

الاتحاد الدولي للاتصالات

# ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية **ITU-R P.676-11**  
(2016/09)

## التوهين الناجم عن الغازات الجوية

السلسلة **P**  
انتشار الموجات الراديوية



## تمهيد

يوظف قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد مدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها. ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

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

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

### سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

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

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

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

النشر الإلكتروني

جنيف، 2017

## التوصية ITU-R P.676-11

## التوهين الناجم عن الغازات الجوية

(المسألة ITU-R 201/3)

(1990-1992-1995-1997-1999-2001-2005-2007-2009-2012-2013-2016)

## مجال التطبيق

- تعرض هذه التوصية أساليب تقدير التوهين الناجم عن الغازات الجوية على مسيرات الأرض والمسيرات المائلة باستعمال:
- أ) تقدير التوهين الناجم عن الغازات الجوية المحسوب بجمع فرادى خطوط الامتصاص الصالحة بالنسبة لمدى التردد 1 000-1 GHz؛
- ب) أسلوب مبسط تقريبي لتقدير التوهين الغازي المنطبق في مدى التردد 1-350 GHz.

## مصطلحات أساسية

امتصاص غازي، توهين محدد، توهين المسير المائل، التوهين الكلي، بخار الماء، الأوكسجين، الهواء الجاف

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

- أ) ضرورة تقدير توهين الغازات الجوية على مسيرات الأرض والمسيرات المائلة،
- توصي

- 1 بأن تستعمل للتطبيقات العامة الإجراء الوارد في الملحق 1 لحساب التوهين بالغازات الجوية على ترددات تصل حتى 1 000 GHz؛
- 2 بأن يستعمل الإجراء الأبسط حسابياً الوارد في الملحق 2 لإجراء تقدير تقريبي للتوهين الناجم عن الغازات الجوية في مدى الترددات بين 1 و 350 GHz.

## دليل إرشادي إلى هذه التوصية

- تقدم هذه التوصية الأساليب الثلاثة التالية للتنبؤ بالتوهين الغازي النوعي وعلى المسير الناتج عن الأوكسجين وبخار الماء:
- 1 حساب التوهين الغازي النوعي وعلى المسير باستخدام طريقة جمع مساهمات خطوط الامتصاص الواردة في الملحق 1 بافتراض الضغط الجوي ودرجة الحرارة وكثافة بخار الماء مقابل الارتفاع؛
- 2 تقدير تقريبي للتوهين الغازي النوعي وعلى المسير على النحو الوارد في الملحق 2 بافتراض كثافة بخار الماء على سطح الأرض؛
- 3 تقدير تقريبي لتوهين المسير على النحو الوارد في الملحق 2 بافتراض المحتوى المتكامل لبخار الماء عبر المسير.
- ويمكن لطرائق التنبؤ هذه استعمال بيانات الأرصاد الجوية المحلية أو الظروف الجوية المرجعية أو خرائط الأرصاد الجوية المقابلة لاحتمال مطلوب للتجاوز والوارد في توصيات أخرى من سلسلة التوصيات P لقطاع الاتصالات الراديوية، وذلك في حالة عدم توفر البيانات المحلية.

## التوهين النوعي

المعادلة (1) بالملحق 1 القابلة للتطبيق على الترددات حتى GHz 1 000 أو جمع المعادلتين (22) و(23) بالملحق 2 وهو ما يمكن تطبيقه على الترددات حتى GHz 350، يمكن استعمالها للتنبؤ بالتوهين المحدد. وتحتاج الطريقتان إلى الضغط ودرجة الحرارة وكثافة بخار الماء في الموقع المحدد. وفي حالة عدم وجود بيانات محلية، يمكن أن تستخدم بدلاً من الكثافة المرجعية القياسية لبخار الماء على السطح عند مستوى الأرض البالغة  $7,5 \text{ g/m}^3$ ، توليفة من الآتي: أ) المتوسط السنوي للظروف الجوية المرجعية العالمية الواردة في التوصية ITU-R P.835، وب) خريطة المتوسط السنوي لدرجة حرارة سطح الأرض الواردة في التوصية ITU-R P.1510، وج) خرائط كثافة بخار الماء على سطح الأرض مقابل احتمال التجاوز الواردة في التوصية ITU-R P.836.

## توهين المسير المائل (الاتجاه أرض-فضاء)

يمكن استخدام المعادلة (20) بالملحق 1 أو المعادلتين (28) أو (29) بالملحق 2.

- تتطلب المعادلة (20) بالملحق 1 معرفة مواصفات درجة الحرارة والضغط وكثافة بخار الماء عبر المسير. وفي حالة عدم توفر بيانات المواصفات المحلية، يمكن استعمال مواصفات الظروف الجوية المرجعية الواردة في التوصية ITU-R P.835. ويمكن أن تستخدم بدلاً من الكثافة المرجعية القياسية لبخار الماء على السطح عند مستوى الأرض البالغة  $7,5 \text{ g/m}^3$ ، خرائط كثافة بخار الماء على سطح الأرض مقابل احتمال التجاوز الواردة في التوصية ITU-R P.836.
  - تتطلب المعادلة (28) بالملحق 2 معرفة الضغط ودرجة الحرارة وكثافة بخار الماء على سطح الأرض. والمعادلة (28) عبارة عن تقريب للمعادلة (20) يمكن تطبيقها على الترددات حتى GHz 350 بافتراض المتوسط السنوي للظروف الجوية المرجعية العالمية وقيمة عشوائية لكثافة بخار الماء على سطح الأرض بقيمة أسية سالبة لكثافة بخار الماء مقابل الارتفاع. ويمكن استخدام المعادلة (28) بالملحق 2 للتنبؤ: أ) بالتوهين الغازي اللحظي لقيمة محددة من الضغط ودرجة الحرارة وكثافة بخار الماء على السطح أو ب) التوهين الغازي المقابل لكثافة بخار الماء على السطح عند احتمال مطلوب للتجاوز. وفي حالة عدم وجود بيانات محلية لكثافة بخار الماء على السطح، يمكن استخدام خرائط كثافة بخار الماء على السطح الواردة في التوصية ITU-R P.836.
  - تتطلب المعادلة (29) بالملحق 2 معرفة درجة الحرارة والضغط على السطح والمحتوى المتكامل لبخار الماء عبر المسير. وكما هو الحال مع المعادلة (28) بالملحق 2، يمكن استخدام المعادلة (29) بالملحق 2 للتنبؤ: أ) بالتوهين الغازي اللحظي لقيمة محددة من الضغط ودرجة الحرارة على السطح والمحتوى المتكامل لبخار الماء، أو ب) التوهين الغازي المقابل للمحتوى المتكامل لبخار الماء عند احتمال مطلوب للتجاوز. وفي حالة عدم توفر بيانات محلية للمحتوى المتكامل لبخار الماء، يمكن استخدام خرائط المحتوى المتكامل لبخار الماء الواردة في التوصية ITU-R P.836.
- في حالة توفر بيانات كثافة بخار الماء على السطح والمحتوى المتكامل لبخار الماء، فإن المعادلة (29) بالملحق 2 مع استعمال البيانات المحلية للمحتوى المتكامل لبخار الماء تعتبر أكثر دقة من المعادلة (28) بالملحق 2 مع استعمال البيانات المحلية لكثافة بخار الماء. وبالمثل، في حالة عدم توفر بيانات محلية، فإن المعادلة (29) بالملحق 2 مع استعمال خرائط المحتوى المتكامل لبخار الماء الواردة في التوصية ITU-R P.836، تعتبر أكثر دقة من المعادلة (28) بالملحق 2 مع استعمال خرائط كثافة بخار الماء على السطح الواردة في التوصية ITU-R P.836.

الملحق 2 المعادلة (29)	الملحق 2 المعادلة (28)	الملحق 1 المعادلة (20)	
GHz 350 ≥		GHz 1 000 ≥	مدى الترددات
تقريب		الأفضل في مجموع كل خط على حدة	الدقة
مواصفة المتوسط السنوي للظروف الجوية المرجعية العالمية		قيم عشوائية	الضغط مقابل الارتفاع
			درجة الحرارة مقابل الارتفاع
المحتوى المتكامل لبخار الماء بدلاً من كثافة بخار الماء مقابل الارتفاع			كثافة بخار الماء مقابل الارتفاع
القيمة السطحية مع مواصفة أسية سالبة مقابل الارتفاع			

## الملحق 1

### حساب التوهين الناجم عن الغازات الجوية بواسطة جمع مساهمات خطوط الامتصاص

#### 1 التوهين النوعي

إن أدق طريقة لتقدير التوهين النوعي الذي يعزى إلى الهواء الجاف وبخار الماء في الترددات التي تصل إلى GHz 1 000 لأي قيمة من قيم الضغط والحرارة والرطوبة هي جمع مساهمات كل خط من خطوط الطنين الصادرة عن الأوكسجين وبخار الماء مع عوامل صغيرة إضافية مطابقة لطيف Debye اللاتنان الصادر عن الأوكسجين تحت GHz 10، وللتوهين المستحث من ضغط الآزوت فوق GHz 100 وللطيف المستمر لبخار الماء الذي يسمح بمراعاة القيم المقيسة لامتناس بخار الماء التي تفوق القيم المتوقعة. ويوضح الشكل 1 التوهين النوعي باستخدام طريقة التنبؤ، والمحسوب من 0 إلى GHz 1 000 بفواصل يبلغ كل منها GHz 1، من أجل ضغط مقداره hPa 1 013,25 ودرجة حرارة هي 15° مئوية وذلك في حالتي كثافة بخار الماء البالغة 7,5 g/m<sup>3</sup> والجو القياسي (الجاف).

ويندمج بجوار GHz 60 العديد من خطوط امتناس الأوكسجين في ضغوط على مستوى البحر من أجل تشكيل نطاق وحيد وعريض للامتناس والذي يوضح بالتفصيل في الشكل 2. ويبين هذا الشكل أيضاً التوهين بالأوكسجين على مرتفعات أعلى، كلما زادت استبانة الخطوط، ومع انخفاض الضغط بزيادة الارتفاع. ولا تندرج في طريقة التنبؤ خطأً خطأً بعض أنواع الجزئيات الأخرى (مثل: أنواع نظائر الأوكسجين وأنواع الأوكسجين المثار بالاهتزاز والأوزون وأنواع نظائر الأوزون والأوزون المثار بالاهتزاز وغيرها من الأنواع الصغرى). وهذه الخطوط الإضافية ليست هامة للأجواء العادية، لكن قد تكون ضرورية للجو الجاف.

وفيما يخص التقييم السريع والتقريبي للتوهين النوعي في ترددات تصل إلى GHz 350 وفي حالات لا تتطلب دقة كبيرة، يمكن استعمال الخوارزميات المبسطة الواردة في الملحق 2 من أجل مدبات محدودة تتعلق بظروف الأرصاد الجوية.

تعطي العبارة التالية التوهين النوعي بالغازات الجوية:

$$(1) \quad \gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0,1820f \left( N''_{\text{Oxygen}}(f) + N''_{\text{WaterVapour}}(f) \right) \quad (\text{dB/km})$$

وهنا  $\gamma_w$  و  $\gamma_o$  هما توهينان نوعيان (dB/km) سببهما الهواء الجاف (التوهين الناجم عن الأوكسجين وضغط الآزوت وطيف Debye اللاطنان) وبخار الماء على التوالي، و  $f$  هو التردد (GHz) و  $N''_{Oxygen}(f)$  و  $N''_{Water\ vapour}(f)$  هما الجزآن التخيليان من الانكسارية المركبة المرتبطة بالتردد:

$$(2a) \quad N''_{Oxygen}(f) = \sum_i (Oxygen) S_i F_i + N''_D(f)$$

$$(2b) \quad N''_{Water\ vapour}(f) = \sum_i (Water\ vapour) S_i F_i$$

$S_i$  هي شدة الخط رقم  $i$  للأوكسجين أو بخار الماء، و  $F_i$  عامل الشكل لخط الأوكسجين أو بخار الماء، ويغطي المجموع كل الخطوط الواردة في الجدولين 1 و2؛

$N''_D(f)$  هو الطيف المستمر للجو الجاف الناجم عن الامتصاص المستحث من ضغط الآزوت وطيف Debye، المتحصل عليه بالمعادلة (8).

وتحدد شدة الخط على النحو التالي:

$$(3) \quad \begin{aligned} S_i &= a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp [a_2 (1 - \theta)] && \text{لأوكسجين} \\ &= b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3.5} \exp [b_2 (1 - \theta)] && \text{لبخار الماء} \end{aligned}$$

حيث:

$p$ : ضغط الجو الجاف (hPa)

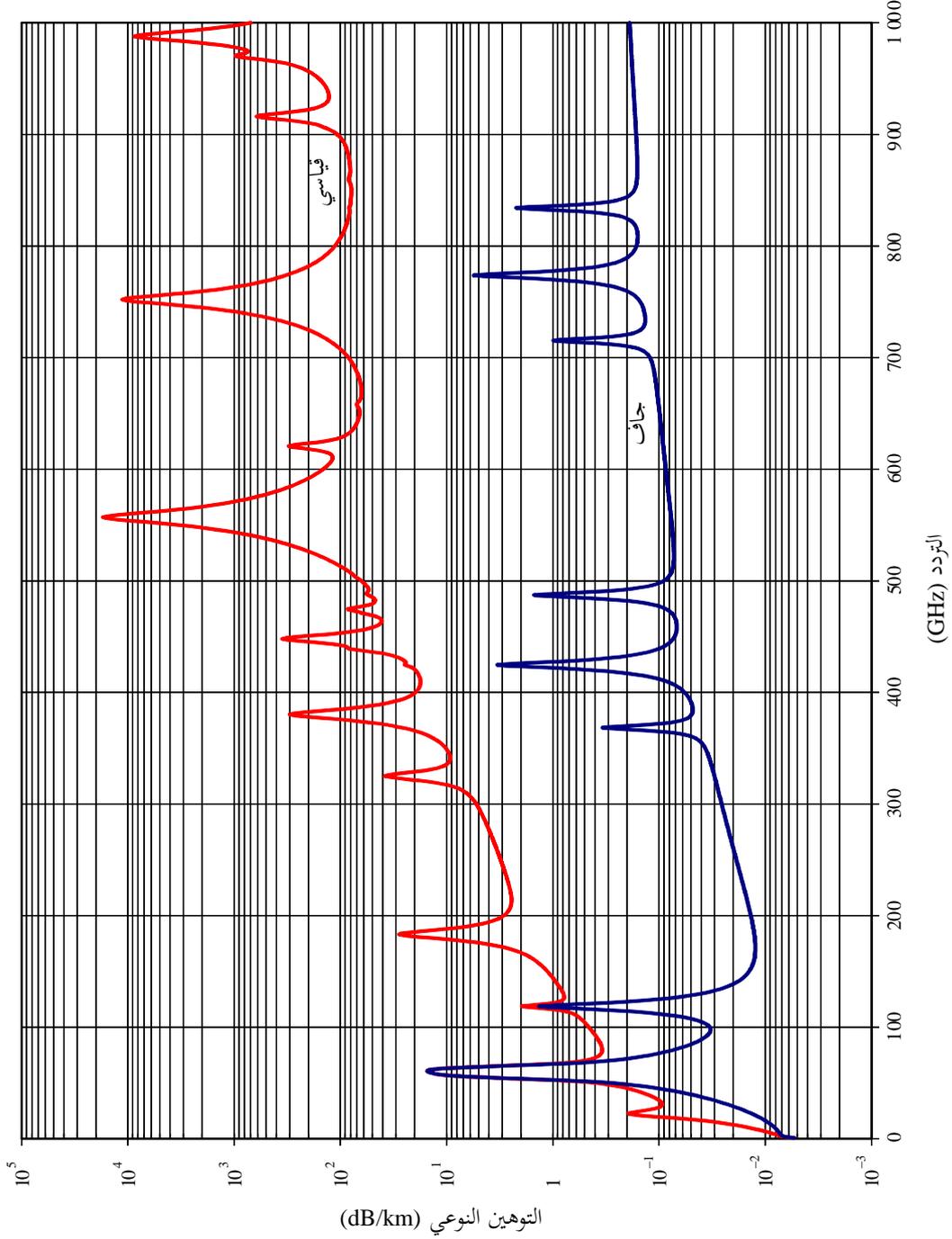
$e$ : الضغط الجزئي لبخار الماء معبراً عنه (hPa) (الضغط الجوي الكلي،  $p_{tot} = p + e$ )

$\theta = 300/T$

$T$ : درجة الحرارة (K).

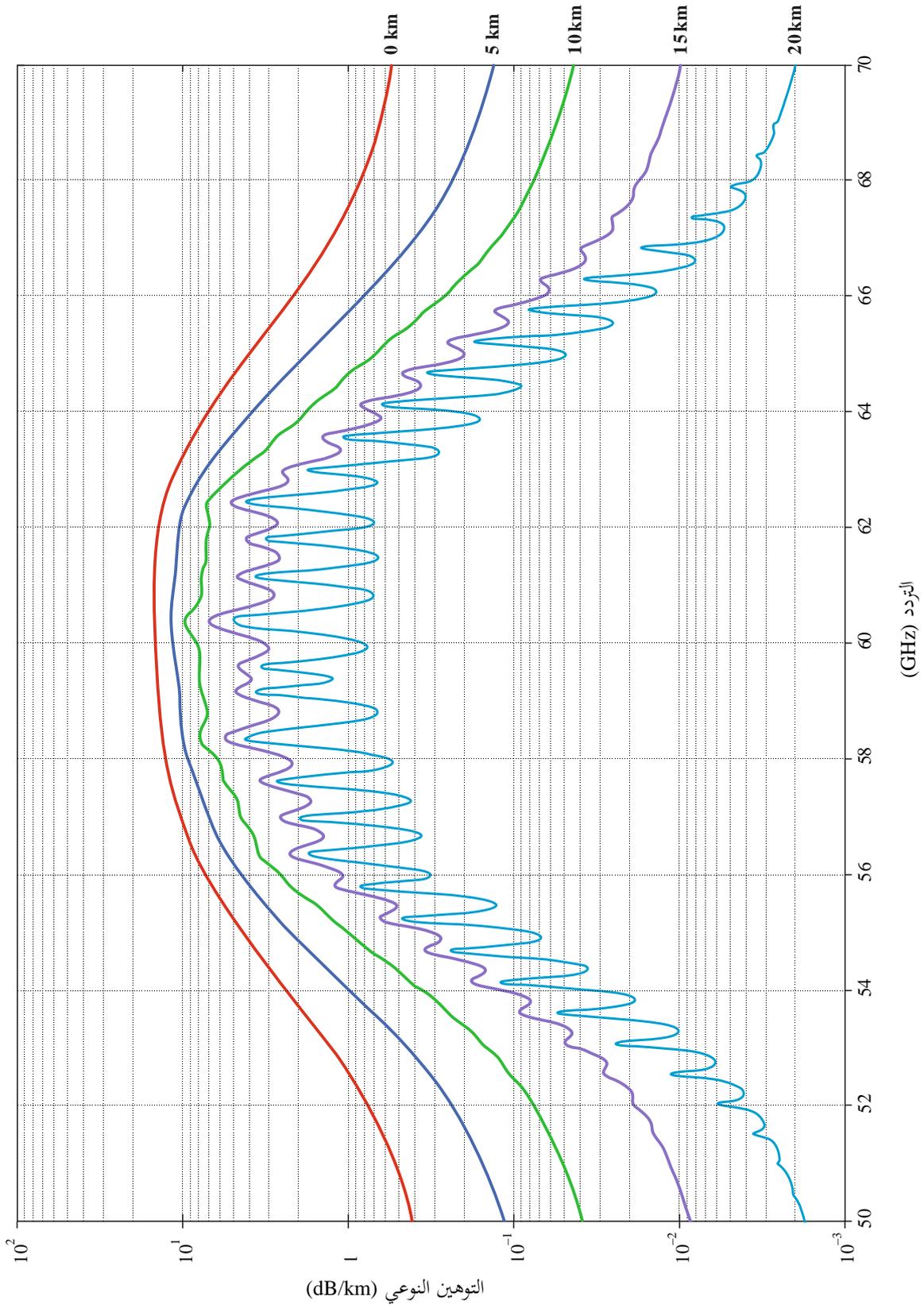
الشكل 1

التوهين النوعي الناجم عن الغازات الجوية محسوباً في فواصل قدر كل منها 1 GHz بما فيها الترددات المركزية للخطوط



الشكل 2

توهين نوعي في مدى الترددات 50-70 GHz في الارتفاعات المبينة، والمحسوب على فواصل 10 MHz، بما في ذلك مراكز الخطوط (0 و 5 و 10 و 15 و 20 km)



P.0676-02

ينبغي استعمال القيم الخاصة بالضغط  $p$  والضغط الجزئي  $e$  ودرجة الحرارة  $T$  (المتحصل عليها مثلاً بواسطة المسابير الراديوية). وينبغي عند الافتقار إلى المعلومات المحلية، استعمال الظروف الجوية القياسية المرجعية الواردة في التوصية ITU-R P.835. (جدير بالذكر أنه في حال حساب التوهين الجوي الكلي يستعمل نفس الضغط الجزئي لبخار الماء في كل من التوهينين الناجمين عن الهواء الجاف وبخار الماء.)

ويمكن الحصول على الضغط الجزئي لبخار الماء،  $e$ ، على ارتفاع ما من كثافة بخار الماء  $\rho$  ودرجة الحرارة  $T$  على هذا الارتفاع، باستعمال المعادلة التالية:

$$(4) \quad e = \frac{\rho T}{216,7}$$

وترد البيانات الطيفية للأوكسجين في الجدول 1، والبيانات الطيفية لبخار الماء في الجدول 2. وآخر مدخلات في الجدول 2 عبارة عن شبه خط مركزه 1 780 GHz، يمثل حده الأدنى المساهمة المشتركة تحت 1 000 GHz لرنين بخار الماء غير المدرج في طريقة التنبؤ بجمع مساهمات خطوط الامتصاص (أي التواصل الرطب). وتضبط معلمات شبه الخط لمراعاة الفارق بين الامتصاص المقاس عند النوافذ الجوية والامتصاص المحسوب للخط المحلي.

تعطي العبارة التالية عامل شكل الخط:

$$(5) \quad F_i = \frac{f}{f_i} \left[ \frac{\Delta f - \delta (f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta (f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right]$$

حيث  $f_i$  هو تردد خط الأوكسجين أو بخار الماء و  $\Delta f$  هو عرض الخط:

$$(6a) \quad \begin{aligned} \Delta f &= a_3 \times 10^{-4} (p \theta^{(0,8 - a_4)} + 1,1e\theta) && \text{للأوكسجين} \\ &= b_3 \times 10^{-4} (p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6}) && \text{لبخار الماء} \end{aligned}$$

ويعدل عرض الخط لمراعاة تقسيم زمني لخطوط الأوكسجين وتوسيع دوبلر لخطوط بخار الماء:

$$(6b) \quad \begin{aligned} \Delta f &= \sqrt{\Delta f^2 + 2,25 \times 10^{-6}} && \text{للأوكسجين} \\ &= 0,535 \Delta f + \sqrt{0,217 \Delta f^2 + \frac{2,1316 \times 10^{-12} f_i^2}{\theta}} && \text{لبخار الماء} \end{aligned}$$

و  $\delta$  عامل تصحيح ينتج عن تأثيرات التداخل في خطوط الأوكسجين:

$$(7) \quad \begin{aligned} \delta &= (a_5 + a_6 \theta) \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8} && \text{للأوكسجين} \\ &= 0 && \text{لبخار الماء} \end{aligned}$$

## الجدول 1

## المعطيات المطيافية للتوهين بالأوكسجين

$a_6$	$a_5$	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$f_0$
6,850	2,566	0,0	6,690	9,651	0,975	50,474214
6,800	2,246	0,0	7,170	8,653	2,529	50,987745
6,729	1,947	0,0	7,640	7,709	6,193	51,503360
6,640	1,667	0,0	8,110	6,819	14,320	52,021429
6,526	1,388	0,0	8,580	5,983	31,240	52,542418
6,206	1,349	0,0	9,060	5,201	64,290	53,066934
5,085	2,227	0,0	9,550	4,474	124,600	53,595775
3,750	3,170	0,0	9,960	3,800	227,300	54,130025
2,654	3,558	0,0	10,370	3,182	389,700	54,671180
2,952	2,560	0,0	10,890	2,618	627,100	55,221384
6,135	1,172-	0,0	11,340	2,109	945,300	55,783815
0,978-	3,525	0,0	17,030	0,014	543,400	56,264774
6,547	2,378-	0,0	11,890	1,654	1331,800	56,363399
6,451	3,545-	0,0	12,230	1,255	1746,600	56,968211
6,056	5,416-	0,0	12,620	0,910	2120,100	57,612486
0,436	1,932-	0,0	12,950	0,621	2363,700	58,323877
1,273-	6,768	0,0	14,910	0,083	1442,100	58,446588
2,309	6,561-	0,0	13,530	0,387	2379,900	59,164204
0,776-	6,957	0,0	14,080	0,207	2090,700	59,590983
0,699	6,395-	0,0	14,150	0,207	2103,400	60,306056
2,825-	6,342	0,0	13,390	0,386	2438,000	60,434778
0,584-	1,014	0,0	12,920	0,621	2479,500	61,150562
6,619-	5,014	0,0	12,630	0,910	2275,900	61,800158
6,759-	3,029	0,0	12,170	1,255	1915,400	62,411220
0,844	4,499-	0,0	15,130	0,083	1503,000	62,486253
6,675-	1,856	0,0	11,740	1,654	1490,200	62,997984
6,139-	0,658	0,0	11,340	2,108	1078,000	63,568526
2,895-	3,036-	0,0	10,880	2,617	728,700	64,127775
2,590-	3,968-	0,0	10,380	3,181	461,300	64,678910
3,680-	3,528-	0,0	9,960	3,800	274,000	65,224078
5,002-	2,548-	0,0	9,550	4,473	153,000	65,764779
6,091-	1,660-	0,0	9,060	5,200	80,400	66,302096
6,393-	1,680-	0,0	8,580	5,982	39,800	66,836834
6,475-	1,956-	0,0	8,110	6,818	18,560	67,369601
6,545-	2,216-	0,0	7,640	7,708	8,172	67,900868
6,600-	2,492-	0,0	7,170	8,652	3,397	68,431006
6,650-	2,773-	0,0	6,690	9,650	1,334	68,960312
0,079	0,439-	0,0	16,640	0,010	940,300	118,750334

الجدول 1 (تتمة)

$a_6$	$a_5$	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$f_0$
0,000	0,000	0,0	16,400	0,048	67,400	368,498246
0,000	0,000	0,0	16,400	0,044	637,700	424,763020
0,000	0,000	0,0	16,000	0,049	237,400	487,249273
0,000	0,000	0,0	16,000	0,145	98,100	715,392902
0,000	0,000	0,0	16,200	0,141	572,300	773,839490
0,000	0,000	0,0	14,700	0,145	183,100	834,145546

الجدول 2

## البيانات الطيفية للتوهين ببخار الماء

$b_6$	$b_5$	$b_4$	$b_3$	$b_2$	$b_1$	$f_0$
1,00	5,087	76,	26,38	2,144	1079,	*22,235080
82,	4,930	69,	28,58	8,732	0011,	67,803960
79,	4,780	70,	29,48	8,353	0007,	119,995940
85,	5,022	77,	29,06	668,	2,273	*183,310087
54,	4,398	67,	24,04	6,179	0470,	*321,225630
74,	4,893	64,	28,23	1,541	1,514	*325,152888
61,	4,740	69,	26,93	9,825	0010,	336,227764
89,	5,063	54,	28,11	1,048	11,67	*380,197353
55,	4,810	63,	21,52	7,347	0045,	390,134508
48,	4,230	60,	18,45	5,048	0632,	437,346667
52,	4,483	63,	20,07	3,595	9098,	439,150807
50,	5,083	60,	15,55	5,048	1920,	443,018343
67,	5,028	66,	25,64	1,405	10,41	*448,001085
65,	4,506	66,	21,34	3,597	3254,	470,888999
64,	4,804	65,	23,20	2,379	1,260	474,689092
72,	5,201	69,	25,86	2,852	2529,	488,490108
43,	3,980	61,	16,12	6,731	0372,	503,568532
45,	4,010	61,	16,12	6,731	0124,	504,482692
1,00	4,500	70,	26,00	158,	9785,	547,676440
1,00	4,500	70,	26,00	158,	1840,	552,020960
1,00	4,552	69,	30,86	159,	497,0	*556,935985
68,	4,856	71,	24,38	2,391	5,015	620,700807
50,	4,000	60,	18,00	8,633	0067,	645,766085
1,00	4,140	69,	32,10	7,816	2732,	658,005280
84,	4,352	68,	30,86	396,	243,4	*752,033113

الجدول 2 (تتمة)

$b_6$	$b_5$	$b_4$	$b_3$	$b_2$	$b_1$	$f_0$
45,	5,760	33,	15,90	8,177	0134,	841,051732
84,	4,090	68,	30,60	8,055	1325,	859,965698
90,	4,530	68,	29,85	7,914	0547,	899,303175
95,	5,100	70,	28,65	8,429	0386,	902,611085
53,	4,700	70,	24,08	5,110	1836,	906,205957
,78	5,150	,70	26,73	1,441	8,400	916,171582
,80	5,000	,70	29,00	10,293	,0079	923,112692
,67	4,940	,64	25,50	1,919	9,009	970,315022
,90	4,550	,68	29,85	,257	134,6	987,926764
5,00	24,15	2,00	196,3	,952	17506,	*1 780,000000

ينتج تواصل الجو الجاف من طيف امتصاص الأوكسجين اللاطنان (طيف Debye) تحت 10 GHz، والتوهين المستحث من ضغط الآزوت فوق 100 GHz.

$$(8) \quad N_D''(f) = f p \theta^2 \left[ \frac{6,14 \times 10^{-5}}{d \left[ 1 + \left( \frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1,4 \times 10^{-12} p \theta^{1,5}}{1 + 1,9 \times 10^{-5} f^{1,5}} \right]$$

حيث  $d$  هي معلمة العرض لطيف Debye:

$$(9) \quad d = 5,6 \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8}$$

## 2 التوهين في المسير

### 1.2 مسيرات للأرض

يمكن، في حالة مسير للأرض أو المسيرات المائلة قليلاً قريباً من الأرض، أن يحسب التوهين في المسير،  $A$ ، على النحو التالي:

$$(10) \quad A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB}$$

حيث  $r_0$  هو طول المسير (km).

## 2.2 المسيرات المائية

يقدم هذا القسم طريقة تسمح بتكامل التوهين النوعي المحسوب بجمع خطوط الامتصاص (انظر أعلاه) من أجل قيم مختلفة للضغط والحرارة والرطوبة عبر الجو. وتفيد هذه الطريقة في تحديد التوهين في المسير بدقة من أجل أنظمة الاتصالات التي تتنوع تشكيلاتها الهندسية والموجودة داخل الجو الأرضي أو خارجه وتقوم الطريقة ببساطة على أساس تقسيم الجو إلى طبقات أفقية وتعيين خصائص معالم الأرصاد الجوية الخاصة بالضغط ودرجة الحرارة والرطوبة أثناء المسير. ويمكن عند الافتقار إلى الخصائص المحلية التي تم التوصل إليها مثلاً اعتباراً من معطيات الموجات الراديوية، استعمال الأجواء المرجعية الواردة في التوصية ITU-R P.835 إما من أجل تطبيق عالمي أو تطبيق في مواقع منخفضة الارتفاع (سنوياً) ومتوسطة الارتفاع (صيفاً وشتاءً) وعالية الارتفاع (صيفاً وشتاءً).

ويبين الشكل 3 التوهين باتجاه السميت المحسوب بفواصل يبلغ كل منها 1 GHz بهذه الطريقة من أجل جو مرجعي عالمي ورد في التوصية ITU-R P.835 مع طبقات أفقية تبلغ سماكة كل طبقة منها 1 km والتوهين المعبر عنه هو مجموع التوهينات المصاحبة لكل طبقة في حالة جو رطب (قياسي) وجو جاف (جاف).

ويمكن حساب التوهين الكلي أثناء المسير المائل  $A(h, \varphi)$ ، اعتباراً من محطة ارتفاعها  $h$  وزاوية ارتفاعها  $\varphi$  كالاتي حين  $0 \leq \varphi$ :

$$(11) \quad A(h, \varphi) = \int_h^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH$$

حيث يمكن تحديد قيمة  $\Phi$  كالاتي على أساس قانون Snell بالإحداثيات القطبية:

$$(12) \quad \Phi = \arccos \left( \frac{c}{(r+H) \times n(H)} \right)$$

وحيث:

$$(13) \quad c = (r+h) \times n(h) \times \cos \varphi$$

حيث  $n(h)$  هو دليل الانكسار الراديوي للجو المحسوب باستعمال المعادلتين (1) و(2) من التوصية ITU-R P.453 استناداً إلى الضغط ودرجة الحرارة وضغط بخار الماء عبر المسير (انظر التوصية ITU-R P.835).

وعندما تكون  $0 > \varphi$  يوجد ارتفاع أدنى  $h_{min}$  تصبح عنده الحزمة الراديوية موازية لسطح الأرض. ويمكن تحديد قيمة  $h_{min}$  بحل المعادلة المتسامية التالية:

$$(14) \quad (r+h_{min}) \times n(h_{min}) = c$$

ويمكن بسهولة حل المعادلة وذلك بتكرار الحساب التالي على أن تكون القيمة الأولية هي  $h_{min} = h$ :

$$(15) \quad h'_{min} = \frac{c}{n(h_{min})} - r$$

ويمكن إذاً الحصول على التوهين  $A(h, \varphi)$  كالاتي:

$$(16) \quad A(h, \varphi) = \int_{h_{min}}^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH + \int_{h_{min}}^h \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH$$

وينبغي عند إجراء التكامل للمعادلتين (11) و(16) الانتباه لأن التكامل يساوي لانهاية عند  $\Phi = 0$ . ومع ذلك يمكن استبعاد هذا التمييز بتحويل متغير مناسب كأن يستعمل في المعادلة (11)  $u^4 = H - h$  وفي المعادلة (16)  $u^4 = H - h_{min}$ . وتسمح الخوارزمية أدناه بإيجاد حل رقمي للتوهين الذي يُعزى إلى الغازات الجوية.

ولا بد بغية حساب التوهين الكلي لوصلة ساتلية من معرفة التوهين النوعي في كل نقطة من الوصلة وكذلك لمعرفة طول المسير الذي يتضمن التوهين النوعي. ويجب لتحديد طول المسير مراعاة منحنى الشعاع الذي يعزى إلى كروية الأرض. وإذا اتخذ الشكل 4 كمرجع  $a_n$  هو طول المسير خلال الطبقة  $n$  التي تقابل سماكتها  $\delta_n$  ودليل انكسارها  $n_n$ . أما  $\alpha_n$  و  $\beta_n$  فهما زاويتا الحدوث للدخول والخروج. و  $r_n$  هو نصف القطر من مركز الأرض إلى بداية الطبقة  $n$ . ويمكن التعبير عن  $a_n$  كالتالي:

$$(17) \quad a_n = -r_n \cos \beta_n + \frac{1}{2} \sqrt{4 r_n^2 \cos^2 \beta_n + 8 r_n \delta_n + 4 \delta_n^2}$$

ويمكن حساب الزاوية  $a_n$  باستعمال الصيغة التالية:

$$(18) \quad \alpha_n = \pi - \arccos \left( \frac{-a_n^2 - 2 r_n \delta_n - \delta_n^2}{2 a_n r_n + 2 a_n \delta_n} \right)$$

و  $\beta_1$  هي زاوية الحدوث على مستوى محطة على الأرض (أي تكملة زاوية الارتفاع  $\theta$ ). ويمكن حساب  $\beta_{n+1}$  بدلالة  $\alpha_n$  عن طريق استعمال قانون Snell كالتالي:

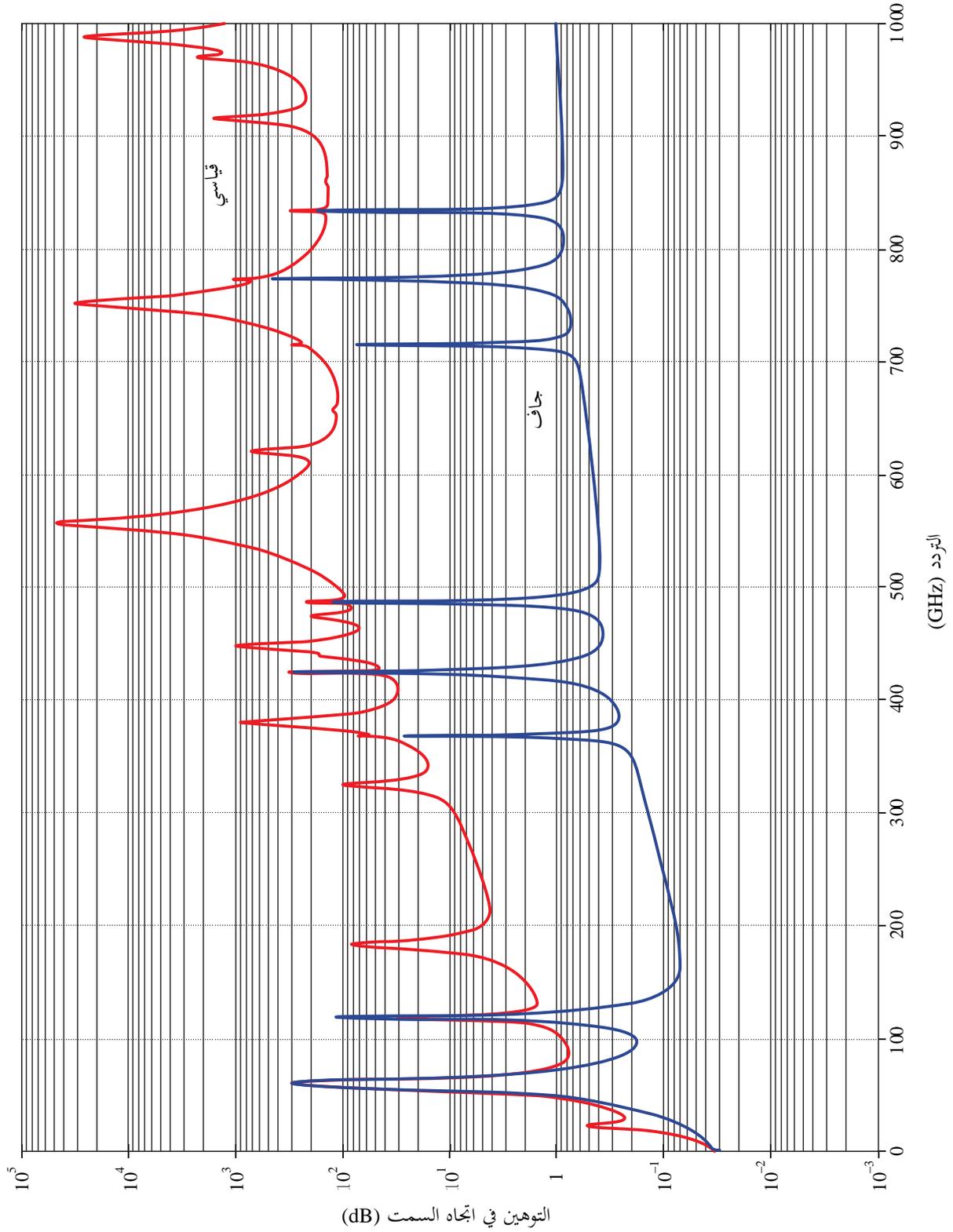
$$(19) \quad \beta_{n+1} = \arcsin \left( \frac{n_n}{n_{n+1}} \sin \alpha_n \right)$$

حيث  $n_n$  و  $n_{n+1}$  هما دليل الانكسار للطبقتين  $n$  و  $n+1$ .

ويمكن للمعادلة (19) أن تفقد صلاحيتها عند زوايا الارتفاع المنخفضة جداً ( $\varphi < 1^\circ$ )، عندما تستخدم كمدخلات بيانات المسبارات الراديوية الموجودة في بعض مناطق العالم المعرضة لظروف تعدد مسارات الانتشار. وفي هذه الحالات، توجد طبقات جوية ذات تغيرات في قيم الانكسارية الراديوية أقل من 157 N/km ومن ثم لا يمكن أن تطبق فيها خوارزمية تتبع الشعاع (المعادلات (17) إلى (19)) القائمة على البصرييات الهندسية. وتصبح دالة قوس الجيب (arcsine) في المعادلة (19) معقدة في ظل هذه الظروف الشاذة حيث تصبح قيمتها عندئذ أكبر قليلاً من الواحد الصحيح (1). وجددير بالذكر أن المعادلة (19) تصلح لكل زوايا الارتفاع عند استخدام طبقات الجو المعيارية المرجعية الواردة في التوصية ITU-R P.835 كمدخل للمعادلة، حيث أن هذه الطبقات النموذجية - لا تتضمن بالقطع تغيرات قوية سالبة من قيم الانكسارية - لا تدعم مثل ظروف الانتشار الشاذة هذه.

الشكل 3

توهين السمات نتيجة للغازات الجوية والمحسوب عند فواصل قيمة كل منها 1 GHz بما فيها مراكز الخط



ويمكن تحديد التوهين الكلي،  $A_{gas}$ ، باستعمال الصيغة التالية:

$$(20) \quad A_{gas} = \sum_{n=1}^k a_n \gamma_n \quad \text{dB}$$

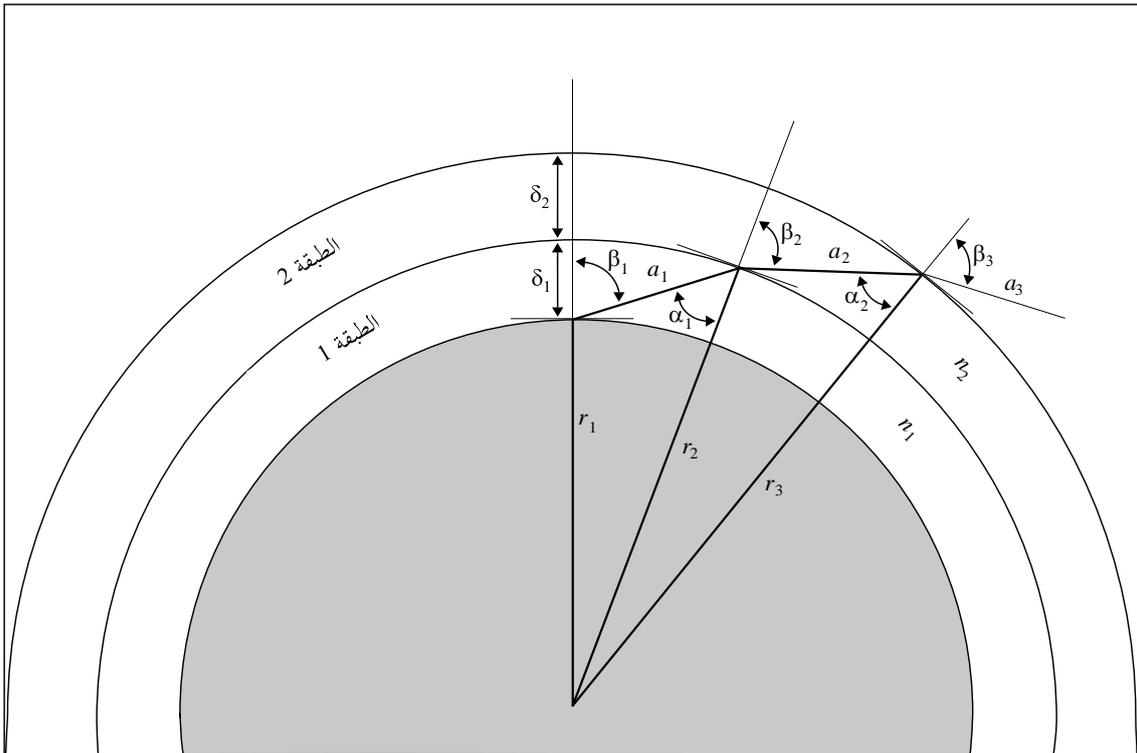
حيث  $\gamma_n$  هي التوهين النوعي المحسوب بواسطة المعادلة (1) للطبقة n. ويجب، بغية ضمان الدقة في تقييم التوهين، زيادة سماكة الطبقات أسياً بدلالة الارتفاع بدءاً من 10 cm كأدنى طبقة (مستوى الأرض) وحتى 1 km عند ارتفاع 100 km باستخدام المعادلة التالية:

$$(21) \quad \delta_i = 0,0001 \exp \left\{ \frac{i - 1}{100} \right\} \quad \text{km}$$

وبالنسبة إلى  $i = 1$  إلى 922، مع العلم بأن  $\delta_{922} \cong 1,0 \text{ km}$  وأن  $\sum_{i=1}^{922} \delta_i \cong 100 \text{ km}$ . وعندما يتعلق الأمر بالتطبيقات الخاصة بالاتجاه "أرض-فضاء"، ينبغي إجراء التكامل حتى 30 km على الأقل وحتى 100 km عند الترددات المركزية لخطوط الأوكسجين.

الشكل 4

مسير عبر الغلاف الجوي



## 3 آثار التشتت

إضافة إلى التوهين المشروح في الفقرة السابقة والقائم على الجزء التحليلي للانكسارية المركبة المعتمدة على التردد، يتولد عن الأوكسجين وبخار الماء أيضاً تشتت يستند إلى الجزء الحقيقي للانكسارية المركبة المعتمدة على التردد. ويوضح هذا التأثير بدلالة الطور مقابل التردد (درجات/كيلومترات)؛ ويمكن حسابه، على غرار التوهين للمسبارات المائلة. وتناقش آثار التشتت في الفصل 6 من كتيب قطاع الاتصالات الراديوية بشأن الأرصاد الجوية الراديوية والذي يتضمن نموذج حساب للتشتت قائم على طريقة التنبؤ بحساب مجموع مساهمات خطوط الامتصاص. ويفترض من الناحية العملية ألا تفضي آثار التشتت تقييدات صارمة على أنظمة الاتصالات للأرض التي تعمل في موجات ملليمترية والتي تصل عرض نطاقاتها بضع مئات MHz على مسافات قصيرة (مثلاً تقل عن حوالي 20 km) وخاصة في نوافذ الانتشار لترددات بعيدة مراكز خطوط الامتصاص الرئيسية. وفيما يخص أنظمة الاتصالات الساتلية ونظراً إلى طول المسيرات عبر الجو، يجب حتماً استعمال ترددات تقع ضمن نوافذ الانتشار حيث يكون التوهين بالغازات الجوية شأنه شأن التشتت المطابق ضعيفاً.

## الملحق 2

### التقييم التقريبي للتوهين بالغازات الجوية في نطاق التردد 1-350 GHz

يتضمن هذا الملحق خوارزميات مبسطة للتقدير التقريبي للتوهين بالغازات الجوية من أجل مدى محصور من ظروف الأرصاد الجوية وتنوع محدود من التشكيلات الهندسية.

## 1 التوهين النوعي

يمكن تقدير التوهين النوعي الذي يعزى إلى الهواء الجاف وبخار الماء اعتباراً من مستوى البحر وحتى ارتفاع 10 km بواسطة خوارزميات مبسطة ترد أدناه وتستند إلى التوهين النوعي للأوكسجين وبخار الماء المنبثق عن الحساب بجمع مساهمات خطوط الامتصاص والارتفاعات الفعلية للأوكسجين وبخار الماء. وتتفق عمليات التقريب بشكل جيد مع الحساب بجمع مساهمات خطوط الامتصاص. بيد أنه بالنسبة للارتفاعات التي تفوق 10 km وفي الحالات التي تتطلب دقة أكبر، ينبغي استعمال طريقة جمع مساهمات خطوط الامتصاص.

ويعطى التوهين النوعي في حالة الهواء الجاف،  $\gamma_o$  (dB/km)، والتوهين النوعي في حالة الهواء الرطب،  $\gamma_w$  (dB/km) بالمعادلتين التاليتين:

$$(22) \quad \gamma_o = 0,1820 f (\sum_{i(Oxygen)} S_i F_i + N_D''(f))$$

$$(23) \quad \gamma_w = 0,1820 f \sum_{i(Water\ vapour)} S_i F_i$$

حيث تعرف  $S_i$  و  $F_i$  و  $N_D''(f)$  للأوكسجين في المعادلات (3) و (5) و (6a) و (7) و (8) و (9) و  $S_i$  و  $F_i$  لبخار الماء في المعادلات (3) و (4) و (5) و (6a) و (7). ولا تدرج المعادلة (6b) لعدم وجود حاجة إلى مراعاة تقسيم زمني لخطوط الأوكسجين والتوسيع الدوبلري لخطوط بخار الماء على الارتفاعات دون 10 km. ويتم جمع الأوكسجين فوق جميع خطوط الأوكسجين الواردة في الجدول 1 ولبخار الماء فوق المجموعة الفرعية لخطوط بخار الماء الموسومة برمز النجمة في الجدول 2.

و  $T$  و  $p$  هما الضغط الجاف ودرجة الحرارة عند سطح الأرض وفي حالة عدم وجود بيانات محلية، يمكن استخدام المتوسط السنوي للظروف الجوية المرجعية العالمية الواردة في التوصية ITU-R P.835 لتحديد الضغط الجاف ودرجة الحرارة على ارتفاع سطح الأرض. ويعرض الشكل 5 التوهين النوعي للهواء الجاف (الجاف) ولبخار الماء بكثافة  $7,5 \text{ g/m}^3$  فقط (بخار الماء) والتوهين النوعي الكلي (الكلي) على ترددات من 1 إلى 350 GHz عند مستوى سطح البحر بالنسبة للمتوسط السنوي للأجواء المرجعية العالمية الواردة في التوصية ITU-R P.835.

## 2 التوهين في المسير

### 1.2 المسيرات للأرض

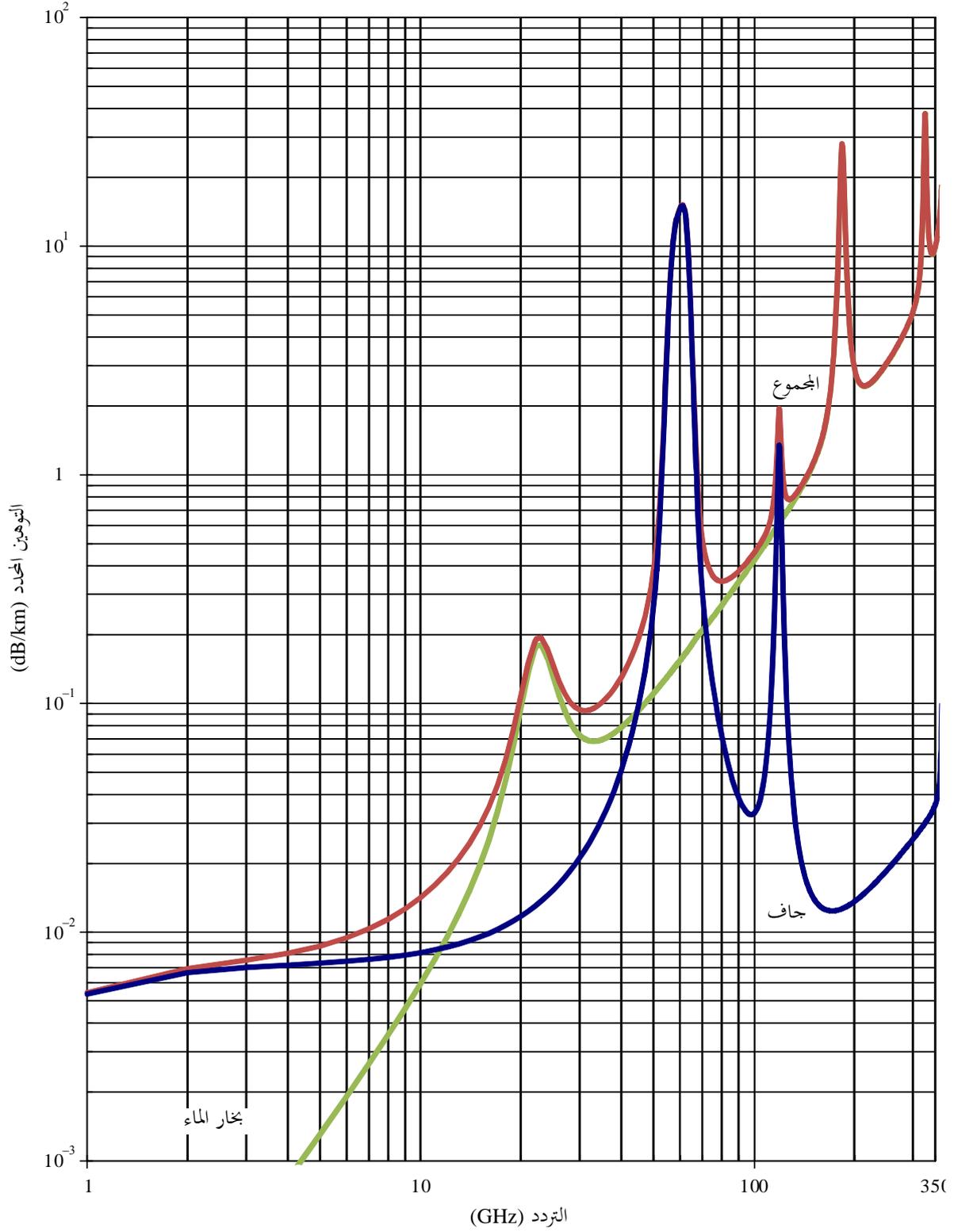
يمكن، في حالة المسير الأفقي، أو المسيرات المائلة قليلاً قريباً من الأرض، أن يحسب التوهين في المسير على النحو التالي:

$$(24) \quad A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB}$$

حيث  $r_0$  هو طول المسير بالكيلومتر (km).

## الشكل 5

التوهين النوعي نتيجة للغازات الجوية

(الضغط = 1 013,25 hPa؛ درجة الحرارة = 15 °مئوية؛ كثافة بخار الماء = 7,5 g/m<sup>3</sup>)

## 2.2 المسيرات المائية

تتضمن هذه الفقرة خوارزميات أقل تعقيداً لحساب التوهين بالغازات الجوية على طول مسيرات مائلة عبر جو الأرض. وهي تستند إلى تحديد ارتفاع مكافئ يمكن به مضاعفة التوهين النوعي المحسوب في الفقرة 1 وذلك للحصول على التوهين على المسير في اتجاه السم. وتعلق الارتفاعات المكافئة بالضغط ويمكن بالتالي استعمالها في تحديد التوهين باتجاه السم اعتباراً من مستوى البحر وحتى ارتفاع 10 km تقريباً. وتبلغ دقة نتائج توهينات السم  $\pm 10\%$  بالنسبة إلى الجو الجاف و  $\pm 5\%$  بالنسبة إلى بخار الماء اعتباراً من مستوى البحر وحتى ارتفاعات تتقارب 10 km وذلك استناداً إلى معطيات الضغط ودرجة الحرارة وكثافة بخار الماء المناسبة للارتفاع المعني. أما فيما يخص الارتفاعات التي تزيد عن 10 km وخاصة بالنسبة إلى الترددات الواقعة ضمن الترددات القريبة من الترددات المركزية لخطوط الطنين بأقل من 0,5 GHz ومهما كان الارتفاع، فيستحسن تطبيق إجراء الملحق 1. وجدير بالإشارة أن الدالة الغوسية في المعادلة (25b) التي تصف الارتفاع المكافئ للأوكسجين في نطاق التردد 60 GHz قد تؤدي إلى معدل أخطاء يفوق 10% عند بعض الترددات، لأن هذا الإجراء ليس المقصود منه على وجه الدقة استنساخ البنية المبينة في الشكل 7. وتشق المعادلات الواردة أدناه من توهينات السم المحسوبة استناداً إلى إجراء الملحق 1 الذي يحسب بالأرقام تكامل التوهينات في عروض النطاق فوق 500 MHz؛ وتمثل التوهينات الناتجة عملياً أدنى قيم تقريبية في النطاق 50-70 GHz. وفيما يخص الاتجاهات الأخرى غير اتجاه السم يمكن تحديد التوهين على المسير باستعمال الإجراءات الموصوفة لاحقاً في هذه الفقرة.

تعطي العبارتان التاليتان الارتفاع المكافئ للهواء الجاف:

$$(25a) \quad h_o = \frac{6,1}{1 + 0,17 r_p^{-1,1}} (1 + t_1 + t_2 + t_3)$$

حيث:

$$(25b) \quad t_1 = \frac{4,64}{1 + 0,066 r_p^{-2,3}} \exp \left[ - \left( \frac{f - 59,7}{2,87 + 12,4 \exp(-7,9 r_p)} \right)^2 \right]$$

$$(25c) \quad t_2 = \frac{0,14 \exp(2,12 r_p)}{(f - 118,75)^2 + 0,031 \exp(2,2 r_p)}$$

$$(25d) \quad t_3 = \frac{0,0114}{1 + 0,14 r_p^{-2,6}} f \frac{-0,0247 + 0,0001f + 1,61 \times 10^{-6} f^2}{1 - 0,0169f + 4,1 \times 10^{-5} f^2 + 3,2 \times 10^{-7} f^3}$$

مع العلم بأن:

$$(25e) \quad h_o \leq 10,7 r_p^{0,3} \quad \text{when } f < 70 \text{ GHz}$$

ويكون الارتفاع المكافئ لبخار الماء:

$$(26a) \quad h_w = 1,66 \left( 1 + \frac{1,39 \sigma_w}{(f - 22,235)^2 + 2,56 \sigma_w} + \frac{3,37 \sigma_w}{(f - 183,31)^2 + 4,69 \sigma_w} + \frac{1,58 \sigma_w}{(f - 325,1)^2 + 2,89 \sigma_w} \right)$$

for  $f \leq 350$  GHz

$$(26b) \quad \sigma_w = \frac{1,013}{1 + \exp[-8,6 (r_p - 0,57)]}$$

حيث:

$$(p + e)/1013,25 = r_p$$

وحساب التوهين في اتجاه السميت بين الترددات 50 و 70 GHz دالة معقدة للتردد كما هو مبين في الشكل 7. ولا تتيح عموماً الخوارزميات الواردة أعلاه إلا حساباً تقريبياً للسويات الدنيا للتوهين المحتمل وجوده في هذا المدى من الترددات. ويستحسن استعمال إجراء الملحق 1 للحصول على مزيد من الدقة.

ويستند مفهوم الارتفاع المكافئ إلى افتراض جو أسي يحدده سلم للارتفاع المكافئ هدفه وصف تناقص الكثافة وفقاً للارتفاع. وتجدر الإشارة إلى أن سلا لم الارتفاع للهواء الجاف ولبخار الماء قد تتغير مع خط العرض والفصل و/أو المناخ، وأن توزيعات بخار الماء في الجو الفعلي قد تنحرف عن التوزيع الأسي، وتكون التغيرات مقابلة للارتفاعات المكافئة. وتطبق القيم المشار إليها أعلاه حتى ارتفاع 10 km.

ويكون عندها التوهين الكلي باتجاه السميت:

$$(27) \quad A = \gamma_o h_o + \gamma_w h_w \quad \text{dB}$$

ويبين الشكل 6 التوهين الكلي باتجاه السميت عند مستوى البحر (الكلي)، إضافة إلى التوهين الناجم عن الهواء الجاف (الجاف) وعن بخار الماء (بخار الماء) وذلك استناداً إلى المتوسط السنوي العام المرجعي للجو والوارد في التوصية ITU-R P.835. ويمكن الحصول على دقة أكبر بين 50 و 70 GHz من خلال المنحني 0 km في الشكل 7. وقد استعملت للحصول على هذه الدقة طريقة جمع مساهمات خطوط الامتصاص الموصوفة في الملحق 1.

## 1.2.2 زوايا الارتفاع بين 5 و 90°

### 1.1.2.2 المسيرات أرض-فضاء

يمكن الحصول فيما يخص زوايا الارتفاع  $\varphi$  التي تتراوح ما بين 5° و 90° على التوهين على المسير باستعمال قانون قاطع التمام: بالنسبة لتوهين المسير استناداً إلى بيانات الأرصاد الجوية السطحية:

$$(28) \quad A = \frac{A_o + A_w}{\sin \varphi} \quad \text{dB}$$

$$\text{حيث: } A_o = h_o \gamma_o \quad \text{و} \quad A_w = h_w \gamma_w$$

وفيما يخص التوهين على المسير القائم على كثافة بخار الماء المتكاملة:

$$(29) \quad A = \frac{A_o + A_w}{\sin \varphi} \quad \text{dB}$$

حيث تعطى  $A_w$  في الفقرة 3.2.

### 2.1.2.2 المسيرات المائلة

من أجل تحديد قيم التوهين على مسير مائل بين محطة تقع عند ارتفاع  $h_1$  ومحطة أخرى تقع عند ارتفاع أعلى  $h_2$ ، وعندما يقل كلا الارتفاعين عن 10 km عن مستوى البحر يجب أن يستعاض عن قيمتي  $h_o$  و  $h_w$  في المعادلة (28) بالقيمتين  $h'_o$  و  $h'_w$  التاليتين:

$$(30) \quad h'_o = h_o \left[ e^{-h_1/h_o} - e^{-h_2/h_o} \right] \quad \text{km}$$

$$(31) \quad h'_w = h_w \left[ e^{-h_1/h_w} - e^{-h_2/h_w} \right] \quad \text{km}$$

مع التأكيد على أن القيمة  $\rho$  لكثافة بخار الماء المستعملة في المعادلة (23) هي القيمة الافتراضية على مستوى البحر المحسوبة كالآتي:

$$(32) \quad \rho = \rho_1 \times \exp(h_1/2)$$

وحيث  $\rho_1$  هي القيمة المقابلة للارتفاع  $h_1$  للمحطة الفضائية، وحيث يفترض أن الارتفاع المكافئ لبخار الماء هو 2 km (انظر التوصية ITU-R P.835).

تستعمل المعادلات (30) و(31) و(32) تقييسات مختلفة للارتفاع المكافئ للجو الجاف ولبخار الماء. غير أنه يمكن اعتبار متوسط ضغط الجو بالنسبة إلى مستوى البحر ثابتاً في العالم بأكمله (أي أنه 1013,25 hPa) ولا تتمتع كثافة بخار الماء بمدى واسع من التغييرات المناخية وحسب بل هي مقيسة على الأرض (أي ارتفاع المحطة على الأرض). وفيما يخص قيم كثافة بخار الماء المقيسة على مستوى الأرض يرجع إلى التوصية ITU-R P.836.

## 2.2.2 زوايا الارتفاع بين 0 و 5°

### 1.2.2.2 المسيرات أرض-فضاء

يجب، في هذه الحالة، استعمال الملحق 1. كما ينبغي استعمال الملحق 1 بشأن الارتفاعات ما دون الصفر.

### 2.2.2.2 المسيرات المائلة

يمكن تحديد قيم التوهين على مسير مائل بين محطة تقع عند ارتفاع  $h_1$  ومحطة أخرى تقع عند ارتفاع أعلى  $h_2$  (عندما يقل كلا الارتفاعين عند 10 km عن مستوى البحر) باستعمال المعادلة التالية:

$$(33) \quad A = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[ \frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x_1) e^{-h_1/h_o}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x_2) e^{-h_2/h_o}}{\cos \varphi_2} \right] + \gamma_w \sqrt{h_w} \left[ \frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x'_1) e^{-h_1/h_w}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x'_2) e^{-h_2/h_w}}{\cos \varphi_2} \right] \quad \text{dB}$$

حيث:

$R_e$ : نصف قطر الأرض الفعال بما في ذلك الانكسار، كما هو محدد في التوصية ITU-R P.834، معبراً عنه بالكيلومترات (قيمة من 8 500 km تعتبر عادة مقبولة في الجوار المباشر لسطح الأرض)

$\varphi_1$ : زاوية الارتفاع عند الارتفاع  $h_1$

F: دالة تعرف بالصيغة التالية:

$$(34) \quad F(x) = \frac{1}{0,661x + 0,339\sqrt{x^2 + 5,51}}$$

$$(35a) \quad \varphi_2 = \arccos \left( \frac{R_e + h_1}{R_e + h_2} \cos \varphi_1 \right)$$

$$(35b) \quad x_i = \tan \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_o}} \quad \text{for } i = 1, 2$$

$$(35c) \quad x'_i = \tan \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_w}} \quad \text{for } i = 1, 2$$

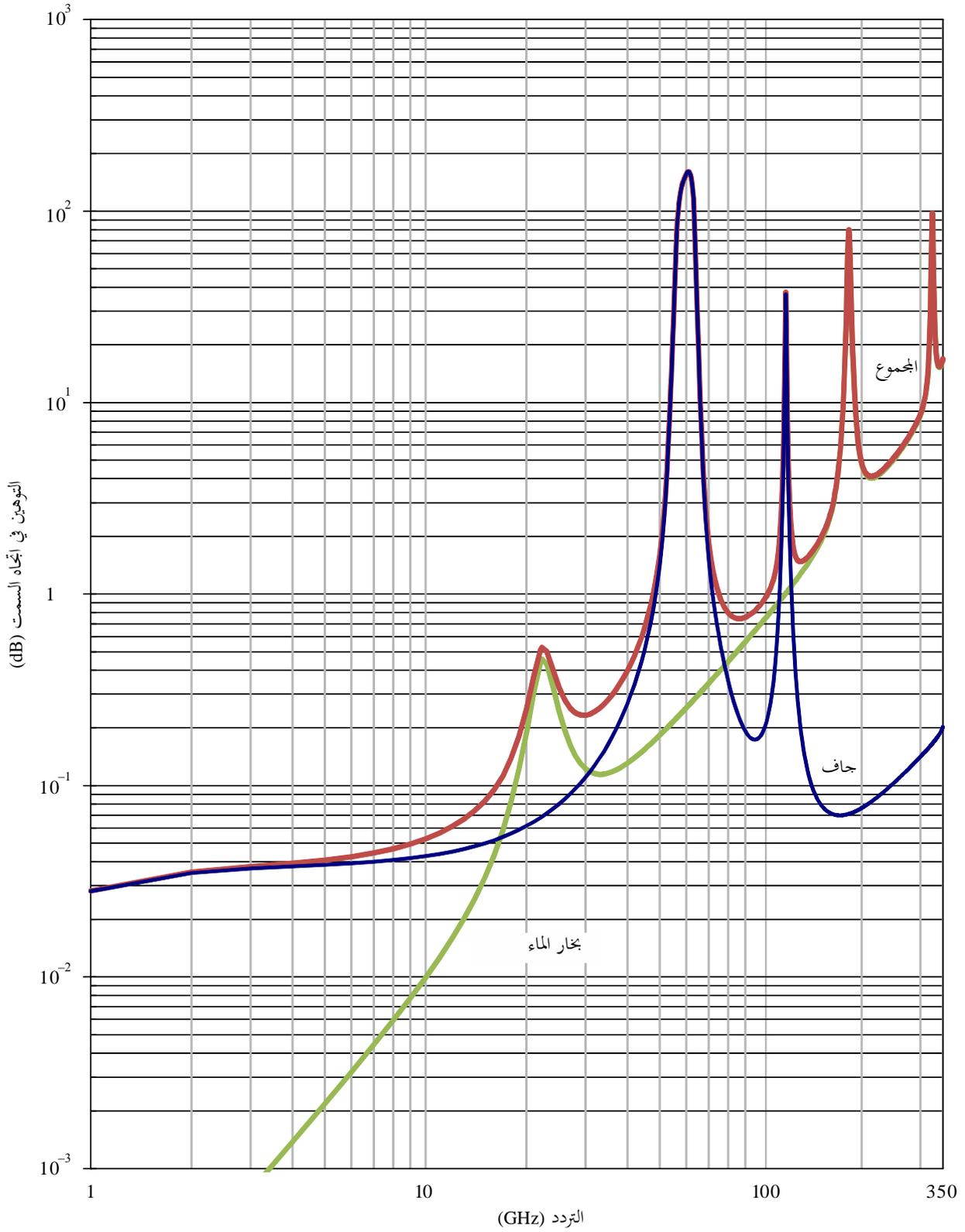
علماً بأن القيمة  $\rho$  لكثافة بخار الماء المستعملة في المعادلة (23) هي القيمة الافتراضية على مستوى البحر المحسوبة كالاتي:

$$(36) \quad \rho = \rho_1 \cdot \exp(h_1 / 2)$$

حيث  $\rho_1$  هي القيمة المقابلة للارتفاع  $h_1$  للمحطة المعنية، ويُفترض أن الارتفاع المكافئ لكثافة بخار الماء هو 2 km (انظر التوصية ITU-R P.835).

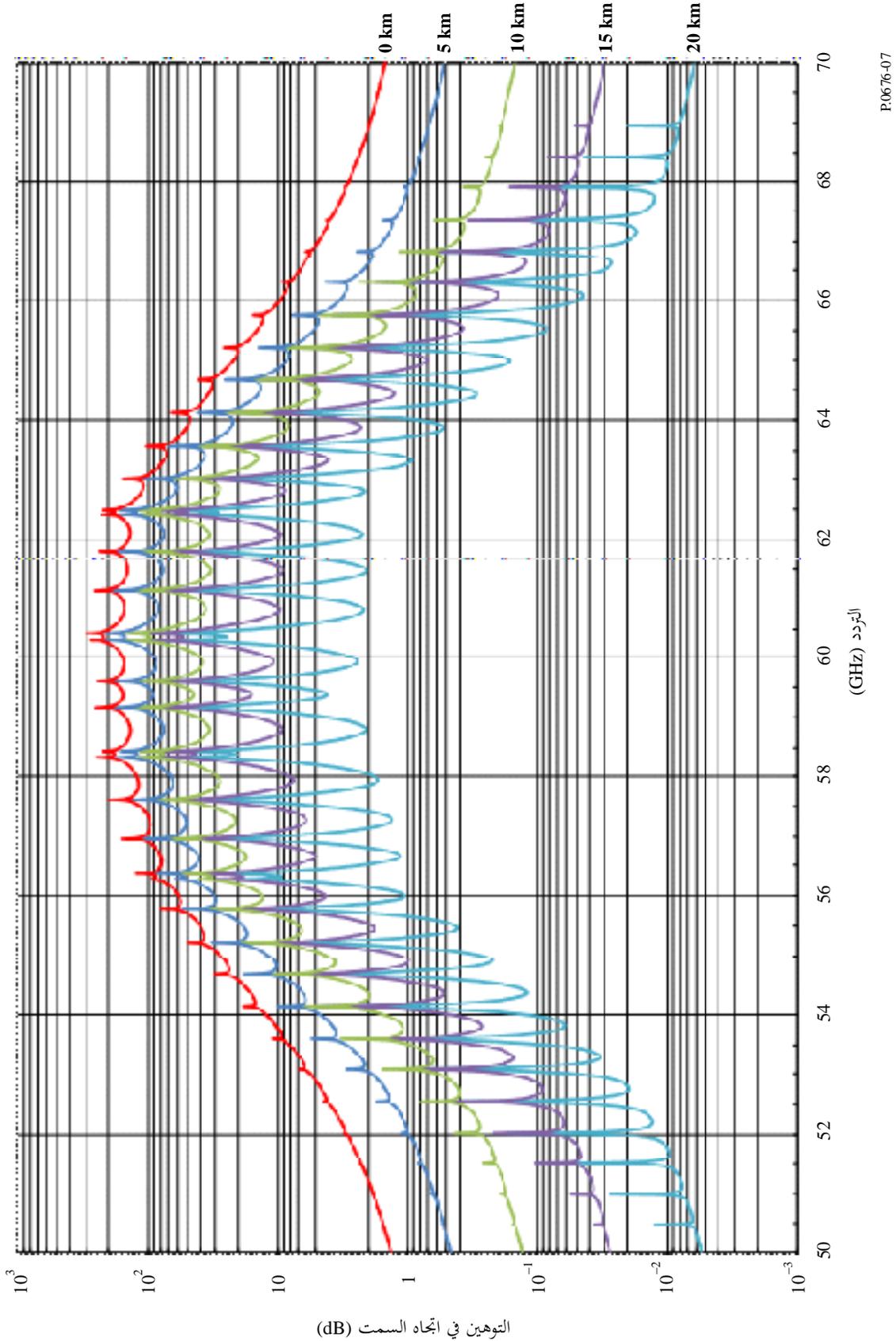
الشكل 6

التوهين الكلي الناجم عن الهواء الجاف وبخار الماء على مستوى البحر في اتجاه السمات  
 (الضغط = 1 013,25 hPa؛ درجة الحرارة = 15 °مئوية؛ كثافة بخار الماء = 7,5 g/m<sup>3</sup>)



الشكل 7

توهين الأوكسجين باتجاه السميت في الارتفاعات المشار إليها والمحسوبة عند فواصل تبلغ 10 MHz بما فيها مراكز الخطوط (0 km و 5 km و 10 km و 15 km و 20 km)



ويمكن الرجوع إلى التوصية ITU-R P.836 من أجل قيم  $\rho_1$  المقيسة على مستوى الأرض. وقد تم شرح فروق صيغة الهواء الجاف وبخار الماء في الفقرة 2.2.2.2.

### 3.2 التوهين ببخار الماء على المسيرات في اتجاه السمات

تستند الطريقة أعلاه لحساب التوهين ببخار الماء على المسيرات المائلة إلى معرفة كثافة بخار الماء على السطح. وإذا عرف المكون المتكامل لبخار الماء،  $V_t$ ، يمكن عندئذٍ تقدير التوهين الكلي ببخار الماء على النحو التالي:

$$(37) \quad A_w = \begin{cases} \frac{0,0176 V_t \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}, & 1 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ \frac{0,0176 V_t \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})} (ah^b + 1), & 20 \text{ GHz} < f \leq 350 \text{ GHz} \end{cases} \text{ dB}$$

حيث:

$$a = 0,2048 \exp \left[ - \left( \frac{f - 22,43}{3,097} \right)^2 \right] + 0,2326 \exp \left[ - \left( \frac{f - 183,5}{4,096} \right)^2 \right] \\ + 0,2073 \exp \left[ - \left( \frac{f - 325}{3,651} \right)^2 \right] - 0,113 \\ b = 8,741 \times 10^4 \exp(-0,587f) + 312,2f^{-2,38} + 0,723$$

$$h = \begin{cases} h_s & h_s \leq 4 \text{ km} \\ 4 & h_s > 4 \text{ km} \end{cases}$$

وحيث

$$f : \text{التردد (GHz)}$$

$$f_{ref} : 20,6 \text{ (GHz)}$$

$$p_{ref} = 815 \text{ (hPa)}$$

$$\frac{V_t}{3,67} \text{ (g/m}^3\text{)} = \rho_{v,ref}$$

$$14 \ln \left( \frac{0,22 V_t}{3,67} \right) + 3 \text{ (}^\circ\text{C)} = t_{ref}$$

$V_t$ : المكون المتكامل لبخار الماء من: أ) بيانات محلية لمسابير راديوية أو أجهزة قياس راديوية أو ب) عند النسبة المئوية للوقت المطلوب ( $\text{kg/m}^2$  أو  $\text{mm}$ ) المتحصل عليها من الخرائط الرقمية الواردة في التوصية ITU-R P.836 ( $\text{kg/m}^2$  أو  $\text{mm}$ )

$\gamma_w(f, p, \rho, t)$ : التوهين النوعي كدالة للتردد والضغط وكثافة بخار الماء ودرجة الحرارة يتم حسابه استناداً إلى المعادلة (23) (dB/km)

$h_s$ : ارتفاع المحطة فوق متوسط مستوى سطح البحر (a.m.s.l.) (km).