ب من أجل تحويل قيم شدة المال إلى ترميزات أخرى. ولكن يُسترعى الانتباه إلى أن الجذر التربيعي لعوامل التحويل المعطاة في الجدول 3ب يجب استعماله بصدد قيم شدة المال. وعليه، ففي مثال الإرسال الراديوي AM المعطى أعلاه، يجب أن تُضرَب فقط القيمة الفعالة لشدة مجال الموجة الحاملة بالجذر $\sqrt{1,5}$ (أو $\sqrt{1,25}$) من أجل الحصول على القيمة الفعالة لشدة المال التي تدخل في حسابا مكونات التشكيل. وبالعكس في حالة السوية المشتقة (التي تدخل في حسابا مكونات التشكيل): يجب أن تُقسم قيمتها على الجذر $\sqrt{1,5}$ (أو $\sqrt{1,25}$) من أجل الحصول على السوية المشتقة المكافئة بخصوص الموجة الحاملة وحدها.

والقيمة الفعالة لشدة المال في المال البعيد يمكن أن تُحسَب انطلاقاً من القدرة المعروفة، باستعمال المعادلة (7). ونمط القدرة المناسب استعماله (P_m أو P_p) معطى في الجدول 4.

الجدول 4

العلاقة بين بعض ترميزات شدة المال وبعض ترميزات القدرة

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

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

6.1.2 مخططات التداخل

من شأن البنى الطبيعية والاصطناعية على السواء أن تكرر إشعاع مجال كهرمغنطيسي (EMF). 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 الإشعاع، أي في حالة إشعاع عدة قنوات إذاعة وتلفزيون من موقع واحد.

2.2 سويات شدة المجال قربَ الهوائيات الإذاعية

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

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

في حالة الإرسال بالموجات الكيلومترية والهكتومترية تكون الترددات أخفض من ترددات رنين كامل الجسم. ففي حالات تأثير المجال الكهرمغنطيسي مباشرة، تكون السويات الحدية (وتُعرف أيضاً بأنها "سويات 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 سويات 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 السويات 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 السويات المشتقة لشدة المجال الكهربائي، وعلى الخصوص قرب كبلات التغذية المكشوفة. وقد أصبحت كبلات التغذية مغلفة ومدفونة في كثير من محطات البث الإذاعي من أجل خفض شدة المجال، لكن هذا الإجراء لا يمكن تطبيقه حول صفيف هوائيات الإرسال نفسها. ولذا يجب أن تُجعَل أجزاء من الأرض المحيطة بمجموعات هوائيات 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 صفيف هوائيات البث الإذاعي بالموجات الديكامترية (HF) تجنح شدة المجال إلى التزايد اطراداً مع ارتفاع الهوائي فوق سطح الأرض. وهذا التزايد يُفسر 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 مكون أفقي صغير.

ومن المهم الإدراك أن المجال القريب لمجموعة 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 الفتحة الفعالة لمجموعة الهوائيات. وهذا يسبب بدوره أن قيم شدة المجال المأخوذة بالقياس في مواضع قريبة من مجموعة الهوائيات تنخفض أدنى من السويات المشتقة، ثم ترتفع من جديد كلما ابتعدت المسافة عن الهوائيات. إلا أنه، منذ الدخول في منطقة المجال البعيد، تتبع سويات شدة المجال المخطط العادي وهو الانخفاض كلما ابتعدت المسافة عن مجموعة الهوائيات.

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

في المحطات العالية القدرة للبث بالموجات VHF/UHF، تكون الهوائيات عادة مرفوعة نحو 100 m فوق سطح الأرض، على سَوارٍ أو أبراج بدون أواصر. ولذا تكون شدة المال 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)

يستعمَل نطاق الترددات هذا في عدد ضخم من خدمات الاتصالات، مثل وصلات الموجات الصغرية، الثابتة والمتنقلة، التي من نقطة إلى نقطة ومن نقطة إلى نقاط متعددة، وأنظمة البث الساتلي، وأنظمة الرادار العسكرية والمدنية، ومحطات الوصلة الصاعدة الأرضية، وغير ذلك.

وتتناول الأقسام الفرعية التالية الأنظمة المستعملة في الإذاعة.

1.4.2.2 تعاريف مناطق المال

بخصوص الهوائيات المكافئيّة التي قطرها $D >> \lambda$ ، تستعمل التعاريف التالية:

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

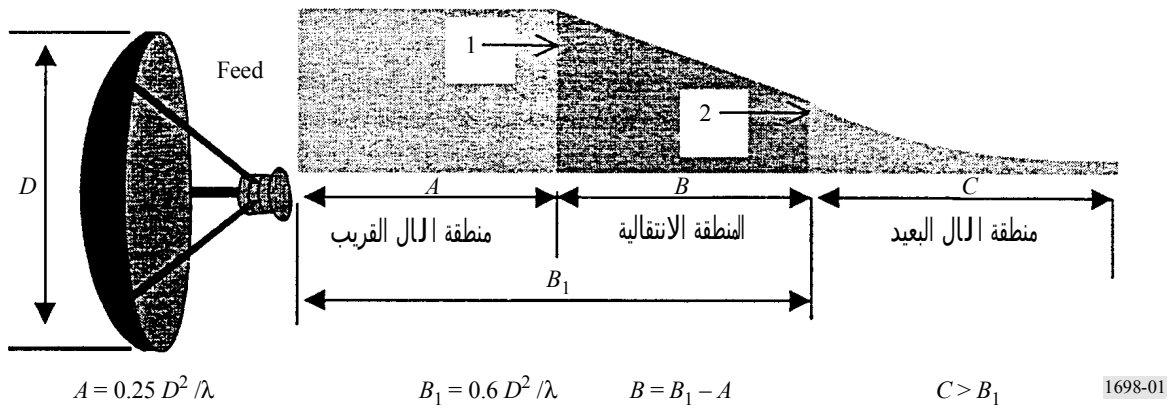
المنطقة الانتقالية - تتناقص كثافة القدرة في المنطقة الانتقالية بتناسب عكسي مع المسافة عن الهوائي.

منطقة المال البعيد - في منطقة المال البعيد أو منطقة Fraunhofer، تتناقص كثافة القدرة بتناسب عكسي مع مربع المسافة.

ويوضح الشكل 1 مختلف مناطق الهوائي المكافئي. لكن النهج التالي لا يصلح إلا على امتداد المحور الرئيسي للهوائي.

الشكل 1

كثافة القدرة لهوائي مكافئيّ على محور الهوائي



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

ويعبر عنها بالمعادلة التالية:

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

حيث:

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

P: قدرة المرسِل (W)

D: قطر الهوائي المكافئيّ (m).

يسترعى الانتباه إلى أن الكثافة، S، قيمتها قصوى في منطقة الـال القريب بأكملها.

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

في منطقة الـال البعيد، تتناقص الكثافة، S، بتناسب عكسي مع مربع المسافة طبقا للمعادلة التالية:

$$S\,(\mathrm{W/m^2}) = \frac{G\,P}{4\pi r^2}$$

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.

2.4.2.2 الوصلات الأرضية الثابتة والمتنقلة للموجات الصغرية

يتكون نظام إرسال - استقبال نمطي من مرسل - مستقبِل، وموجه للموجات، وهوائي مكافئيّ للإرسال والاستقبال. وتقع قدرة المرسل ضمن المدى من 0,1 W إلى 15 W، ومحور الهوائي المكافئيّ ضمن المدى 0,5 m إلى 4 m، تبعاً لنطاق الترددات المستعمل.

ويقع كسب الهوائي المكافئيّ المستعمل عادة، ضمن الـال 30 إلى 50 dB.

3.4.2.2 المحطات الأرضية الساتلية

يكون الموضع المثالي لمحطة أرضية ساتلية على أرض مستوية منخفضة أو في وادٍ بعيد عن أي منشأة أو منطقة صناعية. أما في الواقع فكثيراً ما توضع هذه المحطات في المناطق الحضرية، على سطوح المباني، وغير ذلك.

وعلى العموم، تقع زاوية ارتفاع الحزمة الرئيسية بين 5° و50°؛ ويبلغ أقصى طول لنصف قطر الهوائي 15 m، على الرغم من وجود أمثلة نادرة على هوائي مكافئي قده اكبر.

وفي منطقة الـال القريب، يمكن لشدة مجال الوصلات الثابتة والمتنقلة للأرض أن تتجاوز السويات المرجعية، وخصوصاً حين تكون ذات قدرات أعلى. فلذا يجب وضع حائل مادي دون نفاذ أي شخص غير مرخص له إلى المنطقة. لا بل إن السويات المرجعية قد يحصل تجاوزها حتى في المنطقة الانتقالية، ناهيك عن منطقة الـال القريب.

وعلى وجه الخصوص، من شأن المحطات الأرضية الساتلية العالية القدرة أن تُحدِث، في حالة عدد كبير منها، مجالات تتجاوز شددها السويات الموصى بـا في كلتا المنطقتين، الـال القريب والمنطقة الانتقالية. وبما أنه يحتمل أن تمتد هذه المناطق امتداداً لا يستهان به، يلزم تركيز العناية في اختيار موضع المحطة الأرضية الساتلية. وبما أن الإشعاع يصدر بزاوية ارتفاع معينة، يجب تجهيز المحطة بآليات تمنع ميكانيكياً أي تغير في زاوية الارتفاع من شأنه جعل الإشعاع يتجه إلى فسحة يحتمل أن يوجد فيها شخص ما.

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, *specific absortion rate*) (انظر التذييل 4)، 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:

$$S_t = \sum_{i=1}^{n} S_i \tag{11}$$

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

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{S_i}{L_i} \leq 1 \tag{12}$$

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

هذا هو المبدأ الأساسي، لكن تطبيقه يشتمل على فروق (انظر التذييل 4).

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، إذا أُريد حساب حدود التعرض بدقة مقبولة.

وأما الدقة في القياس فإنها مرهونة بحجم ونمط المسبار، وكذلك بموضع القائس بالنسبة إلى مصدر الإشعاع وإلى المسبار.

ولا توجد بعد معايير دولية لطرائق الحساب والقياس.

فلب 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

1.3 الإجراءات

تمكن طرائق الحساب التحليلية والرقمية من توقع المجال الخارجي أو الداخلي الناجم عن مشعاع كهرمغنطيسي. والحسابات مفيدة في تقدير سوية 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 المحصلة 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, *specific absortion rate*).

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 المشعاع والنقطة المقصودة بالتوقع. وبخصوص حسابات المعدل SAR تتأثر جودة النتائج بدقة النموذج البدني.

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

ومن أمثلة هذه المعلمات: التردد، متوسط القدرة، ذروة القدرة، عرض النبضة، طول النبضة، معدل تكرار النبضات، ومخطط الهوائي وكسبه وهندسته.

1.1.3 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 الحر، من أجل حساب كثافة القدرة:

$$S = \frac{P\,G}{4\pi\,d^2}$$

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:

$$S = \frac{E^2}{\eta} = H^2\eta$$

حيث:

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

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

η: المعاوقة الملازمة للفضاء الحر، 377 Ω.

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

$$E = \sqrt{\frac{P\,G\eta}{4\pi\,d^2}} = \frac{5{,}5\sqrt{P\,G}}{d}$$

$$H = \sqrt{\frac{P\,G}{4\pi\,d^2\eta}} = \frac{\sqrt{P\,G}}{68{,}8\,d}$$

لكن هذه العلاقات تصلح فقط 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 العلاقات المذكورة 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.

2.1.3 الإجراءات الرقمية

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

- 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, *method of moments*)
- طريقة متعددات الأقطاب العديدة (MMP, *multiple multipole method*)
- طريقة الفروق المنتهية في المجال الزمني (FDTD, *finite-difference time-domain method*)
- طريقة العناصر المنتهية (FEM, *finite element method*)
- طريقة المعاوَقات.

في صدد كل تطبيق، يجب إجراء تقييم من أجل تقرير أي من هذه الطرائق هي الأنسب لحل المسألة المطروحة.

وكل من هذه الطرائق تمكن 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.

طريقة العزوم (MOM, *method of moments*)

كثيراً ما تُستعمَل طريقة العزوم في تصميم أنظمة هوائيات الإرسال الراديوي (خرج المرسل، وقدرته، وكسب الهوائي، الخ.) 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 فتكمُن 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, *specific absortion rate*)، على نماذج قدرية من الأجسام البيولوجية. وبذه الطريقة أيضاً تُحسب شدة المجال الكهربائي داخل جسم بيولوجي، عن طريق حل معادلات Maxwell التكاملية بواسطة دالة Green.

طريقة المحولة السريعة محولة Fourier/طريقة التدرج الاقتراني (FFT/CG)

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

طريقة الفروق المنتهية في المجال الزمني (FDTD)

طريقة FDTD رقمية تُستعمَل لحل معادلات Maxwell التدويرية التفاضلية في المجال الزمني. ويمكن استعمالها لحساب شدة المجال الكهرمغنطيسي الداخلي والخارجي، وتوزيع المعدل SAR في الأجسام البيولوجية المعرضة في المجالين القريب والبعيد. ومقتضى 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. تُعتَبر هذه الطريقة أقوى الطرائق وعدا فيما يتعلق بحساب معدل الامتصاص النوعي (SAR)، لكن الحسابات الدقيقة تستلزم حواسيب قديرة جداً.

طريقة متعددات الأقطاب العديدة (MMP, *multiple multipole method*)

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.

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.

1.2.1.3 حسابات شدة المجال

يمكن أن تُستعمَل أكثرية الطرائق المذكورة أعلاه لحساب سويات 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.

2.2.1.3 حسابات معدل الامتصاص النوعي

نظراً لصعوبة قياس متوسط المعدل SAR لكامل الجسم أو ذروته المكانية في الكثير من حالات التعرض، يعول 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 معينة فيتوقف على التردد، مثلاً، وظروف التعرض، وقد الشيء المعرض، 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 المعرض 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.

4 القياسات

1.4 الإجراءات

يسترعى الانتباه إلى أن طرائق القياس محفوفة بالمخاطر، ولا سيما في المجالات القريبة والمنخفضة التردد. ففي نطاقات الترددات المنخفضة تكون طريقة القياس دقيقة جداً ومعقدة جداً، إذ إن مسافة نقطة القياس (عن مصدر الإشعاع) تكون عادة أقصر بكثير من طول الموجة. ولهذا السبب يقسم مدى الترددات 10 kHz-30 GHz 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).

1.1.4 نطاقات الموجات الكيلومترية/الهكتومترية (LF/MF)

للتحقق من النتائج النظرية، تُجرى قياسات شدة المجال في المنطقة القريبة باستعمال أدوات خاصة (مقاييس شدة المجال) مكونة من ثلاثة ثنائيات قطب قصيرة منصوبة بصورة متعامدة. ويوصى بعدم استعمال أي أداة تستلزم كبلاً لتزويدها بالقدرة.

وتحاشياً لأي تأثير مخِل بالقياس من جهة الشخص الذي ينفذه، تُربَط أداة القياس بعصا معزولة. والمسافة بين الأداة والمنفذ يجب تحديدها مع مراعاة ما إذا كان يحدث أي تغير في سلم الأداة بسبب أي حركة من المنفذ. 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)

في هذه الحالة تُطبق الطريقة المعيارية للقياس، نظراً لطول الموجة والمسافات عن مصادر الإشعاع.

2.4 الأدوات

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 أدوات تفي بالغرض، والتقيد بالتصرف الصحيح في تنفيذ القياس. فمن الأهمية بمكان معرفة خصائص أدوات القياس، لأن هذه الخصائص تقرر اختيار الأداة المناسبة. والخصائص المرتبطة بالترددات، مثل التفاعلات الكبلية، والاستجابات غير المعايَرة خارج النطاق، والاستجابة الترددية المقوَّلبة، كلها بالغة الأهمية بخصوص الأدوات العريضة النطاق. وبالمقابل، هناك خواص للمجال يجب مواءمتها لخصائص الأدوات، 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.

وأدوات القياس اللازم استعمالها في هذه الحالة هي:

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

1.1.2.4 أمور عامة

التجهيزات الأساسية هي:

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

2.1.2.4 المسابير

أكثرية المسابير متناحية أو شاملة الاتجاه في ثلاثة أبعاد، مَعَدة لقياس الطاقة المشَعة 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 معينة أظهرت أن بعض المسابير يمكن أن تكون أبعادها أكبر بالنسبة إلى طول موجة المجال الكهربائي؛
- الاستجابة كما هو متوقع لتغيرات الظروف البيئية، مثل الحرارة والرطوبة.

وأثناء القياس، من المهم جداً أن توضع المسابير المتناحية في موضع يجعل التوصيل يقلل عند المسبار تشويش الـال بسبب كبلات التوصيل. وتشويش الـال هذا مشكلة أكثر شيوعاً في عمليات قياس شدة الـال 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 الـال بوحدة القياس.

ومن المهم جداً الملاحظة أن من الممكن أن تشتغل الكبلات شغل هوائي، فتعدل الـال عند المسبار، بحيث تأتي قراءة القيمة مغلوطة. وهذه المشكلة يمكن حلها أحياناً، بتثبيت الكبلات أثناء الاختبار في وضع عمودي على الـال الكهربائي.

2.2.4 خصائص أدوات القياس لكل من الـالين الكهربائي والمغنطيسي

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

1.2.2.4 أنماط ومواصفات الأدوات العريضة النطاق

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

الشكل 2

الأدوات العريضة النطاق

1698-02

تتكون الأدوات العريضة النطاق من محاسيس، وهذه يمكن أن تكون غير متناحية فيقاس با مكون فضائي وحيد للمجال، ويمكن أن تكون متناحية فتقاس با مكونات الـال الثلاثة في الوقت نفسه. وتمكن هذه الأدوات من قياس السوية الكلية للمجال الكهربائي أو المغنطيسي الآني أو قيمة شدة الـال الفعالة (RMS) أو قيمة متوسط كثافة القدرة في فترة زمنية معينة، وهي عادة 6 دقائق تبعاً لمعايير التعرض.

وتنقسم الأدوات العريضة النطاق إلى الأصناف التالية، تبعاً للكاشف المستعمَل:

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

وهذه الأدوات يمكن استعمالها في كلا الحيزين، المجال القريب والمجال البعيد.

3.2.4 أنماط ومواصفات الأدوات الضيقة النطاق

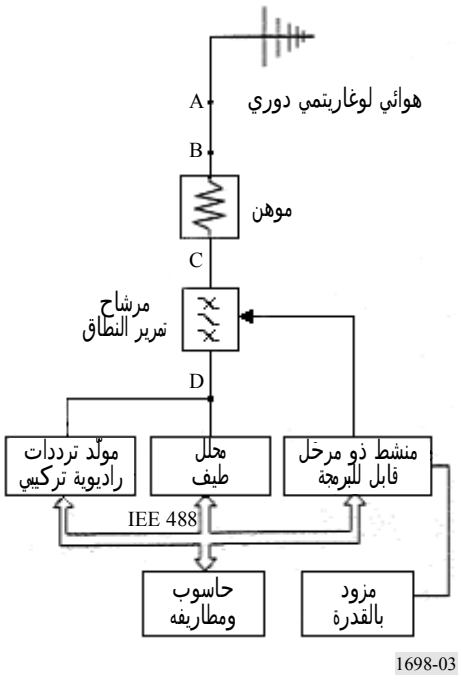
الأدوات الضيقة النطاق انتقائية تجاه الترددات، فتمكّن من قياس شدة المجال الكهرمغنطيسي في مدى معيّن من الترددات المختلفة. فيستطاع بواسطة محساس لا متناحٍ أو هوائي لا متناحٍ تقدير اتجاه المجال واستقطابه. ويجب التنبّه عند نصب التجهيزات إلى أن المجالات الناجمة عن ترددات عالية تتغير بسرعة في الفضاء تبعاً لِقد 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 ناجم عن ترددات عالية، أن تُستعمَل أدوات ذات خواص تحليلية ملائمة (بخصوص الاستجابة من حيث التردد والاستبانة) من أجل الحصول على نتائج جيدة من تحليل الطيف بواسطة محولة Fourier .

ويعطي الشكل 3 المخطط الفدري لنظام قياس ضيق النطاق.

الشكل 3

مخطط فدري لنظام القياس

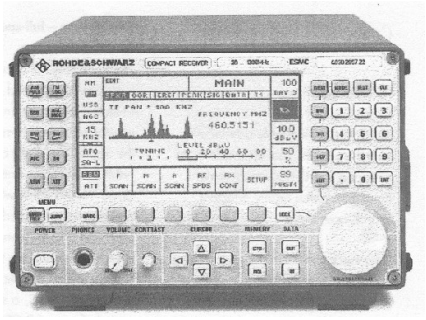


يتألف النظام من المكونات الأساسية التالية:

- هوائي معاير، يحول المال الكهربائي الخاص بوائي ثنائي القطب أو المال المغنطيسي الخاص بوائي إطاري، إلى موجة على خط نقل؛
- خط نقل وتوصيل معاير أو كبل متحد المحور معاير؛
- مستقبِل انتقائي، وهو عموماً محلل طيف (أنظر الشكل 4)، يقيس، بواسطة دارة توليف، شدة الإشارة المستقبَلة باعتبارها تابعة للتردد. فيعطي محلل الطيف قيم التوتر أو القدرة في مجال التردد.

الشكل 4

مستقبِل انتقائي مع محلل طيف



1698-04

إنه لمن الهام جداً الاعتناء أثناء إجراء هذه القياسات بألا تشوش أدوات القياس المال الجاري قياسه.

3.4 مقارنة بين التوقعات والقياسات

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

5 التدابير الاحترازية الواجبة في محطات الإرسال وفي جوارها

هذا القسم يوجز التدابير الاحترازية الواجب اتخاذها في محطات الإرسال الإذاعي العالية القدرة، من أجل تلافي المخاطر المحتملة بسبب إشعاع الترددات الراديوية. وتنقسم هذه المخاطر إلى فئتين رئيسيتين، الأولى فئة الأخطار المباشرة على الصحة التي تقع عندما يتعرض الناس لسويات عالية من إشعاع الترددات الراديوية، مثل الصدمات، والحروق، وإمكان سوء أداء الغرسات الطبية. وتضم الفئة الثانية الأخطار غير المباشرة مثل أن تسبب الإشعاعات الراديوية انفجارات أو حرائق أو تشويش وظائف الآلات من رافعات ومركبات الخ.

1.5 التدابير الاحترازية للتخفيف من الآثار المباشرة لإشعاعات الترددات الراديوية 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 بشأنا 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 المعرضة. فيجب أن لا يكون النفاذ إلى مثل هذه المساحات ممكناً إلا باستعمال مفتاح أو أداة 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، وغير ذلك.

وإذا لزم تناول مثل هذه الأشياء ضمن مجال الترددات الراديوية، توفر وسائل إضافية لاتقاء الصدمات والحروق، مثل القُفازات الواقية والعلامات المنبهة الفعالة.

2.1.1.5 الإجراءات التشغيلية

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

- المساحات الممكن أن يتعرض فيها الناس لسويات توتر "مشتقة" أو لسويات "استقصاء"؛
- مختلف فئات الناس المحتمل تعرضهم، مثل الموظفين، والشركاء في الموقع، وأفراد عامة الجمهور، وغيرهم؛
- عواقب اختلال شروط التشغيل، مثل التسرب من حواف الترددات الراديوية، وسوء تراصف الهوائي، وأخطاء التشغيل.

ويمكن إجراء تدقيق أولي لسويات إشعاع الترددات الراديوية بواسطة الحساب أو النمذجة الرياضية، ولكن يجب إجراء قياس لبعض العينات لأغراض التحقق. ولكن في أكثرية الحالات، يلزم إجراء قياسات لتحديد سويات الإشعاع بوجه أدق. والمقادير الفعلية الواجب قياسها (شدة المجال الكهربائي، شدة المجال المغنطيسي، كثافة القدرة، التيار المستحَثّ) يجب تحديدها بالاستناد إلى الظروف المعينة. ويشمل هذا القياس ترددات المحطة، ومنطقة المجال (المجال القريب/البعيد)، والتحقق من الالتزام بالتقييدات الأساسية (كالمعدل SAR) أو فقط بالسويات "المشتقة/الاستقصائية". وعلى ضوء ذلك يتقرر بسهولة ما إذا كان ينبغي قياس مكونات المجال الثلاث فرادى أو ينبغي استعمال أدوات قياس متناحية. وعندئذ ينبغي إجراء عمليات مسح لإشعاع الترددات الراديوية على أيدي موظفين مدربين على استعمال مثل هذه الأدوات، يتّبعون فيها إجراءات القياس المفروضة، ويسجلون النتائج بنسق محدد.

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

ويجدر الأخذ بطرائق عمل تضمن عدم تجاوز إشعاع الترددات الراديوية الحدود المفروضة. وينبغي تدريب الموظفين على ما يناسب من إجراءات السلامة من هذه الإشعاعات. أما أعمال الصيانة في المساحات المقيد النفاذ إليها بسبب السويات العالية لإشعاع الترددات الراديوية، فيجب تخطيطها بحيث تجرى، قدر الإمكان، في فترات انقطاع الإرسال أو فترات تغير مخطط الإشعاع. إلا أنه ينبغي أيضاً الموازنة في الاهتمام بين أخطار الإشعاعات 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 تُحدد وتعلم 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 متقاسَمَة مع منظمات أخرى. والموظفون الذين يعملون بصورة منتظمة في المناطق العالية فيها سويات الإشعاع يلزم تزويدهم جميعاً بجهاز شخصي للإنذار أو لقياس خطر الإشعاعات.

ويجب أن تُدون في سجلات حالات التعرض لسويات إشعاع من الترددات الراديوية تفوق السوية المحددة. ويتعين على الشركات أو المنظمات المسؤولة عن تشغيل محطات الإرسال أن تراقب صحة الموظفين لديها الذين يعملون في المساحات العالية فيها سويات إشعاع الترددات 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 إشعاعات الترددات 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 إشعاعات الترددات الراديوية وآثارها، وعلى الجوانب الطبية ومعايير السلامة.

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 معينة يمكن فيها أن تتجاوز إشعاعات الترددات 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 مزودين بغرسات طبية. فيلزم اعتماد إجراءات توفر معلومات عن المخاطر الصحية لمثل هؤلاء الزائرين المحتملين، كما يلزم اعتماد الإجراءات المناسبة بخصوص نفاذهم إلى المساحات الخطرة. ويفتَرض أن توفر لمن يزورون الموقع بصورة متواترة التعليمات الأساسية بشأن السلامة من إشعاعات الترددات الراديوية.

ويجب أن يُدرس موضوع إجراء مسوح لإشعاعات الترددات الراديوية خارج حدود موقع المحطة، وعلى الخصوص حيث يُحتمل أن تسبب التوترات المستحثة 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.

ويُعطى مثال لإيضاح ما تقدم في التذييل 3 (الشكلين 43 و44).

2.5 التدابير الاحترازية للتخفيف من الآثار غير المباشرة للإشعاعات الراديوية

يمكن أن تحدث الآثار غير المباشرة عن الإشعاعات الراديوية، مثل اندلاع النار في مواد قابلة للاشتعال، مع سويات أدنى بكثير من السويات "المشتقة/الاستقصائية"، وخصوصاً في حالات الإرسال بالموجات الهكتومترية/الديكامترية (MF/HF). وذلك،

لأن المواد القابلة للاشتعال قد تكون مخزنة في موقع فيه بنى موصلة، مثل شبكة أنابيب تؤدي وظيفة هوائي استقبال فعال بما فيه الكفاية. لكن الأخطار الفعلية نادرة، وإن كانت تدد منشآت المعالجة الصناعية، ومستودعات المحروقات، ومحطات التزوّد بالوقود. بيد أن التقييم المفصل بعيد عن البساطة. ولذا فإن الإجراءات الموصى با 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 معين من المرسلات والبنية الموصلة، تجنبا للخطر. وتقوم الخطوة الأولى في هذا التقييم على تحديد أدنى قيمة لشدة المال يمكن أن يتمثل فيها خطر اندلاع حريق، نظراً لترددات المرسل المعين 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 المال 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 المال 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 المعايير الوطنية، مثل المعيار BS 6657 المعمول به في المملكة المتحدة. 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. وإن حصانة هذه الأنظمة مشمولة بلوائح الملاءمة الكهرمغنطيسية (EMC) (انظر التذييل 3).

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

التذييل 1
للملحق 1

أمثلة على شدد مجال قريب من هوائيات الإرسال، فيمها محصلة بالحساب

1 المثال A - منحنيات شدة المال الكهربائي والمال المغنطيسي

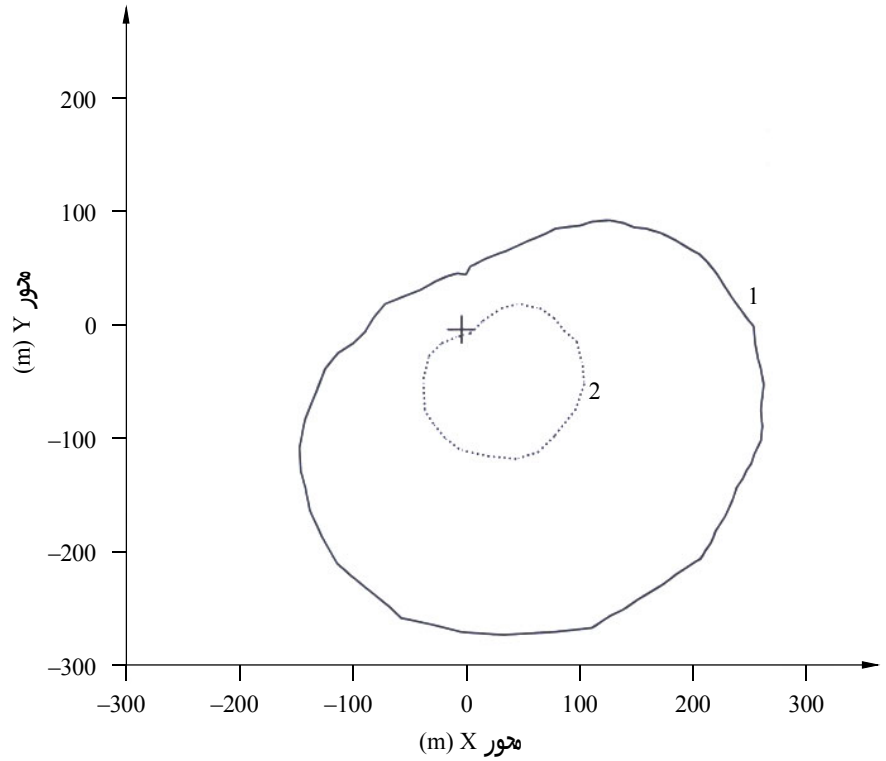
حسبما جاء في القسم 3 أعلاه، يمكن إجراء حسابات رقمية لتوزيع شدة كل من المالين الكهربائي والمغنطيسي قرب هوائيات الإرسال الإذاعي، من أجل تحديد قيم شدة المال في بعض النقاط أو المساحات، ولا سيما منطقة المال القريب حيث تكون بنية المال معقدة جداً على العموم. ويمكن إجراء حسابات أيضاً من أجل التحقق من خطوط الكفاف (الخطوط

أو السطوح الثابتة فيها شدة المال) حيث يتم التقيد بالقيم الحدودية المناسبة (السويات) للمجال الكهرمغنطيسي. وعلى هذا النحو يمكن (لأغراض التخطيط، مثلاً) تقدير امتداد المساحات التي يمكن أو يجب أن تُنفذ فيها تدابير حماية.

وفي وثيقة تقنية صادرة عن الاتحاد الإذاعي الأوربي (EBU) [2] معطى كثير من نتائج الحسابات. فالأشكال التالية تعرض بصورة منحنيات بيانية، بعض نتائج الحسابات لهذه الأمثلة (هوائيات بث إذاعي بالموجات الهكتومترية (MF) والديكامترية (HF)).

الشكل 5

هوائي أحادي القطب يبث بالموجات الهكتومترية؛ خطوط الكفاف لشدة المال الكهربائي (القيمة الفعالة) مثلةً بعض السويات

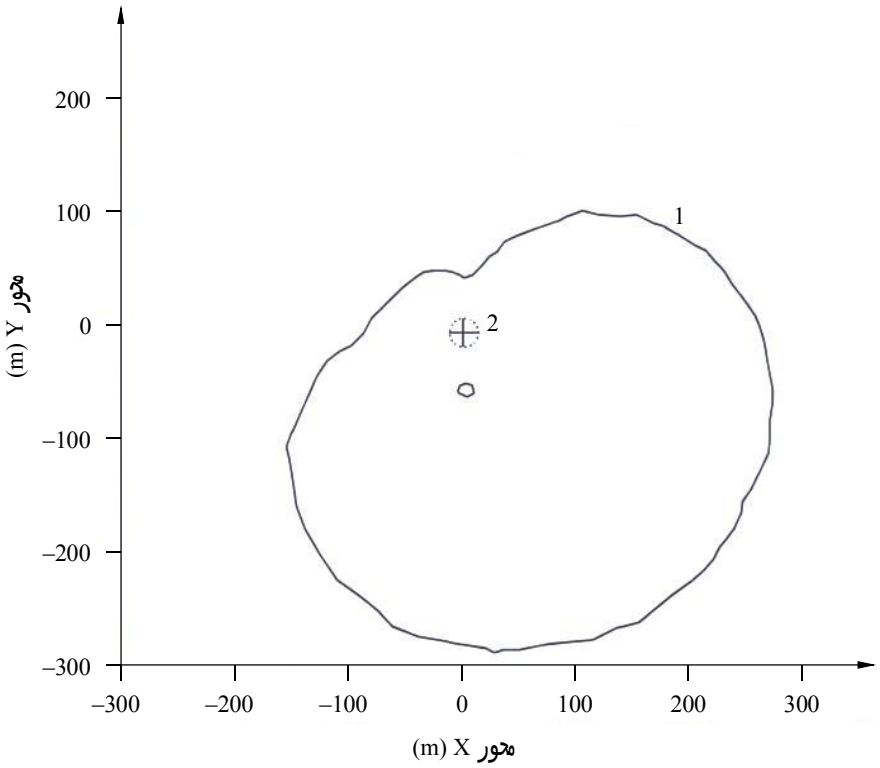


1: ICNIRP (اللجنة الدولية للحماية من الإشعاعات غير المؤينة) (مطبوع عام) = 60 V/m
2: 158 V/m
E_{max}: 449,8 V/m
التردد: 1 422 kHz
القدرة: 600 kW
ارتفاع نقطة التقييم: 1,5 m فوق سوبة الأرض

1698-05

الشكل 6

هوائي أحادي القطب يبث بالموجات الهكتومترية؛ خطوط الكفاف لشدة المجال المغنطيسي (القيمة الفعالة) مثلةً بعض السويات

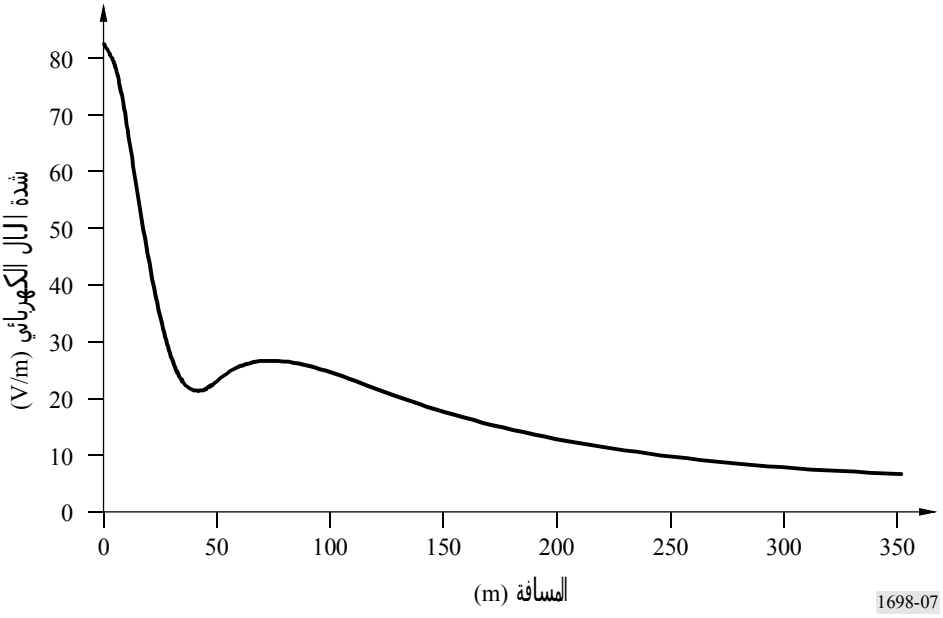


1: ICNIRP (اللجنة الدولية للحماية من الإشعاعات غير المؤينة) (مطبوع عام) = A/m 0,16
2: A/m 1,3
H_{max}: A/m 1,6
التردد: kHz 1 422
القدرة: kW 600
ارتفاع نقطة التقييم: m 1,5 فوق سوية الأرض

1698-06

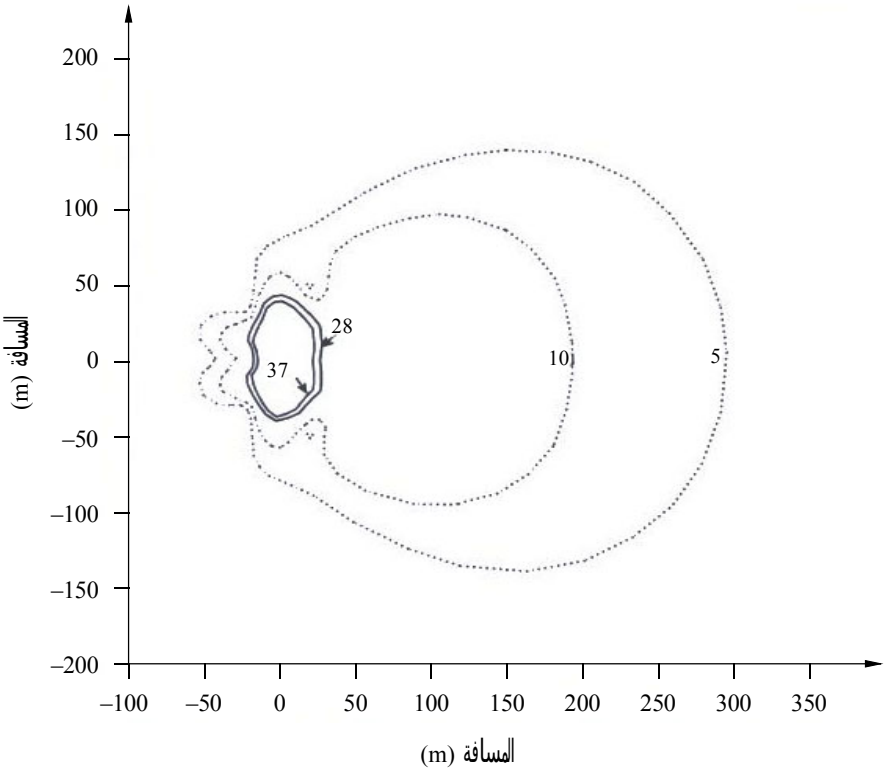
الشكل 7

مجموعة هوائيات سارية تبث بالموجات الديكامترية؛ منحني خط التسديد لشدة المال الكهربائي (القيمة الفعالة) والقيم MHz 6 وkW 500 (ارتفاع نقطة التقييم m 1,5 فوق سوية الأرض)



الشكل 8

مجموعة هوائيات سارية تبث بالموجات الديكامترية (HF)؛ منحني الخط الكفافي لشدة المال الكهربائي (القيمة الفعالة) (V/m) مثلاً بعض السويات

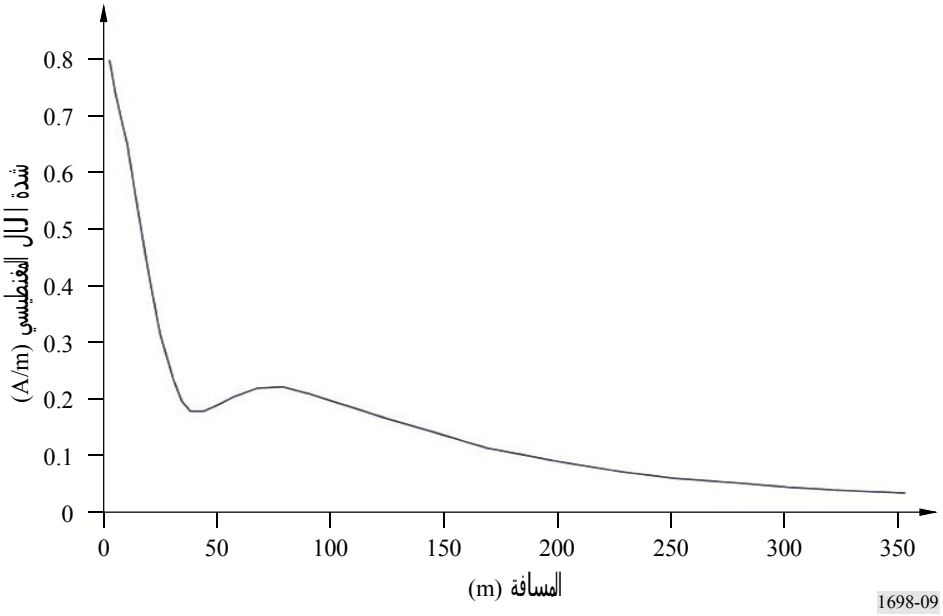


القدرة: kW 500
التردد: MHz 6
ارتفاع نقطة التقييم: m 1,5 (فوق سوية الأرض)

1698-08

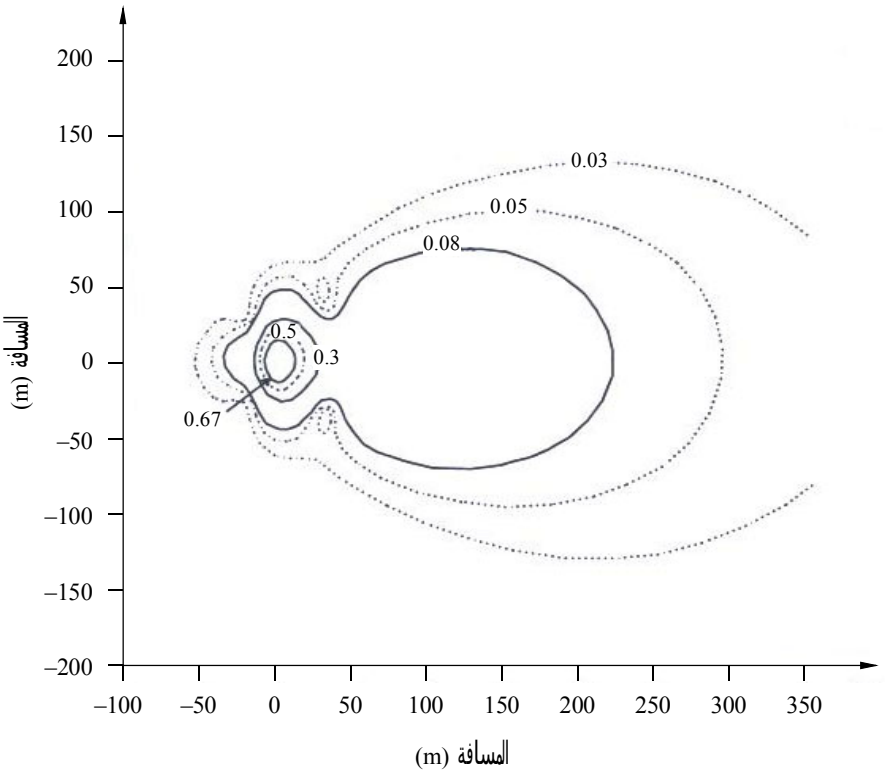
الشكل 9

مجموعة هوائيات سارية تبث بالموجات الديكامترية (HF)؛ منحني خط التسديد لشدة المال المغنطيسي (القيمة الفعالة) بقيم MHz 6 وkW 500 (ارتفاع نقطة التقييم m 1,5 فوق سوية الأرض)



الشكل 10

مجموعة هوائيات سارية تبث بالموجات الديكامترية (HF)؛ الخطوط الكفافية لشدة المال المغنطيسي (القيمة الفعالة) (V/m) مثلة بعض السويات



القدرة: kW 500
التردد: MHz 6
ارتفاع نقطة التقييم: m 1,5 (فوق سوية الأرض)

1698-10

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

الغرض من هذا المثال تحديد 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.

في حالة البث في نطاقات الترددات الأقل من 10 MHz تكون العلاقات الفيزيائية داخل المجال الكهرمغنطيسي أكثر تعقيداً بكثير منها مع نطاقات أخرى. إذ إنه، خلافاً لحالة ترددات الموجات الصغرية حيث المجال الكهرمغنطيسي له خصائص منطقة المجال البعيد حتى على مسافات قريبة جداً من مصدر الإشعاع، وحيث يكون مفهوم كثافة القدرة المشَعة (شدة متجه Poynting) مفيداً جداً، يتسم المجال قرب الهوائي بتعقيد شديد في حالة الإرسال بالترددات الهكتومترية/الكيلومترية (MF/LF). فبالواقع، تزول العلاقة البسيطة بين المجال الكهربائي والمجال المغنطيسي، في منطقة المجال القريب: إذ إن المجالين ليسا هنا مطاوَرْين، وليست نسبتهما 377 Ω. وهذا الواقع يزيد في تعقيد العلاقات داخل المجال الكهرمغنطيسي في حالة الترددات ما تحت 10 MHz.

فمن الواضح أن قيم شدة المجال المحصلة بالقياس تتوقف على نمط هوائي الإرسال، وقدرة الإرسال، والمسافة عن الهوائي المرسِل. مثلاً: في حالة مرسِل عالي القدرة، يمكن لقيم شدة المجال للمكون 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 بكثير، تسمى الهوائيات الستارية. هذه الهوائيات هامة جداً لأغراض الإرسال العالي القدرة بالموجات القصيرة (الديكامترية، HF). إنا بالواقع صفيفات من الهوائيات الثنائية القطب الأفقية المرتبة في مستوٍ عمودي.

إن النـزعة العامة نحو زيادة القدرة وكسب هوائيات الإرسال قوية جداً في مجال الإذاعة بالموجات القصيرة. وقد أصبح من الأمور المعيارية، في مراكز الإرسال الكبرى ذات التغطية العالمية، أن تكون قدرة المرسل 500 kW، وكسب الهوائي (في اتجاه الإشعاع الأقوى) أكثر من 20 dB (بالنسبة لثنائي القطب نصف الموجي). فالمرسل المشتغل بقدرة 500 kW وهوائي كسبه 20 dB يُحدِث قدرة مشعة فعلية (ERP) قيمتها 50 MW.

وفي الفقرة 2.3 توصف بإيجاز التقنية الرقمية التي استعملت لحساب شدة كل من المجالين القريبين الكهربائي والمغنطيسي للهوائيات العالية القدرة. وفي الفقرة 3.3 تُعطى نتائج هذه الحسابات بخصوص المجالين قرب الهوائيات الستارية المرسِلة بالموجات الديكامترية (HF).

2.3 التحليل الرقمي للبنى الأسلاكية

أُجريت حسابات المجالين القريبين للهوائيات الستارية باستعمال برنامج تحليل الهوائيات والناثرات الأسلاكية (AWAS, Analysis of Wire Antennas and Scatterers)، وهو أحد عدة برامج أعدّتها مدرسة الهندسة الكهربائية بجامعة بلغراد، من أجل تحليل الهوائيات والناثرات الأسلاكية. وباختصار، يعتمد هذا البرنامج على صياغة ما يسمّى بالمعادلة ذات الكمونَيْن المتعلقة بتوزع التيار على طول الأسلاك. وتُحَلّ هذه المعادلة باستعمال طريقة العزوم (MOM) مع تقريب متعدد الحدود بخصوص التيار.

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

$$\left(\mathbf{E} + \mathbf{E}_i\right)_{\tan} = 0 \qquad (13)$$

حيث:

$\mathbf{E}$: المجال الكهربائي المتولد عن تيارات وشحنات البنية الأسلاكية

$\mathbf{E}_i$: المجال الكهربائي المسلط، الذي يُنمذِج إثارة النظام.

والمجال المسلط 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 يُنمذِج المولد الحافز للهوائي (في تحليل الهوائيات المرسِلة).

والمجال الكهربائي المتولد عن تيارات وشحنات البنية الأسلاكية يمكن التعبير عنه بحدود الكمون الاتجاهي المغنطيسي، $\mathbf{A}$، والكمون اللا اتجاهي الكهربائي، V، كما يلي:

$$\mathbf{E} = -\,\mathrm{j}\omega\,\mathbf{A} - \mathrm{grad}V \tag{14}$$

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 الأسلاكية إلى عدد N من القطع (لكل منها محور محلي، s_m). وأخيراً تحصل معادلة الكمونَيْن (وتسمى أيضاً معادلة الكمون الاتجاهي والكمون اللاتجاهي) الخاصة بتوزع التيار، على الشكل التالي:

$$\sum_{m=1}^{N} \int_{0}^{h_m} \left[\mathbf{u}_p \cdot \mathbf{u}_m I_m\,(s_m)\, g(r_a) + \frac{1}{k^2}\,\frac{\mathrm{d}I_m(s_m)}{\mathrm{d}s_m}\,\mathrm{grad}\,g(r_a) \right] \mathrm{d}s_m = \frac{\mathbf{u}_p \cdot \mathbf{E}_i}{\mathrm{j}\,\omega\,\mu_0} \tag{15}$$

حيث:

I_m: شدة التيار على طول القطعة

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

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

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

والمعادلة (15) تكاملية وتفاضلية من أجل توزع التيار، ولا يمكن حلها إلا رقمياً. ولهذا الغرض، تُتبع الخطوط التوجيهية العامة بخصوص طريقة العزوم، وتُقرب 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، يعني:

$$I_m(s_m) = \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^i \tag{16}$$

حيث:

h_m: طول القطعة

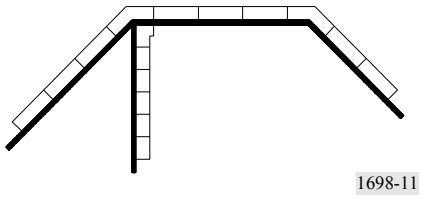
I_{mi}: معاملات الترجيح.

لا يمكن أن تُحَلّ المعادلة (15) حلاً مرضياً في جميع النقاط على طول القطع السلكية، ولكن تقريبياً فقط. فطبقاً لطريقة العزوم (MOM) تُختار مجموعة من دوال الترجيح، وتقيم هذه الدوالّ وحواصل الضرب الداخلية للمعادلة (15). وتُعتبر الدوال

نبضات. وكل نبضة تعتَبر ثابتاً للوحدة المعينة، محدداً في قطعة فرعية قصيرة، وصفراً في غير موضع. ويبين الشكل 11 التوزع النمطي للنبضات.

الشكل 11

التوزيع النمطي لدوال الترجيح المستعملة بشكل نبضات في البرنامج AWAS



ومن تقييم حواصل الضرب الداخلية، بخصوص نبضة ما محددة في القطعة الفرعية (s_{p1}, s_{p2}) على طول محور القطعة السلكية p، تنتج المعادلة (17) التالية:

$$\sum_{m=1}^{N}\sum_{i=0}^{n_m} I_{mi}\left\{\int_{s_{p1}}^{s_{p2}}\int_{0}^{h_m}\mathbf{u}_p\cdot\mathbf{u}_m\left(\frac{s_m}{h_m}\right)^i g(r_a)\,\mathrm{d}s_m\mathrm{d}s_p+\frac{1}{k^2}\frac{i}{h_m}\int_{0}^{h_m}\left(\frac{s_m}{h_m}\right)^{i-1}\left[g(r_a)_{s_{p2}}-g(r_a)_{s_{p1}}\right]\mathrm{d}s_m\right\}$$
$$+\sum_{i=0}^{n_p} I_{pi}\int_{s_{p1}}^{s_{p2}}\frac{Z'(s_p)}{\mathrm{j}\,\omega\,\mu_0}\left(\frac{s_p}{h_p}\right)^i\mathrm{d}s_p=\int_{s_{p1}}^{s_{p2}}\frac{\mathbf{u}_p\cdot\mathbf{E}_i}{\mathrm{j}\,\omega\,\mu_0}\,\mathrm{d}s_p \tag{17}$$

وفي هذه المعادلة، $\mathbf{u}_p$ هي متجه 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 (17) بخصوص جميع النبضات، فهي تشتمل على منظومة من المعادلات الخطية في I_{mi} يمكن حلها رقميا.

ومتى عُرفت 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 الكمونَين، بنفس الطريقة المتبعة في اشتقاق معادلة الكمونَين، أي:

$$\mathbf{E}=-\mathrm{j}\,\omega\,\mu_0\sum_{m=1}^{N}\sum_{i=0}^{n_m} I_{mi}\int_{0}^{h_m}\left[\mathbf{u}_m\left(\frac{s_m}{h_m}\right)^i g(r_a)+\frac{1}{k^2}\frac{i}{h_m}\left(\frac{s_m}{h_m}\right)^{i-1}\mathrm{grad}\,g(r_a)\right]\mathrm{d}s_m \tag{18}$$

والمجال المغنطيسي يكن التعبير عنه بحدود الكمون الاتجاهي المغنطيسي كالتالي:

$$\mathbf{H}=\frac{1}{\mu_0}\,\mathrm{rot}\,\mathbf{A} \tag{19}$$

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

$$\mathbf{H}=-\sum_{m=1}^{N}\sum_{i=0}^{n_m} I_{mi}\int_{0}^{h_m}\left(\frac{s_m}{h_m}\right)^i\mathbf{u}_m\times\mathrm{grad}\,g(r_a)\,\mathrm{d}s_m \tag{20}$$

3.3 الالان الفريان الكهربائي والمغنطيسي للهوائيات الستارية

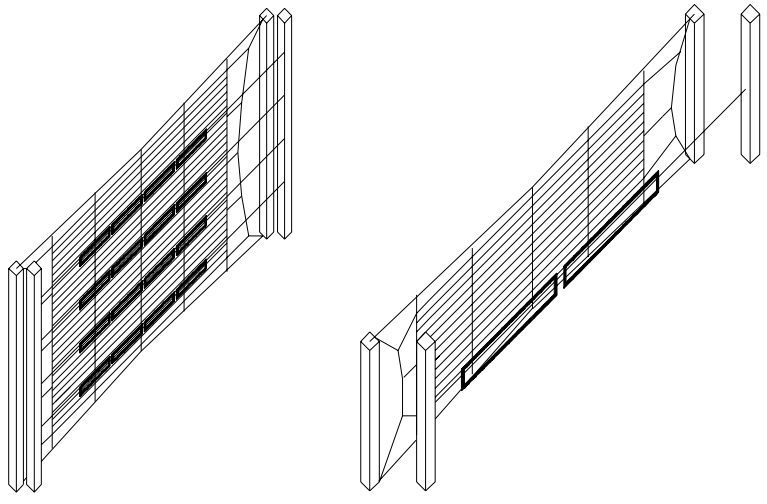
تتنوع هوائيات الإرسال العالية القدرة المستعملة في مدى الموجات الديكامترية (HF) (الموجات القصيرة)، فمنها ثنائيات القطب الأفقية (التي تشكل عادة صفيفاً توجيهياً)، والهوائيات المعينية، وأحاديات القطب العمودية. وموضوع البحث هنا هو ثنائيات القطب الأفقية، التي تُرتب في مستوٍ عمودي، وتُعرَف بالهوائيات الستارية، على اعتبار أن هذا النوع من الصفائف منوي استعماله في مركز إذاعة يوغوسلافيا الجديد بالموجة القصيرة، الواقع في استوبلين قريباً من بلغراد. 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 المخطط المرغوب. ويُجهز الصفيف عادة بعاكس منفعل، يتكون في أكثرية الحالات العملية من شبكة أسلاك (عاكس لا دوري)، ولكن يمكن أيضاً أن يكون صفيفاً من ثنائيات القطب المولفة. وتوسم الصفائف الستارية بالسمات التالية: H(R)(S) *m*/*n*/*h*، حيث H تدل على صفيف من ثنائيات القطب المرّتبة في مستوٍ عمودي؛ وR تدل على عاكس (إن وُجد)؛ وS تدل على زحزحة الطور (إن وجدت) بين التيارات التي تغذي الثنائيات المتجاورة الواقعة على مستقيم واحد من أجل زحزحة 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 المنضدة عمودياً (على مسافة تساوي عادة نصف طول الموجة)، يعني عدد الصفوف (الفسحات)؛ و*h* تدل على ارتفاع أوطأ صف فوق سوية الأرض (بطول الموجة).

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

في المركز اليوغوسلافي الجديد للإذاعة بالموجات الديكامترية (HF) 15 هوائياً استقطابا أفقي. اثنان منها بشكل ربعية، شاملة الاتجاه، والثلاثة عشر هوائياً الباقية ستارية مؤلفة من ثنائيات القطب (الشكل 12). سبعة من الهوائيات الستارية يحتوي كل منها 16 من ثنائيات القطب مرتبة في أربع فسحات من أربعة عناصر (HRS 4/4/*h*)، وستة من الهوائيات الستارية يحتوي كل منها اثنين من ثنائيات القطب المطوية، مرتبة في فسحة واحدة (HR 2/1/*h*). ولكل من الهوائيات الستارية عاكس لا دوري، مصنوع من أسلاك دقيقة أفقية. والمركز مزود بمرسِلَين، قدرة كل منهما 500 kW (الموجة الحاملة غير مشكلة)، ويستطيع المركز إرسال برنامجَين متآونين إلى مقاصد مختلفة. والمرسِلان موصلان بالهوائيات المناظرة عن طريق جهاز تبديل، خاص بالهوائيات، موضوع في غرفة مجاورة لموضع المرسلين. ويعرض الشكل 13 مخططاً لحقل الهوائيات مع المبنى الذي يؤوي المرسلَين. بينما يعرض الشكل 14 بالتفصيل تركيب أحد الهوائيات (B12).

الشكل 12

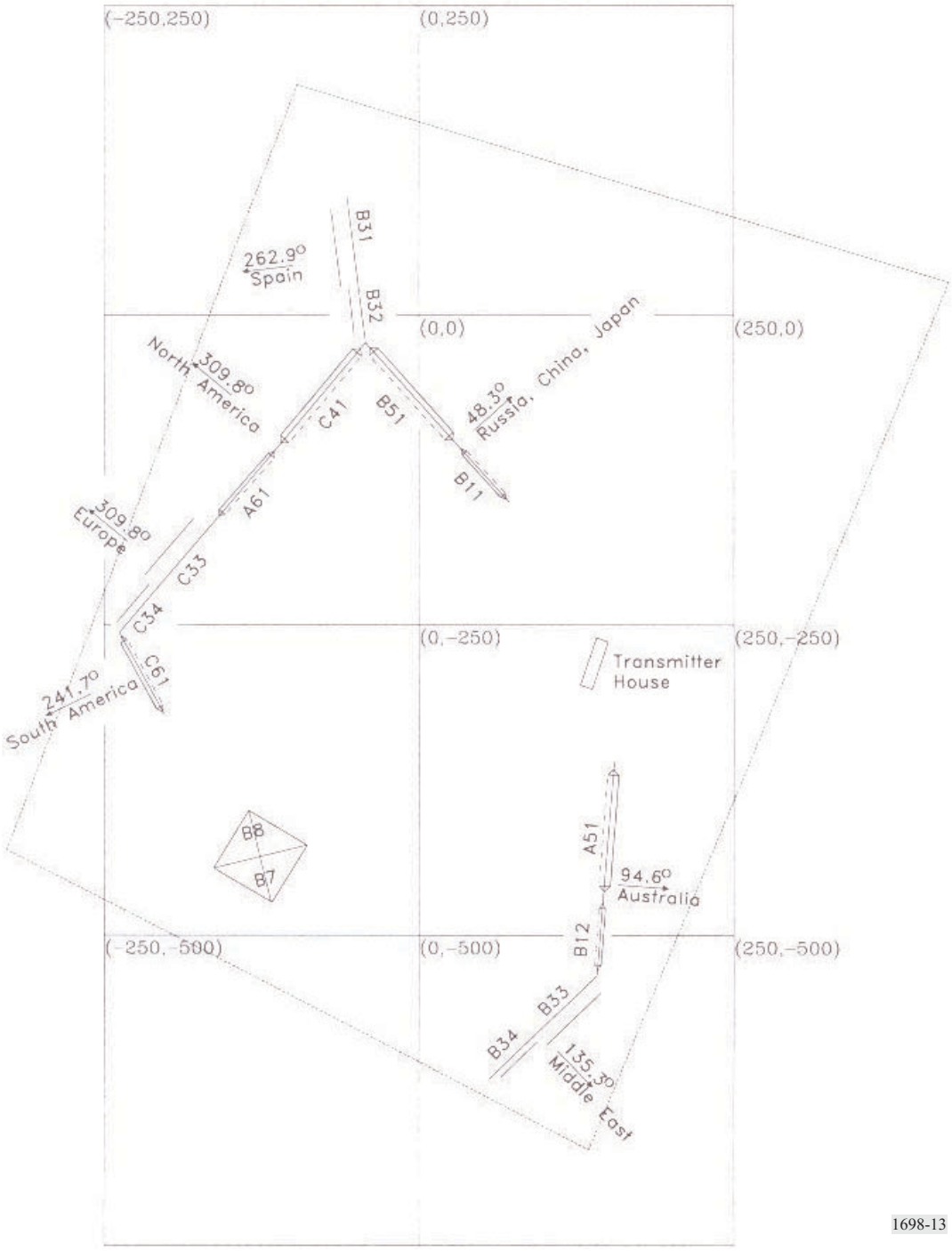
هوائيات ستارية نمطية مستعملة في مركز راديو يوغوسلافيا المشتغل بالموجات الديكامترية (HF)



HR 4/4/*h* HR 2/1/*h* 1698-12

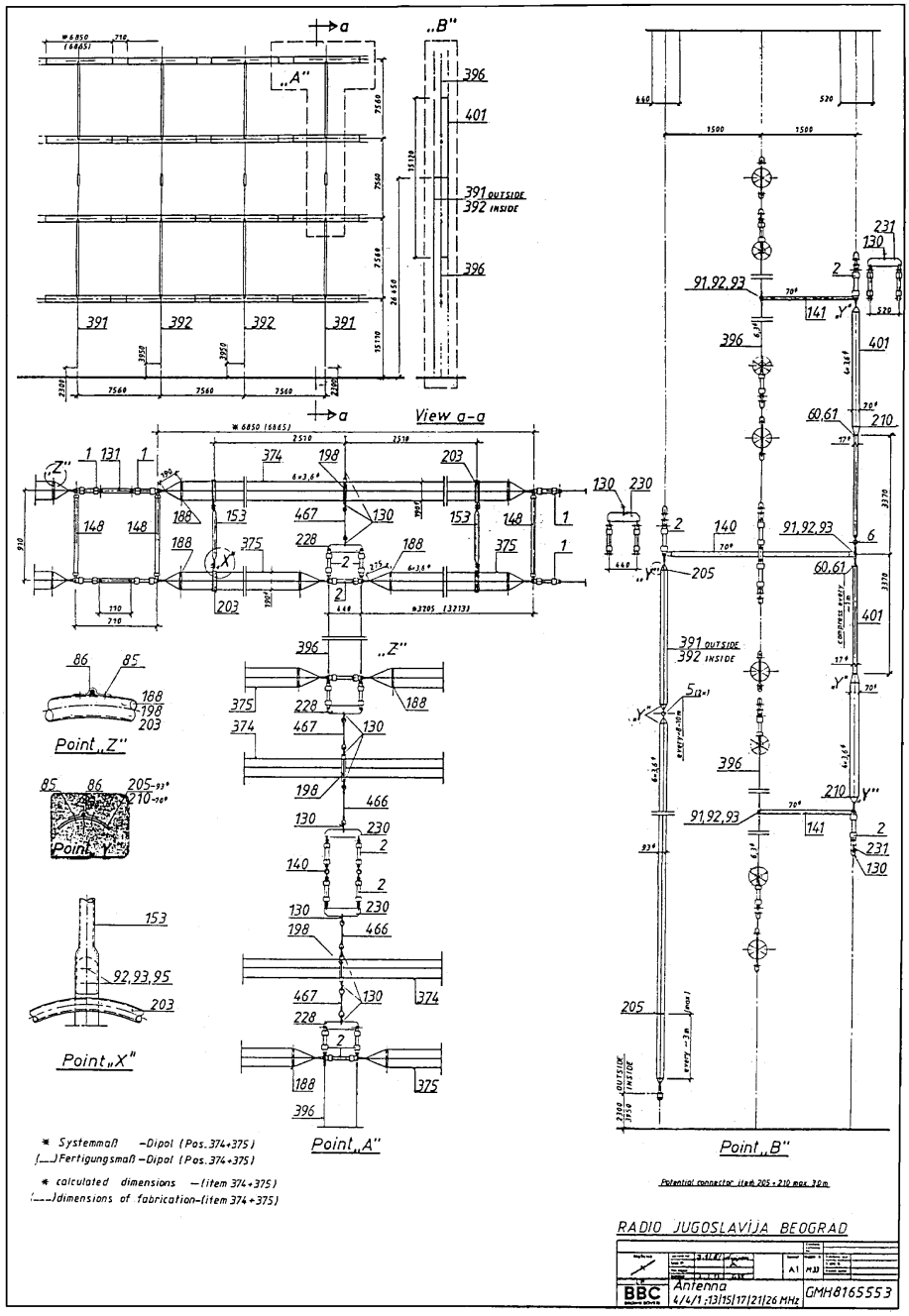
الشكل 13

مخطط حقل الهوائيات في مركز راديو يوغوسلافيا المشتغل بالموجات الديكامترية (HF)



الشكل 14

رسم تخطيطي مفصل لتركيب هوائي ستاري من ثنائيات القطب، الهوائي B12 (HRS 4/4/1)
في مركز إذاعة يوغوسلافيا المشتغلة بالموجات الديكامترية (HF)



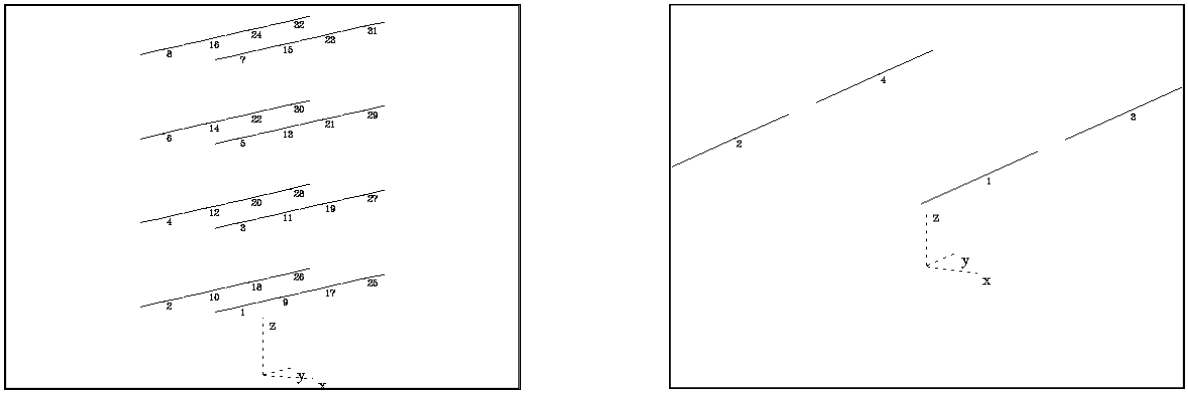
1698-14

من بين البحوث المتخصصة، قليلة هي البحوث التي تناولت موضوع حساب شدة كل من المالين الكهربائي والمغنطيسي للهوائيات الستارية المرسِلة بالموجات الديكامترية (HF)، لكنها تستند كلها إلى التقريب الجيبـي 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 بمستوٍ جيد التوصيل يأتي بنتائج دقيقة. وهذا التبسيط هام، لأنه يسمح باستعمال البرنامج AWAS مباشرة، دون إدخال أي تعديل عليه، لكونه 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. ويبيّن الشكل 15 النماذج المنتَجة بفضل البرنامج AWAS عن الهوائيات الستارية النمطية في مركز إذاعة يوغوسلافيا المشتغلة بالموجات الديكامترية (HF).

الشكل 15

النموذج المحصل بفضل البرنامج AWAS عن الهوائي أ) HRS 4/4/h والهوائي ب) HR 2/1/h

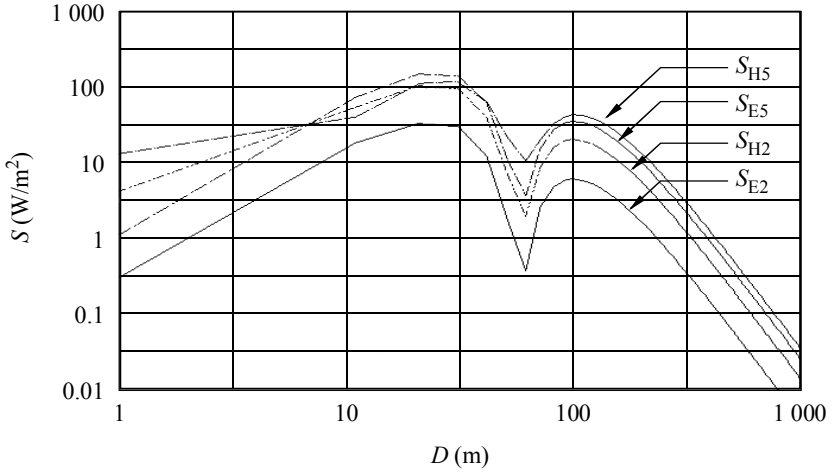


وجرى تقييم شدة كل من المالين القريبين، الكهربائي والمغنطيسي، في اتجاه القوة العظمى في مخطط الإشعاع (إذ وُجد المال في اتجاه الفصين الجانبيين أضعف بكثير). وتم التقييم من نقطة على ارتفاع z = 2 m من أجل تقييم مخاطر الإشعاع على العاملين في المركز، إذ يُحتمل أن يتنقلوا ضمن مجال المركز، ومن نقطة على ارتفاع z = 5 m من أجل عامة السكان، إذ أُخذ في الحسبان إمكان قيام مساكن بطابقين في جوار المركز.

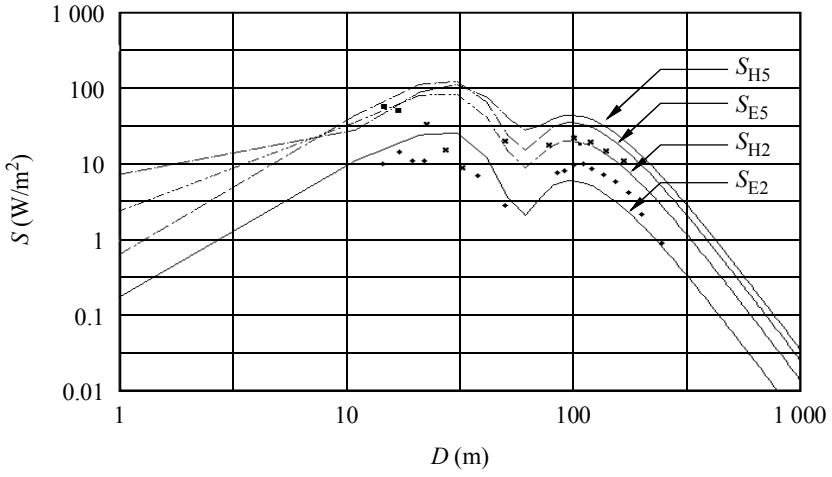
وقورنت نتائج التحليل أولاً بالنتائج المحصلة في صدد الهوائي HRS 4/4/1. التردد الذي يشتغل به الهوائي هو 15,245 MHz، وقدرة تغذيته 500 kW. ويعرض الشكل 16أ) النتائج المحصلة بخصوص متجه Poynting "المكافئ"، بتقييم البرنامج AWAS، على افتراض أن ثنائيات القطب تتغذى بتيارين متماثلين تماماً. ويعرض الشكل 16ب) نفس النتائج ولكن على افتراض أن ثنائيات القطب تتغذى بتوترين متماثلين تماماً، مع معطيات مستمدة من القياس على z = 2 m. وتبين أن التوافق بين المعطيات النظرية والمعطيات التجريبية حسن. ولذا فمن البديهي أن تغذية الهوائي بتوترات متساوية تعطي نتائج توقعية أفضل بشأن المال الفعلي، وعلى الخصوص قرب ثنائيات القطب على مسافة 70 m من الهوائي.

الشكل 16

نتيجة تقييم متجه Poynting المكافئ بخصوص الهوائي HRS 4/4/1 بحسب البرنامج AWAS على افتراض: أ) تغذية ثنائيات القطب بتيارين متماثلين تماما، وب) تغذية ثنائيات القطب بتوترين متماثلين تماما، مع نتيجة المعطيات التجريبية (المنحنيات المنقوطة)



a)



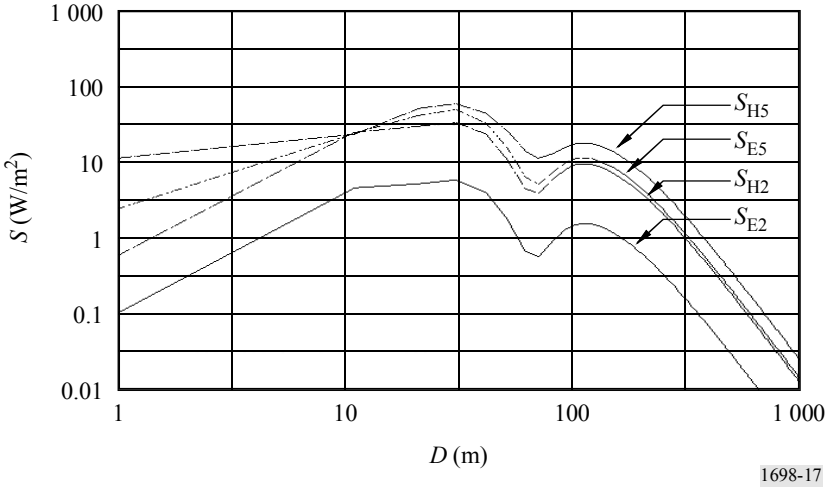
b)

1698-16

على أثر ثبوت اعتمادية التقنية الرقمية المستعملة لحساب الـالين القريبين، جرى تطبيقها في تقييم مجالات جميع الهوائيات الستارية المنصوبة في مركز إذاعة يوغوسلافيا الجديد. ويعرض الشكلان 17 و18 مثالين مفيدين عن ذلك.

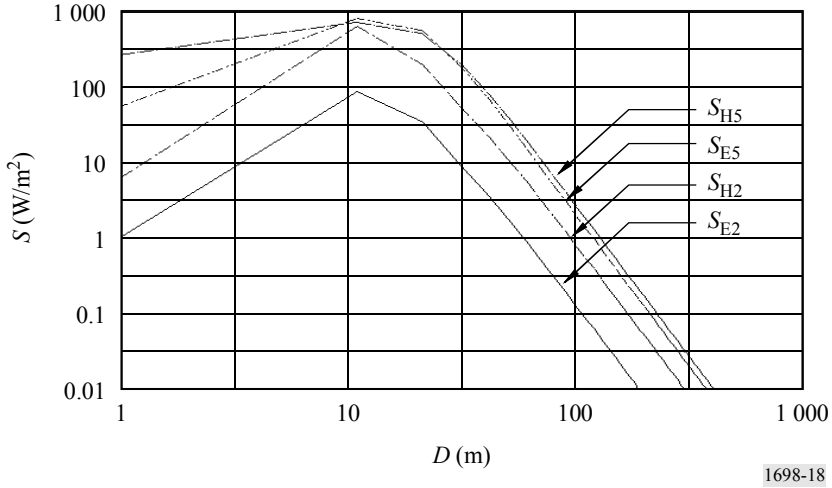
الشكل 17

متجه Poynting "المكافئ" بخصوص الهوائي A51(HRS 4/4/0,5) المشتغل بتردد 9,63701 MHz مسافة الأمان الفاصلة عن الهوائي هي 50 m للعاملين في المركز، و300 m لعامة الجمهور



الشكل 18

متجه Poynting "المكافئ" بخصوص الهوائي C34 (HR 2/1/0,5) المشتغل بتردد 10,67996 MHz مسافة الأمان الفاصلة عن الهوائي هي 70 m للعاملين في المركز، و130 m لعامة الجمهور



4 الخلاصة

جرى بحث نظري، مستعين بالبرنامج AWAS، لشدة الـالين الكهربائي والمغنطيسي في جوار هوائيات إرسال، ستارية، عالية القدرة، مشتغلة بالموجات الديكامترية (HF). وتم تطبيق النظرية خصوصاً على هوائيات المركز الجديد لإذاعة يوغوسلافيا. وحُددت مساحات الأمان للأشخاص في جوار هذه الهوائيات. وقُدمت النتائج المتعلقة بالـالين القريبين للهوائيات الستارية، باستعمال نظرية صارمة لأول مرة، وثبت أنا على توافق جيد مع المعطيات التجريبية المنشورة في غير هذا الموضع.

التذييل 2
للملحق 1
مقارنة بين نتائج التوقعات ونتائج القياسات

1 تمهيد

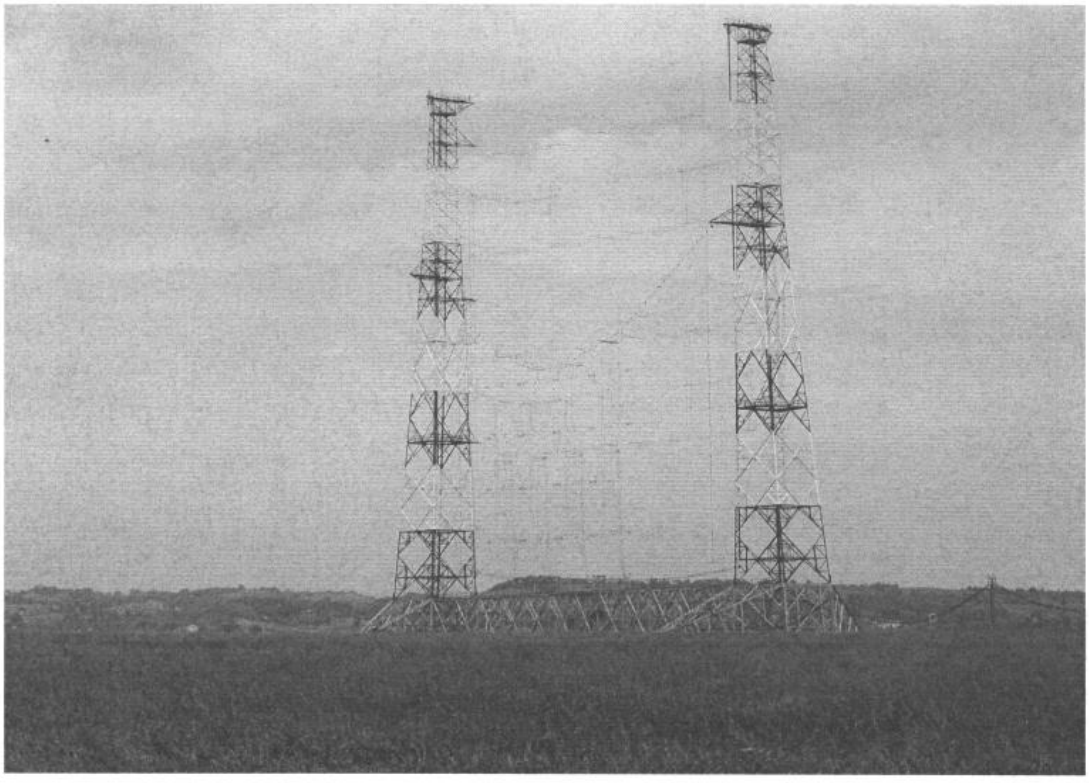
أجريت المحاكاة والقياسات بصورة مستقلة، علي يد أشخاص ليس بينهم اتصال، تحاشياً للتأثير والتأثر في العمل والنتائج.

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

أجريت القياسات والتوقعات على نظام هوائيات، مثلة في الشكلين 19 و20، قادرة على الاشتغال في نطاق الموجات القصيرة، وقد جرت المقارنة بخصوص الترددين 13 MHz و18 MHz.

الشكل 19

نظام الهوائيات



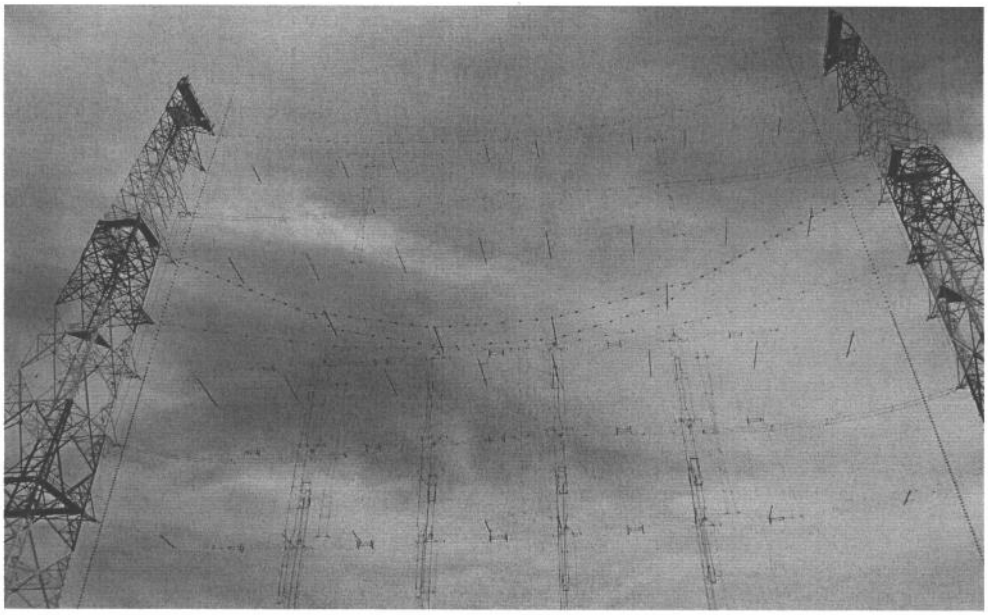
1698-19

1.1 نموذج نظام الهوائيات المستعمل

نموذج نظام الهوائيات الممثل في الشكل 19 مكون من صفيف أفقي الاستقطاب قوامه 16 من ثنائيات القطب المطوية، المرتبة 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 20، مرتّبة بمعظمها على نحو عمودي (عمودياً على 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، مرتبة بحيث تفلق القدرة المستعملة للترددات الراديوية وتوزعها بين الـ "أعمدة" الأربعة لثنائيات القطب.

الشكل 20

شبكة المواءمة وشبكة التغذية



1698-20

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 مبين في الشكل 21، 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، المحققة مادياً 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 22.

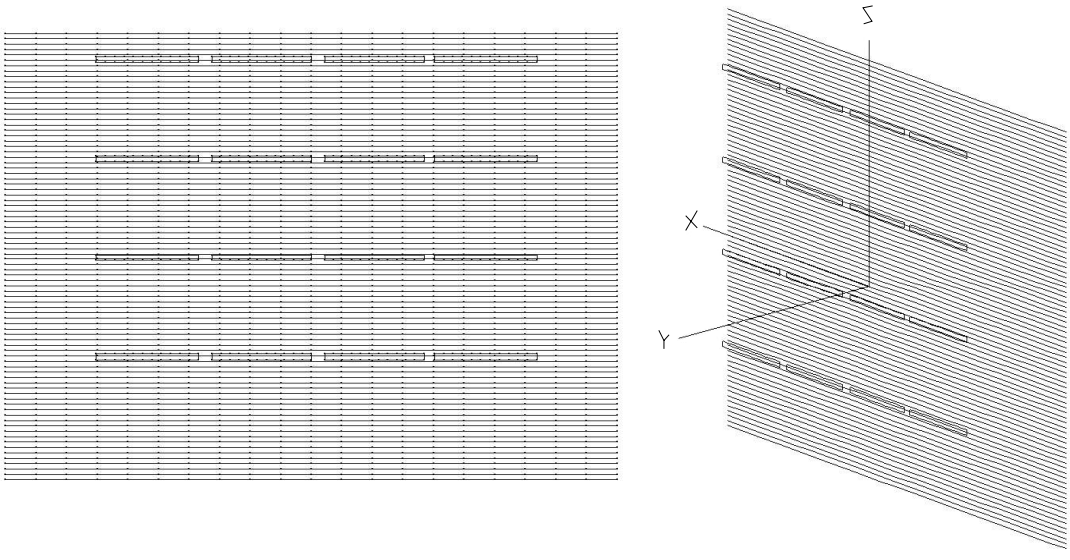
2.1 محاسن ومساوئ نموذج نظام الهوائيات المنفذ

المزية الأهم هي أن النموذج المنفذ في غاية البساطة إزاء تعقيد نظام الهوائيات الحقيقية. فبفضل هذا النموذج يمكن إنجاز الحسابات في وقت قصير نسبياً (نحو عشر دقائق بواسطة حاسوب من نمط بنتيوم 4 بسرعة 2 GHz).

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 المكونات x وy وz للمجالين. إذ إن كما من القدرة تُشِعه خطوط المواءمة الثنائية السلك، خطوط تشتغل بالموجات المستقرة. فلهذا السبب لا يظهر في نتيجة التوقع المكون العمودي (المكون 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 المكون 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 يُسجل حضور كلا المكونين، العمودي (z) والأفقي (y) للمجال E، وكذلك حضور المكون الأفقي (x) للمجال H، وهذا الاختلاف يسبب بعض المشكلات في المقارنة المباشرة. والتصرف الأرشَد لتذليل الصعوبة هو اعتبار أن هذين المكونَيْن يتولّدان عن كم القدرة الذي لا يبلغ إلى صفيفات ثنائيات القطب؛ ومن ثم فإن إسهامهما في شدة المال المقصود قياسها ينبغي أن يراعى في إسهام المكون الأفقي (x) في نتيجة المحاكاة. وبعبارة أخرى، إن إسهام المكون الأفقي (x) المحصل بالمحاكاة تجب مقارنته بالنتيجة الإجمالية للقياسات، وهذه النتيجة هي الجذر التربيعي لموع القيم المربعة للإسهامات المحصلة بالقياس على المحاور x وy وz.

الشكل 21

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



1698-21

الشكل 22

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

1698-22

2 مقارنة بين التوقعات والقياسات

1.2 MHz 13

1.1.2 التوقعات

1.1.1.2 ملاحظات على النموذج

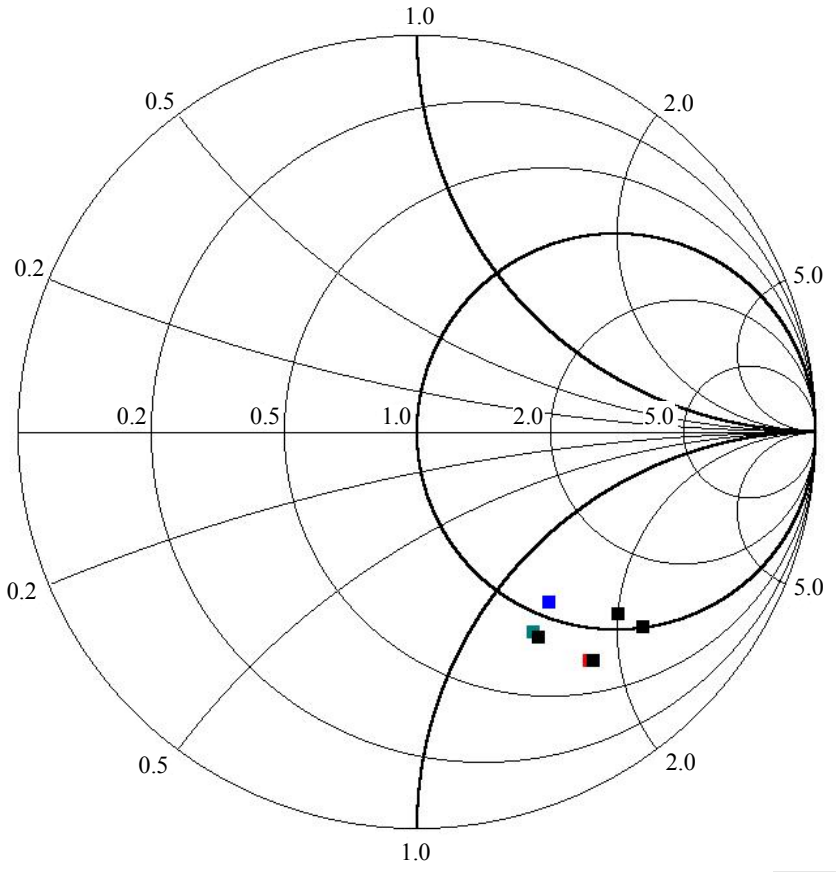
لا بد، لكي يكون التناظر على أمثل وجه بين النموذج المتقدم وصفه ونظام الهوائيات الحقيقية، من معرفة دقيقة لكم القدرة في دخل كل ثنائي قطب، نظراً للخسارة الحاصلة في خط النقل.

وتوخياً لإمداد كل من ثنائيات القطب بقيمة التوتر المناسبة، جرى في المحاكاة حساب معاوقة الدخل لكل واحد من ثنائيات القطب هذه. والقيم معروضة في الشكل 23.

الشكل 23

القيم المحصلة بالمحاكاة لمعاوقة دخل ثنائيات القطب، معاوقة مُقيسة 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)



1698-23

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.

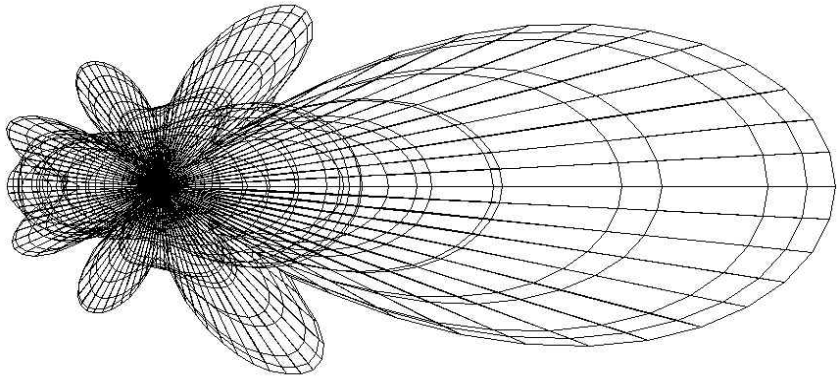
وتعويضاً عن عدم المواءمة الناجم بمعظمه عن المكون التفاعلي وما يتبعه من عكس القدرة نحو المرسِل، ارتُئيَ أن تزاد القدرة الزيادة الوافية. وعليه، فقد طُبق التوتر المناسب على كل ثنائي قطب.

2.1.1.2 تقييمات المجال البعيد

توخياً للمقارنة على أفضل وجه بين النموذج والهوائيات الحقيقية الممثلة في الشكلين 19 و20، حُسِبت مخططات الإشعاع، فكانت النتائج ما يرد تمثيله في الشكل 24 (المستوي الأفقي)، والشكل 25 (المستوي العمودي)، والشكل 26 (المشهد الأمامي).

الشكل 24

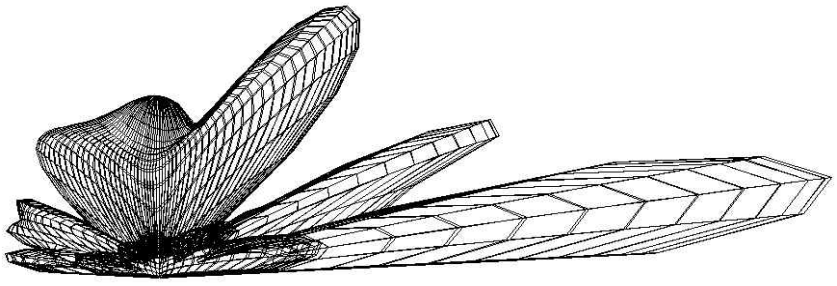
مخطط الإشعاع على المستوى الأفقي



1698-24

الشكل 25

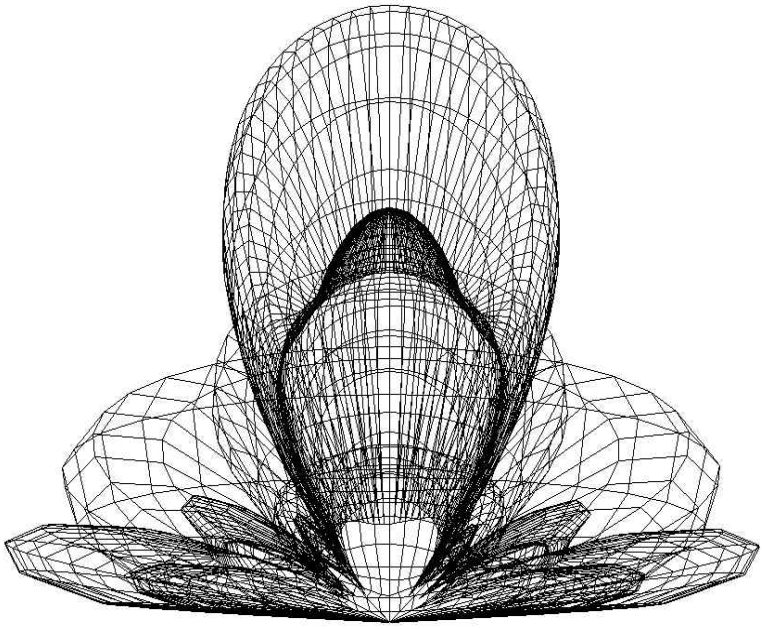
مخطط الإشعاع على المستوى العمودي



1698-25

الشكل 26

مخطط الإشعاع، المشهد الأمامي



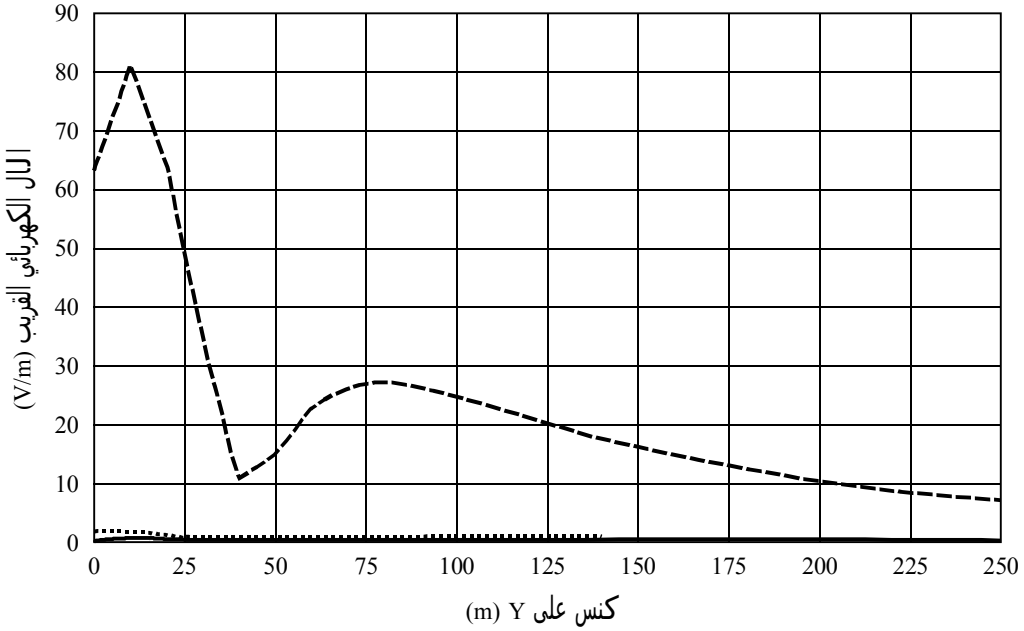
1698-26

3.1.1.2 نتائج توقع شدة المال في المنطقة القريبة

حُققت التوقعات عن طريق حساب المكونات x وy وz للمجالين E وH، في اتجاه الكسب الأقصى للهوائي (المحور Y)، وعلى ارتفاع 2 m فوق سوية الأرض (المحور Z = 2). والقيم المحصلة بالحساب ممثلة في الشكل 27 (المال E) والشكل 28 (المال 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 المالين E وH مع تغيير ارتفاع نقطة التقييم فوق سوية الأرض (المحور Z) من 0 إلى 9 m على مسافة ثابتة طولها 60 m (Y = 60). وتأثر النتائج بتغيير ارتفاع نقطة التقييم يمثله الشكل 29 (بخصوص المال E) والشكل 30 (بخصوص المال H).

الشكل 27

قيمة شدة المجال الكهربائي في المنطقة القريبة، محصلة بالحساب



13 MHz، شدة المجال القريب تبعاً للمسافة. قدرة المرسل 225 kW في موصل الهوائي.
الارتفاع عن سوية الأرض: 2 m

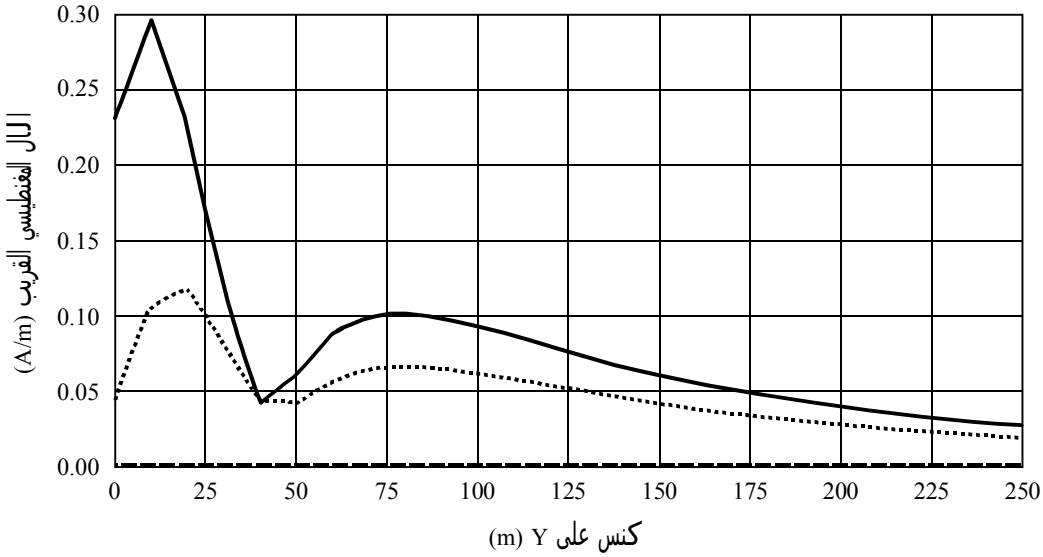
المجال الكهربائي القريب، مقدار (X)، كنس على Y، الثوابت: X = 0، Z = 2؛ CORT13
المجال الكهربائي القريب، مقدار (Y)، كنس على Y، الثوابت: X = 0، Z = 2؛ CORT13
المجال الكهربائي القريب، مقدار (Z)، كنس على Y، الثوابت: X = 0، Z = 2؛ CORT13

1698-27

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

الشكل 28

قيمة شدة المجال المغنطيسي في المنطقة القريبة، محصلة بالحساب



13 MHz، شدة المجال القريب تبعاً للمسافة. قدرة المرسل 225 kW في موصل الهوائي.
الارتفاع عن سوية الأرض: 2 m

CORT13؛ 2 = Z، 0 = X، الثوابت: Y، كنس على (X)، مقدار المغنطيسي القريب المجال ------

CORT13؛ 2 = Z، 0 = X، الثوابت: Y، كنس على (Y)، مقدار المغنطيسي القريب المجال ——

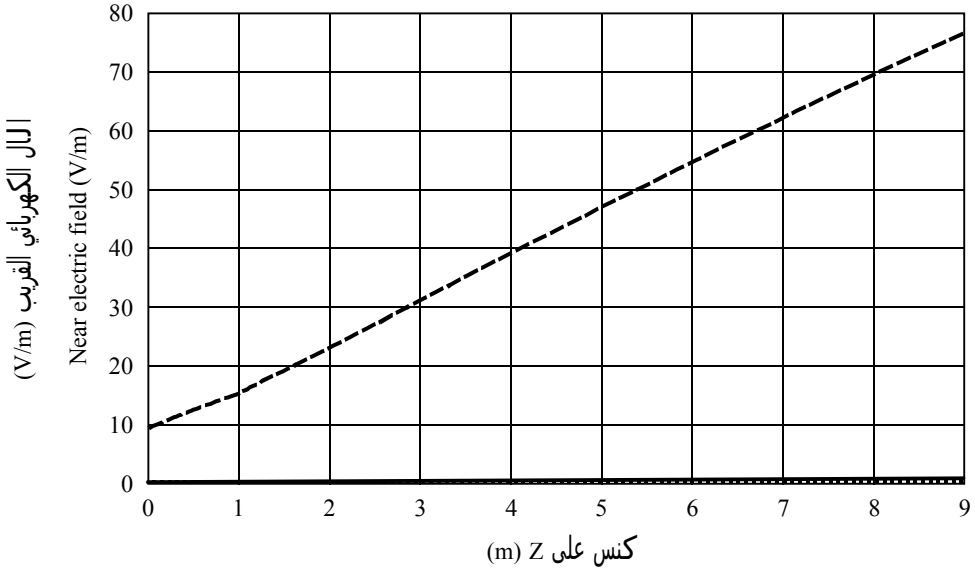
CORT13؛ 2 = Z، 0 = X، الثوابت: Y، كنس على (Z)، مقدار المغنطيسي القريب المجال .....

1698-28

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

الشكل 29

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



13 MHz، شدة المال القريب تبعاً للارتفاع، على مسافة 60 m من الهوائي.
قدرة المرسل 225 kW في موصل الهوائي.

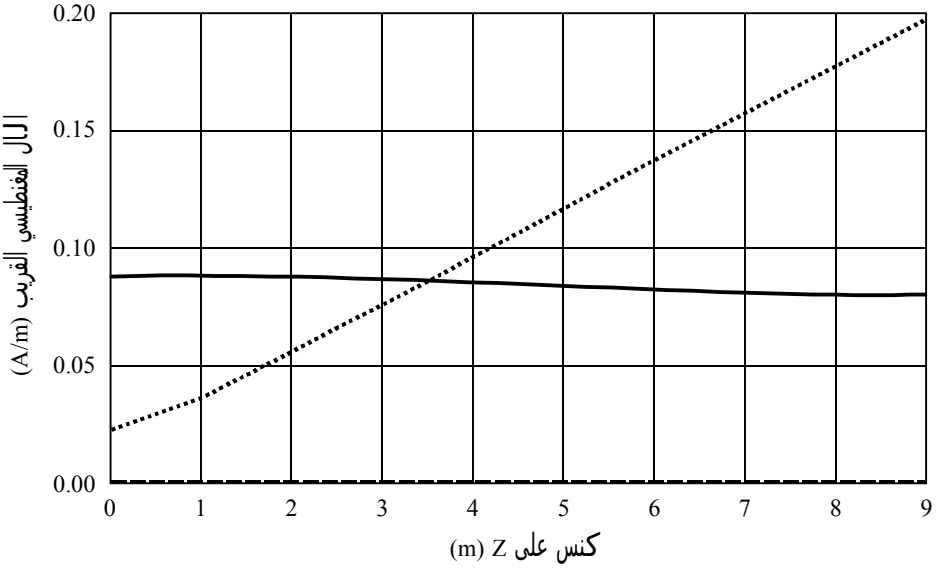
المال الكهربائي القريب، مقدار (X)، كنس على Z، الثوابت: X = 0، Y = 60؛ CORT13 ------
المال الكهربائي القريب، مقدار (Y)، كنس على Z، الثوابت: X = 0، Y = 60؛ CORT13 ——————
المال الكهربائي القريب، مقدار (Z)، كنس على Z، الثوابت: X = 0، Y = 60؛ CORT13 .....

1698-29

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

الشكل 30

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)



13 MHz، شدة المجال المغنطيسي القريب تبعاً للارتفاع، على مسافة 60 m من الهوائي.
قدرة المرسل 225 kW في موصل الهوائي.

المجال المغنطيسي القريب، مقدار (X)، كنس على Z، الثوابت: X = 0، Y = 60؛ CORT13 – – – – – –
المجال المغنطيسي القريب، مقدار (Y)، كنس على Z، الثوابت: X = 0، Y = 60؛ CORT13 ————
المجال المغنطيسي القريب، مقدار (Z)، كنس على Z، الثوابت: X = 0، Y = 60؛ CORT13 .....

1698-30

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

2.1.2 القياسات

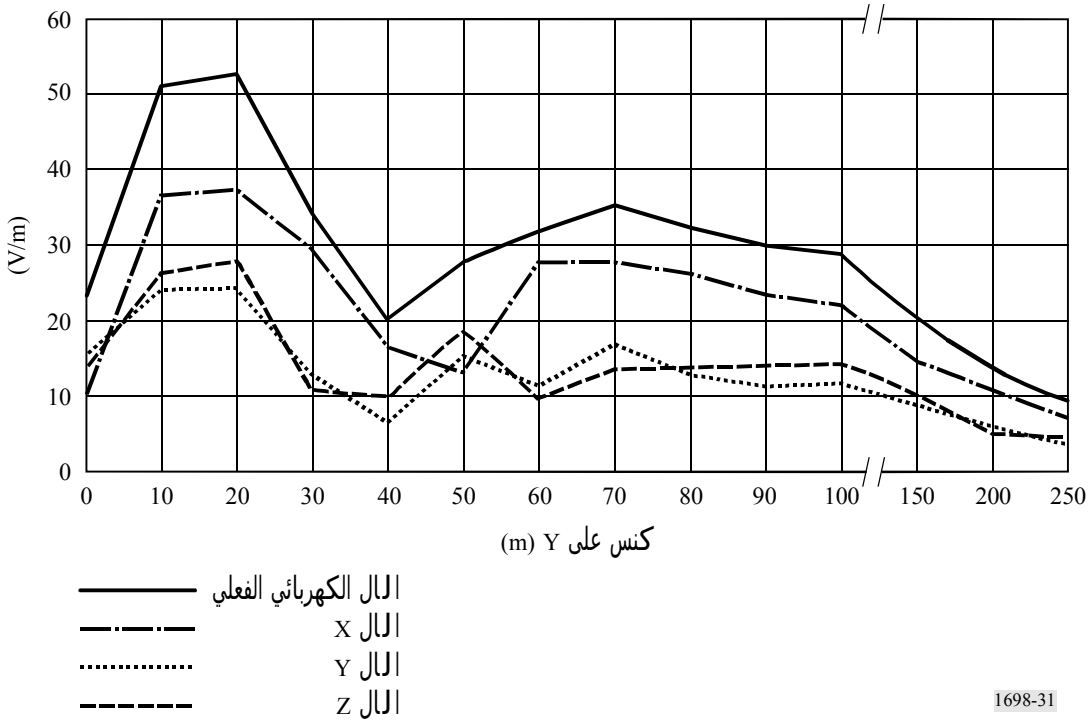
أُجريت القياسات باستعمال مقياس لشدة مجال النطاقات العريضة، منصوب على عربة معزولة عن الكهرباء يحركها مشغل متمركز بعيداً عن موقع الهوائي. وبذه الوسيلة تم تجّنب أي تشويش للمجالين الكهربائي والمغنطيسي.

1.2.1.2 نتائج القياسات

القيم المحصلة بالقياس معروضة في الشكلين 31 (المجال E) و32 (المجال H). والشكلان 31 و32 قابلان للمقارنة المباشرة مع الشكلين 27 و28 على ترتيب التوالي.

الشكل 31

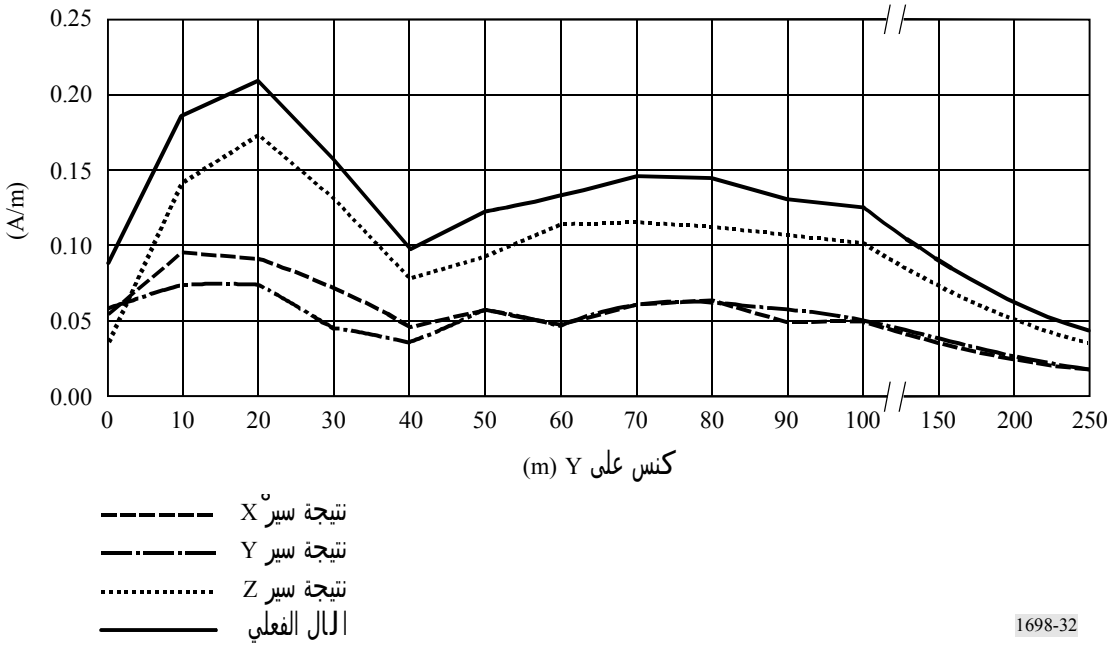
قيم شدة المجال الكهربائي محصلة بالقياس



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

الشكل 32

قيمة شدة المجال المغنطيسي محصلة بالقياس



يمثل المحور الأفقي المسافة عن الهوائي بالمتر (كنس على Y). وشدة مكوّنات المجال H ممثلة بـ A/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

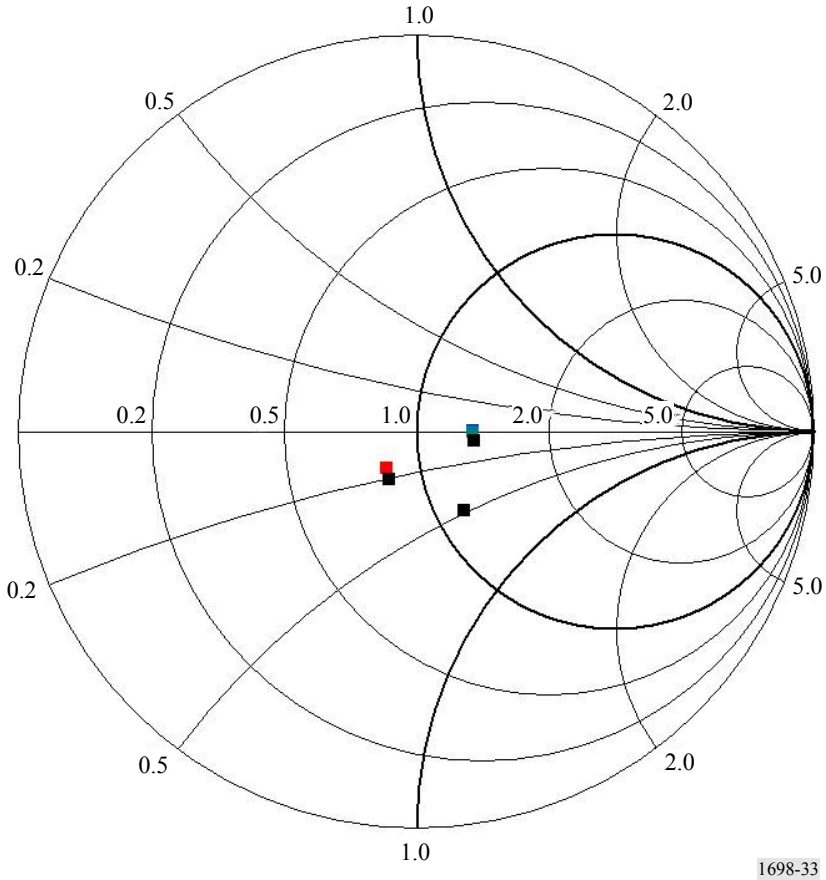
لا بد، لكي يكون التناظر على أمثل وجه بين النموذج المتقدم وصفه ونظام الهوائيات الحقيقي، من معرفة دقيقة لكم القـدرة في دخل كل ثنائي قطب، نظراً للخسارة الحاصلة في خط النقل وبسبب عدم المواءمة.

وتوخياً لإمداد كل من ثنائيات القطب بقيمة التوتر المناسبة، جرى في المحاكاة حساب معاوقة الدخل لكل واحد من ثنائيات القطب. والقيم معروضة في الشكل 33.

الشكل 33

القيم المحصلة بالمحاكاة لمعاوقة دخل ثنائيات القطب، معاوقة مُقيسة بـ 180 Ω

18 MHz، ثنائيات القطب (معاوقة مقيسة 180 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.

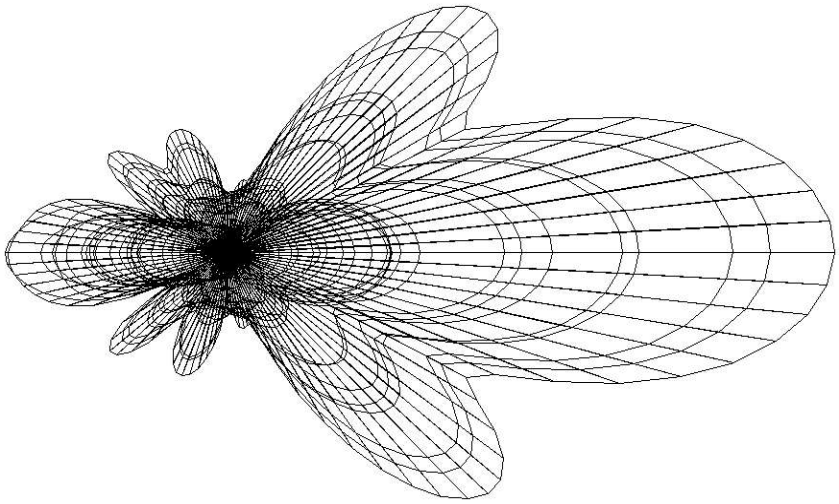
يسترعى الانتباه إلى التشتت الضئيل - لكنه غير معدوم - في قيم المقاومة قرب 180 Ω، والغياب الكبير للمكوّنات التفاعلية.

2.1.2.2 تقييمات المجال البعيد

توخياً للمقارنة على أفضل وجه بين النموذج والهوائيات الحقيقية الممثلة في الشكلين 19 و20، حُسِبت مخططات الإشعاع، فكانت النتائج ما يرد تمثيله في الشكل 34 (المستوي الأفقي)، والشكل 35 (المستوي العمودي)، والشكل 36 (المشهد الأمامي).

الشكل 34

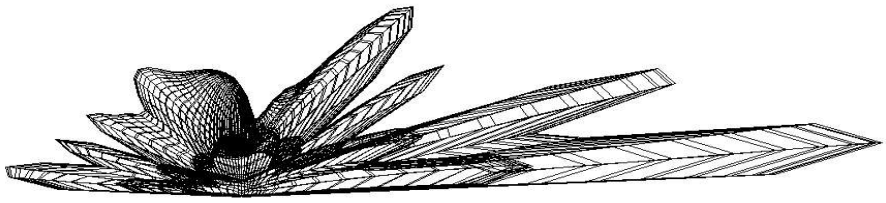
مخطط الإشعاع على المستوي الأفقي



1698-34

الشكل 35

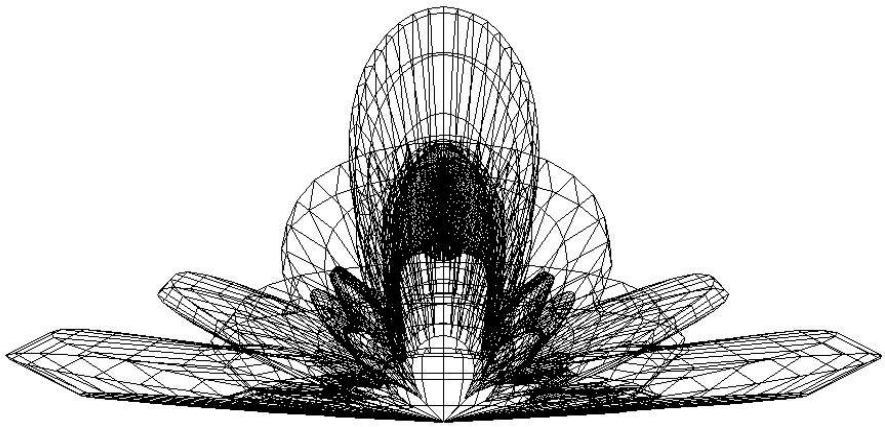
مخطط الإشعاع على المستوي العمودي



Rap 2037-35

الشكل 36

مخطط الإشعاع، المشهد الأمامي



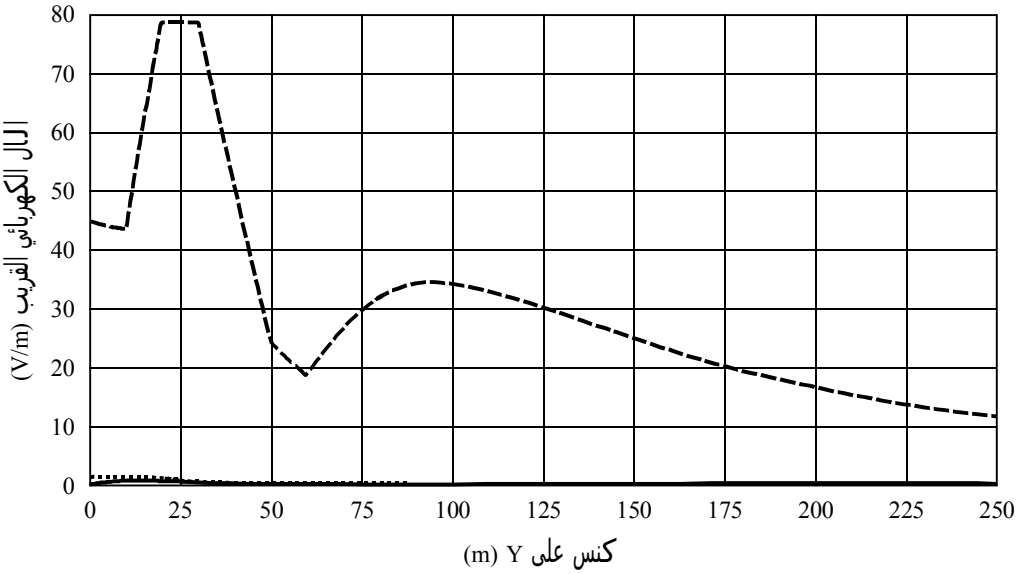
1698-36

3.1.2.2 نتائج توقع شدة المال في المنطقة القريبة

حُققت التوقعات عن طريق حساب المكونات x وy وz للمجالين E وH، في اتجاه الكسب الأقصى للهوائي (المحور Y)، وعلى ارتفاع 2 m فوق سوية الأرض (المحور Z = 2). والقيم المحصلة بالحساب ممثلة في الشكل 37 (المال E) والشكل 38 (المال 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 المالين E وH مع تغيير ارتفاع نقطة التقييم فوق سوية الأرض (المحور Z) من 0 إلى 9 m على مسافة ثابتة طولها 60 m (Y = 60). وتأثر النتائج بتغيير ارتفاع نقطة التقييم يمثله الشكل 39 (بخصوص المال E) والشكل 40 (بخصوص المال H).

الشكل 37

قيمة شدة المال الكهربائي في المنطقة القريبة



18 MHz، شدة المال القريب تبعاً للمسافة. قدرة المرسل 200 kW في موصل الهوائي.
الارتفاع عن سوية الأرض: 2 m

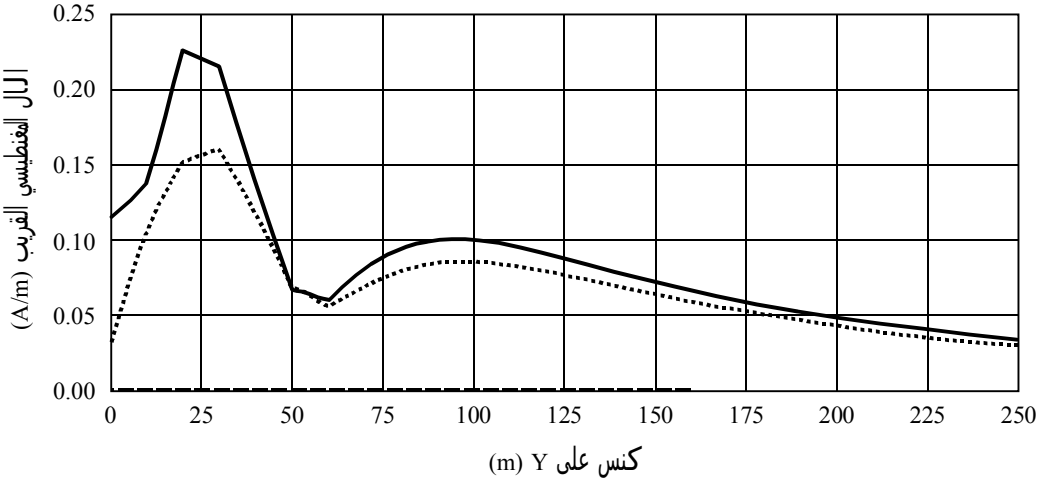
المال الكهربائي القريب، مقدار (X)، كنس على Y، الثوابت: X = 0، Z = 2؛ CORT18
المال الكهربائي القريب، مقدار (Y)، كنس على Y، الثوابت: X = 0، Z = 2؛ CORT18
المال الكهربائي القريب، مقدار (Z)، كنس على Y، الثوابت: X = 0، Z = 2؛ CORT18

1698-37

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

الشكل 38

قيمة شدة المال المغنطيسي في المنطقة القريبة، محصلة بالحساب



18 MHz، شدة المال المغنطيسي القريب تبعاً للمسافة. قدرة المرسل 200 kW في موصل الهوائي.
الارتفاع عن سوية الأرض: 2 m

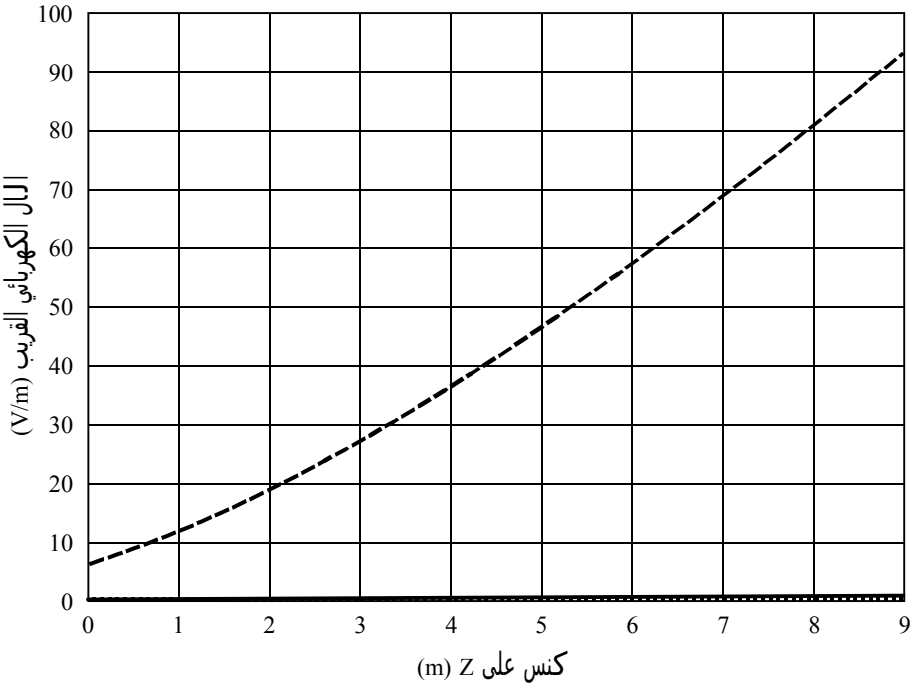
المال المغنطيسي القريب، مقدار (X)، كنس على Y، الثوابت: X = 0، Z = 2؛ CORT18 ------
المال المغنطيسي القريب، مقدار (Y)، كنس على Y، الثوابت: X = 0، Z = 2؛ CORT18 ——
المال المغنطيسي القريب، مقدار (Z)، كنس على Y، الثوابت: X = 0، Z = 2؛ CORT18 .....

1698-38

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

الشكل 39

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 القريب تبعاً للارتفاع، على مسافة 60 m من الهوائي.
قدرة المرسل 200 kW في موصل الهوائي.

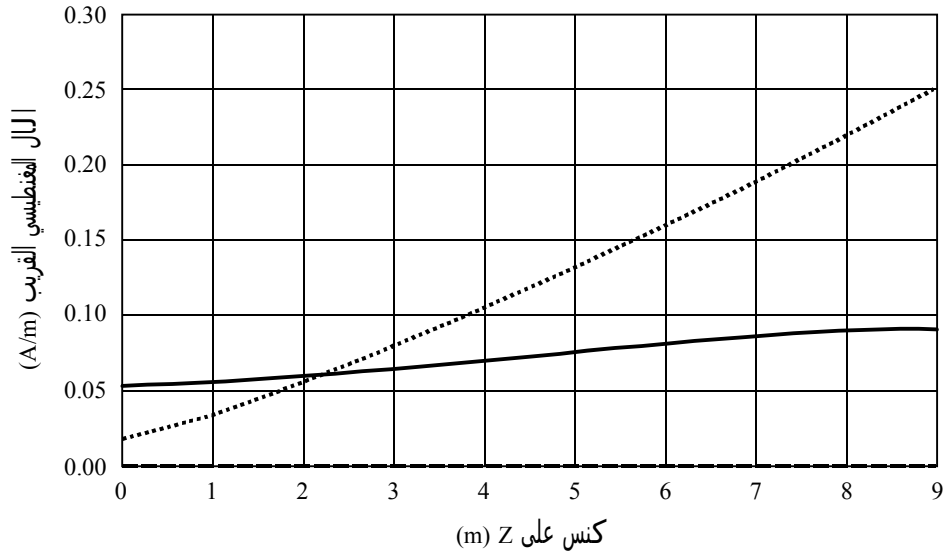
المجال الكهربائي القريب، مقدار (X)، كنس على Z، الثوابت: X = 0، Y = 60؛ CORT18 ------
المجال الكهربائي القريب، مقدار (Y)، كنس على Z، الثوابت: X = 0، Y = 60؛ CORT18 ——————
المجال الكهربائي القريب، مقدار (Z)، كنس على Z، الثوابت: X = 0، Y = 60؛ CORT18 .....

1698-39

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

الشكل 40

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)



18 MHz، شدة المجال المغنطيسي القريب تبعاً للارتفاع، على مسافة 60 m من الهوائي.
قدرة المرسل 200 kW في موصل الهوائي.

المجال المغنطيسي القريب، مقدار (X)، كنس على Z، الثوابت: X = 0، Y = 60؛ CORT18 ------
المجال المغنطيسي القريب، مقدار (Y)، كنس على Z، الثوابت: X = 0، Y = 60؛ CORT18 ——
المجال المغنطيسي القريب، مقدار (Z)، كنس على Z، الثوابت: X = 0، Y = 60؛ CORT18 .....

1698-40

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

2.2.2 القياسات

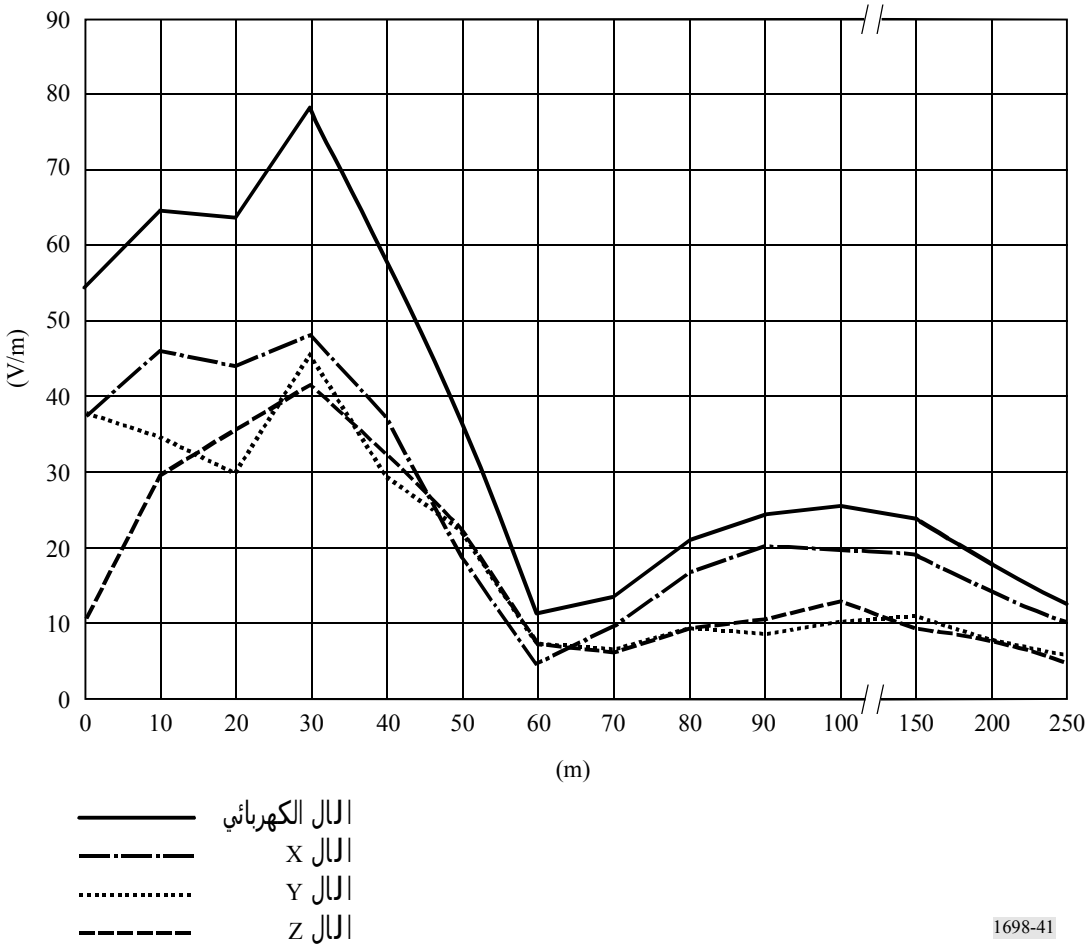
أجريت القياسات باستعمال مقياس لشدة مجال النطاقات العريضة، منصوب على عربة معزولة عن الكهرباء يحركها مشغل متمركز بعيداً عن موقع الهوائي. وبذه الوسيلة تم تجّنب أي تشويش للمجالين الكهربائي والمغنطيسي.

1.2.2.2 نتائج القياسات

القيم المحصلة بالقياس معروضة في الشكلين 41 (المجال E) و42 (المجال H). والشكلان 41 و42 قابلان للمقارنة المباشرة مع الشكلين 37 و38 على التوالي.

الشكل 41

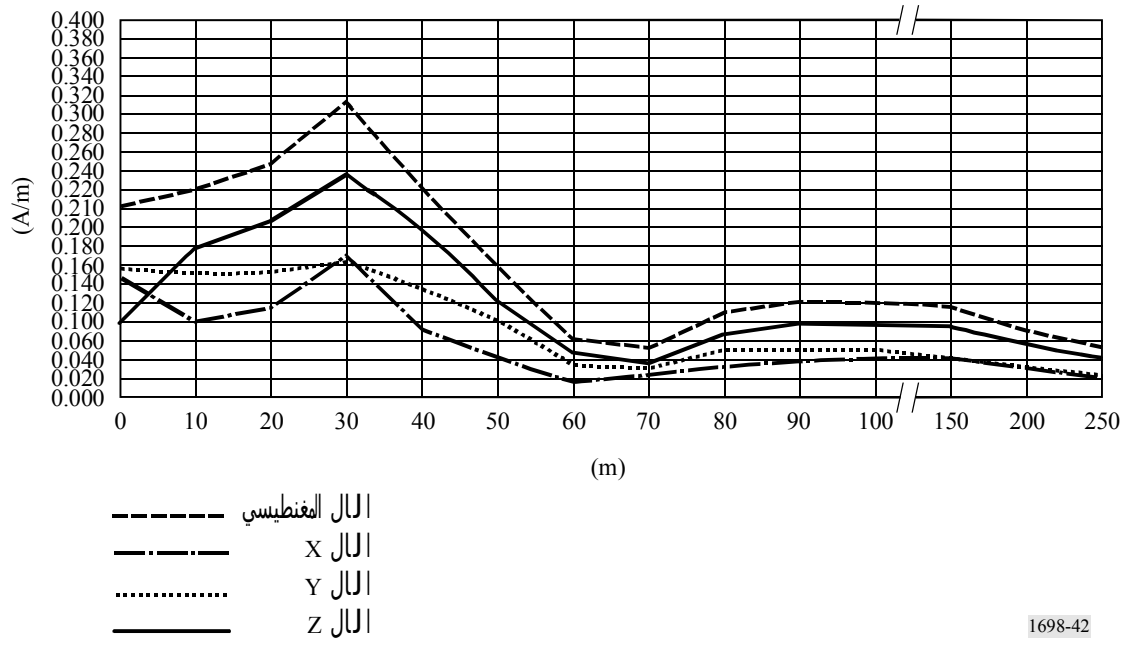
قيم شدة المجال الكهربائي في المنطقة القريبة، محصلة بالقياس



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

الشكل 42

قيمة شدة المجال المغنطيسي في المنطقة القريبة، محصلة بالقياس



يمثل المحور الأفقي المسافة عن الهوائي بالمتر (كنس على Y). وشدة مكوّنات المجال H ممثلة بـ A/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 نظام الهوائيات، 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 ذروتا، 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 نظام الهوائيات، 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 الحالين، 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 الأدوات غير يقينية، وأن سطح الأرض ليس مستوياً تماماً قرب الهوائي (وهذا الأمر لم يراعَ في المحاكيات، حتى حين كان من الواضح تبعية شدة الحال بقوة لارتفاع نقطة القياس)، وأن بساطة النموذج مفروضة. والفروق كبيرة قرب الهوائي (يعني أن القيمة العليا الأولى تظهر على بعد نحو m 10) حتى إنا تصل إلى 50%، ثم تتناقص كلما كبرت المسافة حتى تصير زهيدة على مسافة m 250.

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

ففي سبيل تحقيق أفضل توقع تقريبـي لنشاط الحالين 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، ويُسلط مولد 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 تمثل أنظمة الهوائيات الأسلاكية بقطع لا يتجاوز طولها $\lambda/20$.

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 سوية الأرض: هذه المعلَمَة هامة جداً في كثير من الحالات، إذا كان المقصود هو المقارنة بين القيم المحصلة بالقياس والقيم المتوقعة بالحساب. وبالفعل، يلاحَظ التأثير القوي للارتفاع على قيم الحالين، ثم إذا كانت نمذجة أرضية الموقع قد جرت على أساس أنا 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 التوقع.

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

التذييل 3
للملحق 1

الحدود والسويات

1 السلطات التنظيمية والاستشارية المعنية بالجوانب الصحية

يوجد عدد من السلطات الدولية والوطنية المعنية بالجوانب الصحية للمجالات الكهرمغنطيسية. وعلى سبيل الإعلام نعطي قائمة بأسمائها غير كاملة، في القسم الأخير من هذا التذييل.

2 مقارنة للحدود الأساسية والسويات المشتقة الواردة في التنظيمات المستعملة على نطاق واسع

ليست الخطوط التوجيهية المعيارية الحالية متطابقة في تعريف فئات الأشخاص المحتمل تعرضهم للخطر، "الفئات المعرضة" (مثل: عامة الجمهور، العاملين المعرضين بحكم مهنتهم، فئات العمر) و/أو تعريف الأماكن المقصودة بالحماية (مثل: الأماكن العامة، المنازل، الأماكن المسيّجة، المباني المقيد دخولها).

وتظهر فروق بينها بخصوص أجزاء الجسم المقصودة بالحماية.

تتناول المقارنة في هذا التذييل ما يلي:

- معيار معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) لسويات السلامة بخصوص تعرض الأشخاص للمجالات الكهرمغنطيسية الناجمة عن الترددات الراديوية المتراوحة بين 3 kHz و300 GHz [3]؛
- الخطوط التوجيهية الصادرة عن اللجنة الدولية للحماية من الإشعاعات غير المؤينة (ICNIRP) بخصوص حدود التعرض للمجالات الكهربائية والمغنطيسية والكهرمغنطيسية المتغيرة مع الوقت (حتى ذروة 300 GHz) [4]؛
- بيان المجلس الوطني للحماية من الإشعاعات (NRPB) بشأن تقييدات الحد من تعرض الأشخاص للمجالات والإشعاعات الكهرمغنطيسية الساكنة والمتغيرة مع الوقت [5].

ويقدم الجدول 5 مقارنة تقريبية بين الفئات والأماكن المختارة في المعايير.

الجدول 5

	IEEE/ANSI	ICNIRP	NRPB
الفئات	لا شيء	عامة الجمهور الناس المعرضون بحكم مهنتهم	الكبار والأطفال الكبار
الأماكن	الحماية موفرة (توعية المعرضين) الحماية غير موفرة (لا توعية)	لا شيء	لا شيء

1.2 مقارنة الحدود البيولوجية الأساسية

تضع المعايير والخطوط التوجيهية "حدوداً أساسية" لتيار التماس، وكثافة التيار، ومعدل الامتصاص النوعي (SAR)، يعرضها الجدول 6 مع شروط القياس.

هناك خط توجيهي مشترك، تُجمِع عليه المعايير المقارَنة، وهو أنا تحظر أن يتجاوز المعدل SAR لكامل الجسم قيمة 4 W/kg.

فإذا طُبّقنا عامل سلامة بمقدار 10، انخفض الحد الأساسي للمعدل SAR (معدل SAR الوسطي لكامل الجسم) إلى 0,4 W/kg. والحد الأساسي الذي وضعته الهيئة NRPB بقيمة 0,4 W/kg يُقترَح اعتباره السوية القصوى المسموح با مع ارتفاع الحرارة بقيمة 1 K.

وتجب الملاحظة أن الحد الأساسي للمعدل SAR لكامل الجسم يوضع متوسطه على مدى 6 دقائق. وهناك أيضاً حدود تنطبق على أجزاء معيّنة من الجسم، ويشار إليها بمصطلح "معدلات SAR الموضعية"؛ وبما أن الرنين يؤثر بأنه يرفع درجة الحرارة في مواضع معينة يشار إليها بتسمية "النقط الحارة"، فالحدود في هذه النقط أعلى من معدل SAR الوسطي لكامل الجسم.

2.2 مقارنة السويات المشتقة بشأن المالين E وH وحدود كثافة القدرة مع ترددات متنوعة

من الصعب جداً إجراء قياس مباشر لكثافة التيار ومعدل الامتصاص النوعي (SAR)، لا بل إنه من المستحيل عملياً. وعليه، فإن السويات المشتقة تعطى بالإضافة إلى الحدود الأساسية في المعايير والتوجيهات المقصودة هنا.

ومن جهة أخرى، أسهل بكثير عملياً قياس المقادير E وH في المال الكهرمغنطيسي.

ثم إن المعدل SAR تابع للتردد، بينما تُفترَض الحدود الأساسية المعروضة في الجدول 6 ثابتة. ولكن يمكن بفضل المعطيات ذات الصلة تحويل حدود المعدل SAR إلى المقادير المناظرة E وH وS.

الجدول 6

مقارنة التقييدات البيولوجية الأساسية (حدود SAR) والسويات المرجعية (المعلمات الحالية)

المعلمة	IEEE/ANSI		ICNIRP		NRPB
	الحماية موفرة	الحماية غير موفرة	مهني	عامة الجمهور	
الشدة الفعالة RMS للتيار المستحث أو تيار التماس (mA)	1 000 f (13a))	450 f (13a))	100 (2)	45 (2)	
	100 (1), (13b))	45 (1) , (13b))	40 (3)	20 (3)	
كثافة التيار الفعالة RMS (A/m^2) مساحة حساب المتوسط (cm^2) وقت حساب المتوسط	350 f 1 1 (4)	15,7 f 1 1 (4)	10 f 1 (4)	2 f 1 (4)	10 f
متوسط المعدل لكامل الجسم SAR (W/kg)	0,4 (5a))	0,08 (5b))	0,4 (5a))	0,08 (5a))	0,4 (5c))
المعدل SAR (W/kg) الموضعي	8 (13c))	1,6 (13c))	10 (13d))	2 (13d))	10
كتلة حساب المتوسط (kg)	0,001	0,001	0,001	0,01	0,01 and 0,1

الجدول 6

مقارنة التقييدات البيولوجية الأساسية (حدود SAR) والسويات المرجعية (المعلمات الحالية)

المعلمة	IEEE/ANSI		ICNIRP		NRPB
	الحماية موفرة	الحماية غير موفرة	مهني	عامة الجمهور	
	(6)	(6)	(5a), (7)	(5a), (7)	(5a)), (10)
المعدل Sar[7] (W/kg) الموضعي	20 (13c))	4 (13c))	20 (13d))	4 (13d))	20
كتلة (kg) حساب المتوسط	0,010[8]	0,010[8]	0,01[(5a)), (9)]	0,01[(5a)), (9)]	0,1[(5a)), (9)]
كثافة القدرة (W/m^2)			50 $68/f^{1,05}$ (12), (13)	10 $68/f^{1,05}$ (12), (13)	100 $68/f^{1,05}$ (12)
وقت (min) حساب المتوسط					

f: التردد بـ MHz (ما لم يُذكر غيره).

(1) التيار العابر في كل من القدمين. f: التردد (MHz).

(2) التيار المستحث في أي عضو (10-110 MHz).

(3) تيار التماس المأخوذ من أي شيء موصل (100 kHz-110 MHz).

(4) كثافة التيار في أي مساحة قدرها 1 cm^2 من نسيج الجسم.

(5) a) حدود المعدل SAR بالنسبة إلى وقت لحساب المعدل مدته 6 min.

b) حدود المعدل SAR بالنسبة إلى وقت لحساب المعدل كما هو معطى في الجدول 7.

c) حدود المعدل SAR بالنسبة إلى وقت لحساب المعدل مدته 15 min.

(6) المعدل SAR الموضعي باستثناء اليدين والمعصمين والقدمين والكاحلين (100 kHz-6 GHz).

(7) المعدل SAR الموضعي بخصوص الرأس والجذع (100 kHz-10 GHz).

(8) المعدل SAR الموضعي بخصوص اليدين والمعصمين والقدمين والكاحلين (100 kHz-6 GHz).

(9) المعدل SAR الموضعي بخصوص الأطراف (100 kHz-10 GHz).

(10) المعدل SAR الموضعي بخصوص الرأس والرقبة والجذع والجنين (10 MHz-10 GHz).

(11) 10 g بخصوص الرأس والجنين؛ 100 g بخصوص الرقبة والجذع.

(12) بخصوص الترددات بين 10 و300 GHz. f: التردد (GHz).

(13) متوسط المعدل على كل 20 cm^2 من المساحة المعرضة:

a) $100 \text{ kHz} > f > 3 \text{ kHz}$

b) $100 \text{ MHz} > f > 100 \text{ kHz}$

c) $6 \text{ GHz} > f > 100 \text{ kHz}$

d) $10 \text{ GHz} > f > 100 \text{ kHz}$

تعرض الجداول 7 و8 و9 السوية القصوى للمجالين E وH ولكثافة القدرة على التوالي، في مدى نطاقات ترددية من 1 kHz إلى 300 GHz. والحدود محسوبة على افتراض ثبات اقتران كهرمغنطيسي أمثل بين المجال الكهرمغنطيسي والجسم.

الجدول 7 (يقرأ من اليسار إلى اليمين)

مقارنة السويات المشتقة؛ المال E (القيم الفعالة V/m)*

مدى الترددات	IEEE/ANSI		ICNIRP		NRPB	
	حماية موفرة	حماية غير موفرة	مهنيون	عامة الجمهور	الكبار فقط	الكبار والأطفال
0,6-3 kHz					1 000	
3-30 kHz	614		610 (1)	87		
30-38 kHz						
38-65 kHz						
65-100 kHz						
100-410 kHz						
410-600 kHz						
600-610 kHz					600/*f*	
610-680 kHz						
680-920 kHz						
0,92-1 MHz						
1-1,34 MHz			610/*f*	87/$f^{0,5}$		
1,34-3 MHz	614	823,8/*f*				
3-10 MHz	1 842/*f*	823,8/*f*	61	28	60	600/*f*
10-12 MHz						
12-30 MHz						50 (2)
30-60 MHz	61,4	27,5				
60-100 MHz					*f* (2)	
100-137 MHz						
137-200 MHz					137 (2)	
200-300 MHz						0,25 *f* (2)
300-400 MHz						
400-800 MHz			3 $f^{0,5}$	1,375 $f^{0,5}$		100 (2)
0,8-1,1 GHz						0,125 *f* (2)
1,1-1,55 GHz					0,125 *f* (2)	
1,55-2 GHz					194 (2)	
2-3 GHz			137	61		
3-15 GHz						
15-300 GHz						

f: التردد بـ MHz (ما لم يُذكر غيره)

* يُحسب متوسط القيم على فترة 6 دقائق، باستثناء الحالتين التاليتين:

a) $f^2/0,3$

b) 30 دقيقة.

(1) تقع هذه القيمة بين 0,82 MHz و1 MHz.

(2) هذه القيمة مكافئة لموجة مستوية من موجات المال E.

الجدول 8 (يقرأ من اليسار إلى اليمين)

مقارنة السويات المشتقة؛ المال H (القيم الفعالة لشدة المال)[1]، [2]

مدى الترددات	IEEE/ANSI		ICNIRP		NRPB	
	الحماية موفرة	الحماية غير موفرة	مهنيون	عامة الجمهور	الكبار فقط	الكبار والأطفال
1-3 kHz					64	
3-30 kHz	163			5 [3]		
30-38 kHz						
38-65 kHz						
65-100 kHz			1,6/*f*			
100-140 kHz	16,3/*f*					
140-150 kHz						
150-535 kHz				0,73/*f*	$18/f^2$	
535-610 kHz						
610-680 kHz						
0,68-1 MHz						
1-1,34 MHz						
1,34-3 MHz						
3-10 MHz						
10-12 MHz			0,16	0,073		
12-30 MHz					0,16 [2]	0,13
30-60 MHz	16,3/*f*	$158,3/f^{1,668}$ (1a))				
60-100 MHz					*f*/377 [2]	
100-137 MHz	0,163	0,0729 (1b))				
137-200 MHz					0,36 [2]	$0.66 \times 10^{-3} f$
200-300 MHz						
300-400 MHz						0.26
400-800 MHz			$0,008f^{0,5}$	$0,0037f^{0,5}$		$0.33 \times 10^{-3} f$
0,8-1,1 GHz						
1,1-1,55 GHz					$0,33 \times 10^{-3} f$ [2]	
1,55-2 GHz					0,52	
2-3 GHz			0,36	0,16		
3-15 GHz						
15-300 GHz						

f: التردد بـ MHz (ما لم يُذكر غيره)

(1) يُحسب متوسط القيم على فترة 6 دقائق، باستثناء الحالتين التاليتين:

a) $0,0636 f^{1,337}$ دقيقة

b) 30 دقيقة.

(2) هذه القيمة مكافئة لموجة مستوية في المال H، استناداً إلى قيم كثافة القدرة المعطاة بخصوص الكبار. **ملاحظة** - لا تعطى هذه القيم صراحة على نفس النحو على اعتبار أن قيم المال E وكثافة القدرة محددة.

(3) تصلح هذه القيمة في المدى 0,8 kHz إلى 150 kHz.

الجدول 9 (يقرأ من اليسار إلى اليمين)

مقارنة السويات المشتقة؛ كثافة القدرة (W/m^2)[3]

مدى الترددات	IEEE/ANSI[1]				ICNIRP		NRPB	
	الحماية موفرة		الحماية غير موفرة		المهنيون	عامة الجمهور	الكبار فقط	الكبار والأطفال
	الحال E	الحال H	الحال E	الحال H				
<100 Hz								
0,1-1 kHz								
1-3 kHz								
3-30 kHz								
30-100 kHz	1 000	10×10^6	1 000	10×10^6				
100-410 kHz								
0,41-1 MHz	1 000	$10^5/f^2$	1 000	$10^5/f^2$				
1-1,34 MHz								
1,34-3 MHz	1 000	$10^5/f^2$	$1\,800/f^2$ (2), (3a))	$10^5/f^2$ (2)				
3-10 MHz			$1\,800/f^2$ (2), (3b))	$10^5/f^2$ (2)				
10-12 MHz	$9\,000/f^2$	$10^5/f^2$						
12-30 MHz					10	2	10	6,6
30-60 MHz			2 (2), (3b))	$(9{,}4 \times 10^6)/f^{8{,}336}$ (2), (3c))				
60-100 MHz	10	$10^5/f^2$					$2{,}7 \times 10^{-3} f^2$	
100-137 MHz								
137-200 MHz	10		2 (3b))					
200-300 MHz								$0{,}165 \times 10^{-3} f^2$
300-400 MHz							50	
400-800 MHz								26
0,8-1,1 GHz								$41 \times 10^{-6} f^2$
1,1-1,55 GHz	$f/30$		$f/150$ (3b))		$f/40$	$f/200$	$41 \times 10^{-6} f^2$	
1,55-2 GHz							100	
2-3 GHz								
3-15 GHz	100		$f/150$ (3d))		50	10		
15-300 GHz	100 (3e))							

f: التردد بـ MHz (ما لم يُذكر غيره)

(1) فيما تحت 100 MHz، القيم المكافئة لموجة مستوية معطاة بخصوص الحالين E وH.

(2) كما أعطتها بعض أجهزة القياس المتيسرة في السوق.

(3) يُحسب متوسط القيم على فترة 6 دقائق، باستثناء الحالات التالية:

a) $f^2/0{,}3$ دقائق

b) 30 دقيقة

c) $0{,}0336\, f^{1{,}337}$ دقيقة

d) $90\,000/f$ دقيقة

e) $616\,000/f^{1{,}2}$ دقيقة.

3 قيم شدة المال اللازم تحديدها

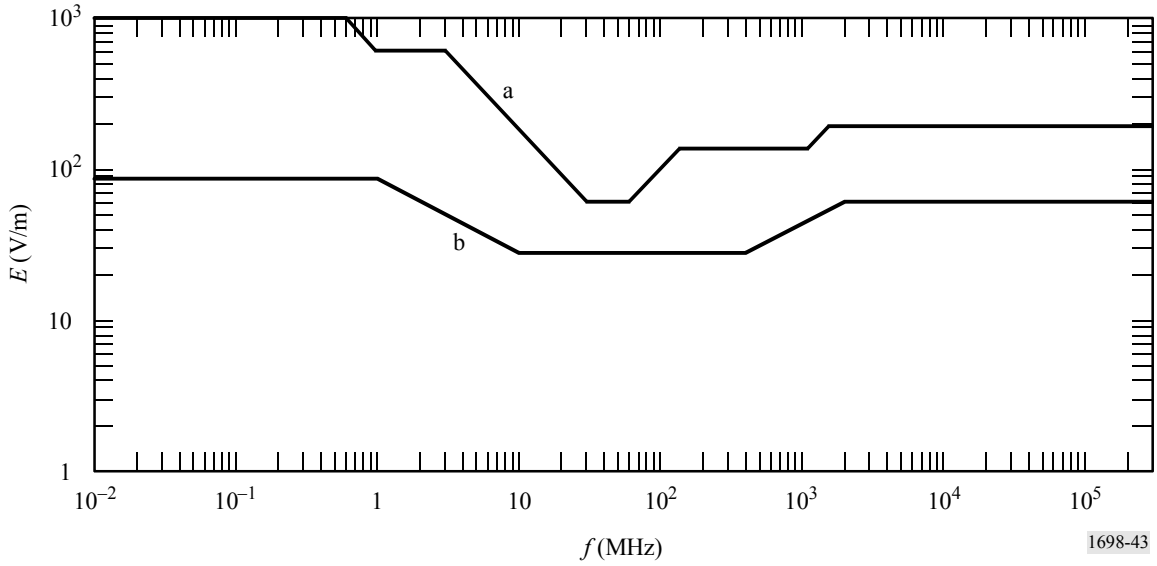
استُعين بالمعطيات المعروضة في الفقرة 2.2 من هذا التذييل لبيان قيم شدة المالين الكهربائي والمغنطيسي في الشكلين 43 و44 على ترتيب التوالي.

والمنحنيات/البيانيات الواردة في الشكلين 43 و44 ينبغي ألا تعتمدها الإدارات أساساً لإعداد تنظيماتها الوطنية، لأنها تمثل خليطاً من الحدود الموصوفة في الوقت الحاضر، والقابلة بالتأكيد للتطور مع الزمن. فهي من ثم إيضاحية فحسب للطريقة الممكن أن تنتهجها إدارة ما لإعداد معايير مفيدة.

ولا بد من الاعتراف أيضاً بأن نتائج الدراسات المستقلة لهذا الموضوع ليست متسقة تماماً، ومن ثم فإن تفسير السلطات المسؤولة لهذه النتائج أسفر، وسيظل يسفر في المستقبل، عن متطلبات مختلفة بحسب البلدان.

الشكل 43

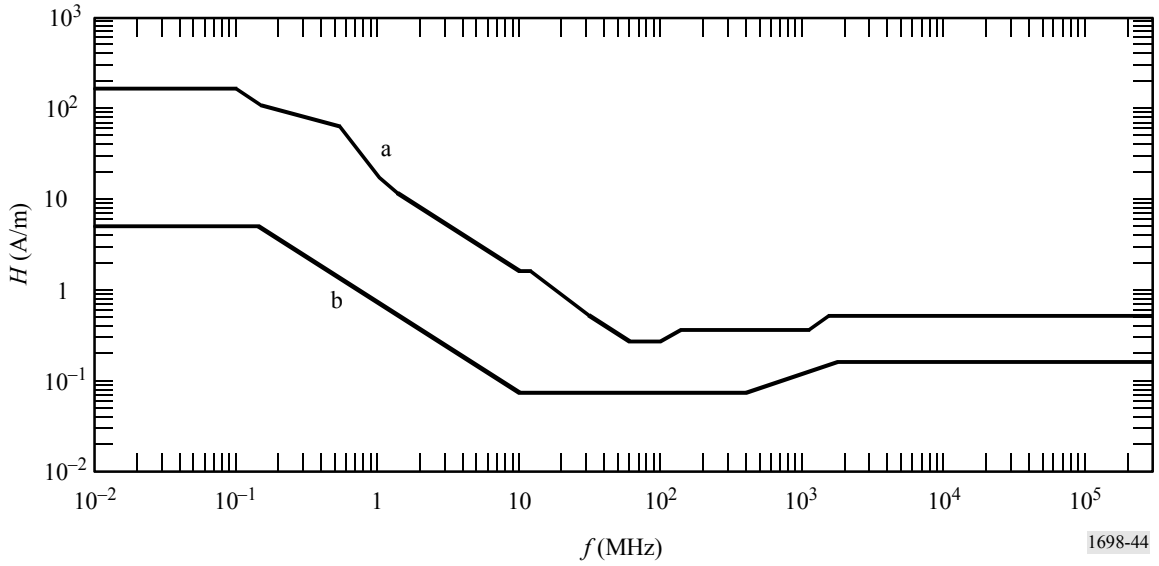
مدى قيم شدة المال الكهربائي، مشتقة من الجداول المعطاة في التذييل 3



يمثل المنحنيان a وb الحدين الأعلى والأدنى على التوالي، الموضوعين في بعض التوصيات المعروفة، المعمول بها حالياً، بخصوص سويات التعرض لإشعاعات الترددات الراديوية (مقدمة في هذا التذييل على سبيل المثال). كل المنحنيات التي تضعها سلطات تُصدِر مثل هذه التوصيات تقع بين هذين الحدين، وأي منحنٍ يقع بين المنحنيين a وb فمن المفترض أنه يسمح بتشغيل خدمات إذاعية سليمة.

الشكل 44

مدى قيم شدة المجال المغنطيسي، مشتقة من الجداول المعطاة في التذييل 3



يمثل المنحنيان a وb الحدين الأعلى والأدنى على التوالي، الموضوعين في بعض التوصيات المعروفة، المعمول بها حالياً، بخصوص سويات التعرض لإشعاعات الترددات الراديوية (مقدمة في هذا التذييل على سبيل المثال). كل المنحنيات التي تضعها سلطات تُصدِر مثل هذه التوصيات تقع بين هذين الحدين، وأي منحنٍ يقع بين المنحنيين a وb فمن المفترض أنه يسمح بتشغيل خدمات إذاعية سليمة.

الفروق بين السويات القصوى المقترحة في نفس التردد (كما في الشكلين 43 و44) تابعة لاختلاف الشروط التي تلتزم بها السلطات التي تقترح هذه الحدود.

4 الإجراءات الرقمية وحساب مقادير المجال الكهرمغنطيسي

يمكن، في عدد من الحالات البسيطة نسبياً، حل مشكلات الإشعاع والتناثر عن طريق إجراءات تحليلية بصيغة مغلقة. إلا أن حل المشكلات العامة، المتصفة بهندسات متغيرة، يقتضي تطبيق إجراءات حساب رقمي، تنفذ بواسطة حواسيب مقتدرة.

والإجراءات الرقمية، التابعة لمدى التردد قيد النظر ولأبعاد البنى الهندسية المستعملة، متيسرة من أجل حساب مقادير المجال الكهرمغنطيسي.

وقد فضّلنا أن نستعمل، من بين هذه الطرائق، طريقة العزوم (MOM) المستعملة في تصميم أنظمة الهوائيات الإذاعية، وفي حساب قيم المجالات الكهرمغنطيسية الناجمة عنها.

وطريقة العزوم (MOM) هذه يكثر استعمالها لحساب توزع معدل الامتصاص النوعي (SAR) في ما يسمّى "النموذج الفدري".

أما شدة المجال الكهربائي داخل الجسم فتحسب قيمها عن طريق حل المعادلة التكاملية الخاصة بالمجال الكهربائي، مع الاستعانة بمعادلات Maxwell.

والبرامجيات المستعملة هي: NEC – WIN Professional V 1.1 (1997) by Nittany Scientific, inc. – http://www.nittany-scientific.com/.

5 قائمة ببعض التنظيمات الوطنية

1.5 الإدارات

1.1.5 أستراليا

Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA) Radiation Protection Standard RPS-3, Radiation Protection Standard – Maximum exposure levels to radiofrequency fields – 3 kHz to 300 GHz.

2.1.5 البرازيل

- القرار رقم 303/202

Regulamento sobre Limitacao da Exposicao a Campos Elétricos, Magnéticos e Elétromagnéticos na Faixa de Radiofrequencias entre 9 kHz e 300 GHz.
www.anatel.gov.br/bibliotheca/Templates/Resolucoes/resolucoes.asp

3.1.5 فرنسا

المرسوم التنظيمي رقم 2002-775 بتاريخ 2002.05.03 المتعلق بالقيم الحدية لتعرض الجمهور للمجالات الكهرمغنطيسية الناجمة عن التجهيزات المستعملة في شبكات الاتصالات أو عن المنشآت الراديوية الكهربائية.

4.1.5 ألمانيا

Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit. www.bmwi.de.

5.1.5 إيطاليا

DPCM 8 July 2003. www.parlamento.it/parlam/leggi/elelenum.htm.

6.1.5 نيوزيلندا

7.1.5 الولايات المتحدة الأمريكية

.http://www.fcc.gov/oet/rfsafety/

8.1.5 دولة مدينة الفاتيكان

Delibera del 16/12/1992 No: 225620.

9.1.5 اليابان

Radio Law (Law No. 131 of May 2, 1950), Article 30.
The Regulations for Enforcement of the Radio Law (Radio Regulatory Commission Rules No. 14 of November 30, 1950), Article 21-3 and Annex, Table 2-3-2.

موقع الويب: http://www.tele.soumu.go.jp/e/ele/index.htm (بالانكليزية)

http://www.tele.soumu.go.jp/j/ele/index.htm (باليابانية)

(ليست مواد القانون والتنظيمات متيسرة إلا باليابانية. بعض التقارير المقدمة إلى الوزارات متيسرة بالانكليزية.)

6 قائمة ببعض الهيئات التنظيمية والاستشارية

1.6 لجنة المكونات الإلكترونية [6]

2.6 اللجنة الألمانية لتكنولوجيات المعلومات الكهربائية والإلكترونية

3.6 الاتحاد الأوروبي – توصية مجلس الاتحاد الأوروبي، 199 L، 12 يوليو 1999

4.6 معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات/معهد التقييس الوطني الأمريكي (IEEE/ANSI)

5.6 اللجنة الدولية للحماية من الإشعاعات غير المؤينة (ICNIRP)

6.6 اللجنة الكهرتقنية الدولية (IEC)

7.6 منظمة الصحة العالمية (WHO)

8.6 الهيئة الوطنية للحماية من الإشعاعات (NRPB)

9.6 المعهد الأوروبي لتقييس الاتصالات (ETSI)

التذييل 4
للملحق 1

طرائق تقييم أخرى

1 قياس الجرعات

يمكّن تطبيق مفاهيم قياس الجرعات من إقامة الصلة بين القيم الخارجية لشدة المال (أي المحصلة بالقياس خارج الجسم) والمقادير الداخلية من شدة المال، 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 والمالات الكهرمغنطيسية.

وفي حين أن كثافة التيار هي الكم 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 المال المحصلة بالقياس في البيئة، باستعمال نماذج خاصة بقياس الجرعات. وجرى استعمال تقنيات غير مشوشة للقياس بخصوص ترددات تحت 100 MHz، من أجل قياس التيار المستحث، وفي المالات المنتظمة الموسعة أُوجِدت الصلة كدالة للتردد بين قيم شدة المال 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).

2 قياس المعدل SAR

المعدل SAR (W/kg) هو المقدار الحدي الأساسي المعتمد في أكثرية التنظيمات والمعايير المتعلقة بالتعرض للإشعاعات الكهرمغنطيسية. إنه قياس معدل الطاقة الكهرمغنطيسية التي تبددها الوحدة الكتلية من نسيج الجسم.

ويمكن تعريف المعدل SAR بأنه القيمة المقيسة 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:

$$\mathrm{SAR} = \frac{\sigma E^2}{\rho} = C_i \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}T} = \frac{J^2}{\sigma\rho}$$

حيث:

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

σ: إيصالية نسيج الجسم ($\mathrm{S/m^{-1}}$)

ρ: كثافة نسيج الجسم ($\mathrm{kg/m^{-3}}$)

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

$\mathrm{d}T/\mathrm{d}t$: المشتقة الزمنية للحرارة في نسيج الجسم ($\mathrm{°C/s^{-1}}$)

J: قيمة كثافة التيار المستحث في نسيج الجسم ($\mathrm{A/m^2}$)

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

$$\mathrm{SAR} = \mathrm{d}/\mathrm{d}t \qquad \mathrm{dW}/\mathrm{dm}$$

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 بالسويات 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 طريقة القياس بواسطة المال الكهربائي

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

$$SAR = \sigma E^2/\rho$$

حيث:

σ (S/m): الإيصالية

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

يُحدد 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 المال 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 طريقة القياس بواسطة الحرارة

المعدل SAR متناسب مع المعدل الابتدائي dT/dt (C/s) لارتفاع الحرارة في نسيج شيء معرض، طبقاً للمعادلة التالية:

$$SAR = c\ \Delta T/\Delta t$$

حيث c هي السعة الحرارية النوعية لمادة النسيج (J/KgC). 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 طريقة القياس المِسْعَريّ

يمكن تحديد متوسط المعدل SAR لكامل الجسم بطرائق القياس المِسْعَريّ. في عملية قياس مسعري عادية، يُجرى أولاً تعريض نموذج جسمي قده طبيعي أو سُلميّ، 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. يُعرض 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.

3 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.

1.3 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.

وتُركب 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 مولفة (مزيتها أنها تحدد توزيع التردد للتيار المستحث في بيئات متعددة مصادر الإشعاع)، وإما باستعمال تقنيات عريضة النطاق تعتمد طريقة الكشف بالعينات على ثنائيات القطب أو على التحويل الحراري.

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

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

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 الموصل، بواسطة محول تيار ضيق الفتحة، أو بواسطة مزدوجة حرارية موضوعة في فراغ.

ومتيسرة هي أيضاً الأدوات الملبية لترددات مستوية الموجة من 3 kHz إلى 100 MHz

وعند اختيار أداة 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 شأنما التأثير على السريان الظاهر للتيار نحو الأرض.

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

2.3 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 10 Ω) موصلة بالتسلسل بين الشيء الموصل والمسبار المعدني الممسوك طرفه باليد؛
- مقياس ملّي أمبير بشكل مزدوجة حرارية يوصل بالتسلسل توصيلاً مباشر.

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

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

3.3 قياس توتر التماس

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

التذييل 5
للملحق 1
الأجهزة الإلكترونية الطبية

1 الأجهزة الإلكترونية الطبية

الملاءمة الكهرمغنطيسية (EMC) مسألة عامة تنطرح بصدد التجهيزات الإلكترونية، ولا سيما التجهيزات الإلكترونية الطبية. فهذه إذا استُعملت في حضور مجالات كهرمغنطيسية قوية يمكن ألا تشتغل بصورة صحيحة. ويزداد خطر سوء الأداء كلما قويت شدة المال. وخطر سوء الأداء مرهون بعدة متغيرات، مثل سوية شدة المال، وهذه تابعة للمسافة بين الهوائي المشِعّ والجهاز، ومثل قدرة المرسل، وتردد الموجات، ونمط تشكيل الإشارة المشعة، وتأثير اقتران الكبلات، وحصانة الأجهزة الإلكترونية نفسها إزاء الترددات الراديوية.

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

1.1 الأجهزة المغروسة والأجهزة المحمولة

من شأن الـالات الكهرمغنطيسية أن تسبب تداخلاً في الأجهزة الطبية المغروسة والمحمولة.

يدخل في هذا الصنف مضخات الأنسولين وناظمات القلب، وسيكبر في المستقبل عدد هذه الأجهزة. ويبدو آخذاً في التزايد أيضاً مدى وعدد الأجهزة الجديدة المختلفة، مثل المِرقّب المحمول، والمعينات البدلية للبصر والحركة. فبوجه عام، يمكن أن تتأثر ناظمات القلب وسائر الأجهزة الطبية من تداخل الـالات الكهرمغنطيسية المشعة. ومع ذلك فإن مشكلات تداخل الترددات الراديوية في الأجهزة الإلكترونية الطبية المغروسة لم تُحَلّ تماماً، بسب عدم الوعي الكافي لها عند المصنعين والموردين.

التذييل 6
للملحق 1
مراجع بيبليوغرافية

[1] IEC [6 October 2000] IEC Committee Draft (CD) 85/214/CD: Measurement and evaluation of high frequency (9 kHz to 300 GHz) electromagnetic fields with regard to human exposure.

[2] EBU [November 2001] BPN 023: Radio frequency radiation: Exposure limits and their implication for broadcasters. European Broadcasting Union.

[3] ANSI/IEEE [1992] Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. IEEE Std C95.1/D1.4.

[4] ICNIRP [April 1998] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, Vol. 74, **4**, p. 494-522.

[5] NRPB [1993] Board Statement on restrictions on human exposure to state and time varying electromagnetic fields and radiation. Doc. NRPB, Vol. 4, **5**.

[6] CENELEC [21 November 2003] Draft prEN 50413: Basic Standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz-300 GHz).

[7] IEEE. IEEE Std C95.3: IEEE recommended practice for measurements and computations of radio frequency electromagnetic fields with respect to human exposure to such fields, 100 kHz-300 GHz.

- - - - - - - - -